

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์tridge  
ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปริญญานิพนธ์  
ของ  
ชาญชัย บุญชู

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา  
พฤษภาคม 2545  
ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์  
ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ  
ของ  
ชาญชัย บุญชู

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา  
พฤษภาคม 2545

๒ 149592

ชาญชัย บุญชู(2545) การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม.(อุตสาหกรรมศึกษา).  
กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม :  
ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร,อาจารย์โอภาส สุขหวาน.

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการนำเครื่องจักรมาช่วยลดอันตรายและทดแทนการทำงานของพนักงานและช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์สามารถทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นมีคุณภาพสม่ำเสมอ โดยใช้วิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออก แบบการไหลย้อนของก๊าซเฉพาะแห่งและฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ (Pulse Jet) โดยใช้หัวฉีดเป่าลมที่มีปริมาณมากกว่าถึงสี่ารองออกมาแบบเป็นจังหวะๆ ในทิศทางจากด้านในออกสู่ด้านนอกของไส้กรอง ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างชุดถังไซโคลนใช้กักเก็บและป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่น ชุดหัวจับไส้กรองออกแบบให้จับยึดไส้กรองสามารถหมุนรอบตัวเองได้โดยการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ควบคุมระบบการทำงานด้วย พีแอลซี เพื่อนำไปใช้ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์กรองฝุ่นของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำไส้กรองฝุ่นมาทำความสะอาด แล้ววัดความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรอง นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของลมต่อหน้าที่ ตั้งสมมุติฐานการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ได้มากกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์ และผลการทดลองเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีรายละเอียดดังนี้

1. การทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานใน 1-24 สัปดาห์ ที่ทำการทดลองทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์มีค่าสะอาดอยู่ในช่วงร้อยละ 98.263 – 82.137 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ร้อยละ 80

2. การประเมินของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ที่ทำการประเมินในภาพรวมของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น ทั้ง 5 ด้าน คือ ลักษณะทางด้านวิศวกรรม ลักษณะทางด้านความปลอดภัย ลักษณะทางด้านกายภาพ ลักษณะทางการใช้งาน และลักษณะทางด้านบำรุงรักษา ในภาพรวมอยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.2

DESIGN AND CONSTRUCTION THE CARTRIDGE DUST FILTER CLEANER  
FOR ELECTRONIC INDUSTRIAL MACHINE.

AN ABSTRACT  
BY  
CHARNCHAI BOONCHOO

Presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of  
Education degree In Industrial Education  
at Srinakharinwirot University  
May 2002

Charnchai Boonchoo (2002). ***Design and Construction the Cartridge dust filter cleaner for Electronic industrial machine.*** Master thesis, M.Ed. (Industrial Education) Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Dr Pairust Vongyuttakrai, Mr. Opas Sukwan.

This research was conducted to serve as basic for Design and Construction of the Cartridge dust filter cleaner for Electronic industrial machine instated of using manual labour. The Cartridge dust filter cleaner machine user mass air pressure flow reverse to the nozzle by quick exhaust valve (pulse jet) from inside of the Cartridge dust filter, A spindle chuck was installed at the top machine and was designed to hold the Cartridge dust filter to rotate itself building the centrifugal force drive by using a motor. The Multi-Cyclone was designed to control dust particle dispersal. Program logic Control was used as the Cartridge dust filter cleaner sequence controller. The efficiency of Cartridge dust filter cleaner machine was measured by cleaning the Cartridge dust filter once a week for a 24 weeks lifetime and by the flow rate. An effectiveness target was set at more than 80% of new Cartridge dust filter flow rate. The results are as follow;

1. The Cartridge dust filter flow rate form 1<sup>st</sup> to 24<sup>th</sup> week lifetime is 98.3 % to 82.1% of the new Cartridge dust filter flow rate met the target.

2. Design and Construction of the Cartridge dust filter cleaner for Electronic industrial machine uses 5 main criteria : Engineering, Safety, Physical, Performance and Maintenance. The overall performance in the 5 main criteria was good

ปริญญานิพนธ์

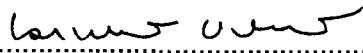
เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์  
ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ของ

นายชาญชัย บุญชู

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)

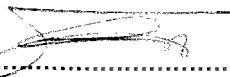
วันที่ 5 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2545

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์



..... ประธาน

(อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)



..... กรรมการ

(อาจารย์โอภาส สุขหวาน)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ ดร. อภิวิทย์ สุคันธกุล)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์วิโรจน์ เอ็งสุโสภณ)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยความเมตตาให้คำแนะนำแก้ไขดูแลและทำให้กำลังใจอย่างดียิ่ง จาก อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ขอขอบพระคุณที่สละเวลาเป็นประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ พร้อมทั้งคำแนะนำแก้ไขดูแลให้กำลังใจและให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์โอภาส สุขหวาน ที่สละเวลาเป็นกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ พร้อมทั้งคำแนะนำแก้ไขดูแลให้กำลังใจและให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ดร.อุพิทย สุวคันทกุล อาจารย์ดร.ละเอียต รักษ์เผ่า อาจารย์ยวีโรจน์ เอ็งสุโสภณ และอาจารย์สุดใจ เห่งสีไพร ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบให้ข้อเสนอแนะต่างๆ และให้แนวคิดรวมไปถึงกำลังใจในการดำเนินงานเพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ ผศ.ดร.ไพโรจน์ เบาลือ เป็นผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบประเมินในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ ให้แนวคิดรวมไปถึงการดำเนินงาน เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ชนรัตน์ แต้ววัฒนา อาจารย์มณฑล แสงประไพทิพย์ คุณสุธี คำเพ็ญ คุณวิชัย วัชรินทร์ คุณบุญเลิศ ประสิทธิ์สุภโรจน์ เป็นผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ และให้แนวคิดในการดำเนินงานเพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์กองกิจการนิสิตทุกท่าน ที่ได้พิจารณาอบเงินทุนศาสตราจารย์ ดร.สาโรจน์ บัวศรี (ทุนอุดหนุนการวิจัย) เพื่อทำการวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ พนักงานฝ่ายซ่อมบำรุง บริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนด้านข้อมูล ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย

อนึ่ง ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนและทำให้กำลังใจเป็นอย่างยิ่ง จากคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณนิยม สังขวิเชียร พ.อ.อ ประสงค์ สิบชาติ นิสิตรุ่นพี่ เพื่อนร่วมรุ่นรุ่นน้อง ปริญญาโทหลักสูตรวิชาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจ และบุคคลอื่นที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดที่มีส่วนช่วยเหลือและสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา ครู – อาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักสูงสุดให้ทั้งความรู้กำลังใจ และผู้ที่จะมีได้คือ คุณพงษ์ศักดิ์ ไตรยปั๊กษ์และครอบครัว คุณไพศาล ไตรยปั๊กษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลงได้ อันพระคุณนี้หาที่เปรียบมิได้

ชาญชัย บุญชู

## สารบัญ

| บทที่                                                   | หน้า |
|---------------------------------------------------------|------|
| 1. บทนำ.....                                            | 1    |
| ภูมิหลัง.....                                           | 1    |
| ความมุ่งหมายของการวิจัย.....                            | 3    |
| ความสำคัญของการวิจัย.....                               | 3    |
| ขอบเขตของการวิจัย.....                                  | 3    |
| นิยามศัพท์เฉพาะ.....                                    | 4    |
| กรอบแนวคิดในการวิจัย.....                               | 5    |
| สมมติฐานในการวิจัย.....                                 | 5    |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                  | 6    |
| การวางแผนผังกระบวนการผลิตของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....  | 6    |
| หลักเกณฑ์สำหรับการวางแผนผังกระบวนการผลิต .....          | 6    |
| รูปแบบและขั้นตอนของกระบวนการประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ |      |
| (แผงวงจรรวม IC)ของการวางแผนผังกระบวนการผลิต.....        | 9    |
| การควบคุมคุณภาพตามเอกสารและการเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่น..... | 11   |
| การควบคุมคุณภาพตามเอกสาร .....                          | 11   |
| การควบคุมและการเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่น .....               | 20   |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบกรอง .....                      | 46   |
| การออกแบบและการสร้าง .....                              | 75   |
| ปรัชญาการออกแบบ .....                                   | 76   |
| พื้นฐานของผู้ออกแบบเครื่องกล .....                      | 76   |
| ขั้นตอนของการออกแบบ .....                               | 77   |
| ระบบหน่วย .....                                         | 79   |
| คุณสมบัติทางกลของวัสดุ.....                             | 81   |
| ค่าความปลอดภัย .....                                    | 82   |
| การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย .....                | 84   |
| เสา .....                                               | 87   |
| คาน .....                                               | 90   |
| ภาระความดันผนัง .....                                   | 91   |
| การจับยึดชิ้นงาน .....                                  | 92   |
| การยึดด้วยสลักเกลียว .....                              | 92   |
| การออกแบบเพลลา .....                                    | 99   |
| มอเตอร์ไฟฟ้า .....                                      | 104  |

## สารบัญ(ต่อ)

| บทที่                                                                                             | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2 (ต่อ)    การทำงานของ PROGRAM LOGIC CONTROL.....                                                 | 106  |
| คุณสมบัติของไหล.....                                                                              | 114  |
| การวัดประสิทธิภาพของไส้กรอง.....                                                                  | 120  |
| อัตราไหลและความเร็วเฉลี่ย.....                                                                    | 120  |
| อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบกีดขวางการไหล(Obstruction Flow Sensor)...                                  | 128  |
| เครื่องมือวัดการไหลแบบเทอร์ไบน์แบบวอร์เทกซ์และระบบ Swirlmeter.....                                | 129  |
| เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                               | 135  |
| 3.    วิธีดำเนินการวิจัย.....                                                                     | 139  |
| การออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย.....                                                           | 139  |
| เกณฑ์ข้อกำหนดของการสร้างเครื่องในการวิจัย.....                                                    | 139  |
| ลำดับขั้นตอนในการวิจัย.....                                                                       | 141  |
| 4.    ผลการทดลอง.....                                                                             | 146  |
| ผลการทดสอบใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                                      | 146  |
| 5.    สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....                                                         | 152  |
| สรุปผล.....                                                                                       | 153  |
| อภิปรายผล.....                                                                                    | 154  |
| ข้อเสนอแนะ.....                                                                                   | 156  |
| บรรณานุกรม.....                                                                                   | 157  |
| ภาคผนวก.....                                                                                      | 160  |
| ภาพผนวก ก ภาพเขียนแบบที่ใช้ในการสร้างเครื่อง.....                                                 | 161  |
| ภาพผนวก ข รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่อง.....                                        | 184  |
| ภาพผนวก ค หนังสือขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย.....                                                  | 188  |
| ภาพผนวก ง แบบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                        | 197  |
| ภาพผนวก จ ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพและประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์..... | 202  |
| ภาพผนวก ฉ คู่มือการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                             | 216  |
| ประวัติย่อผู้วิจัย.....                                                                           | 224  |

## บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ                                                                                                          | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....                                                                                        | 4    |
| 2 แผนผังกระบวนการผลิตตามผลิตภัณฑ์.....                                                                             | 6    |
| 3 กระบวนการประกอบแผงวงจรรวม(IC).....                                                                               | 10   |
| 4 คุณสมบัติของอนุภาคชนิดต่างๆ .....                                                                                | 14   |
| 5 เส้นโค้งสมมุติฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บกับเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>ของอนุภาค.....                  | 16   |
| 6 (1) การกระจายขนาดของอนุภาค.....                                                                                  | 16   |
| 6 (2) การกระจายขนาดของอนุภาคแบบเชมิล็อก.....                                                                       | 17   |
| 7 การกระจายขนาดของอนุภาคแบบบล็อก-พรอบเอบิลิตี้.....                                                                | 17   |
| 8 ความเร็วปั่นป่วนของการตกตัวของอนุภาคทรงกลมโดยแรงโน้มถ่วง<br>(ภายในน้ำ และภายในอากาศ อุณหภูมิและความดันปกติ)..... | 26   |
| 9 การตกตัวของอนุภาคด้วยแรงโน้มถ่วงจากกระแสก๊าซที่ไหลแบบชั้นๆ<br>ระหว่างผนังขนาดในแนวระดับ.....                     | 27   |
| 10 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพย่อยกับขนาดอนุภาค<br>สำหรับห้องตกตะกอนแบบผนังขนาดด้วยแรงโน้มถ่วง.....   | 28   |
| 11 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง.....                                                                        | 28   |
| 12 กลไกการแยกอนุภาคโดยการชนและการเปลี่ยนทิศทางไหลของก๊าซ.....                                                      | 29   |
| 13 ตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลกระทบ.....                                                   | 29   |
| 14 ตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลวก.....                                                      | 30   |
| 15 วิธีต่างๆ สำหรับจัดวางทางเข้าของก๊าซและช่องปล่อยอนุภาคฝุ่นออก.....                                              | 32   |
| 16 ลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow)<br>ภายในไซโคลนธรรมดา.....                         | 32   |
| 17 ตัวอย่างการกระจายของความดันและของความเร็วของการหมุน<br>ภายในไซโคลนธรรมดา.....                                   | 33   |
| 18 ตัวอย่างผลความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพ<br>การเก็บอนุภาคของไซโคลน .....                           | 35   |
| 19 สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส (ญี่ปุ่น).....                                                     | 36   |
| 20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัดของอนุภาค $D_{pc}$ กับเส้นผ่านศูนย์กลาง $D$<br>ของไซโคลนมาตรฐาน (ญี่ปุ่น).....        | 36   |
| 21 ตัวอย่างของประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนเดี่ยว.....                                                                  | 37   |
| 22 ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน.....                                                                                   | 38   |
| 23 มัลติ-ไซโคลน (แบบไหลเข้าในแนวแกนและไหลย้อนออก).....                                                             | 39   |
| 24 มัลติ-ไซโคลน (แบบไหลเข้าในแนวแกนและไหลย้อนออก).....                                                             | 39   |
| 25 เครื่องแยกอนุภาคฝุ่นแบบกระแสหมุน (Rotary Stream).....                                                           | 40   |

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                                                     | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 26 เจ็ตโคลน (Jetclone).....                                                                                                   | 41   |
| 27 ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของเจ็ตโคลน.....                                                                 | 42   |
| 28 ตัวอย่างการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องเก็บฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลางชนิดต่างๆ                                             | 42   |
| 29 รูปร่างที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Shape) ของไซโคลน.....                                                                     | 44   |
| 30 การเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง(การกรองที่ผิว).....                                                                            | 47   |
| 31 ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง.....                                                                  | 48   |
| 32 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพสะสมของถุงกรองตามภาระของอนุภาคฝุ่น.....                                                           | 49   |
| 33 โครงสร้างของถุงกรองที่ใช้ทั่วไป.....                                                                                       | 52   |
| 34 ถุงกรองแบบ Pluse Jet.....                                                                                                  | 52   |
| 35 ถุงกรองแบบเขย่าอนุภาคฝุ่นออกโดยการสั่นวงวนที่อยู่ช่วงกลางของถุง<br>ด้วยแรงกลและส่งอากาศไหลย้อน.....                        | 53   |
| 36 การเปลี่ยนแปลงของความดันสูญเสียและอัตราการไหลของก๊าซ<br>ตามวัฏจักรการเขย่าอนุภาคฝุ่นออก.....                               | 54   |
| 37 รูปแบบของบ้านถุงกรอง (Filter Bag House).....                                                                               | 54   |
| 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเกาะติดกับขนาดอนุภาค.....                                                                            | 55   |
| 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SO <sub>3</sub> และจุดน้ำค้างของกรดในก๊าซทิ้ง.....                                       | 56   |
| 40 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค.....                                                                                          | 59   |
| 41 การเปรียบเทียบค่าคำนวณและค่าทดลองของประสิทธิภาพแรกเริ่มของเส้นใย<br>ที่อยู่โดดเดี่ยว.....                                  | 61   |
| 42 เครื่องกรองแบบโยนแผ่นทิ้ง.....                                                                                             | 62   |
| 43 เครื่องกรองแบบเปลี่ยนวัสดุกรองได้.....                                                                                     | 62   |
| 44 เครื่องกรองแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราว(เส้นใยเชิงไดอิเล็กตริกและปล้อยโครนา)....                                           | 63   |
| 45 ความสามารถในการจูนอนุภาคฝุ่นของเครื่องกรองแบบเส้นใย<br>ชนิดเปลี่ยนวัสดุใหม่บางส่วน(เส้นทึบ : การคำนวณ : X : การทดลอง)..... | 63   |
| 46 กลไกเชิงกลและกลไกดูดซับติดผิว.....                                                                                         | 65   |
| 47 การจับอนุภาคที่ถูกสกัดกันในครั้งต่อไป.....                                                                                 | 66   |
| 48 Collection curve ของไส้กรองพันรอบและไส้กรองทบจีบ.....                                                                      | 67   |
| 49 ไส้กรองพันรอบทำจากเส้นไคเดียว.....                                                                                         | 68   |
| 50 การพันรอบแกนลักษณะโค้ง Diamond ทำให้อนุภาคถูกจับทั่วทั้งกรอง<br>ไม่เกิดบริเวณผิวเท่านั้น.....                              | 69   |
| 51 รูปร่างลักษณะของไส้กรองแบบพันรอบรวมทั้งโครงสร้างภายใน.....                                                                 | 69   |
| 52 รูปร่างลักษณะของไส้กรองทบจีบรวมทั้งโครงสร้างภายใน.....                                                                     | 70   |
| 53 ชั้นกรองและชั้นจุนต่างๆที่ใช้ในไส้กรองทบจีบแบบหนึ่ง.....                                                                   | 70   |
| 54 ปริมาณพื้นที่ผิวเหมาะสมสำหรับไส้กรองตัวนี้มีค่าเท่ากับ 4 ตารางฟุต.....                                                     | 71   |

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                 | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 55 สภาพให้ของไหลซึมผ่านแพร่ปกผันกับประสิทธิภาพการจัดอนุภาค.....                           | 72   |
| 56 ผลของอัตราการไหลต่ออายุการใช้งานของไส้กรองทบจีบ.....                                   | 72   |
| 57 ผลของพื้นที่กรองต่ออายุการใช้งานของไส้กรอง.....                                        | 72   |
| 58 ไส้กรองพันรอบจุ่มสารปนเปื้อนได้ทั่วเนื้อสารกรอง.....                                   | 73   |
| 59 ไส้กรองทบจีบก่อให้เกิด Filter cake ที่ผิวสารกรอง.....                                  | 74   |
| 60 แผนภาพการออกแบบที่มีวงป้อนกลับ.....                                                    | 77   |
| 61 แผนภาพความเค้น-ความเครียด.....                                                         | 81   |
| 62 แรงชนิดต่างๆ.....                                                                      | 84   |
| 63 ท่อกลมผนังบาง ผ่าตลอดความยาว.....                                                      | 87   |
| 64 แสดงการบิดปลายเสาวิธีต่างๆ.....                                                        | 88   |
| 65 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเพียวจากสูตรของออยเลอร์<br>และจอห์นสัน..... | 89   |
| 66 คานและแกนสะเทิน.....                                                                   | 90   |
| 67 แบบรากฐานของเกลียว.....                                                                | 93   |
| 68 เปรียบเทียบการขบกันระหว่างสลักเกลียวกับแป้นเกลียวชนิดหยาบและชนิดละเอียด.....           | 98   |
| 69 เหลาอยู่ภายใต้แรงต่างๆ.....                                                            | 101  |
| 70 ผังแสดงขดลวดของสปลิตเฟสมอเตอร์.....                                                    | 105  |
| 71 เว้นโรเตอร์มอเตอร์.....                                                                | 105  |
| 72 การกวนของเหลว.....                                                                     | 106  |
| 73 วงจรการใช้รีเลย์.....                                                                  | 107  |
| 74 วงจรการใช้ PLC (อินพุต โมดูล).....                                                     | 107  |
| 75 วงจรการใช้ PLC (เอาต์พุต โมดูล).....                                                   | 107  |
| 76 วงจรแลตเตอร์ (PLC Ladder Logic Diagram).....                                           | 108  |
| 77 วงจรรีเลย์ที่แก้ไขใหม่.....                                                            | 108  |
| 78 แลตเตอร์ ลอจิก ไดอะแกรมของ PLC ที่แก้ไขใหม่.....                                       | 109  |
| 79 การทำงานภาคอินพุต (Input).....                                                         | 110  |
| 80 การทำงานของภาคเอาต์พุต.....                                                            | 110  |
| 81 การกำหนดเบอร์รีเลย์.....                                                               | 111  |
| 82 การกำหนดเบอร์ของ Holding และ Link Relay.....                                           | 111  |
| 83 โครงสร้างของข้อมูล.....                                                                | 113  |
| 84 แผนผังการใช้ PLC.....                                                                  | 114  |
| 85 ของไหลรูปปลี.....                                                                      | 117  |
| 86 บุคตองเกจ.....                                                                         | 118  |
| 87 streamline.....                                                                        | 119  |

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                                                                              | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 88 stream tube.....                                                                                                                                    | 119  |
| 89 stream tube.....                                                                                                                                    | 120  |
| 90 ของไหลใน control volume.....                                                                                                                        | 123  |
| 91 ของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อลด.....                                                                                                                      | 125  |
| 92 การพล็อตกราฟ log - log แสดงการไหลในท่อ.....                                                                                                         | 126  |
| 93 แสดงหลักการและโครงสร้างของโรตัมมิเตอร์.....                                                                                                         | 128  |
| 94 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบใบพัดหมุน.....                                                                                                              | 129  |
| 95(1) ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องมือวัด Flow แบบเทอร์ไบน์.....                                                                                 | 130  |
| 95(2) ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องมือวัด Flow แบบเทอร์ไบน์.....                                                                                 | 130  |
| 96 การนับจำนวนรอบที่เทอร์ไบน์มิเตอร์หมุนไปใช้ Pick off Coil.....                                                                                       | 131  |
| 97 K-factor Curve เมื่อ Plot เทียบกับค่า Flow Rate.....                                                                                                | 132  |
| 98 ค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ.....                                                                                                        | 133  |
| 99 การติดตั้งและตรวจสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์.....                                                                                                           | 134  |
| 100 การเปลี่ยนของค่า K-factor เปลี่ยนเนื่องจาก Viscosity เปลี่ยน.....                                                                                  | 134  |
| 101 ค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น.....                                                                                                                   | 135  |
| 102 แสดงขั้นตอนในดำเนินการการวิจัย.....                                                                                                                | 141  |
| 103 การทดสอบหาค่ามาตรฐานของไส้กรองใหม่โดยใช้เครื่องวัดความเร็วของลมและการ<br>ทดสอบหาประสิทธิภาพของไส้กรองที่ผ่านการทำความสะอาดจากเครื่องที่สร้างขึ้น.. | 145  |
| 104 กราฟแสดงค่าร้อยละของปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นสัปดาห์ที่1-24.....                                                                               | 149  |

## บัญชีตาราง

| ตาราง                                                                                                                                    | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 การแบ่งประเภทเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นและลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่น.....                                                                    | 21   |
| 2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นประเภทต่างๆ.....                                                                                | 21   |
| 3 สูตรคำนวณทั่วไปสำหรับค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น.....                                                 | 23   |
| 4 ค่าใช้จ่ายแรกเริ่ม (เงินลงทุน) ของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น.....                                                                           | 24   |
| 5 ประเภทของอนุภาคฝุ่นและเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นในอุตสาหกรรมต่างๆ.....                                                                      | 25   |
| 6 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของดุกรองและชั้นกรองอากาศ.....                                                                               | 46   |
| 7 ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนของราคาของผ้ากรองทั่วไป.....                                                                                   | 50   |
| 8 วิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออกแบบต่างๆ.....                                                                                                    | 51   |
| 9 สูตรคำนวณประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นของเส้นใยโคโนเดี่ยว<br>โดยกลไกแรงโน้มถ่วงและการสกัดกัน.....                                       | 60   |
| 10 ได้กรองทบจับอาจใช้ประหยัดกว่าคาร์ทริดจ์พันรอบ.....                                                                                    | 75   |
| 11 ระบบของหน่วย.....                                                                                                                     | 80   |
| 12 ระบบหน่วยอนุพันธ์.....                                                                                                                | 80   |
| 13 การใช้อุปสรรค.....                                                                                                                    | 81   |
| 14 ค่าความปลอดภัย.....                                                                                                                   | 83   |
| 15 ขนาดระบุของเพลตามมาตรฐาน ISO/R775-1969.....                                                                                           | 95   |
| 16 ค่าตัวประกอบความล่า.....                                                                                                              | 96   |
| 17 พื้นที่หน่วยความจำของ CPM1.....                                                                                                       | 112  |
| 18 การทดสอบหาค่าปริมาตรของลมมาตรฐานที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                                                               | 146  |
| 19 การทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                                                               | 148  |
| 20 รายการเครื่องมือที่ใช้สร้างเครื่อง.....                                                                                               | 185  |
| 21 รายการอุปกรณ์ประกอบชุดหัวจับหมุนไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                                                                         | 186  |
| 22 รายการอุปกรณ์ประกอบชุดควบคุมการทำงานระบบนิวเมติกส์.....                                                                               | 187  |
| 23 รายการอุปกรณ์ประกอบชุดวงจรไฟฟ้าควบคุมระบบการทำงาน.....                                                                                | 188  |
| 24 ผลการตรวจประเมินสมรรถนะเครื่อง.....                                                                                                   | 203  |
| 25 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 1 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น..... | 204  |
| 26 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 2 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น..... | 204  |
| 27 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 3 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น..... | 205  |
| 28 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 4 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น..... | 205  |

**บัญชีตาราง(ต่อ)**[illegible]

## บัญชีตาราง(ต่อ)

| ตาราง                                                                                                                                    | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 45 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 21 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น ..... | 214  |
| 46 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 22 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น ..... | 214  |
| 47 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 23 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น ..... | 215  |
| 48 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ<br>ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 24 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น ..... | 215  |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ภูมิหลัง

อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมที่ทางภาครัฐบาลได้ให้ความร่วมมือกันระหว่างกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมกับกระทรวงอุตสาหกรรม โดย ฯพณฯ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และ ฯพณฯ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ได้ตั้งคณะทำงานชุดเฉพาะกิจขึ้นเพื่อศึกษาและทำแผนยุทธศาสตร์ ในการพัฒนาอุตสาหกรรม เพื่อเสนอต่อคณะรัฐมนตรี โดยเสนอให้มีการจัดตั้งโรงงานผลิตแผ่นวงจรรวม มูลค่า 5 หมื่นล้านบาท ขึ้นในประเทศไทย โดยให้เงื่อนไขในการดึงดูดต่างชาติเข้ามาเป็นผู้ดำเนินการหลัก เพื่อป้องกันให้กับอุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย และเป็นยุทธศาสตร์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้แผ่นวงจรรวมที่ผลิตในประเทศไทย ([www.moste.go.th/news\\_event/npr/feb43/01feb43.html](http://www.moste.go.th/news_event/npr/feb43/01feb43.html)) โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือแผ่นวงจรรวม มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน มีการควบคุมกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Intel. 2000 : 1) แล้วยังมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทำงาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฝุ่นผง ไฟฟ้าสถิตย์ ดังนั้นพนักงานที่ปฏิบัติงานในฝ่ายผลิตต้องสวมใส่ชุดทำงาน (บันนี่สูท) มีเสื้อกางเกง และหมวกคลุมผม ทำจากผ้าสังเคราะห์ชนิดป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ใส่ผ้าปิดปากและเปลี่ยนใส่รองเท้าที่ป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ เฉพาะที่อนุญาตให้เข้าไปในฝ่ายผลิตตามข้อกำหนดของโรงงาน (Philips Semiconductors Thailand. 2000 : 1-7)

การปิดผนึกเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิต ที่ทำหน้าที่ปิดผนึกสายวงจรและลวดเชื่อมต่อวงจรภายในไม่ให้ชำรุดเสียหาย จากสิ่งแวดล้อมภายนอกและยังทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะขางาน และทำให้มีรูปลักษณะภายนอกที่สมบูรณ์ โดยฉีดเม็ดพลาสติกผสม ชนิดเทอร์โมเซตติงเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ที่ร้อนให้หลอมละลายเป็นของเหลวแล้วไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ (Amoco Electronic Materials Division. 1999) การปิดประกบของแบบแม่พิมพ์ต้องสะอาดและแนบสนิทไม่ให้มีฝุ่นผงตกค้าง เพราะจะทำให้เกิดการรบกวนบริเวณขอบรอยกดขางานหรือตกค้างที่ช่องทางไหลของแบบแม่พิมพ์ปะปนเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อวงจรหรือไปอุดตันในช่องทางการไหลของพลาสติกเหลวทำให้ไม่สามารถไหลเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ ทำให้รูปลักษณะภายนอกไม่สมบูรณ์เป็นของเสียได้ (Philips Semiconductors Thailand. 2000 : 5-15) เครื่องจักรปิดผนึกนี้มีชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดและระบบดูดฝุ่นออกจากผิวแม่พิมพ์และส่วนอื่นๆในเครื่องจักร โดยผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์บอนทำด้วยใยสังเคราะห์ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและไอเทคอื่นๆ ที่มีอนุภาคหรือตะกอนแขวนลอยตั้งแต่ 100 ไมครอน ลงมา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคอยู่ในช่วง 0.006 ถึง 300 ไมครอน ได้แก่การกรองวัตถุดิบในกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ที่เสร็จแล้วให้มีความใสหรือบริสุทธิ์สูงขึ้น เนื่องจากไส้กรองคาร์บอนทำความสะอาด ควบคู่ไปกับการลดปริมาณฝุ่นและมลพิษจากการใช้ไส้กรองแบบอื่นๆ (ฝ่ายวิศวกรรมบริษัทโปรเซล จำกัด. 2533 : 261-265) เมื่อผ่านการใช้งานจะมีฝุ่นผงมาเกาะติดอยู่บริเวณผิวรอบๆนอกของไส้กรอง และทำให้เกิดการอุดตัน อากาศไหลผ่านไม่สะดวกทำให้ประสิทธิภาพของการดูดฝุ่นลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาประสิทธิภาพของไส้กรองเพื่อให้ระบบการดูดฝุ่นมีประสิทธิภาพอยู่เสมอ บริษัทไดอิชิ โซโกะ จำกัด ผู้ผลิตเครื่องปิดผนึกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้กำหนดในคู่มือการใช้เครื่องให้ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นทุกสัปดาห์ โดยพนักงานที่รับผิดชอบถอดไส้กรองออกจากระบบดูดฝุ่น มาทำความสะอาดให้ฝุ่นผงที่เกาะติดอยู่ภายนอกของไส้กรองหลุดออก (Dai-ichi Seiko CO.,LTD. 1998)

ขั้นตอนการทำความสะอาดนี้ อาจทำให้เกิดอันตรายกับพนักงานและยังสร้างสภาพแวดล้อมในการทำงานไม่ดี โดยก่อให้เกิดมลสารในอากาศ (Air Pollutants) คือสารใดๆ ก็ตามในอากาศซึ่งมีผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เป็นที่รังเกียจหรือไม่พึงปรารถนาต่อมนุษย์หรือสารซึ่งมีผลเสียต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์ โดยทางตรงหรือทางอ้อมสารนี้อาจมีผลร้ายเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากตัวสารแต่ละตัวหรือเมื่อรวมตัวกับสารอื่น ที่มองไม่เห็นแต่เป็นอันตรายต่อเซลล์ที่มีชีวิต (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์และคณะ. 2536 : 2) การควบคุมมลภาวะในอากาศของโรงงานอุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์นั้น เป็นกระบวนการจัดการสิ่งแวดล้อม กระบวนการหนึ่งซึ่งเป็นไปตามกฎหมายของประเทศไทย ดังนั้นบริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) ได้มีนโยบายการควบคุมสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดเป็นไปตามมาตรฐานสากล (Phillips Semiconductors Thailand. 1999 : 2)

อุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทยยังไม่มีกระบวนการหรือขั้นตอนของการออกแบบซึ่งเป็นหัวใจที่สำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิต สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติได้ให้ความสำคัญในการพัฒนาเพื่อให้มีศักยภาพที่จะผลิตชิ้นส่วนและวัสดุอุปกรณ์ ที่ใช้ในการอำนวยความสะดวกของอุตสาหกรรมการผลิตได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ การวิจัยและพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีมาประยุกต์ และผลักดันให้อุตสาหกรรมการผลิตเริ่มเกิดขึ้นได้ ตลอดจนการออกแบบการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องของอุตสาหกรรมที่เกิดจากการนำผลงานการวิจัยและพัฒนาไปใช้ประโยชน์ได้ ([www.moste.go.th/news\\_event/npr/feb43/01feb43.html](http://www.moste.go.th/news_event/npr/feb43/01feb43.html)) ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยมีแนวความคิดการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการ การไหลย้อนกลับของก๊าซเฉพาะแห่งและเป็นแบบพัลส์ กับการหมุนรอบตัวเองของไส้กรอง ประกอบอยู่ในชุดของถังไซโคลน โดยขึ้นมาใช้ทำความสะอาดไส้กรองทดแทนการทำงานของพนักงาน

### ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงาน

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

### ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สามารถนำไปใช้ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นในเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ได้เครื่องจักรมาช่วยลดอันตรายทดแทนการทำงานของพนักงาน
2. ช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
3. เป็นการพัฒนาศักยภาพชีวิตของพนักงาน
4. ได้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ที่สามารถทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นได้

คุณภาพสม่ำเสมอ

ได้คู่มือการใช้งานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

## ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ครั้งนี้ บรรลุตามจุดมุ่งหมายที่วางไว้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

1.1 ชุดโครงสร้างและกักเก็บฝุ่นแบบไซโคลน

1.2 ชุดหัวจับไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ หมุนด้วยความเร็ว 1450 รอบต่อนาที ส่งกำลังขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด ¼ แรงม้า เฟสเดียว 220 โวลต์ โดยผ่านพูลส์และสายพานแบบร่องลิ้น

1.3 ชุดนิวเมติกส์ ควบคุมแรงดันในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ประกอบด้วยระบบกรองฝุ่น วาล์วควบคุมแรงดัน ถังสำรองแรงดัน วาล์วเร่งระบาย และวาล์วไฟฟ้าควบคุมจังหวะการเป่าลม

1.4 ชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล (Program Logic Control, PLC) ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจใน 1 รอบการทำงานใช้เวลา 5 นาที

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

2.1 ประชากรคือ ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยดังต่อไปนี้

2.1.1 บริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์)

2.1.2 บริษัทเอ เอ็ม ดี ประเทศไทย

2.1.3 บริษัทเอ็น เอส อิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพฯ (1993)

2.1.4 บริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

2.1.5 บริษัทอัลฟาเทค เซมิคอนดักเตอร์ แพกเกจจิ้ง จำกัด

2.1.6 บริษัทเทอร์ริสเต็ม ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ไทย)

2.2 กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงคือ ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ของบริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) โดยทำการสุ่มตัวอย่างจากการใช้งานของไส้กรองจำนวน 10 ตัวอย่าง ตลอดช่วงระยะเวลาการใช้งานของไส้กรอง 24 สัปดาห์ ที่กำหนดระยะเวลาการทำความสะอาดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

3. ตัวแปรที่ศึกษา ของการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ครั้งนี้คือ

3.1 ตัวแปรต้นคือ ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้งานทุกๆ สัปดาห์ตลอดระยะเวลาการใช้งานของไส้กรองฝุ่น 24 สัปดาห์

3.2 ตัวแปรตามคือ ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้น ใช้เครื่องมีวัดความเร็วลม ได้ค่าความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรองต่อหน่วยเวลา แล้วนำมาคำนวณหาค่าปริมาตรของลมต่อหน่วยเวลา ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์

## นิยามศัพท์เฉพาะ

### การออกแบบ

หมายถึง การกำหนดลักษณะของวัสดุอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ และเหมาะสมกับการใช้งานตามหลักการของการออกแบบ เพื่อให้สามารถใช้ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ได้

### การสร้าง

หมายถึง การทำและประกอบวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ได้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

### เครื่องทำความสะอาด

หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น ที่มีลักษณะเป็นถังไซโคลน ใช้หลักการทำความสะอาดแบบเจ็ตโคลนและให้ไส้กรองหมุนรอบตัวเองในแนวแกนตั้ง แล้วมีระบบควบคุมการทำงานในตัวเอง

### ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

หมายถึง ไส้กรองฝุ่นที่มีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง พันรอบด้วยผ้ากรองแบบทบจีบ ทำจากใยสังเคราะห์ มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 เซนติเมตร และภายนอก 15 เซนติเมตร มีความยาว 30 เซนติเมตร ยึดจับด้านบนด้วยสกรูขนาด 6 มิลลิเมตร ทำมุมตั้งฉากกันจำนวน 4 ตัว

### โรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

หมายถึง โรงงานที่ใช้เครื่องจักรทำการผลิตแผงวงจรรวมหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ระบบการกำจัดฝุ่นไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

### ประสิทธิภาพ

หมายถึง การวัดความเร็วของลมที่ไหลผ่านไส้กรองหลังจากการทำความสะอาดไส้กรอง โดยนำไส้กรองมาทำการวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม(DIGITAL ANEMOMETER รุ่น DA 400) แล้วนำมาคำนวณค่าหาปริมาตรของลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ โดยใช้สูตร  $V = Q / A$  (ชาญ ถนัดงาน. 2523 : 71)

### ความเร็วเฉลี่ย(V)

หมายถึง อัตราการไหลของลมผ่านพื้นที่หน้าตัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที อัตราไหล(Q)

หมายถึง ปริมาตรของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

### พื้นที่หน้าตัด(A)

หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของท่อ หรือของเครื่องวัดความเร็วของลม

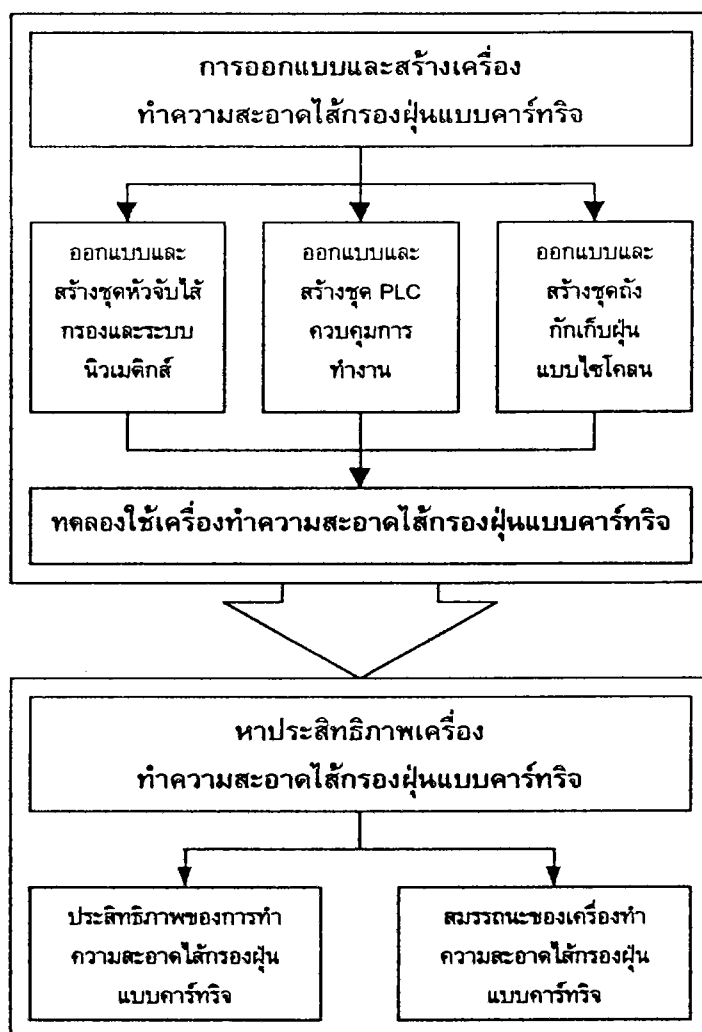
### เครื่องมือวัดความเร็วของลม

หมายถึง เครื่องวัดวัดความเร็วลม DIGITAL ANEMOMETER รุ่น DA 400 มีพื้นที่หน้าตัด 0.002676 ตารางเมตร

### สมรรถนะ

หมายถึง การตรวจประเมินลักษณะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ 5 ด้าน คือ ลักษณะด้านวิศวกรรม ลักษณะด้านความปลอดภัย ลักษณะด้านกายภาพ ลักษณะด้านการใช้งาน และลักษณะด้านการซ่อมบำรุงรักษา โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมิน

## กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น

## สมมติฐานในการวิจัย

เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์

## บทที่ 2

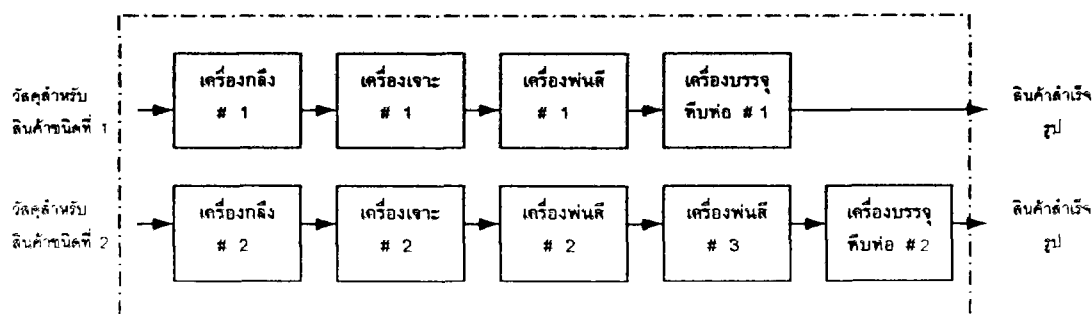
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงนำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การวางแผนผังกระบวนการผลิตของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
2. การควบคุมอนุภาคมลสารและการเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่น
3. การออกแบบและการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
4. การวัดประสิทธิภาพ และสมรรถนะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
5. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. การวางแผนผังกระบวนการผลิตของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การวางแผนผังกระบวนการผลิต เป็นกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่งของเครื่องจักร เครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นต่อการผลิต และการให้บริการภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้างอาคารที่มีอยู่ เพื่อให้การดำเนินการผลิตและการให้บริการมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด การวางแผนผังตามผลิตภัณฑ์ หมายถึงการจัดวางเครื่องจักรตามลำดับความต้องการของการใช้เครื่องจักร เพื่อใช้ในการผลิตหรือการให้บริการ สินค้า หรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะใช้เครื่องจักรเฉพาะ เพื่อการผลิตสินค้าแต่ละชนิดเท่านั้น จะไม่ใช่เครื่องจักรเครื่องมือในการผลิตร่วมกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2 สังเกตได้ว่าในการทำงานที่ซ้ำกัน เช่นการกรึงหรือการเจาะ จะไม่ใช่เครื่องจักรที่ซ้ำกันเลย การวางแผนผังตามผลิตภัณฑ์เหมาะสำหรับการผลิตสินค้าที่มีปริมาณการผลิตมากๆ มีรูปแบบของสินค้ามาตรฐาน สินค้ามีขั้นตอนในการผลิตที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลง เป็นการวางแผนผังกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 2 แผนผังกระบวนการผลิตตามผลิตภัณฑ์

##### 1.1 หลักเกณฑ์สำหรับการวางแผนผังกระบวนการผลิต

ในการวางแผนผังกระบวนการผลิตของโรงงาน หรือสถานที่ให้บริการใดๆ มีหลักเกณฑ์ที่พึงพิจารณา 10 ประการ คือ

1.1.1 มีความคล่องตัวสูงสุด (maximum flexibility) สามารถเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิตได้ง่าย มีความคล่องตัวในการปรับเปลี่ยนการวางแผนผังกระบวนการผลิตในอนาคตได้ดี

1.1.2 เกิดการประสานงานแต่ละแผนกหรือเครื่องจักรแต่ละเครื่องต้องเกิดการทำงานที่ประสานสอดคล้องกัน ไม่เกิดการรอคอยระหว่างกระบวนการผลิตโดยไม่จำเป็น

1.1.3 ใช้เนื้อที่ทุกส่วนของโรงงานให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เช่น ใช้ในการเก็บวัสดุระหว่างการผลิต วางเครื่องจักร และเก็บวัตถุดิบ เป็นต้น

1.1.4 มองเห็นได้เมื่ออยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งของโรงงานควรมองเห็นจุดอื่นๆ ได้โดยไม่มียะโรมาขวางแนวสายตา เครื่องจักรที่มีขนาดสูงใหญ่ไม่ควรวางไว้บริเวณกลางโรงงาน บริเวณใดที่ต้องการกันบริเวณเพื่อความเป็นสัดส่วน ควรหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุทึบ ควรใช้วัสดุโปร่ง เช่น ตาข่ายลวด หรือกระจกใสแทน ถ้าไม่จำเป็นควรหลีกเลี่ยงการกั้นบริเวณในโรงงาน เพราะจำทำให้เปลืองเนื้อที่ใช้งาน

1.1.5 เข้าถึงเครื่องจักรเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานได้ง่ายไม่มีสิ่งกีดขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย เช่น อุปกรณ์ดับเพลิง ที่แจ้งสัญญาณอันตรายแผงฟิวส์หรือแผงสวิตซ์ไฟฟ้าจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เข้าถึงได้สะดวก

1.1.6 ระยะเวลาการเคลื่อนย้ายวัสดุและผลิตภัณฑ์ระหว่างการผลิต ต้องทำให้มีระยะทางสั้นที่สุด เส้นทางเคลื่อนย้ายไม่ควรคดเคี้ยว หลีกเลี่ยงการเคลื่อนย้ายที่ซ้ำซ้อน เช่น เมื่อออกจากเครื่องจักรเครื่องหนึ่งควรเคลื่อนย้ายไปยังเครื่องจักรถัดไปเลย ไม่ควรเคลื่อนย้ายไปเก็บไว้ในที่เก็บก่อน แล้วจึงค่อยเคลื่อนย้ายมาผลิตในเครื่องจักรถัดไป เป็นต้น

1.1.7 เกิดการเคลื่อนย้ายน้อยหลีกเลี่ยงการเคลื่อนย้ายวัสดุและผลิตภัณฑ์ในระหว่างการผลิตโดยไม่จำเป็น ใช้อุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายและขนส่งผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วและต่อเนื่อง เช่น การใช้สายพาน ลูกรอก ลิฟต์ และรถยก เป็นต้น

1.1.8 มีสภาพแวดล้อมการทำงานในโรงงานและสถานที่ทำงานจะต้องมีอากาศถ่ายเทที่ดี มีอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม มีแสงสว่างเพียงพอ และปราศจากเสียงรบกวน

1.1.9 มีความปลอดภัย ตำแหน่งเครื่องจักรต้องจัดวางให้ถูกต้องตามข้อกำหนด อุปกรณ์และเครื่องจักรที่อาจก่อให้เกิดอันตรายในขณะปฏิบัติงานจะต้องปิดป้ายสัญญาณเตือน เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เครื่องจักรที่มีความร้อน น้ำยาสารเคมีที่ติดไฟง่าย เป็นต้น นอกจากนี้จะต้องมีอุปกรณ์เตือนอันตราย เช่น เครื่องตรวจจับควันไฟ แสงเปลวไฟ กระดิ่งเตือนภัย มีอุปกรณ์ดับเพลิง เช่น สารเคมีและน้ำดับเพลิงที่มากเพียงพอ ตำแหน่งของอุปกรณ์ดับเพลิงจะต้องมีเครื่องหมายแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดและเข้าถึงได้สะดวก

1.1.10 เคลื่อนย้ายวัสดุทางเดียวเส้นทางเคลื่อนย้ายและขนส่งวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ระหว่างการผลิต ควรเดินทางเดียวไม่สวนทางกัน เส้นทางไม่ควรตัดกันหรือมีทางแยก (พิชิต สุขเจริญพงษ์. 2538 : 106-111)

การพัฒนาอุตสาหกรรมของการผลิตแผ่นวงจรรวม (เวเฟอร์ แฝบริเคชั่น) และมีความเห็นชอบร่วมกันให้มีการตั้งคณะทำงานขึ้นมาศึกษา แผนพัฒนาอุตสาหกรรมดังกล่าว เพื่อป้อนให้อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของไทย โดยจะมีการลงทุน ก่อตั้งโรงงานผลิตแผ่นวงจรรวมขึ้นในประเทศมูลค่าการลงทุน 1,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือเท่ากับ 37,000 ล้านบาท ซึ่งจะสามารถชักชวนนักลงทุนต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีการผลิตแผ่นวงจรและนักลงทุนไทยที่สนใจมาลงทุน นอกจากนี้เพื่อสร้างความมั่นใจทางภาครัฐจะเข้าไปถือหุ้นไทยต้องมีสัดส่วนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 51 เพื่อให้เป็นกิจการของคนไทย ทั้งนี้ จะมีกำลังการผลิตประมาณ 25,000-30,000 แผ่นต่อเดือน ผลตอบแทนลงทุนร้อยละ 10-24 คาดว่า โครงการจะเสร็จในปี 2545 เป็นต้นไป สำหรับเงื่อนไขการลงทุนครั้งนี้ จะเป็นการลงทุนร่วมกันระหว่างรัฐบาลและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ โดยรัฐถือหุ้นร้อยละ 10-26 เพื่อผลักดันอุตสาหกรรมให้เกิดขึ้น ส่วนที่เหลือจะดึงเอกชนมาถือหุ้นโดยมีนักลงทุนต่างประเทศถือหุ้นไม่เกินร้อยละ 40 ทั้งนี้ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าจะมีผลตอบแทนการลงทุน

ทุนร้อยละ 16-24 ปัจจุบันมีหลายประเทศที่รัฐบาลมีการลงทุนในโครงการนี้ โดยตรงเพราะเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกจำนวนมาก เช่น สิงคโปร์รัฐเข้าไปลงทุนร้อยละ 90 มีโรงงานแล้ว 5 โรงงานไต้หวันรัฐลงทุนร้อยละ 40 มีโรงงานแล้ว 20 โรงงานและมาเลเซียรัฐลงทุนร้อยละ 100 มี 2 โรงงานและจะเดินเครื่องการผลิตได้ในปีนี้ สาเหตุต้องผลักดันอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจรรวม เพราะเป็นยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมต้น ในขณะนี้ปัจจุบันไทยจะมีเพียงชั้นกลางและปลายน้ำเท่านั้น ทำให้แต่ละปีต้องสูญเสียเงินนำเข้าแผ่นวงจรรวมไม่น้อยกว่า 70,000-80,000 ล้านบาท ดังนั้นหากโครงการสามารถ เกิดขึ้นได้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต ทั้งนี้นักลงทุนหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่นและไต้หวัน ให้ความสนใจและแจ้งความประสงค์ที่จะหาแหล่งเพื่อขยายการลงทุนในต่างประเทศ แต่ยังคงรอความชัดเจนในเรื่องของนโยบายของรัฐบาลก่อน([www.moste.go.th/news\\_event/npr/feb43/01feb43.html](http://www.moste.go.th/news_event/npr/feb43/01feb43.html)) โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือแผ่นวงจรรวม มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน มีการควบคุมกระบวนการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Intel. 2000 : 1) แล้วยังมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทำงาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ผุ่นผง ไฟฟ้าสถิตย์ ดังนั้นพนักงานที่ปฏิบัติงานในฝ่ายผลิต ต้องสวมใส่ชุดทำงาน (บันนี่สูท) มีเสื้อกางเกง และหมวกคลุมผม ทำจากผ้าสังเคราะห์ชนิดป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ใส่ผ้าปิดปากและเปลี่ยนใส่รองเท้าที่ป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ เฉพาะที่อนุญาตให้เข้าไปในฝ่ายผลิตตามข้อกำหนดของโรงงาน (Philips Semiconductors Thailand. 2000 : 1-7) การปิดผนึกเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิต ที่ทำหน้าที่ปิดผนึกสายวงจรและลวดเชื่อมต่อวงจรภายในไม่ให้ชำรุดเสียหาย จากสิ่งแวดล้อมภายนอกและยังทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะขางาน และทำให้มีรูปลักษณะภายนอกที่สมบูรณ์ โดยฉีดยาเคลือบพลาสติกผสม ชนิดเทอร์โมเซตติงเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ที่ร้อนให้หลอมละลายเป็นของเหลวแล้วไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ (Amoco Electronic Materials Division. 1999) การปิดประกบของแบบแม่พิมพ์ต้องสะอาดและแนบสนิทไม่ให้มีฝุ่นผงตกค้าง เพราะจะทำให้เกิดการรบกวนบริเวณขอบ รอยกดขางานหรือตกค้างที่ช่องทางไหลของแบบแม่พิมพ์ปะปนเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อวงจร หรือไปอุดตันในช่องทางการไหลของพลาสติกเหลวทำให้ไม่สามารถไหลเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ ทำให้รูปลักษณะภายนอกไม่สมบูรณ์เป็นของเสียได้ (Philips Semiconductors Thailand. 2000 : 5-15) เครื่องจักรปิดผนึกนี้มีชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดและระบบดูดฝุ่นออกจากผิวแม่พิมพ์ และส่วนอื่นๆในเครื่องจักร โดยผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์บอนทำด้วยใยสังเคราะห์ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและไอเทคอื่นๆ ที่มีอนุภาคหรือตะกอนแขวนลอยตั้งแต่ 100 พิกโตกรัมลงมา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคอยู่ในช่วง 0.006 ถึง 300 ไมครอน ได้แก่การกรองวัตถุดิบในกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ที่เสร็จแล้วให้มีความใสหรือบริสุทธิ์สูงขึ้น เนื่องจากไส้กรองคาร์บอนให้ความสะอาด ความปลอดภัยและมีสมรรถนะสูงกว่าการใช้ไส้กรองแบบอื่นๆ (ฝ่ายวิศวกรรมบริษัทโปรเซล จำกัด. 2533 : 261-265) เมื่อผ่านการใช้งานจะมีฝุ่นผงมาเกาะติดอยู่บริเวณผิวรอบๆนอกของไส้กรอง และทำให้เกิดการอุดตัน อากาศไหลผ่านไม่สะดวกทำให้ประสิทธิภาพของการดูดฝุ่นลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาประสิทธิภาพของไส้กรองเพื่อให้ระบบการดูดฝุ่นมีประสิทธิภาพอยู่เสมอ บริษัทไดอิชิ ไชโกะ จำกัด ผู้ผลิตเครื่องปิดผนึกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้กำหนดในคู่มือการใช้เครื่องให้นำไส้กรองฝุ่นออกมาทำความสะอาดทุกสัปดาห์ โดยพนักงานที่รับผิดชอบถอดไส้กรองออกจากระบบดูดฝุ่นมาทำความสะอาดให้ฝุ่นผงที่เกาะติดอยู่ภายนอกของไส้กรองหลุดออก (Dai-ichi Seiko CO.,LTD. 1998)

## 1.2 รูปแบบและขั้นตอนของกระบวนการประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (แผงวงจรรวม IC) ของการวางแผนผังกระบวนการผลิต

ในการรูปแบบและขั้นตอนของกระบวนการประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (แผงวงจรรวม IC) ของการวางแผนผังกระบวนการผลิตหรือสถานที่ให้บริการต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 DIE VISUAL เป็นการนำแผ่นแผงวงจรรวม(Wafer) มาตรวจสอบความถูกต้องและสมบูรณ์ทางกายภาพให้ตรงตามข้อกำหนดของการผลิต

1.2.2 SAW / CLEAN เป็นการนำแผ่นแผงวงจรรวมมาเลื่อยตัดออกจากกัน โดยนำมาติดลงบนแผ่นฟิล์มกาวเพื่อยึดเกาะให้แผ่นวงจรติดแน่น แล้วทำการเลื่อยเพื่อแยกแผ่นแผงวงจรรวมออกเป็นชิ้นส่วนแต่ละตัวหรือที่เรียกกันว่าไดค์ (Die) ซึ่งยังยึดติดอยู่บนแผ่นฟิล์ม

1.2.3 DIE ATTACH / CURE ทำหน้าที่ติดตัวไดค์(Die) เข้ากับลีดเฟรม(Lead Frame) ด้วยกาว(Epoxy) ชนิดหนึ่ง แล้วอบให้แห้งและแข็งตัวโดยใช้ลมร้อนเป่า

1.2.4 WIRE BOND ทำหน้าที่ต่อเชื่อมลายวงจรจากไดค์(Die) ออกไปยังขางานแต่ละขางาน (Lead) ที่แผงขางาน(Frame)

1.2.5 ENCAPSULATION ทำหน้าที่ปิดผนึก ห่อหุ้มแผงวงจรและลวดเชื่อมวงจร ไม่ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เป็นการยึดเกาะขางานและสร้างรูปลักษณะภายนอก โดยใช้แม่พิมพ์โลหะเป็นตัวขึ้นรูป ขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรปิดผนึก รุ่น GP-Zett มีดังต่อไปนี้

1.2.5.1 ตัวงานที่เชื่อมต่อวงจรแล้ว จะถูกดันออกจากคาสเซต (Cassette) ใส่งานทั้ง 2 คาสเซต เข้าไปที่แท่นอุ่นความร้อน Pre-heater จนครบ 4 เฟรม พร้อมทั้งตรวจสอบตำแหน่งและทิศทาง

1.2.5.2 ชุดจับลีดเฟรมและชุดใส่เม็ดพลาสติก(Compound) จับใส่ลีดเฟรมและเม็ดพลาสติก ลงในชุดจับงาน (Lead frame & Tablet loader carrier) แล้วนำไปวางบนแม่พิมพ์ส่วนล่าง

1.2.5.3 ชุดแม่พิมพ์ส่วนล่างเคลื่อนที่ขึ้นปิดประกบกับชุดแม่พิมพ์ส่วนบน

1.2.5.4 ระบบส่ง/ฉีดของ บริษัท ไคอิจิ เป็นการฉีดเม็ดพลาสติกแบบหลายชั้น ที่ติดตั้งอยู่ในแบบแม่พิมพ์ส่วนล่าง ฉีดใส่เม็ดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์โมลด์(Mold cavity)

1.2.5.5 การอบใช้เวลาตามความต้องการที่ตั้งเวลาไว้ แล้วเปิดประกบโดยเคลื่อนที่ชุดแม่พิมพ์ส่วนล่าง ลงมาที่ตำแหน่งดันปล่อยงาน(เฟรมที่ปิดผนึกแล้ว) ออกจากแม่พิมพ์

1.2.5.6 ชุดจับงานออก(Unloader) เคลื่อนที่มาจับงานที่ปิดผนึกแล้ว 4 เฟรมขึ้นมา และเคลื่อนที่ไปปล่อยวางบนชุดหักแยกงาน Degater plate

1.2.5.7 แม่พิมพ์ส่วนล่างและส่วนบนถูกทำความสะอาดด้วยระบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสูงของบริษัท ไคอิจิ ที่ประกอบด้วย ระบบดูดฝุ่น ลมเป่าและแปรงขัด

และระบบเครื่องจักรก็จะทำงานซ้ำ เริ่มทำงานจากรายการที่ 1.2.5.2 เป็นรอบต่อเนื่อง

1.2.5.8 ชุดหักแยก(Degater separator) ทำการหักแยก ทางเข้า(Gate) ทางร่วม(Cull) ทางไหล(Runner) ออกจากเฟรมที่มีวงจรปิดผนึกแล้ว เคลื่อนที่ไปวางกองที่ชุดรองรับงานขาออก (Output magazine) (DAI-ICHI SEIKO CO.,LTD. 1998)

1.2.6 POST MOLD CURE. ทำหน้าที่อบงานที่ปิดผนึกแล้ว โดยใช้ลมร้อนเป่าหมุนเวียนในตู้

1.2.7 DAM BAR REMOVAL ทำหน้าที่ตัด ส่วนที่ยึดเกาะระหว่างขางานออก

1.2.8 LEAD FINISH ทำหน้าที่ตัด ส่วนขางานออกจากลีดเฟรม

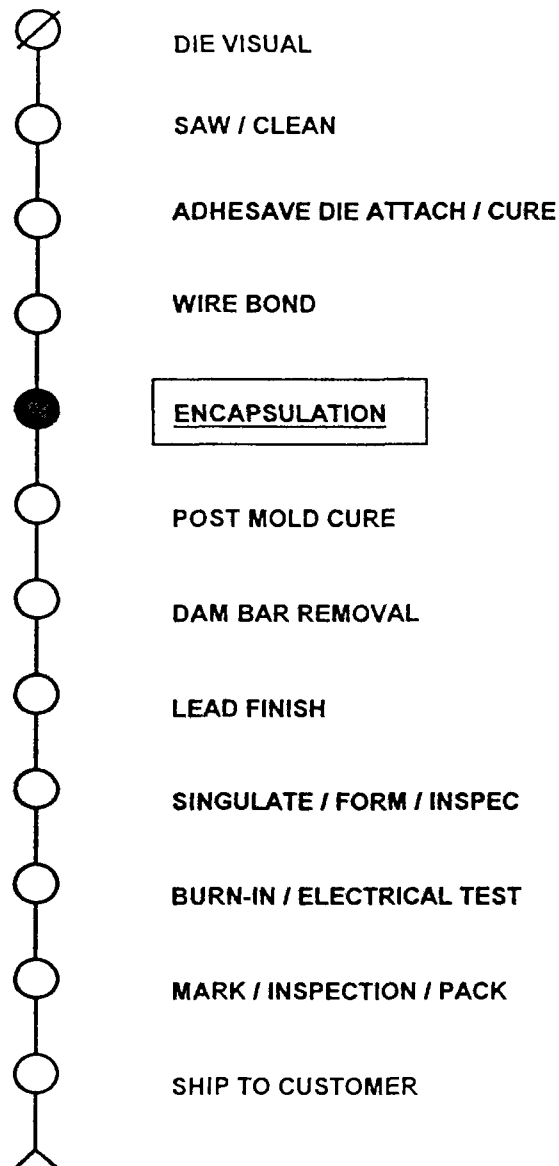
1.2.9 SINGULATE / FORM / INSPEC ทำหน้าที่ขึ้นรูปขางาน แยกตัวงานออกจากลีดเฟรม แล้วทำการตรวจสอบ

1.2.10 BURN-IN / ELECTRICAL TEST ทำหน้าที่อบให้ร้อนแล้วทำการทดสอบทางไฟฟ้า

1.2.11 MARK / INSPECTION / PACK ทำหน้าที่เขียนสัญลักษณ์ ตรวจสอบคุณภาพและ

บรรจุภัณฑ์

1.2.12 SHIP TO CUSTOMER ส่งมอบให้ลูกค้า (Intel : 2000)



ภาพประกอบ 3 กระบวนการประกอบแผงวงจรรวม(IC)

## 2. การควบคุมอนุภาคมลสารและการเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่น

### 2.1 การควบคุมอนุภาคมลสาร

การควบคุมอนุภาคมลสาร (Particulates) ทำให้หลายวิธีขึ้นอยู่กับธรรมชาติและคุณสมบัติของอนุภาคและมลสารนั้น กลไกพื้นฐาน (basic mechanisms) ที่ใช้สำหรับการกำจัดหรือแยกอนุภาคจากอากาศ และการควบคุมอนุภาคและมลสารที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ อาจทำได้โดยใช้เชื้อเพลิงที่ให้อนุภาคและมลสารน้อย ส่วนการทำความสะอาดของอากาศเสีย ในส่วนของการทำความสะอาดอากาศเสีย เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปคือ การออกแบบเครื่องมือที่ใช้แยกอนุภาคและมลสารออกจากอากาศเสีย โดยใช้ข้อดีจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี หรือไฟฟ้าของอนุภาคนั้นๆ ภาพประกอบ 4 แสดงนิยามและคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคพร้อมทั้งเครื่องมือที่ใช้ ทำความสะอาด เครื่องมือที่ใช้แยกอนุภาคนี้นี้มีหลายแบบ แต่ที่ใช้กันมากซึ่งจะกล่าวในที่นี้นั้นมีองค์ประกอบดังนี้

#### 2.1.1 การควบคุมอนุภาคและมลสารโดยธรรมชาติ

- 2.1.1.1 การแยกโดยใช้แรงถ่วงของโลก (gravity separation)
- 2.1.1.2 การแยกโดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal separation)
- 2.1.1.3 การกระทบเนื่องด้วยแรงเฉื่อย (inertial impaction)
- 2.1.1.4 การรับโดยตรง (direct interception)
- 2.1.1.5 การฟุ้งแบบบราวเนียน (Brownian diffusion)
- 2.1.1.6 การฟุ้งปั่นป่วน (turbulent diffusion)
- 2.1.1.7 การตกตะกอนด้วยความร้อน (thermal precipitation)
- 2.1.1.8 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitation)
- 2.1.1.9 การตกตะกอนด้วยแม่เหล็ก (magnetic precipitation)
- 2.1.1.10 การรวมตัวแบบบราวเนียน (Brownian agglomeration)
- 2.1.1.11 การรวมตัวด้วยเสียง (sonic agglomeration)

#### 2.1.2 การควบคุมอนุภาคและมลสารโดยใช้เครื่องมือ

- 2.1.2.1 ห้องตกตะกอนที่ใช้แรงโน้มถ่วงของโลก (settling chambers)
- 2.1.2.2 เครื่องแยกที่ใช้แรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal separators)
- 2.1.2.3 เครื่องสัมผัสแบบเปียก (wet scrubbers)
- 2.1.2.4 เครื่องกรอง (filters)
- 2.1.2.5 เครื่องตกตะกอนที่ใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators)

#### 2.1.3 การเลือกเครื่องมือเก็บอนุภาคและมลสาร

- 2.1.3.1 ประสิทธิภาพ (efficiency) ที่ต้องการซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราที่ยอมให้ปล่อยอนุภาคมลสารออกสู่บรรยากาศ
- 2.1.3.2 คุณสมบัติของก๊าซที่อนุภาคและมลสารอยู่ เช่น ชนิด อัตราการไหล อุณหภูมิ เป็นต้น
- 2.1.3.3 คุณสมบัติของอนุภาคและมลสาร เช่น ลักษณะ ความเข้มข้น การกระจาย ขนาดและน้ำหนัก
- 2.1.3.4 การทำงาน การก่อสร้าง และราคาของเครื่องมืออื่นๆ

#### 2.1.4 การเลือกระบบควบคุมอนุภาคและมลสาร

2.1.4.1 ความเข้มข้นของอนุภาคและมลสารในกระแสก๊าซ (gas stream) ที่ต้องการทำความสะอาดการกระจายขนาดของอนุภาคและมลสารที่ต้องการแยกออก

##### 2.1.4.2 อัตราการไหลของก๊าซ

##### 2.1.4.3 อัตราที่ยอมให้ปล่อยอนุภาคมลสารออกสู่บรรยากาศ

จากข้อมูลนี้ทำให้สามารถเลือกระบบต่างๆ ที่สามารถแยกอนุภาคและมลสารได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ที่อัตราไหลของก๊าซที่กำหนดให้ ขึ้นสุดท้ายก็พิจารณาเปรียบเทียบค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการทำงานของระบบต่างๆ ที่คิดไว้ แล้วเลือกระบบที่ประหยัดที่สุด

2.1.5 ประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคและมลสาร วัดโดยเศษส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่แยกออกโดยคิดที่ขนาดต่างๆ รวมกัน ซึ่งเรียกว่าประสิทธิภาพการเก็บรวม (overall collection efficiency) ประสิทธิภาพการเก็บรวมนี้ใช้เป็นตัววัดระดับการทำงานของเครื่องมือทำความสะอาดก๊าซและอาจหาได้จากสมการที่ (1)

$$\eta_o = 100 \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \quad (1)$$

โดยที่

$\eta_o$  = ประสิทธิภาพการเก็บรวมของเครื่องมือ

$C_i$  = ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคที่เข้าเครื่องมือ

$C_f$  = ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกจากเครื่องมือ

การหาประสิทธิภาพการเก็บรวมนี้จำเป็นต้องรู้น้ำหนักของฝุ่นที่แยกออกจากกระแสก๊าซ ซึ่งหาได้จากประสิทธิภาพการเก็บย่อย (fractional collection efficiency) ของฝุ่นหรืออนุภาคที่ขนาดต่างๆ และการกระจายน้ำหนักของอนุภาคขนาดนั้นๆ ประสิทธิภาพการเก็บย่อยหรือประสิทธิภาพการเก็บสำหรับฝุ่นแต่ละขนาดนั้นโดยทั่วไปแล้วจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาค และแปรอย่างมากขึ้นกับขนาดของอนุภาค ดังแสดงโดยเส้นโค้งสมมุติฐาน (hypothetical curve) ของเครื่องมือเก็บชนิดหนึ่งตามในภาพประกอบที่ 5 ประสิทธิภาพการเก็บย่อยนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงขนาดอนุภาคสั้นๆ รูปร่างของเส้นโค้งจะแปรไปตามชนิดต่างๆ ของเครื่องมือและการแปรของการออกแบบ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเก็บอาจแปรตามชนิดและคุณสมบัติของฝุ่นด้วย เช่น รูปร่าง เป็นต้น การกระจายขนาดของอนุภาคอาจแสดงได้หลายวิธี ภาพประกอบ 6(1) แสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดตามสมมุติฐานบนแกนเลขคณิต ส่วนภาพประกอบ 6(2) แสดงข้อมูลแกนเซมิล็อกเส้นโค้งของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอนุภาคที่เส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่างๆ กับล็อกของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตามภาพประกอบ 6(2) นี้ โดยมากแล้วอาจประมาณได้จากการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ซึ่งถ้าการประมาณนี้ใกล้เคียงเมื่อเขียนเส้นผ่าศูนย์กลางกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมลงบนกระดาษล็อกพรอบเอบิลิตีแล้ว (log-probability paper) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง การกระจายแบบนี้เรียกว่า ล็อก-นอร์มัล (log-normal) ดังภาพประกอบ 8 การแสดงข้อมูลแบบล็อก-นอร์มัล นี้เป็นประโยชน์เนื่องจากการเป็นเส้นตรงนี้ทำให้ประมาณค่าต่างๆ ออกมาได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคจากการทดลองจำกัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $D_p$ ) ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมเท่ากับร้อยละ 0 เรียกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางตัวกลางเรขาคณิต (geometric mean) ของตัวอย่างนั้น จากเส้นโค้งประสิทธิภาพการเก็บอนุภาค เช่น ในภาพประกอบ 5 และเส้นโค้งการกระจายน้ำหนัก เช่น ในภาพประกอบ 6(1) อาจคำนวณประสิทธิภาพการเก็บรวมสำหรับเครื่องเก็บ ที่กำหนดและฝุ่นชนิดที่ต้องการเก็บได้ วิธีหนึ่งที่ใช้ทำโดย

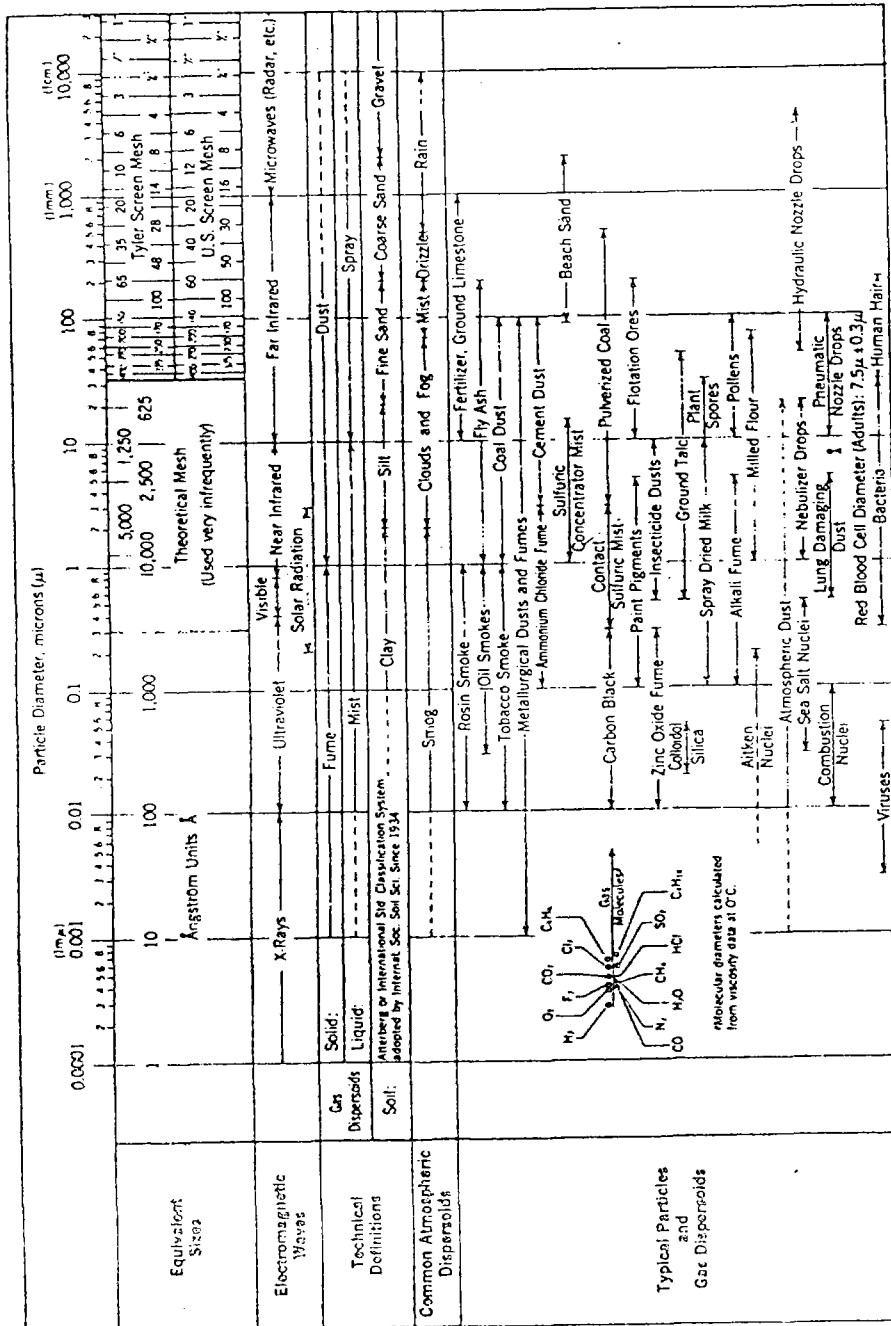
ให้น้ำหนักของประสิทธิภาพการเก็บย่อยสำหรับอนุภาคแต่ละขนาดหรือช่วงสั้นๆ ของขนาด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean) ตามภาพประกอบ 5 (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์และคณะ. 2536 : 214-222)

$$\eta_0 = \frac{\sum [( \text{น้ำหนัก}) D^3]}{\sum (\text{น้ำหนัก}) D} = \sum [(\text{เศษส่วนโดยน้ำหนัก}) D^3] \quad (2)$$

โดยที่  $\eta_0$  = ประสิทธิภาพการเก็บรวม

$(\text{น้ำหนัก})_D$  = น้ำหนักของอนุภาคในช่วงเส้นผ่าศูนย์กลาง  $D_p$

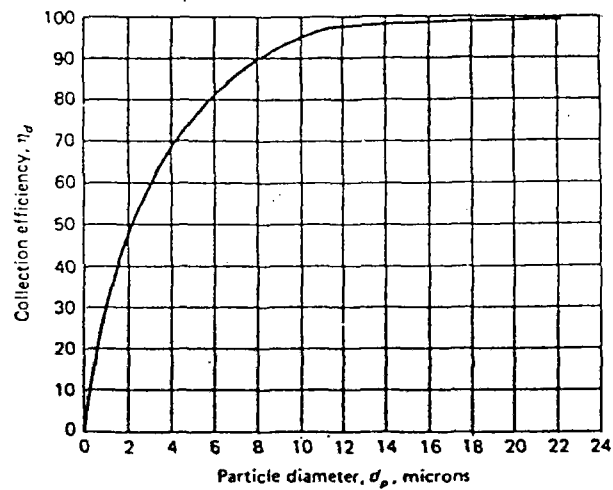
$\eta_D$  = ประสิทธิภาพการเก็บย่อยในช่วงเส้นผ่าศูนย์กลาง  $D_p$



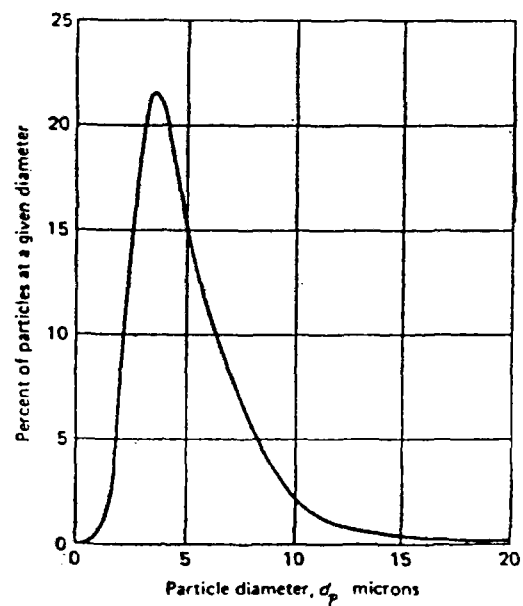
ภาพประกอบ 4 สมบัติของอนุภาคชนิดต่างๆ

ที่มา : Wark &amp; Warner, 1976 : 163-164

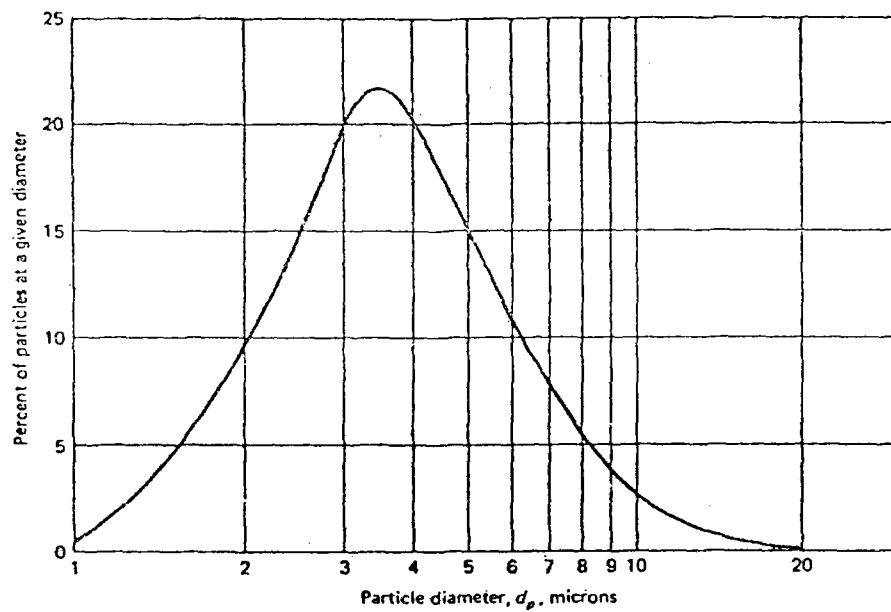
| Methods for Particle Size Analysis                             |                       |                 |                            |  | Electroformed Sieves                                 |                         |                                             |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  | *Furnishes average particle diameter but no size distribution.<br>**Size distributions may be obtained by special calibration. |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|--|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                                                                |                       |                 |                            |  | Impingers                                            | Microscope              | Sieving                                     |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
| Types of Gas Cleaning Equipment                                |                       |                 |                            |  | Ultramicroscope                                      | Electron Microscope     | Centrifuge                                  | Elutriation       |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | Ultracentrifuge                                      | Sedimentation           | Turbidimetry                                | Permeability      |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | X-Ray Diffraction                                    | Adsorption              | Light Scattering                            | Scanners          | Visible to Eye     |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | Nuclei Counter                                       | Electrical Conductivity | Machine Tools (Micrometers, Calipers, etc.) |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | Ultrasonics<br>(very limited industrial application) | Centrifugal Separators  | Liquid Scubbers                             | Cloth Collectors  | Common Air Filters | Impingement Separators |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | Thermal Precipitation<br>(used only for sampling)    | Mechanical Separators   |                                             |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | Electrical Precipitators                             |                         |                                             |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  |                                                      |                         |                                             |                   |                    |                        |                  |                  |                  |                  |                                                                                                                                |                  |                  |                  |                 |                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
| Terminal Gravitational Settling*<br>[for spheres, sp. gr. 2.0] | In Air at 25°C 1 atm. | Reynolds Number | Settling Velocity, cm/sec. |  | 10 <sup>-12</sup>                                    | 10 <sup>-11</sup>       | 10 <sup>-10</sup>                           | 10 <sup>-9</sup>  | 10 <sup>-8</sup>   | 10 <sup>-7</sup>       | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup>                                                                                                               | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>0</sup>  | 10 <sup>1</sup>  | 10 <sup>2</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>4</sup>  | 10 <sup>5</sup>  | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup>  | 10 <sup>9</sup>  | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | 2                                                    | 3                       | 5                                           | 10 <sup>-3</sup>  | 10 <sup>-2</sup>   | 10 <sup>-1</sup>       | 10 <sup>0</sup>  | 10 <sup>1</sup>  | 10 <sup>2</sup>  | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup>                                                                                                                | 10 <sup>5</sup>  | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> | 10 <sup>15</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | 10 <sup>-13</sup>                                    | 10 <sup>-12</sup>       | 10 <sup>-11</sup>                           | 10 <sup>-10</sup> | 10 <sup>-9</sup>   | 10 <sup>-8</sup>       | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup>                                                                                                               | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>0</sup>  | 10 <sup>1</sup> | 10 <sup>2</sup> | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup>  | 10 <sup>5</sup>  | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup>  | 10 <sup>9</sup>  | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> | 10 <sup>15</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | 10 <sup>-14</sup>                                    | 10 <sup>-13</sup>       | 10 <sup>-12</sup>                           | 10 <sup>-11</sup> | 10 <sup>-10</sup>  | 10 <sup>-9</sup>       | 10 <sup>-8</sup> | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup>                                                                                                               | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>0</sup> | 10 <sup>1</sup> | 10 <sup>2</sup>  | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup>  | 10 <sup>5</sup>  | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup>  | 10 <sup>9</sup>  | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> | 10 <sup>15</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
| Particle Diffusion Coefficient*<br>cm <sup>2</sup> /sec.       | In Water at 25°C.     | Reynolds Number | Settling Velocity, cm/sec. |  | 10 <sup>-10</sup>                                    | 10 <sup>-9</sup>        | 10 <sup>-8</sup>                            | 10 <sup>-7</sup>  | 10 <sup>-6</sup>   | 10 <sup>-5</sup>       | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>0</sup>                                                                                                                | 10 <sup>1</sup>  | 10 <sup>2</sup>  | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup> | 10 <sup>5</sup> | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup>  | 10 <sup>9</sup>  | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> | 10 <sup>15</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |
|                                                                |                       |                 |                            |  | 2                                                    | 3                       | 5                                           | 10 <sup>-3</sup>  | 10 <sup>-2</sup>   | 10 <sup>-1</sup>       | 10 <sup>0</sup>  | 10 <sup>1</sup>  | 10 <sup>2</sup>  | 10 <sup>3</sup>  | 10 <sup>4</sup>                                                                                                                | 10 <sup>5</sup>  | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>7</sup>  | 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>9</sup> | 10 <sup>10</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>12</sup> | 10 <sup>13</sup> | 10 <sup>14</sup> | 10 <sup>15</sup> | 10 <sup>16</sup> | 10 <sup>17</sup> | 10 <sup>18</sup> | 10 <sup>19</sup> | 10 <sup>20</sup> | 10 <sup>21</sup> | 10 <sup>22</sup> | 10 <sup>23</sup> | 10 <sup>24</sup> | 10 <sup>25</sup> | 10 <sup>26</sup> | 10 <sup>27</sup> | 10 <sup>28</sup> | 10 <sup>29</sup> | 10 <sup>30</sup> | 10 <sup>31</sup> | 10 <sup>32</sup> | 10 <sup>33</sup> | 10 <sup>34</sup> | 10 <sup>35</sup> | 10 <sup>36</sup> | 10 <sup>37</sup> | 10 <sup>38</sup> | 10 <sup>39</sup> | 10 <sup>40</sup> | 10 <sup>41</sup> | 10 <sup>42</sup> | 10 <sup>43</sup> | 10 <sup>44</sup> | 10 <sup>45</sup> | 10 <sup>46</sup> | 10 <sup>47</sup> | 10 <sup>48</sup> | 10 <sup>49</sup> | 10 <sup>50</sup> | 10 <sup>51</sup> | 10 <sup>52</sup> | 10 <sup>53</sup> | 10 <sup>54</sup> | 10 <sup>55</sup> | 10 <sup>56</sup> | 10 <sup>57</sup> | 10 <sup>58</sup> | 10 <sup>59</sup> | 10 <sup>60</sup> | 10 <sup>61</sup> | 10 <sup>62</sup> | 10 <sup>63</sup> | 10 <sup>64</sup> | 10 <sup>65</sup> | 10 <sup>66</sup> | 10 <sup>67</sup> | 10 <sup>68</sup> | 10 <sup>69</sup> | 10 <sup>70</sup> | 10 <sup>71</sup> | 10 <sup>72</sup> | 10 <sup>73</sup> | 10 <sup>74</sup> | 10 <sup>75</sup> | 10 <sup>76</sup> | 10 <sup>77</sup> | 10 <sup>78</sup> | 10 <sup>79</sup> | 10 <sup>80</sup> | 10 <sup>81</sup> | 10 <sup>82</sup> | 10 <sup>83</sup> | 10 <sup>84</sup> | 10 <sup>85</sup> | 10 <sup>86</sup> | 10 <sup>87</sup> | 10 <sup>88</sup> | 10 <sup>89</sup> | 10 <sup>90</sup> | 10 <sup>91</sup> | 10 <sup>92</sup> | 10 <sup>93</sup> | 10 <sup>94</sup> | 10 <sup>95</sup> | 10 <sup>96</sup> | 10 <sup>97</sup> | 10 <sup>98</sup> | 10 <sup>99</sup> | 10 <sup>100</sup> | 10 <sup>101</sup> | 10 <sup>102</sup> | 10 <sup>103</sup> | 10 <sup>104</sup> | 10 <sup>105</sup> | 10 <sup>106</sup> | 10 <sup>107</sup> | 10 <sup>108</sup> | 10 <sup>109</sup> | 10 <sup>110</sup> | 10 <sup>111</sup> | 10 <sup>112</sup> | 10 <sup>113</sup> | 10 <sup>114</sup> | 10 <sup>115</sup> | 10 <sup>116</sup> | 10 <sup>117</sup> | 10 <sup>118</sup> | 10 <sup>119</sup> | 10 <sup>120</sup> | 10 <sup>121</sup> | 10 <sup>122</sup> | 10 <sup>123</sup> | 10 <sup>124</sup> | 10 <sup>125</sup> | 10 <sup>126</sup> | 10 <sup>127</sup> | 10 <sup>128</sup> | 10 <sup>129</sup> | 10 <sup>130</sup> | 10 <sup>131</sup> | 10 <sup>132</sup> | 10 <sup>133</sup> | 10 <sup>134</sup> | 10 <sup>135</sup> | 10 <sup>136</sup> | 10 <sup>137</sup> | 10 <sup>138</sup> | 10 <sup>139</sup> | 10 <sup>140</sup> | 10 <sup>141</sup> | 10 <sup>142</sup> | 10 <sup>143</sup> | 10 <sup>144</sup> | 10 <sup>145</sup> | 10 <sup>146</sup> | 10 <sup>147</sup> | 10 <sup>148</sup> | 10 <sup>149</sup> | 10 <sup>150</sup> | 10 <sup>151</sup> | 10 <sup>152</sup> | 10 <sup>153</sup> | 10 <sup>154</sup> | 10 <sup>155</sup> | 10 <sup>156</sup> | 10 <sup>157</sup> | 10 <sup>158</sup> | 10 <sup>159</sup> | 10 <sup>160</sup> | 10 <sup>161</sup> | 10 <sup>162</sup> | 10 <sup>163</sup> | 10 <sup>164</sup> | 10 <sup>165</sup> | 10 <sup>166</sup> | 10 <sup>167</sup> | 10 <sup>168</sup> | 10 <sup>169</sup> | 10 <sup>170</sup> | 10 <sup>171</sup> | 10 <sup>172</sup> | 10 <sup>173</sup> | 10 <sup>174</sup> | 10 <sup>175</sup> | 10 <sup>176</sup> | 10 <sup>177</sup> | 10 <sup>178</sup> | 10 <sup>179</sup> | 10 <sup>180</sup> | 10 <sup>181</sup> | 10 <sup>182</sup> | 10 <sup>183</sup> | 10 <sup>184</sup> | 10 <sup>185</sup> | 10 <sup>186</sup> | 10 <sup>187</sup> | 10 <sup>188</sup> | 10 <sup>189</sup> | 10 <sup>190</sup> | 10 <sup>191</sup> | 10 <sup>192</sup> | 10 <sup>193</sup> | 10 <sup>194</sup> | 10 <sup>195</sup> | 10 <sup>196</sup> | 10 <sup>197</sup> | 10 <sup>198</sup> | 10 <sup>199</sup> | 10 <sup>200</sup> | 10 <sup>201</sup> | 10 <sup>202</sup> | 10 <sup>203</sup> | 10 <sup>204</sup> | 10 <sup>205</sup> | 10 <sup>206</sup> | 10 <sup>207</sup> | 10 <sup>208</sup> | 10 <sup>209</sup> | 10 <sup>210</sup> | 10 <sup>211</sup> | 10 <sup>212</sup> | 10 <sup>213</sup> | 10 <sup>214</sup> | 10 <sup>215</sup> | 10 <sup>216</sup> | 10 <sup>217</sup> | 10 <sup>218</sup> | 10 <sup>219</sup> | 10 <sup>220</sup> | 10 <sup>221</sup> | 10 <sup>222</sup> | 10 <sup>223</sup> | 10 <sup>224</sup> | 10 <sup>225</sup> | 10 <sup>226</sup> | 10 <sup>227</sup> | 10 <sup>228</sup> | 10 <sup>229</sup> | 10 <sup>230</sup> | 10 <sup>231</sup> | 10 <sup>232</sup> | 10 <sup>233</sup> | 10 <sup>234</sup> | 10 <sup>235</sup> | 10 <sup>236</sup> | 10 <sup>237</sup> | 10 <sup>238</sup> | 10 <sup>239</sup> | 10 <sup>240</sup> | 10 <sup>241</sup> | 10 <sup>242</sup> | 10 <sup>243</sup> | 10 <sup>244</sup> | 10 <sup>245</sup> | 10 <sup>246</sup> | 10 <sup>247</sup> | 10 <sup>248</sup> | 10 <sup>249</sup> | 10 <sup>250</sup> | 10 <sup>251</sup> | 10 <sup>252</sup> | 10 <sup>253</sup> | 10 <sup>254</sup> | 10 <sup>255</sup> | 10 <sup>256</sup> | 10 <sup>257</sup> | 10 <sup>258</sup> | 10 <sup>259</sup> | 10 <sup>260</sup> | 10 <sup>261</sup> | 10 <sup>262</sup> | 10 <sup>263</sup> | 10 <sup>264</sup> | 10 <sup>265</sup> | 10 <sup>266</sup> | 10 <sup>267</sup> | 10 <sup>268</sup> | 10 <sup>269</sup> | 10 <sup>270</sup> | 10 <sup>271</sup> | 10 <sup>272</sup> | 10 <sup>273</sup> | 10 <sup>274</sup> | 10 <sup>275</sup> | 10 <sup>276</sup> | 10 <sup>277</sup> | 10 <sup>278</sup> | 10 <sup>279</sup> | 10 <sup>280</sup> | 10 <sup>281</sup> | 10 <sup>282</sup> | 10 <sup>283</sup> | 10 <sup>284</sup> | 10 <sup>285</sup> | 10 <sup>286</sup> | 10 <sup>287</sup> | 10 <sup>288</sup> | 10 <sup>289</sup> | 10 <sup>290</sup> | 10 <sup>291</sup> | 10 <sup>292</sup> | 10 <sup>293</sup> | 10 <sup>294</sup> | 10 <sup>295</sup> | 10 <sup>296</sup> | 10 <sup>297</sup> | 10 <sup>298</sup> | 10 <sup>299</sup> | 10 <sup>300</sup> | 10 <sup>301</sup> | 10 <sup>302</sup> | 10 <sup>303</sup> | 10 <sup>304</sup> | 10 <sup>305</sup> | 10 <sup>306</sup> | 10 <sup>307</sup> | 10 <sup>308</sup> | 10 <sup>309</sup> | 10 <sup>310</sup> | 10 <sup>311</sup> | 10 <sup>312</sup> | 10 <sup>313</sup> | 10 <sup>314</sup> | 10 <sup>315</sup> | 10 <sup>316</sup> | 10 <sup>317</sup> | 10 <sup>318</sup> | 10 <sup>319</sup> | 10 <sup>320</sup> | 10 <sup>321</sup> | 10 <sup>322</sup> | 10 <sup>323</sup> | 10 <sup>324</sup> | 10 <sup>325</sup> | 10 <sup>326</sup> | 10 <sup>327</sup> | 10 <sup>328</sup> | 10 <sup>329</sup> | 10 <sup>330</sup> | 10 <sup>331</sup> | 10 <sup>332</sup> | 10 <sup>333</sup> | 10 <sup>334</sup> | 10 <sup>335</sup> | 10 <sup>336</sup> | 10 <sup>337</sup> | 10 <sup>338</sup> | 10 <sup>339</sup> | 10 <sup>340</sup> | 10 <sup>341</sup> | 10 <sup>342</sup> | 10 <sup>343</sup> | 10 <sup>344</sup> | 10 <sup>345</sup> | 10 <sup>346</sup> | 10 <sup>347</sup> | 10 <sup>348</sup> | 10 <sup>349</sup> | 10 <sup>350</sup> | 10 <sup>351</sup> | 10 <sup>352</sup> | 10 <sup>353</sup> | 10 <sup>354</sup> | 10 <sup>355</sup> | 10 <sup>356</sup> | 10 <sup>357</sup> | 10 <sup>358</sup> | 10 <sup>359</sup> | 10 <sup>360</sup> | 10 <sup>361</sup> | 10 <sup>362</sup> | 10 <sup>363</sup> | 10 <sup>364</sup> | 10 <sup>365</sup> | 10 <sup>366</sup> | 10 <sup>367</sup> | 10 <sup>368</sup> | 10 <sup>369</sup> | 10 <sup>370</sup> | 10 <sup>371</sup> | 10 <sup>372</sup> | 10 <sup>373</sup> | 10 <sup>374</sup> | 10 <sup>375</sup> | 10 <sup>376</sup> | 10 <sup>377</sup> | 10 <sup>378</sup> | 10 <sup>379</sup> | 10 <sup>380</sup> | 10 <sup>381</sup> | 10 <sup>382</sup> | 10 <sup>383</sup> | 10 <sup>384</sup> | 10 <sup>385</sup> | 10 <sup>386</sup> | 10 <sup>387</sup> | 10 <sup>388</sup> | 10 <sup>389</sup> | 10 <sup>390</sup> | 10 <sup>391</sup> | 10 <sup>392</sup> | 10 <sup>393</sup> | 10 <sup>394</sup> | 10 <sup>395</sup> | 10 <sup>396</sup> | 10 <sup>397</sup> | 10 <sup>398</sup> | 10 <sup>399</sup> | 10 <sup>400</sup> | 10 <sup>401</sup> | 10 <sup>402</sup> | 10 <sup>403</sup> | 10 <sup>404</sup> | 10 <sup>405</sup> | 10 <sup>406</sup> | 10 <sup>407</sup> | 10 <sup>408</sup> | 10 <sup>409</sup> | 10 <sup>410</sup> | 10 <sup>411</sup> | 10 <sup>412</sup> | 10 <sup>413</sup> | 10 <sup>414</sup> | 10 <sup>415</sup> | 10 <sup>416</sup> | 10 <sup>417</sup> | 10 <sup>418</sup> | 10 <sup>419</sup> | 10 <sup>420</sup> | 10 <sup>421</sup> | 10 <sup>422</sup> | 10 <sup>423</sup> | 10 <sup>424</sup> | 10 <sup>425</sup> | 10 <sup>426</sup> | 10 <sup>427</sup> | 10 <sup>428</sup> | 10 <sup>429</sup> | 10 <sup>430</sup> | 10 <sup>431</sup> | 10 <sup>432</sup> | 10 <sup>433</sup> | 10 <sup>434</sup> | 10 <sup>435</sup> | 10 <sup>436</sup> | 10 <sup>437</sup> | 10 <sup>438</sup> | 10 <sup>439</sup> | 10 <sup>440</sup> | 10 <sup>441</sup> | 10 <sup>442</sup> | 10 <sup>443</sup> | 10 <sup>444</sup> | 10 <sup>445</sup> | 10 <sup>446</sup> | 10 <sup>447</sup> | 10 <sup>448</sup> | 10 <sup>449</sup> | 10 <sup>450</sup> | 10 <sup>451</sup> | 10 <sup>452</sup> | 10 <sup>453</sup> | 10 <sup>454</sup> | 10 <sup>455</sup> | 10 <sup>456</sup> | 10 <sup>457</sup> | 10 <sup>458</sup> | 10 <sup>459</sup> | 10 <sup>460</sup> | 10 <sup>461</sup> | 10 <sup>462</sup> | 10 <sup>463</sup> | 10 <sup>464</sup> | 10 <sup>465</sup> | 10 <sup>466</sup> | 10 <sup>467</sup> | 10 <sup>468</sup> | 10 <sup>469</sup> | 10 <sup>470</sup> | 10 <sup>471</sup> | 10 <sup>472</sup> | 10 <sup>473</sup> | 10 <sup>474</sup> | 10 <sup>475</sup> | 10 <sup>476</sup> | 10 <sup>477</sup> | 10 <sup>478</sup> | 10 <sup>479</sup> | 10 <sup>480</sup> | 10 <sup>481</sup> | 10 <sup>482</sup> | 10 <sup>483</sup> | 10 <sup>484</sup> | 10 <sup>485</sup> | 10 <sup>486</sup> | 10 <sup>487</sup> | 10 <sup>488</sup> | 10 <sup>489</sup> | 10 <sup>490</sup> | 10 <sup>491</sup> | 10 <sup>492</sup> | 10 <sup>493</sup> | 10 <sup>494</sup> | 10 <sup>495</sup> | 10 <sup>496</sup> | 10 <sup>497</sup> | 10 <sup>498</sup> | 10 <sup>499</sup> | 10 <sup>500</sup> | 10 <sup>501</sup> | 10 <sup>502</sup> | 10 <sup>503</sup> | 10 <sup>504</sup> | 10 <sup>505</sup> | 10 <sup>506</sup> | 10 <sup>507</sup> | 10 <sup>508</sup> | 10 <sup>509</sup> | 10 <sup>510</sup> | 10 <sup>511</sup> | 10 <sup>512</sup> | 10 <sup>513</sup> | 10 <sup>514</sup> | 10 <sup>515</sup> | 10 <sup>516</sup> | 10 <sup>517</sup> | 10 <sup>518</sup> | 10 <sup>519</sup> | 10 <sup>520</sup> | 10 <sup>521</sup> | 10 <sup>522</sup> | 10 <sup>523</sup> | 10 <sup>524</sup> | 10 <sup>525</sup> | 10 <sup>526</sup> | 10 <sup>527</sup> | 10 <sup>528</sup> | 10 <sup>529</sup> | 10 <sup>530</sup> | 10 <sup>531</sup> | 10 <sup>532</sup> | 10 <sup>533</sup> | 10 <sup>534</sup> | 10 <sup>535</sup> | 10 <sup>536</sup> | 10 <sup>537</sup> | 10 <sup>538</sup> | 10 <sup>539</sup> | 10 <sup>540</sup> | 10 <sup>541</sup> | 10 <sup>542</sup> | 10 <sup>543</sup> | 10 <sup>544</sup> | 10 <sup>545</sup> | 10 <sup>546</sup> | 10 <sup>547</sup> | 10 <sup>548</sup> | 10 <sup>549</sup> | 10 <sup>550</sup> | 10 <sup>551</sup> | 10 <sup>552</sup> | 10 <sup>553</sup> | 10 <sup>554</sup> | 10 <sup>555</sup> | 10 <sup>556</sup> | 10 <sup>557</sup> | 10 <sup>558</sup> | 10 <sup>559</sup> | 10 <sup>560</sup> | 10 <sup>561</sup> | 10 <sup>562</sup> | 10 <sup>563</sup> | 10 <sup>564</sup> | 10 <sup>565</sup> | 10 <sup>566</sup> | 10 <sup>567</sup> | 10 <sup>568</sup> | 10 <sup>569</sup> | 10 <sup>570</sup> | 10 <sup>571</sup> | 10 <sup>572</sup> | 10 <sup>573</sup> | 10 <sup>574</sup> | 10 <sup>575</sup> | 10 <sup>576</sup> | 10 <sup>577</sup> | 10 <sup>578</sup> | 10 <sup>579</sup> | 10 <sup>580</sup> | 10 <sup>581</sup> | 10 <sup>582</sup> | 10 <sup>583</sup> | 10 <sup>584</sup> | 10 <sup>585</sup> | 10 <sup>586</sup> | 10 <sup>587</sup> | 10 <sup>588</sup> | 10 <sup>589</sup> | 10 <sup>590</sup> | 10 <sup>591</sup> | 10 <sup>592</sup> | 10 <sup>593</sup> | 10 <sup>594</sup> | 10 <sup>595</sup> | 10 <sup>596</sup> | 10 <sup>597</sup> | 10 <sup>598</sup> | 10 <sup>599</sup> | 10 <sup>600</sup> | 10 <sup>601</sup> | 10 <sup>602</sup> | 10 <sup>603</sup> | 10 <sup>604</sup> | 10 <sup>605</sup> | 10 <sup>606</sup> | 10 <sup>607</sup> | 10 <sup>608</sup> | 10 <sup>609</sup> | 10 <sup>610</sup> | 10 <sup>611</sup> | 10 <sup>612</sup> | 10 <sup>613</sup> | 10 <sup>614</sup> | 10 <sup>615</sup> | 10 <sup>616</sup> | 10 <sup>617</sup> | 10 <sup>618</sup> | 10 <sup>619</sup> | 10 <sup>620</sup> | 10 <sup>621</sup> | 10 <sup>622</sup> | 10 <sup>623</sup> | 10 <sup>624</sup> | 10 <sup>625</sup> | 10 <sup>626</sup> | 10 <sup>627</sup> | 10 <sup>628</sup> | 10 <sup>629</sup> | 10 <sup>630</sup> | 10 <sup>631</sup> | 10 <sup>632</sup> | 10 <sup>633</sup> | 10 <sup>634</sup> | 10 <sup>635</sup> | 10 <sup>636</sup> | 10 <sup>637</sup> | 10 <sup>638</sup> | 10 <sup>639</sup> | 10 <sup>64</sup> |



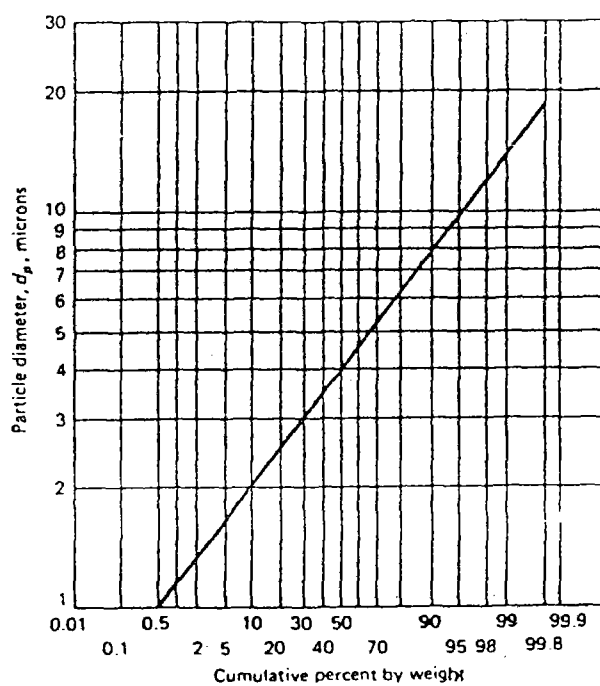
ภาพประกอบ 5 เส้นโค้งสมมุติฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บกับ  
เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  
ที่มา : Wark & Warner. 1976 : 165



ภาพประกอบ 6(1) การกระจายขนาดของอนุภาค  
ที่มา : Wark & Warner. 1976 : 166



ภาพประกอบ 6(2) การกระจายขนาดของอนุภาคแบบเชมิล็อก  
ที่มา : Wark & Warner. 1976 : 166



ภาพประกอบ 7 การกระจายขนาดของอนุภาคแบบล็อก-พروبเอบิลิตี  
ที่มา : Wark & Warner. 1976 : 167

2.1.6 การวัดประสิทธิภาพของการควบคุม โดยทั่วไปการบรรลุประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่น ที่ต้องการโดยใช้เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นเพียงประเภทเดียว เป็นสิ่งที่ทำได้ลำบากขึ้นกับลักษณะสมบัติ และความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่จะกำจัดการใช้ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นหลายประเภทที่เหมาะสมร่วมกันเป็นสิ่งที่แนะนำให้ทำ ประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{W_e}{W_i} \times 100 \quad (3)$$

ในที่นี้  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น (ร้อยละ หรือ %)

$W_e$  คือ ปริมาณของอนุภาคฝุ่นที่เครื่องเก็บได้ (กก/ชม)

$W_i$  คือ ปริมาณของอนุภาคฝุ่นที่เข้าเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (กก/ชม)

อย่างไรก็ดี ในภาคปฏิบัติ จะคำนวณประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นจากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \left( 1 - \frac{W_o}{W_i} \right) \times 100 \quad (4)$$

โดยที่  $W_i$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในท่อที่ทางเข้าของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (กรัม/ลบ.เมตร)

$W_o$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในท่อที่ทางออกของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (กรัม/ลบ.เมตร)

สมการ (4) สามารถใช้ได้กับเมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่ท่อทางเข้าและท่อทางออกมีค่าเท่ากัน ในกรณีอื่น เช่น ที่มีการผลิตไอน้ำขึ้นในกระบวนการ เช่น ในเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบเปียก หรือกรณีที่มีการฉีดก๊าซทุติยภูมิ (Secondary Gas) การคำนวณประสิทธิภาพต้องใช้สมการต่อไปนี้

$$\eta = \left( 1 - \frac{W_o}{W_i} \times \frac{Q_o}{Q_i} \right) \times 100 \quad (5)$$

โดยที่  $Q_o$  คือ อัตราการไหลของก๊าซในท่อทางออกของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น [ที่สภาวะ 0 °ซ และ 1 บรรยากาศ (ลบ.ม/นาที่)]

$Q_i$  คือ อัตราการไหลของก๊าซในท่อทางเข้าของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น [ที่สภาวะ 0 °ซ และ 1 บรรยากาศ (ลบ.ม/นาที่)]

ในกรณีของเครื่องแบบถุงกรอง และเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคฝุ่นสูงอาจใช้อัตราการผ่านของอนุภาคฝุ่น (Dust Passage Rate) แสดงแทนประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น

$$P = 100 - \eta \quad (6)$$

โดยที่  $P$  คือเปอร์เซ็นต์ของอัตราการผ่านของอนุภาคฝุ่น

โดยทั่วไป อนุภาคฝุ่นที่มีอยู่ในก๊าซทั้งจะมีอนุภาคขนาดต่างๆ กันผสมกันอยู่ในอัตราส่วนผสมต่างๆ กัน และการเก็บอนุภาคหยาบจะทำให้ได้ง่ายกว่าอนุภาคละเอียด ดังนั้นในบางครั้ง เรามีความจำเป็นต้องทำการวัดประสิทธิภาพการเก็บสำหรับอนุภาคในขนาดช่วงเล็กๆ  $D_p \pm \Delta D$  แทนการวัดประสิทธิภาพรวมของอนุภาคทุกขนาดที่มีอยู่ ค่าประสิทธิภาพเฉพาะช่วงของขนาดนี้ มีชื่อเรียกว่า ประสิทธิภาพย่อย (Partial or Grade Efficiency) สำหรับช่วงอนุภาคขนาด  $D_p$  ประสิทธิภาพย่อย  $\eta_{D_p}$  สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{D_p} = \left( \frac{1 - W_o D_p}{W_i D_p} \right) \times 100 \quad (7)$$

ในที่นี้  $W_o D_p$  คือความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคในช่วง  $D_p \pm \Delta D_p$  ที่ช่องทางเข้าของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (กรัม/ลบ.ม)

$W_i D_p$  คือความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคในช่วง  $D_p \pm \Delta D_p$  ที่ช่องทางออกของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (กรัม/ลบ.ม)

ถ้าให้  $f(D_p)$  เป็นฟังก์ชันของการกระจายตามขนาดอนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวม  $\eta$  และประสิทธิภาพย่อย  $\eta_{D_p}$  จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\eta = \int f(D_p) \eta_{D_p} \times d D_p \quad (8)$$

ถ้าให้  $R(D_p)$  เป็นฟังก์ชันของจำนวนอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า  $D_p$  ค่า  $\eta$  ยังอาจคำนวณได้จาก

$$\eta = \int \left( \frac{dR}{dD_p} \right) \times \eta_{D_p} \times d D_p \quad (9)$$

ในกรณีที่ระบบประกอบด้วยเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นหลายเครื่องที่มีสมรรถนะในการกำจัดอนุภาคฝุ่นต่างกัน ควรทำการวัดและบันทึกข้อมูลของแต่ละเครื่องด้วย เมื่อต่ออนุกรมเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นสองเครื่องที่เป็นแบบเดียวกันหรือแบบต่างกัน ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นรวมของทั้งระบบ  $\eta_T$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_T = \eta_p + \eta_s(100 - \eta_p) \quad (10)$$

$\eta_p$  คือประสิทธิภาพของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นเครื่องแรก (%)

$\eta_s$  คือประสิทธิภาพของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นเครื่องที่สอง (%) ซึ่งคำนวณจากเงื่อนไขของก๊าซและความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่ทางเข้าของเครื่องนี้

ในกรณีที่ต่ออนุกรมเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบเดียวกัน  $n$  เครื่อง ประสิทธิภาพรวมของระบบสามารถคำนวณได้จาก (ศิริกัลยา สุจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 178-180)

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_o)^n \quad (11)$$

ในที่นี้  $\eta_T$  คือประสิทธิภาพรวมในหน่วยเศษส่วน (-)

$\eta_o$  คือประสิทธิภาพของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแต่ละเครื่องในหน่วยเศษส่วน (-)

## 2.2 การควบคุมและการเก็บรวบรวมอนุภาคฝุ่น

การควบคุมมลภาวะมีสองลักษณะ ลักษณะแรกคือ การลดการผลิตมลสารให้น้อยที่สุด และลักษณะที่สองคือ การกำจัดมลสารที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยทั่วไป ควรให้ความสำคัญต่อลักษณะแรกมากกว่า การควบคุมในลักษณะที่สอง ควรทำเมื่อการควบคุมในลักษณะแรกดีไม่เพียงพอ เทคโนโลยีของการกำจัดมลสาร ในที่นี้ จะกล่าวถึงวิธีการลดการผลิตของมลสารในอากาศ และความรู้เบื้องต้นของเทคโนโลยีการกำจัดมลสาร (ศิริกัลยา สุจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 170)

2.2.1 การเลือกกระบวนการบำบัดอนุภาคฝุ่น เมื่อปริมาณของอนุภาคฝุ่น (อนุภาคและมลสาร) ที่เกิดจากแหล่งผลิตมีค่าเกินกว่าระดับที่ระบุไว้ในมาตรฐานปล่อยออก จึงมีความจำเป็นต้องประยุกต์ใช้วิธีเก็บฝุ่นที่เหมาะสม การเลือกกระบวนการบำบัดอนุภาคฝุ่นที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงปัจจัยดังนี้คือ กระบวนการเก็บอนุภาคฝุ่น ความต้องการด้านอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายของกระบวนการ สำหรับกระบวนการเก็บอนุภาคฝุ่น สิ่งที่ต้องศึกษาคือลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่นที่จะเก็บและลักษณะสมบัติการไหลของก๊าซทั้ง ลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่น ได้แก่ การกระจายตามขนาดอนุภาค ความหนาแน่น (หรือความถ่วงจำเพาะ) ที่แท้จริงของอนุภาค รูปทรงของอนุภาค ลักษณะสมบัติการติดเกาะ การรวมก้อน (Agglomeration) การเสียดสี (Abrasion) และคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าสถิต ลักษณะสมบัติดูดความชื้น (Hygroscopicity) อุณหภูมิติดไฟ และความเข้มข้นในก๊าซ ลักษณะสมบัติของการไหลของก๊าซที่ต้องตรวจสอบในการเลือกเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น คือ อัตราการไหล อุณหภูมิ ความชื้น ฤกษ์กัดกร่อน กลิ่น ความหนืด ลักษณะสมบัติการเกิดระเบิดของอนุภาคฝุ่นและอื่นๆ ส่วนปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งเครื่องเก็บฝุ่น ได้แก่ การใช้ น้ำกระบวนการ (Process Water) มี การใช้ในกระบวนการเก็บแบบเปียกหรือไม่ การเก็บความร้อนทิ้งกลับมาใช้ การกำจัด (Dispose) ฝุ่นที่เก็บรวบรวมได้ การเก็บอนุภาคฝุ่นเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By Products) และขีดจำกัดด้านตำแหน่งที่ตั้งหรือพื้นที่ติดตั้ง ค่าใช้จ่ายของกระบวนการควรรวมทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า ค่ากำจัดของทิ้ง ค่าน้ำกระบวนการ ค่าวัสดุ ค่าบำบัดก๊าซสกปรกก่อนเข้าเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ค่าแรงงาน ค่าประกันภัย และค่าเสื่อมราคา นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการศึกษาทางวิศวกรรม ค่าออกแบบหน่วยหลักและหน่วยพ่วง ค่างานก่อสร้างและงานวิศวกรรมโยธา ตลอดจนค่าทดสอบการทำงานในการประเมินระบบทำความสะอาดก๊าซที่ประหยัดที่สุดและในการเลือกเครื่องเก็บฝุ่นที่เหมาะสมที่สุด เครื่องเก็บฝุ่นที่มีใช้กันในปัจจุบัน สามารถแบ่งประเภทตามกลไกของการแยกฝุ่นดังตาราง 1 ในแง่ของสมรรถนะในการเก็บอนุภาคฝุ่นแล้ว เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรอง (Bag Filter) จะดีที่สุด แต่ เนื่องจากความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านถุงกรองต้องมีค่าต่ำมากคือประมาณ 1 เมตร/นาที่ ดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงมีขนาดโตมหาศาลถ้าต้องการบำบัดก๊าซในปริมาณมากๆ นอกจากนี้ ก็ยังมีจุดอ่อนเรื่องทนก๊าซอุณหภูมิสูง และความชื้นสูงไม่ได้ ในกรณีดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) แทน เพราะสามารถบำบัดก๊าซความเร็วสูงและก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงได้ด้วย ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะสมบัติในการเก็บอนุภาคฝุ่นด้อยกว่าเครื่องแบบถุงกรองเล็กน้อย อนึ่ง เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบสกรับเบอร์

บางชนิดก็มี สมรรถนะในการเก็บอนุภาคฝุ่นดีเลิศ แต่ในกรณีเช่นนี้ ความดันสูญเสียจะมีค่าสูงชันอย่างมาก และยังก่อปัญหาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วย ดังนั้น ในปัจจุบัน จึงไม่ค่อยใช้ เครื่องแบบนี้เพื่อจุดประสงค์เก็บอนุภาคฝุ่นเพียงอย่างเดียว

ตาราง 1 การแบ่งประเภทเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นและลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่น

| ประเภทของเครื่อง<br>เก็บอนุภาคฝุ่น | อนุภาคขนาดเล็กที่สุดแยก<br>เก็บได้<br>(ไมโครเมตร) | ความดัน<br>สูญเสีย<br>(มม. H <sub>2</sub> O) | อุณหภูมิ<br>ใช้<br>งานสูงสุด<br>( ° ซ ) | ความ<br>เข้มข้น<br>ที่ทางเข้า<br>(กรัม/ลบ.ม) | หมายเหตุ                     |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|
| แบบแรงโน้มถ่วง                     | 20                                                | ~15                                          | 1,000                                   | ~10                                          | ใช้ติดตั้งหน้าเครื่องแบบอื่น |
| แบบแรงเฉื่อย                       | 20                                                | ~50                                          | 1,000                                   | ~10                                          | ใช้ติดตั้งหน้าเครื่องแบบอื่น |
| ไซโคลแบบ                           | 1                                                 | ~200                                         | 1,000                                   | ~5                                           | โครงสร้างแบบง่าย             |
| ถุงกรองแบบ                         | 0.01                                              | ~200                                         | 250                                     | 0.1~20                                       | ใช้กับก๊าซควบแน่นไม่ได้      |
| ชั้นของวัสดุเม็ด                   | 0.1                                               | ~300                                         | 1,000                                   | 0.1~20                                       | ยังใช้กันไม่แพร่หลาย         |
| แบบสกรีนเบอร์                      | 0.2                                               | ~2,000                                       | -                                       | 1~100                                        | ต้องมีอุปกรณ์บำบัดน้ำทิ้ง    |
| แบบไฟฟ้าสถิต                       | 0.02                                              | ~30                                          | 1,000                                   | 1~50                                         | ห้ามใช้กับก๊าซที่ระเบิดได้   |

ที่มา : ศิริภัสยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 172

ตาราง 2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นประเภทต่างๆ

| ประเภท                                              | ข้อดี                                                                                                                                                                                                                                       | ข้อเสีย                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เครื่องเก็บอนุ -<br>ภาคฝุ่นแบบ<br>แรงโน้มถ่วง       | ความดันสูญเสียมีน้อย โครงสร้างง่าย ๆ<br>และบำรุงรักษาง่าย                                                                                                                                                                                   | ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ประสิทธิภาพต่ำ                                                                                                                                     |
| เครื่องเก็บ<br>อนุภาคฝุ่น<br>แบบแรงหนี<br>ศูนย์กลาง | โครงสร้างง่าย บำรุงรักษาง่าย และใช้พื้นที่<br>ติดตั้งน้อยปล่อยอนุภาคฝุ่นที่เก็บได้<br>ออกอย่างต่อเนื่องความดันสูญเสียไม่สูง<br>นักเหมาะกับการเก็บอนุภาคหยาบเหมาะ<br>กับก๊าซที่มีภาระของอนุภาคฝุ่นสูงด้วยมี<br>ผลกระทบน้อยจากอุณหภูมิของก๊าซ | จำเป็นต้องมีห้องทางเข้าของก๊าซหลาย<br>ห้องประสิทธิภาพต่ำในการเก็บอนุภาคฝุ่น<br>ละเอียด ไวต่อการแปรเปลี่ยนของภาระ<br>ของอนุภาคฝุ่นและอัตราการไหล                         |
| ถุงกรอง                                             | เป็นกระบวนการแห่งตรวจสอบการทำงาน<br>ผิดปกติได้ง่ายเก็บอนุภาคละเอียดได้<br>มีประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นสูง                                                                                                                               | รับผลกระทบมากจากความเร็วในการกรอง<br>ต้องลดอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้เหลือ 90<br>ถึง 280 ° ซ ก่อนที่จะบำบัด รับผลกระทบ<br>จากความชื้น (เกิดการรวมก้อนของฝุ่นใน<br>ก๊าซขึ้น) |

ตาราง 2 (ต่อ)

| ประเภท                              | ข้อดี                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ข้อเสีย                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เครื่อง<br>สกรับเบอร์               | ดูดกลืนก๊าซและเก็บอนุภาคฝุ่นได้ในชั้น<br>ตอนเดียว สามารถลดอุณหภูมิและชะล้าง<br>ก๊าซ อุณหภูมิสูงและความชื้นสูงเหมาะกับการ<br>กำจัดและทำให้เป็นกลาง<br>(Neutralization) ของก๊าซฤทธิ์ กัดกร่อน<br>และหมอกน้ำค้าง (Mist) มีอัตราายน้อย<br>จากการระเบิดของฝุ่นสามารถควบคุม<br>ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น                                                                         | มีปัญหาการสุกร้อนและสึกหรอ เสียค่าใช้จ่าย<br>เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับการกำจัดน้ำทิ้งและการ<br>ฟื้นฟูสภาพ ของเหลวที่ใช้น้ำบำบัดอันตรายเมื่อ<br>เกิดการแข็งตัวในเขตหนาวจัดแรงลอยตัว<br>ของก๊าซลดลงและกำลังของการลอยขึ้นและ<br>การกระจายตัวของก๊าซลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำ<br>มองเห็นควันขาวของไอน้ำใน<br>สภาวะบรรยากาศบางเงื่อนไข |
| เครื่องตก<br>ตะกอนเชิงไฟ<br>ฟ้าสถิต | สามารถบรรลุประสิทธิภาพร้อยละ 99<br>หรือสูงกว่าเก็บอนุภาคละเอียดได้<br>ประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกระบวนการแห้งและ<br>เปียก ความดันสูญเสียต่ำกว่าและใช้ไฟ<br>ฟ้าน้อยกว่าเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ประ<br>สิทธิภาพสูงประเภทอื่น ต้องการการบำรุง<br>รักษาปานกลาง ยกเว้นเวลาบำบัด<br>อนุภาคฝุ่นฤทธิ์กัดกร่อนหรือเหนียว<br>เหนอะ มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวน้อยกว่า<br>สามารถบำบัดก๊าซอุณหภูมิได้ | ค่าใช้จ่ายแรกเริ่มสูง วิศวกรรมการแปรเปลี่ยน<br>ของภาระของอนุภาคฝุ่นและอัตราการไหล<br>มีความสัมพันธ์ทางเศรษฐศาสตร์น้อยกว่า ใน<br>กรณีของฝุ่นบางประเภทที่มีความต้านทาน<br>ไฟฟ้าสูง ต้องมีวิธีป้องกันสำหรับไฟฟ้า<br>ความดันสูง ประสิทธิภาพในการกำจัด<br>อนุภาคฝุ่นมีแนวโน้มลดลงที่ละน้อยตามอายุ<br>การใช้งาน             |
| เครื่องเผาภายหลัง<br>(After Burner) | กำจัดก๊าซกลิ่นเหม็นได้ กำจัดก๊าซติดไฟ<br>และอนุภาคฝุ่นติดไฟได้พร้อมกัน ใช้พื้นที่<br>ติดตั้งน้อย โครงสร้างง่าย ๆ บำรุงรักษา<br>ง่าย ลดภัยอันตรายจากการเกิดอัคคีภัย                                                                                                                                                                                                              | ค่าใช้จ่ายเดินเครื่องสูง อันตรายจากอัคคีภัย<br>มีประสิทธิผลเฉพาะก๊าซและอนุภาคฝุ่นติด<br>ไฟ ค่าใช้จ่ายแรกเริ่มสูง (กระบวนการตัวเร่ง<br>ปฏิกิริยา) ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ใช้อาจเสื่อมคุณ<br>ภาพ จำเป็นต้องฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา                                                                                      |

ที่มา : ศิริกัลยา สุจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 173

ตาราง 2 รวบรวมข้อดีและข้อเสียของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นประเภทต่างๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะขึ้นกับประเภทของเครื่องที่ใช้ ข้อมูลข้างล่างแสดงค่าประสิทธิ ภาพทั่วไปที่มักพบเห็น ประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นยังขึ้นกับภาระเกิน (Over-Load) ที่ใช้กับเครื่องเก็บอนุภาค ฝุ่น และขึ้นกับการบำรุงรักษาทำไว้ดีหรือไม่ ตัวเลขที่ให้ไว้ข้างบนควรถือว่าเป็นค่าบอกอย่างหยาบๆ ของ ประสิทธิภาพแรกเริ่มในการเก็บอนุภาคฝุ่น เมื่อเดินเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นเหล่านี้ในสภาวะปกติ อายุใช้งาน ของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นประเภทต่างๆ ต่อ 11 ปี สำหรับแบบเปียก 15 ปี สำหรับแบบมัลติไซโคลน (Multi-Cyclone) 9 ปี สำหรับเครื่องกรองแบบเส้นใย อย่างไรก็ตามในภาคปฏิบัติจริง มักพบกรณีที่อายุใช้งานมีสั้น กว่าที่กล่าวมาอย่างมาก ดังนั้น เป็นข้อเสนอแนะที่ดีที่จะคิดวาระระยะเวลาในภาคปฏิบัติที่แน่ใจได้ว่าประสิทธิ ภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะน่าพอใจ คือประมาณ 1/2 หรือ 1/3 ของตัวเลขอายุใช้งานข้างต้น สิ่งสำคัญที่

ควรจำไว้ให้ตึกคือ สมรรถนะของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นจะแตกต่างกันได้มากขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นก่อนที่จะตัดสินใจซื้อเครื่องแบบไหน ควรตรวจสอบเงื่อนไขการบริการ (ซ่อมแซม) อย่างละเอียดของบริษัทต่ออุปกรณ์ที่คล้ายคลึงกัน ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นอาจแปรตามประเภทและเงื่อนไข ปฏิบัติการของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ตาราง 3 แสดงสูตรคำนวณค่าใช้จ่ายเหล่านี้ ซึ่งมีเผยแพร่ในสหรัฐอเมริกา ตาราง 4 แสดงค่าประเมินอย่างคร่าวๆ ของค่าลงทุนติดตั้งเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

|                                         |                |
|-----------------------------------------|----------------|
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถูกรอง          | ร้อยละ 95-99   |
| เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต             | ร้อยละ 80-99.5 |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบเปียก           | ร้อยละ 75-99   |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง | ร้อยละ 50-95   |
| เครื่องเผาภายหลัง (After Burner)        | ร้อยละ 50-99   |

ตาราง 3 สูตรคำนวณทั่วไปสำหรับค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น

| ประเภท                                  | สูตรคำนวณทั่วไป                                                                |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง | $G = S \left[ \frac{0.7457PHK + M}{6,356E} \right]$                            |
| เครื่องสกรับเบอร์                       | $G = S \left[ 0.7457 HK \left( Z + \frac{Qh}{1,980} \right) + WHL + M \right]$ |
| เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต             | $G = S [JHK + M]$                                                              |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบกรอง            | $G = S \left[ \frac{0.7457PHK + M}{6,356E} \right]$                            |
| เครื่องเผาภายหลัง                       | $G = S \left[ \frac{0.7457PHK + F + M}{6,356E} \right]$                        |

ที่มา : กระทรวงสาธารณสุขของสหรัฐอเมริกา. 1969. "เทคนิคการควบคุมมลสารอนุภาคในอากาศ"

G = ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง / ค่าบำรุงรักษาต่อไป (ดอลลาร์)

S = ความจุที่ออกแบบของเครื่อง (ปริมาตรจริงของก๊าซ) (cfm นั่นคือ ลบ.ฟุต / นาที)

P = ความดันสูญเสีย (นิ้ว H<sub>2</sub>O)

H = ชั่วโมงที่เดินเครื่องต่อปี (ชม.)

M = ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่อปี (ดอลลาร์ / (ลบ ฟุต/นาที))

- $K$  = อัตราค่าไฟฟ้า (ดอลลาร์/กิโลวัตต์-ชม)  
 $E$  = ประสิทธิภาพของพัดลม (ค่าจริง) (-)  
 $F$  = ราคาเชื้อเพลิงต่อปี (ดอลลาร์ / (ลบ ฟุต/นาทีก))  
 $W$  = ปริมาณของเหลวที่ใส่เข้า (แกลลอน/(ลบ ฟุต/นาทีก)/ชม)  
 $L$  = ราคาของของเหลวที่ใส่เข้า (ดอลลาร์/แกลลอน)  
 $Z$  = ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด (กำลังทั้งหมดที่ต้องใช้ซึ่งขึ้นกับแรงม้าต่อ cfm)  
 $j$  = ปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์/(ลบ.ฟุต/นาทีก))  
 $h$  = ระดับน้ำที่ยกขึ้นโดยปั๊มน้ำของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น (ฟุต)  
 $Q$  = ปริมาณหมุนเวียนของน้ำ (แกลลอน/(ลบ.ฟุต/นาทีก))

ตาราง 4 ค่าใช้จ่ายแรกเริ่ม (เงินลงทุน) ของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น

| ประเภท                                            | ค่าใช้จ่ายแรกเริ่มโดยประมาณ (หน่วย : 1,000 ดอลลาร์)<br>ปริมาตรของก๊าซที่ต้องการบำบัด (หน่วย : ลบ.ฟุต/นาทีก)<br>ปริมาตรที่สภาวะปกติ |     |     |    |     |     |     |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
|                                                   | 2                                                                                                                                  | 5   | 10  | 15 | 100 | 300 | 500 |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง               | 0.5                                                                                                                                | 1.2 | 2.6 | 15 | 28  | -   | -   |
| เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นเชิงกล                       | -                                                                                                                                  | -   | 4   | 13 | 23  | 80  | -   |
| เครื่องสครับเบอร์                                 | -                                                                                                                                  | 7.5 | 10  | 30 | 55  | 150 | -   |
| เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต<br>แบบความดันไฟฟ้าสูง | -                                                                                                                                  | -   | -   | 85 | 120 | 265 | 415 |
| เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต<br>แบบความดันไฟฟ้าต่ำ | -                                                                                                                                  | -   | 13  | 24 | 105 | 200 | -   |
| ผ้ากรอง (อุณหภูมิต่ำ : 280°F)                     | -                                                                                                                                  | -   | 30  | 88 | 155 | 430 | 720 |
| ผ้ากรอง (อุณหภูมิสูง : 120°F)                     | -                                                                                                                                  | -   | 15  | 45 | 82  | 225 | 375 |
| เครื่องเผาภายหลัง (เปลวไฟโดยตรง)                  | 82                                                                                                                                 | 12  | 18  | -  | -   | -   | -   |
| เครื่องเผาภายหลัง (ตัวเร่งปฏิกิริยา)              | 16                                                                                                                                 | 20  | 29  | -  | -   | -   | -   |

ที่มา : กระทรวงสาธารณสุขของสหรัฐอเมริกา. 1969. "เทคนิคการควบคุมมลสารอนุภาคในอากาศ"

ตาราง 5 ประเภทของอนุภาคฝุ่นและเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นในอุตสาหกรรมต่างๆ

| อุตสาหกรรม                       | แหล่งกำเนิดของอนุภาคฝุ่น                                                  | ประเภทของอนุภาคฝุ่น                                                      | เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นที่ใช้                                                                       |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| อุตสาหกรรมเหล็กกล้า              | Blast Furnace, Converter, Sintering Plant การขนส่งวัสดุ                   | ออกไซด์ของเหล็ก ฝุ่น ควัน                                                | ไซโคลน บ้านดูดกรอง เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า สถิตเครื่องเก็บ อนุภาคฝุ่นแบบเปียก                     |
| โรงหล่อโลหะ                      | Cupola, เครื่องตักออก, เครื่องทำแกน(Core Making)                          | ออกไซด์ของเหล็ก ฝุ่น ควัน น้ำมัน จาระบี และ ฟุม (Fume) ของโลหะ           | เครื่องสกรับเบอร์ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางแบบแห้ง                                 |
| อุตสาหกรรมถลุงโลหะโรงกลั่นน้ำมัน | เตาถลุง เตาหลอม เครื่องพื้นสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องเผาสลัดจ์ (sludge) | ควัน ฟุมของโลหะ น้ำมัน จาระบี ฝุ่นตัวเร่งปฏิกิริยา สลัดจ์และเถ้าบิน      | เครื่องสกรับเบอร์ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางแบบแห้ง                                 |
| อุตสาหกรรมซีเมนต์                | Kiln เครื่องอบแห้ง หน่วยแปรรูปอื่นๆ                                       | Alkali อนุภาคฝุ่นจากกระบวนการผลิต                                        | ผ้ากรอง เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เครื่องเก็บฝุ่นเชิงกล                                         |
| โรงกรดฟอสฟอริกและกรดกำมะถัน      | Heat Treatment, Phosphate Ore Acidification การบดย่อย การขนส่ง            | Acid Mist อนุภาคฝุ่น                                                     | เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, Mesh-Type Eliminator                                                 |
| การผลิตโค้ก (coke)               | การเติมวัสดุเข้า Coke Oven การถ่ายผลิตภัณฑ์ ออก Quenching การขนส่ง        | ฝุ่นของถ่านหินและโค้ก                                                    | ต้องใช้ความระมัดระวังสูงสุดในการออกแบบ เดินเครื่องและบำรุงรักษา เครื่องกรอง เครื่องเก็บฝุ่นเชิงกล |
| อุตสาหกรรมแก้ว                   | การขนส่งวัสดุ การผลิต เส้นใยแก้ว                                          | Mist ของกรดกำมะถัน อนุภาคฝุ่นของวัตถุดิบ ออกไซด์ของ Alkali Resin Aerosol | เครื่องกรองแบบเส้นใยแก้ว เครื่องเผาภายหลัง                                                        |
| อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ            | เตาเก็บกลับสารเคมี, Smelt Tank, Lime Kiln                                 | อนุภาคฝุ่นของสารเคมี                                                     | เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เครื่องเวนทริสกรับเบอร์                                               |

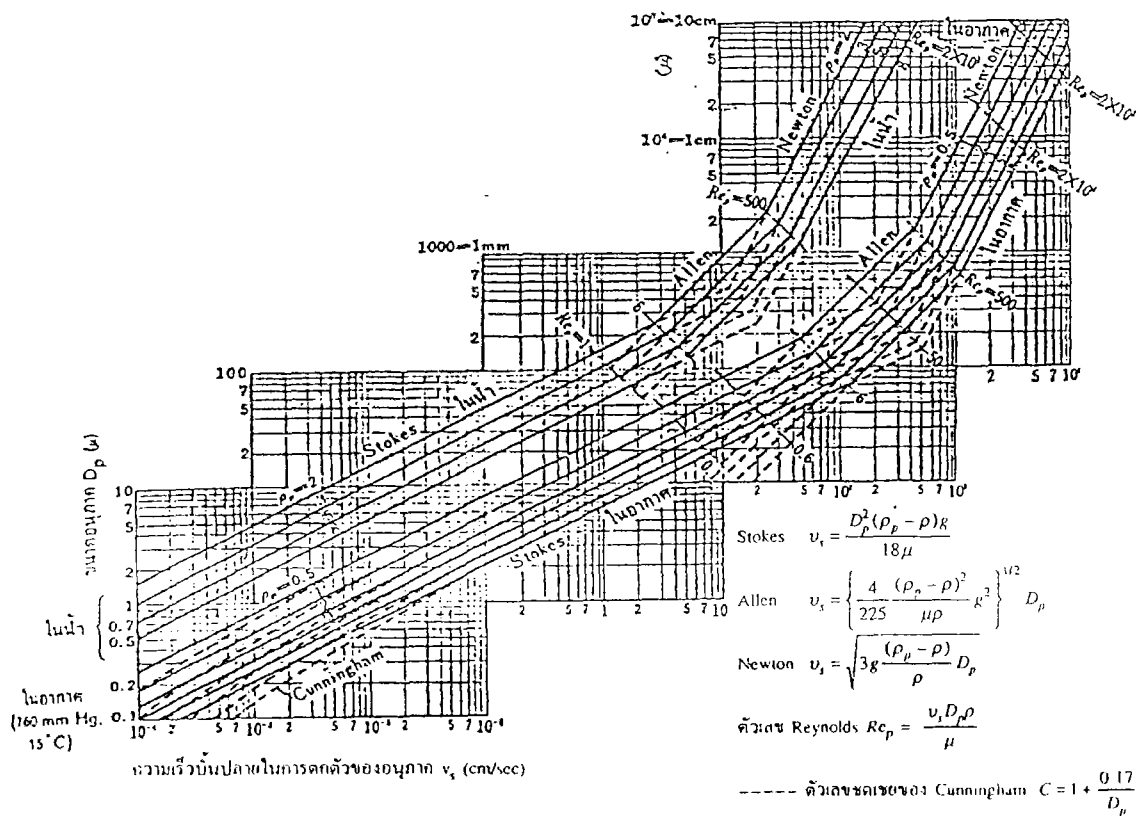
ที่มา : ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 173-178

## 2.2.2 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง

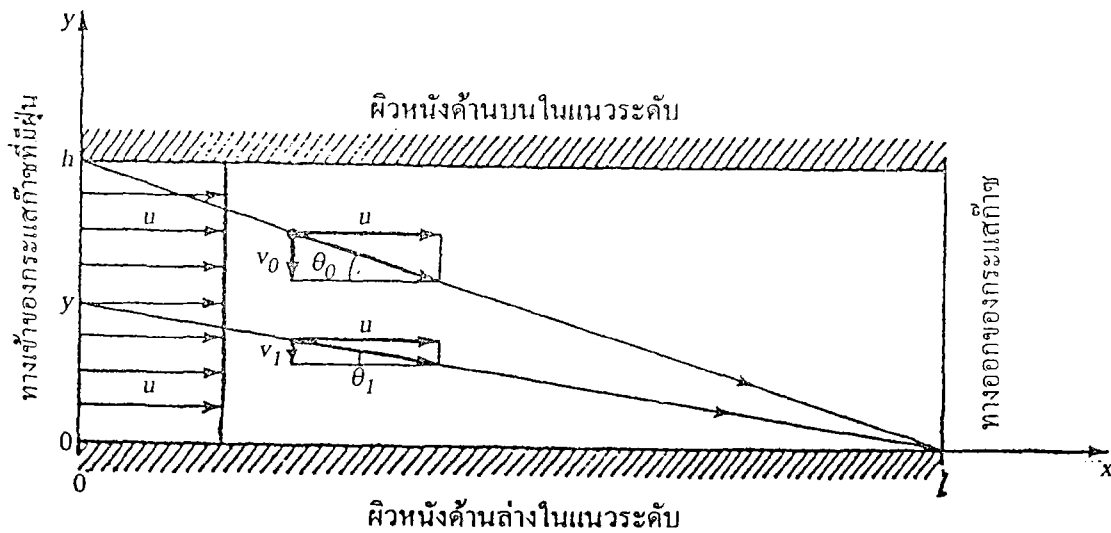
### 2.2.2.1 กลไกของการเก็บอนุภาคฝุ่น

### เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง

(Gravitational Dust Collector) เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกและเก็บอนุภาคฝุ่น โดยอาศัยการตกตัวอย่างธรรมชาติของอนุภาคเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ภาพประกอบ 8 แสดงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของการตกตัวของอนุภาคฝุ่นทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $D_p$  ไมโครเมตรในกรณีที่กระแสน้ำไหลที่อุณหภูมิมีฝุ่นกำลังไหลอยู่ในแนวระดับ กลุ่มของเส้นกราฟด้านบนในรูปแบบของกรณีที่กระแสน้ำไหลเป็นน้ำ ส่วนกลุ่มด้านล่างเป็นของกรณีอากาศที่  $15^\circ \text{C}$  และ 760 มม.ปรอท ในภาพประกอบ 8  $V_s$  คือความเร็วของการตกตัวที่เปลี่ยนแปลงของอนุภาค  $P_p$  คือความหนาแน่นของของไหล  $\mu$  คือความหนืดของของไหล  $g$  คืออัตราเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก  $Re_p$  คือตัวเลขเรย์โนลด์ (reynolds Number) ของอนุภาค และ  $C$  คือ ตัวชดเชยของคันทันนิ่งแฮม ในภาพประกอบ 9 แสดงการตกตัวของอนุภาคจากกระแสน้ำที่ก่อกวนไหลอยู่ระหว่างผนังขนาดที่วางอยู่ในแนวระดับ อนุภาคฝุ่นจะมีความเร็วในแนวระดับ  $u$  เท่ากับความเร็วของก๊าซ ถ้าให้ความเร็วของการตกตัวที่เปลี่ยนแปลงเป็นความเร็วที่คำนวณได้จากสมการของสโตกส์ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของความสูง  $y$  ที่อนุภาควิ่งเข้ากับความยาว  $x$  ของผนังขนาดที่อนุภาคตกตัวได้พอดี จะเป็นดังนี้



ภาพประกอบ 8 ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของการตกตัวของอนุภาคทรงกลมโดยแรงโน้มถ่วง (ภายในน้ำ และภายในอากาศ อุณหภูมิและความดันปกติ)



ภาพประกอบ 9 การตกตัวของอนุภาคด้วยแรงโน้มถ่วงจากกระแสก๊าซที่ไหลแบบชั้นๆ ระหว่างผนังขนาดในแนว ระดับ

$$\tan \theta_1 = \frac{V_1}{u} = \frac{D_p^2 P_p g}{18\mu u} = \frac{y}{1} \quad (12)$$

ในกรณีนี้ อนุภาคขนาดโตกว่า  $D_{p\infty}$  ซึ่งคำนวณได้จากการแทน  $y = h$  (ช่องว่างของผนังขนาด) โดยให้  $V_1 = V_0$  จะตกตัวทั้งหมดภายในผนังขนาด ส่วนอนุภาคที่มีขนาด  $D_p$  เล็กกว่า ( $D_p < D_{p\infty}$ ) ในสมการข้างต้นจะตกตัวและถูกจับเป็นอัตราส่วนเท่ากับ  $y/h$  นั่นคือประสิทธิภาพของการจับอนุภาคที่มีขนาด  $D_p$  หรือประสิทธิภาพย่อย  $\Delta\eta$  จะแปรผันตาม  $D_p^2$  ดังนี้

$$\text{ในที่นี้ } \Delta\eta = \frac{y}{h} = \frac{P_p^{g102} p}{18\mu u h} \quad (13)$$

$$\text{ในที่นี้ } \Delta\eta = 1(=100\%) \text{ เมื่อ } D_p \geq D_{p\infty}$$

ตัวอย่างที่ 1 อากาศที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศกำลังไหลเข้าห้องตกตะกอนด้วยความเร็วในแนวระดับ  $u = 1$  ม/วินาที ขนาดของห้องตกตะกอนสี่เหลี่ยมนี้คือ ความยาว  $l = 3$  ม ความสูง  $h =$  ซม และความกว้าง  $b = 1$  ม จงหาปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่อง  $Q$  และประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่มีอยู่ในอากาศนี้ สมมติ ว่าความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาคคือ  $P_p = 3$  กรัม/ลบ.ซม

วิธีทำ ปริมาณอากาศที่ไหลเข้าเครื่อง คือ

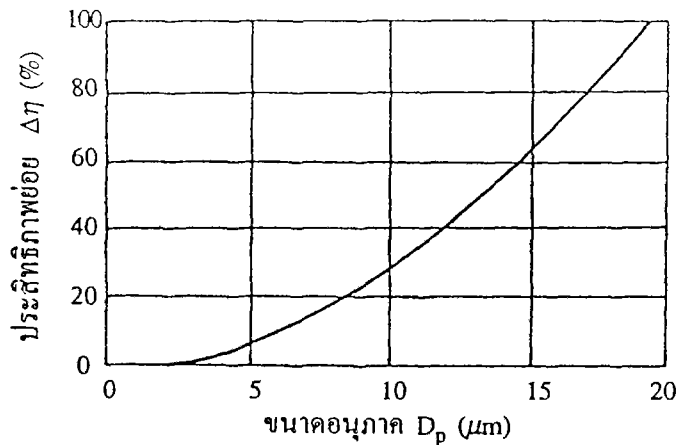
$$\begin{aligned} Q &= b h u = 1 \times 0.1 \times 1 = 0.1 \text{ ลบ.ม/วินาที} \\ &= 6 \text{ ลบ.ม/นาทึ} \end{aligned}$$

จากสมการ (13) ประสิทธิภาพย่อย คือ

$$\Delta\eta = \frac{3 \times 980 \times 300 D_p^2}{18 \times 0.00018 \times 100 \times 10}$$

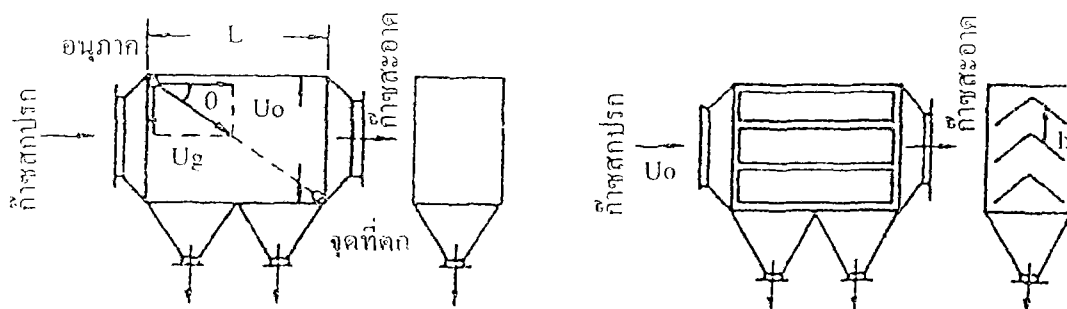
$$= 0.272 \times 10^6 D_p^2$$

โดยที่  $D_p$  มีหน่วยเท่ากับ ซม และ  $\Delta\eta$  มีหน่วยเป็นเศษส่วน ภาพประกอบ 9 แสดงผลการคำนวณของสมการข้างต้นในรูป  $\Delta\eta$  เป็นร้อยละและ  $D_p$  (ไมโครเมตร)



ภาพประกอบ 10 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพย่อยกับขนาดอนุภาค สำหรับห้องตกตะกอนแบบผนังขนาดด้วยแรงโน้มถ่วง

2.2.2.2 ประเภท โครงสร้าง และหน้าที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 11 เครื่องอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง แบ่งออกได้เป็นประเภทห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Settling Chamber) และประเภทห้องตกตะกอนแบบหลายชั้น (Multi-Stage Settling Chamber) เป็นต้น แต่ลักษณะคุณสมบัติของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วงมีดังนี้คือ ถ้าความเร็วของก๊าซยิ่งช้า จะเก็บอนุภาคที่ละเอียดขึ้นได้ ถ้าห้องตกตะกอนยิ่งยาวและยิ่งเตี้ย ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะยิ่งสูง (ดูสมการ 13) ถ้าการไหลของก๊าซภายในห้องตกตะกอนยิ่งมีความเร็วสม่ำเสมอ ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นยิ่งสูง นั่นคือ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อเกิดการผสมของก๊าซในระหว่างที่ไหลอยู่ โดยทั่วไป ความเร็วก๊าซที่ใช้จะเป็น 1-2 ม/วินาที ดังนั้น ขนาดของอนุภาคที่จับได้ในภาคปฏิบัติจะต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร และความดันสูญเสียในเครื่องจะประมาณ 5-10 มม  $\text{H}_2\text{O}$



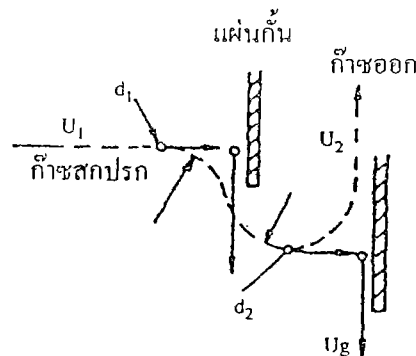
(1) ห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง

(2) ห้องตกตะกอนแบบหลายชั้น

ภาพประกอบ 11 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงโน้มถ่วง

### 2.2.3 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อย

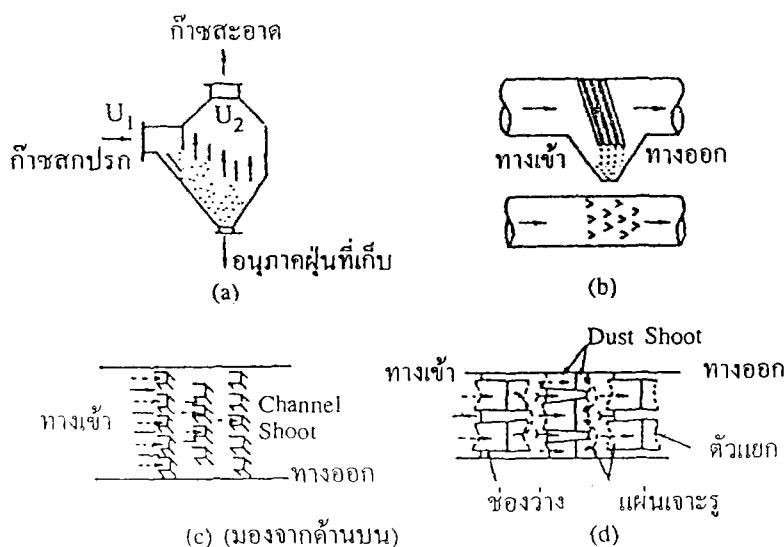
2.2.3.1 กลไกของการเก็บอนุภาคฝุ่น เมื่อกระแสก๊าซเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลอย่างกะทันหัน อนุภาคที่มีความเฉื่อยมากจะไม่ สามารถเปลี่ยนเส้นโคจรตามเส้นการไหลของก๊าซได้ทัน เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อย (Inertial Dust Collector) เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการนี้ในการเก็บอนุภาคฝุ่น ภาพประกอบ 12 แสดงกลไกของการแยกอนุภาคเมื่อก๊าซสลับปรกไหลตั้งฉากกับแผ่นกั้น (Baffle Plates) สองแผ่นในเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อย



ภาพประกอบ 12 กลไกการแยกอนุภาคโดยการชนและการเปลี่ยนทิศทางการไหลของก๊าซ

### 2.2.3.2 ประเภทโครงสร้าง และหน้าที่

#### - ชนิดไหลกระทบ



ภาพประกอบ 13 ตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลกระทบ

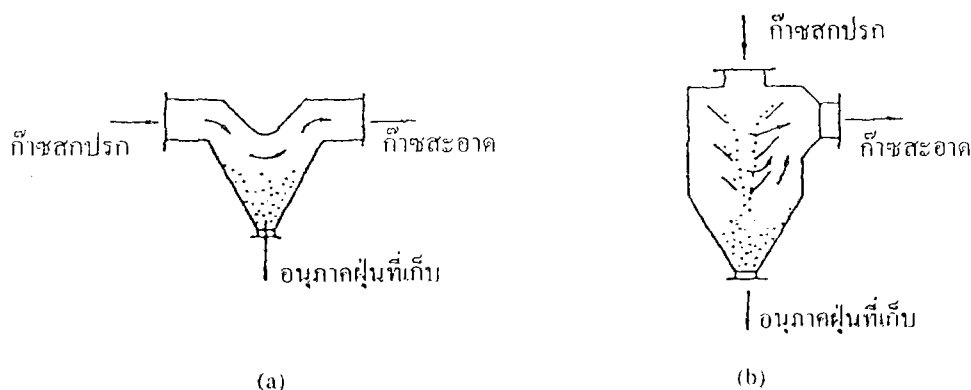
ภาพประกอบ 13 แสดงตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลกระทบ (Impact Type) ในภาพประกอบ 13 แผ่นกั้นของแบบขั้นเดียว (Single-Stage) (a) และของแบบหลายชั้น (Multi-Stage) (b) แผ่นกั้นแชนเนล (Channel Shoot) ของแบบ (c) และหัวฉีด (Nozzle) ของแบบ (d) ซึ่งมีชื่อเรียกว่าแบบแรนดอม (Random) ต่างก็ถูกวางเยื้องกัน (Zigzag) ในทางผ่านของก๊าซ เมื่อก๊าซไหลปะทะกับแผ่นกั้นแชนเนล

หรือ Dust Shoot เหล่านี้ อนุภาคฝุ่นที่มีอยู่ในกระแสก๊าซจะถูกแยกออก โดยทั่วไป ความดันสูญเสียของแบบหลายชั้นและของแบบแรนคอม จะมีค่าสูงกว่าของแบบชั้นเดียว อนึ่ง ถ้าความดันสูญเสียมีค่าอย่างมากประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะยิ่งสูง ในกรณีที่ใช้แบบแรนคอมในการกำจัดเขม่าและควัน เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นมีแนวโน้มที่จะเต็มไปด้วยเถ้าลอยเนื่องจากการเกาะติดบนผิวเก็บอนุภาคฝุ่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดฝุ่นที่เกาะออกโดยการเคาะหรือการใช้มาตรการทำนองเดียวกัน

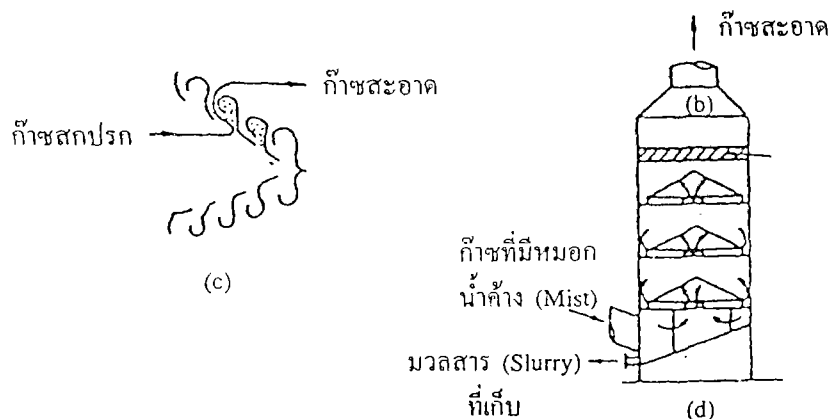
- ชนิดไหลวก ภาพประกอบ 14 แสดงตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลวก (Reverse Type) เช่น แบบท่งอ (a) แบบบานเกล็ด (Louver Type) (a) แบบกระเป๋ (Pocket Type) และแบบหลายแผ่นกัน (Multi-Baffle Type) ในสามแบบแรก ทิศทางการไหลของก๊าซจะวกเปลี่ยน เพื่อแยกอนุภาคที่มีความเฉื่อยสูง ส่วนแบบ (d) ซึ่งมีแผ่นกันรูปกรวยปิดหลายชั้นภายในห้องว่างเปล่า จะใช้จับหมอกน้ำค้าง (Mist) เป็นส่วนใหญ่ ในกรณีที่ต้องการกำจัดหมอกน้ำค้างละเอียด ซึ่งมีขนาดของหยดเท่ากับ 1 ไมโครเมตรหรือเล็กกว่า โดยปกติจะติดตั้งชั้นวัสดุ (Packed Type) ไว้หน้าทางออกของก๊าซสะอาด

- ลักษณะคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อย ในกรณีของชนิดไหลวกจะออกแบบให้ ความเร็วของก๊าซก่อนหน้าการชนพดมีค่าสูงมาก ถ้าความเร็วของก๊าซสะอาดที่ทางออกของเครื่องมีค่าน้อย ปริมาณของอนุภาคฝุ่นที่หนีตามออกไปจะยิ่งน้อย และประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะยิ่งสูง

- ในกรณีของชนิดไหลวก ถ้ารัศมีของการไหลวกของก๊าซที่แผ่นเบนทิศทางมีค่าน้อย จะเก็บอนุภาคฝุ่นได้ขนาดละเอียดขึ้น อนึ่ง ถ้าจำนวนของแผ่นเบนทิศทางมียิ่งมาก ความดันสูญเสียจะมียิ่งมาก และประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะมียิ่งสูง เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบเฉื่อยมีโครงสร้างที่ง่าย ๆ และสามารถใช้อำนาจขับเคลื่อนสูงได้ ความเร็วของก๊าซก็สามารถตั้งค่าสูงถึง 10 ม/วินาที หรือมากกว่า ดังนั้น จึงสามารถติดตั้งในปล่องควันได้โดยทั่วไป เส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต (Critical Particle Diameter) นั่นคือขนาดเล็กสุดของอนุภาคที่จับได้ร้อยละ 100 ในภาคปฏิบัติ คือ 20 ถึง 30 ไมโครเมตร และค่าความดันสูญเสียสูงสุดประมาณ 100 มม.  $H_2O$  ดังนั้น จึงมักใช้เครื่องแบบนี้เป็นเครื่องปฐมภูมิสำหรับกำจัดอนุภาคหยาบออกล่วงหน้า แต่ในกรณีของเครื่องแบบหลายแผ่นกันที่ใช้จับหมอกน้ำค้าง เส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคจะประมาณหลายไมโครเมตร และความดันสูญเสียจะประมาณ 20 ถึง 30 มม.  $H_2O$  ถ้ามีการติดตั้งชั้นวัสดุ ด้วย ความดันสูญเสียจะสูงเป็น 150 มม.  $H_2O$  แต่เส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตจะประมาณ 1 ไมโครเมตร



ภาพประกอบ 14 (a,b) ตัวอย่างของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยชนิดไหลวก

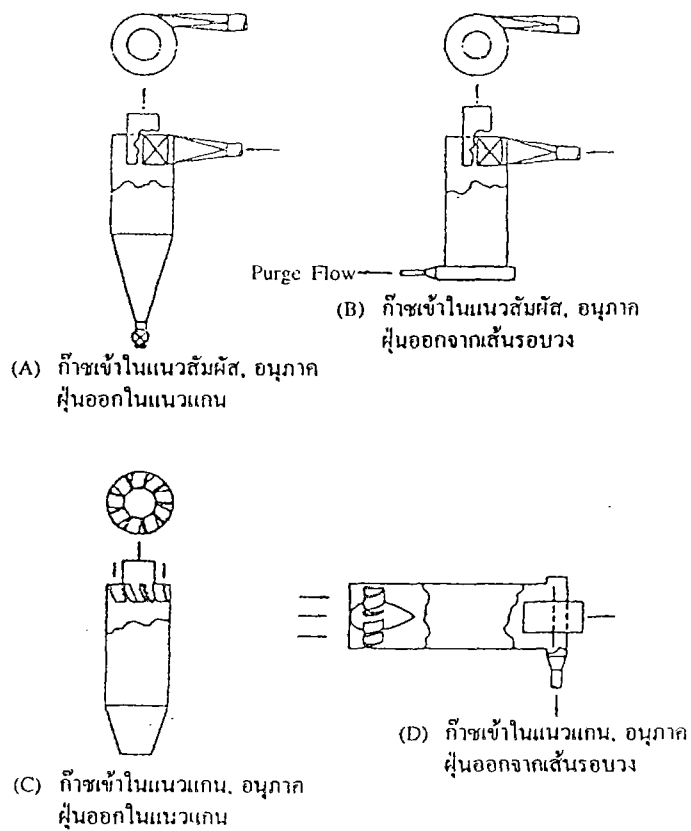


ภาพประกอบ 14 (ต่อ c,d)

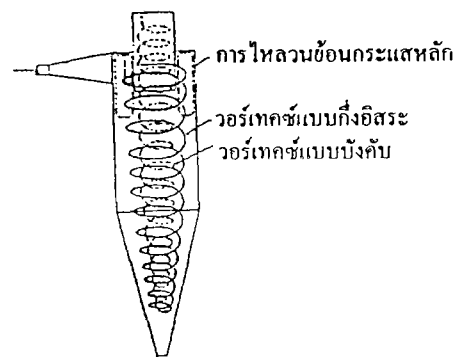
## 2.2.4 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง

2.2.4.1 กลไกของการเก็บอนุภาคฝุ่น อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในก๊าซจะมีความเฉื่อยและโมเมนตัม และได้รับแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงของโลก ลักษณะสมบัติเหล่านี้ของอนุภาคจะก่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เมื่อมีการบังคับให้กระแสก๊าซไหลหมุนวน แรงหนีศูนย์กลางเป็นกลไกหลักในการเก็บอนุภาคของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยส่วนใหญ่ด้วย อนึ่งแรงเฉื่อยของอนุภาคและแรงหนีศูนย์กลางยังมีบทบาทส่วนหนึ่งในการกรอการสครับ (Scrubbing) และวิธีทำความสะอาดก๊าซอื่นๆ ด้วย แต่ว่าการไหลเวียนก็มีความสำคัญในอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ด้วย ก๊าซสกปรกจะถูกทำให้เกิดการไหลหมุนวนในเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง เพื่อบดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาค เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลางสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ แบบไซโคลน (Cyclone Type) และแบบหมุน (Rotary Type) โดยทั่วไป จะนิยมใช้แบบไซโคลน

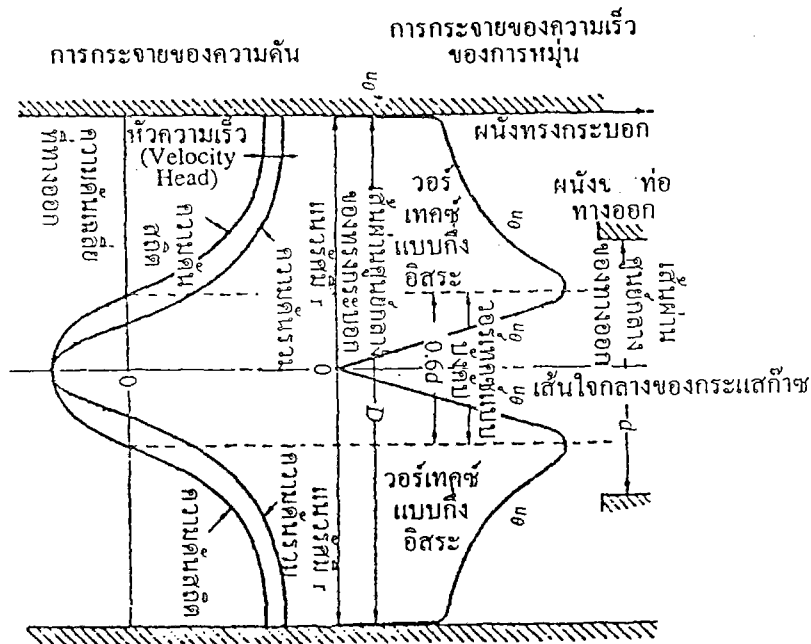
- ลักษณะของการไหลในไซโคลน ชั้นส่วนสำคัญของโครงสร้างของไซโคลน คือทางเข้าของก๊าซที่ช่วยชักนำให้เกิดวอร์เท็กซ์ (Vortex) ทางออกในแนวแกน (Axial Outlet) ของก๊าซสะอาด และช่องเปิดด้านล่างสำหรับปล่อยอนุภาคฝุ่นออก ภาพประกอบ 15 แสดงวิธีต่าง ๆ สำหรับจัดวางทางเข้าของก๊าซและช่องปล่อยอนุภาคฝุ่นออก ลักษณะการไหลในไซโคลนที่จะพูดถึงในที่นี้จะ เป็นของกรณีไซโคลนแบบทั่วไป (ภาพประกอบ 15(A)) ก๊าซที่ไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัสใกล้ด้านบนของตัวทรงกระบอกจะชักนำให้เกิดวอร์เท็กซ์ หรือการไหลเวียนแบบกันหอยในย่านระหว่างผนังของตัวไซโคลนและผนังของท่อทางออกของก๊าซ ในลักษณะที่หมุนวนลงข้างล่าง วอร์เท็กซ์นี้ซึ่งเป็นวอร์เท็กซ์แบบกึ่งอิสระ (Semi-Free Vortex) จะหมุนวนและเคลื่อนลงจนต่ำกว่าผนังของท่อทางออกของก๊าซ แต่เมื่อไปถึงย่าน ๆ หนึ่งใกล้กับก้นของกรวย วอร์เท็กซ์นี้จะกลับทิศทางการเคลื่อนที่ ในแนวแกนจากเคลื่อนลงเป็นเคลื่อนขึ้น โดยที่ยังคงไว้ซึ่งการไหลหมุนวน นั่นคือจะเปลี่ยนเป็นวอร์เท็กซ์แบบบังคับ (Forced Vortex) ซึ่งเปรียบเสมือนการหมุนตัวของของแข็งในย่านระหว่างประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีของท่อทางออกของก๊าซกับแกนกลางของท่อทางออก วอร์เท็กซ์ด้านในนี้จะเป็นย่านความดันต่ำ และมีชื่อเรียกว่า แกน (Core) ภาพประกอบ 16 แสดงลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow) ภายในไซโคลนธรรมดา ส่วนภาพประกอบ 17 แสดงตัวอย่างของการกระจายของความดันและของความเร็วของการหมุนวนภายในไซโคลนธรรมดา ดังจะเห็นได้จากภาพประกอบ 20 ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ( $V_t$ ) ของก๊าซในวอร์เท็กซ์สามารถแสดงในรูปของสมการดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 15 วิธีต่างๆ สำหรับจัดวางทางเข้าของก๊าซและช่องปล่อยอนุภาคฝุ่นออก



ภาพประกอบ 16 ลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลวนย้อนกระแสน้ำ (Eddy Flow)  
ภายในไซโคลนธรรมดา



ภาพประกอบ 17 ตัวอย่างการกระจายของความดันและของความเร็วของการหมุน  
ภายในไซโคลนธรรมดา

$$V_t = V_{tp} (R_p/R)^n \quad (14)$$

ในที่นี้  $R$  คือ รัศมี (ม)

$R_p$  คือ รัศมีของตัวไซโคลน (ม)

$V_t$  คือ ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของก๊าซที่รัศมี  $R$  (ม/วินาที)

$V_{tp}$  คือ ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของก๊าซที่รัศมี  $R_p$  (ผนังตัวไซโคลน) (ม/วินาที)

$n$  คือ ตัวเลขยกกำลัง [ - ]

ในกรณีของวอร์เทกซ์อิสระ (Free Vortex) ซึ่งไม่มีการสูญเสียของความดัน  $n$  จะมีค่าเท่ากับ 1 ในกรณีที่  $0 < n < 1$  จะเรียกวอร์เทกซ์ที่ได้ว่าเป็นแบบกึ่งอิสระ แต่ในภาคปฏิบัติแล้ว  $n$  ของวอร์เทกซ์กึ่งอิสระในไซโคลนจะมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 ส่วนในกรณีที่  $n$  มีค่าเท่ากับ -1 จะเรียกวอร์เทกซ์ที่ได้ว่าเป็นแบบบังคับ สิ่งที่น่าสังเกตในภาพประกอบ 17 ก็คือว่า นอกจากวอร์เทกซ์ที่แสดงในภาพประกอบ 17 แล้ว ยังมีการไหลขึ้นของก๊าซเลียบผนังส่วนบนของทรงกระบอก ก๊าซที่ไหลเลียบขึ้นนี้จะพาเอาอนุภาคติดไปด้วย และไหลตัดเข้าด้านใน แล้วจึงไหลลงเลียบผนังด้านนอกของท่อทางออกของก๊าซ การไหลนี้มีชื่อเรียกว่าการไหลวนย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow) ในระหว่างที่ไหลเลียบลงผ่านขอบล่างของท่อทางออก อนุภาคอาจหลุดติดไปกับก๊าซที่ไหลออกจากไซโคลนได้ ถ้าท่อทางออกของก๊าซยังยื่นลึกเข้าไปในทรงกระบอก การไหลวนย้อนกระแสหลักที่เกิดขึ้นจะยิ่งรุนแรง แต่ว่าการกำจัดส่วนยื่นเข้านี้ให้หมดไปก็ไม่สามารถกำจัดการเกิดของการไหลวนย้อนนี้ได้ ไซโคลนที่ผลิตขายจะมีการออกแบบพิเศษเพื่อป้องกันผลกระทบจากการไหลวนนี้ อนึ่งไซโคลนแบบที่ก๊าซไหลเข้าในแนวแกนจะไม่เกิดการไหลวนย้อนกระแสหลักนี้

- การแยกอนุภาคฝุ่นในวอร์เท็กซ์ สารอนุภาคถูกแยกออกจากก๊าซโดยแรงหนีศูนย์กลางซึ่งขับเคลื่อนอนุภาคผ่านเส้นการไหลของกระแสก๊าซไปยังผนังของไซโคลอน แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาคคือ

$$F_s = M_p V_p^2 / g_c R \quad (15)$$

ในที่นี้  $F_s$  คือ แรงแยกอนุภาค (กก.แรง)  
 $M_p$  คือ มวลของอนุภาค (กก)  
 $V_p$  คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาค (ม/วินาที)  
 $R$  คือ รัศมีของการหมุนวนของอนุภาค (ม)  
 $g_c$  คือ ตัวแปรหน่วย = 9.80 (กก.ม/กก.วินาที<sup>2</sup>)

ถ้าถือว่าความเร็วของอนุภาคเท่ากับความเร็วของก๊าซในแนวสัมผัส (นั่นคือ  $V_t = V_p$ ) แล้วแทนมวลของอนุภาคด้วย  $M_p = \beta D_p^3 \rho_p$  ร่วมกับสมการ (15) จะได้

$$F_s = \beta \rho_p D_p^3 V_p^2 R^{2n} / g_c R^{(2n+1)} \quad (16)$$

โดยที่  $\rho_p$  = ความหนาแน่นของอนุภาค (กก/ลบ.ม)  
 $D_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ม)  
 $\beta$  = Volume Shape Factor  
 $\beta = \frac{\pi}{6}$  ในกรณีของอนุภาคทรงกลม [ - ]

ขณะเดียวกัน ในกรณีของอนุภาคที่มีขนาดในช่วง 3-100 ไมโครเมตร แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านกระแสก๊าซไปยังผนังของไซโคลอนสามารถเขียนได้โดยการอาศัยกฎของสโตกส์ เป็น

$$F_r = K \mu D_p u / g_c \quad (17)$$

ในที่นี้  $F_r$  คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวรัศมี (กก.แรง)  
 $K$  คือ ตัวคงที่ [ - ]  
 $\mu$  คือ ความหนืดของก๊าซ (กก/ม.-วินาที)  
 $u_r$  คือ ความเร็วสัมผัสในแนวรัศมีระหว่างอนุภาคกับก๊าซ (ม/วินาที)

จากสมการ (16) และ (17) จะเห็นได้ว่า แรงแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยกกำลังสาม แต่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยังผนังไซโคลอนจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ดังนั้น ไซโคลอนจะแยกอนุภาคยิ่งหย่าได้ยิ่งง่าย อนุภาคหย่าที่วิ่งไปถึงผนังไซโคลอนจะตกลงเลียบผนังด้วยแรงโน้มถ่วงไปยังช่องปล่อยออกที่ก้นของไซโคลอน ในภาคปฏิบัติ สารอนุภาคที่วิ่งเข้าตัวไซโคลอนจะกระจายตลอดความกว้าง  $W_i$  ของปากทางเข้าของก๊าซสกปรก ดังนั้น รัศมีของการหมุนวน

ความเร็วในแนวสัมผัส และระยะห่างจากผนังไซโคลนของอนุภาคที่เข้ามา จะมีค่าต่างๆ กันได้ ด้วยเหตุนี้ ไซโคลนจึงเป็นเครื่องคัดขนาด (classifier) ที่ไม่แม่นยำเพราะไม่สามารถคัดขนาดได้อย่างชัดเจนระหว่างอนุภาคที่ถูกแยกออกและอนุภาคที่ติดออกไปกับก๊าซ

โดยทั่วไป ขนาดตัด (Cut Size) ของอนุภาค  $D_{pc}$  ในไซโคลนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W_i}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho)}} \quad (18)$$

ในที่นี้  $D_{pc}$  คือ ขนาดตัดหรือขนาดของอนุภาค(ม)ที่ไซโคลนแยกได้ด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 50

$N_e$  คือ จำนวนรอบเชิงประสิทธิผลภายในไซโคลน

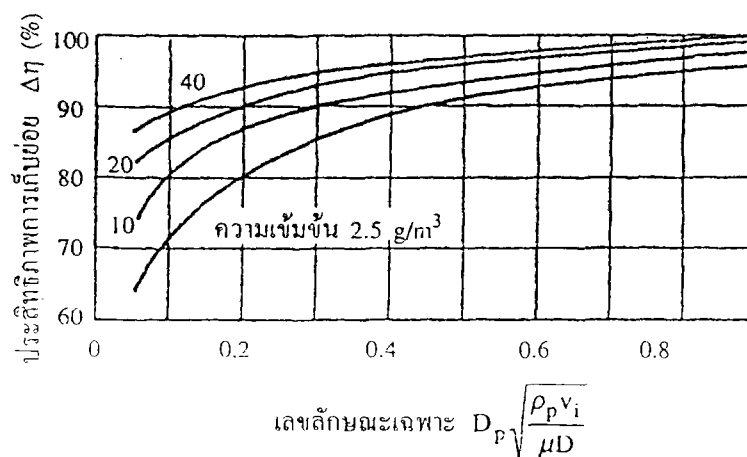
( $N = 5$  ถึง  $10$  สำหรับไซโคลนทั่วไป) [ - ]

$V_i$  คือ ความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซ (ม/วินาที)

$W_i$  คือ ความกว้างของปากทางเข้าของก๊าซ (ม)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (กก/ลบ.ม)

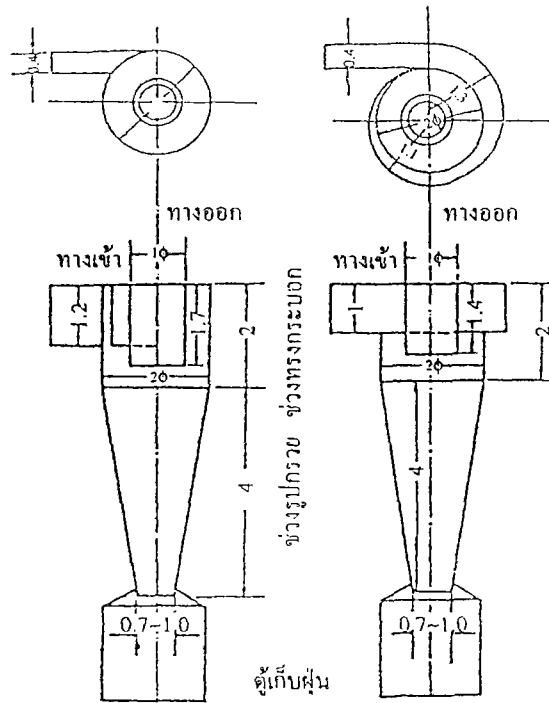
- ผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนจากการศึกษาในประเทศเยอรมัน พบว่า ถ้าความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซสูงเกินไปสูง กว่าค่าๆ หนึ่งแล้ว อนุภาคฝุ่นบางส่วนจะตกตัวบนผนังของไซโคลนได้ก่อนที่จะได้รับการกระทำจากแรงหนีศูนย์กลาง ดังนั้น ในกรณีเช่นนี้ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนจะเพิ่มค่าอย่างเด่นชัด ภาพประกอบ 18 แสดงตัวอย่างหนึ่งของผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคต่อประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่น



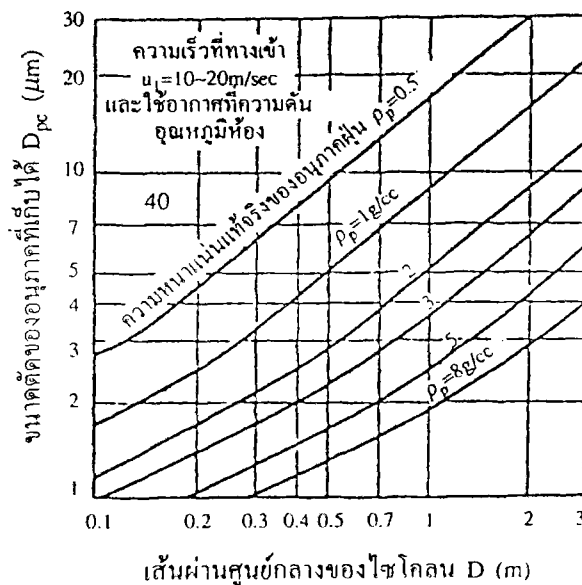
ภาพประกอบ 18 ตัวอย่างของผลความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคของไซโคลน

#### 2.2.4.2 ประเภท โครงสร้าง และหน้าที่

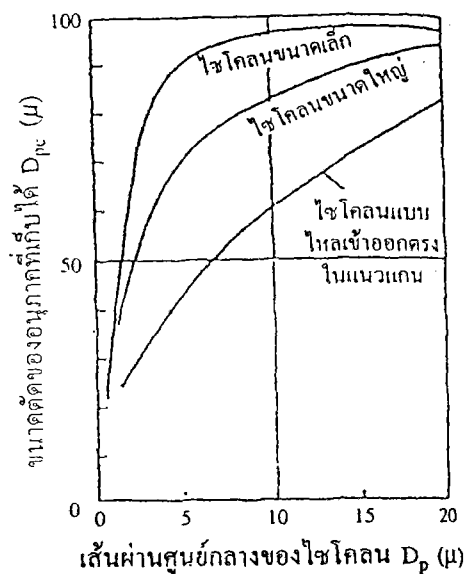
- แบบไหลเข้าในแนวสัมผัส ในภาพประกอบ 20 แสดงสัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส (tangential Inlet Type) โดยแสดงเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของก๊าซสะอาด ไซโคลนแบบนี้ยังแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ชนิดดังแสดงในภาพประกอบ 19 คือ (a) ชนิดปากทางเข้าในแนวสัมผัส และ (b) ชนิดมีห้องวงแหวนเพื่อให้ไหลวนเข้าตลอดเส้นรอบวง



ภาพประกอบ 19 สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส (ญี่ปุ่น)



ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัดของอนุภาค  $D_{pc}$  กับเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ของไซโคลนมาตรฐาน (ญี่ปุ่น)



ภาพประกอบ 21 ตัวอย่างของประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนเดี่ยว

โดยปกติ ความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซจะใช้ประมาณ 10 ถึง 20 ม/วินาที และความเร็วในช่วงนี้จะมีผลน้อยต่อประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นอาจกลับลดลงได้ การทำนายประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นทำได้ลำบากก็จริง แต่ในภาคปฏิบัติแล้ว สามารถใช้ภาพประกอบ 20 ในการกำหนดขนาดตัดของอนุภาค  $D_{pc}$  จากขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ของไซโคลนมาตรฐาน แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพ ในการเก็บอนุภาคฝุ่น  $\eta$  โดยถือว่าอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า  $D_{pc}$  ทั้งหมดในก๊าซจะถูกเก็บแยกออกจากก๊าซ โดยทั่วไปความดันสูญเสียในไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสจะมีค่า 100~200 มม.  $H_2O$  แต่ก๊าซอาจประมาณความดันสูญเสียได้โดยสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = \frac{30a\sqrt{D}}{d^2\sqrt{L+H}} \left[ \frac{\rho V_i^2}{2g_c} \right] \quad (19)$$

ในที่นี้  $\Delta P$  คือ ความดันสูญเสีย (กก.แรง/ตร.ม) หรือ (มม  $H_2O$ )

a คือ พื้นที่หน้าตัดของทางเข้า (ตร.ม)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวไซโคลน (ทรงกระบอก) (ม)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของก๊าซ (ม)

L คือ ความสูงของช่วงทรงกระบอก (ม)

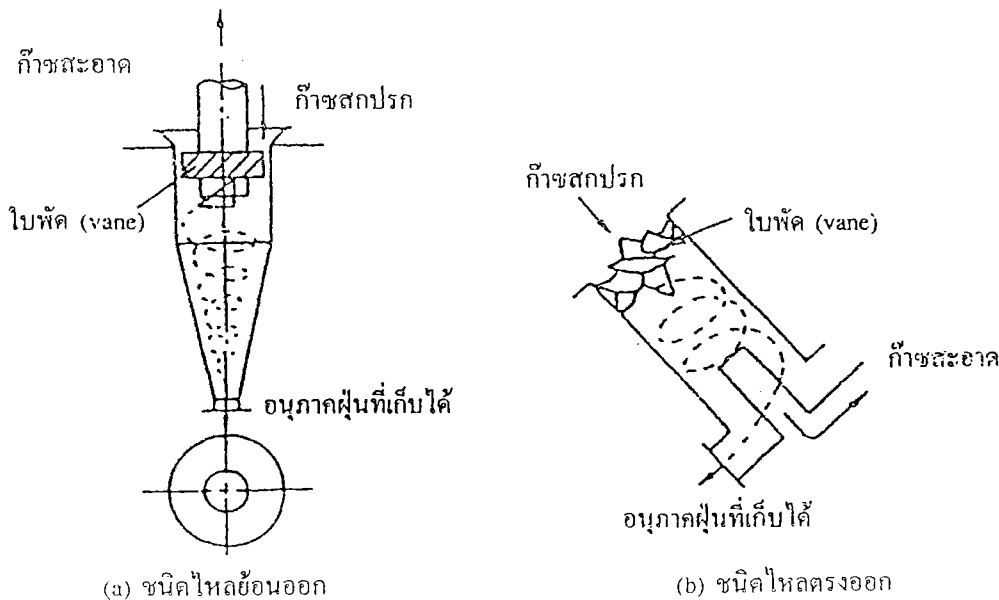
H คือ ความสูงของช่วงกรวย (ม)

สิ่งที่น่าสนใจคือ ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซมีค่าเท่ากัน ความดันสูญเสียจะกลับมีค่าน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซมีค่าสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นข้อดีในภาคปฏิบัติมาก พบว่า  $\Delta P_m$  จะไม่แปรผันตาม  $V_i$  ยกกำลัง 2 อย่างแน่นอน แต่ตาม  $V_i$  ยกกำลัง 1.8 ถึง 2.3 อย่างไรก็ตามถ้าใช้ความดันสูญเสียในสภาวะมาตรฐาน  $\Delta P$  แทน  $\Delta P_m$  จะพบว่า  $\Delta P$  แปรผันเกือบตาม  $V_i$  ยกกำลัง 2 พอดี ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P$  และ  $\Delta P_m$  มีนิยามไว้ดังนี้

$$\Delta P = \Delta P_m \frac{\rho}{\rho_m} = \Delta P_m \frac{P T_m}{P_m T} \quad (20)$$

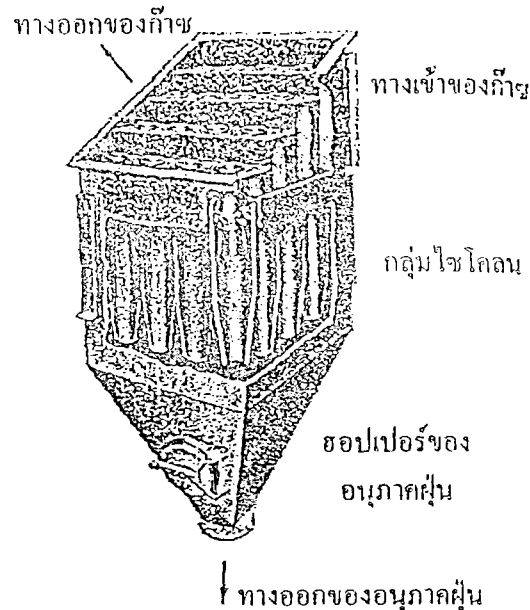
ในที่นี้  $P$  และ  $T$  คือความดันสัมบูรณ์ และอุณหภูมิ และอุณหภูมิสัมบูรณ์ตามลำดับ หนึ่ง ตัวห้อย  $m$  หมายถึง ค่าเฉลี่ยระหว่างทางเข้าและทางออกของก๊าซ ส่วนที่ไม่มีตัวห้อย หมายถึงค่าที่สภาวะมาตรฐาน

- แบบไหลเข้าในแนวแกน ในภาพประกอบ 22 ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน (Axial Inlet Type) ยังแบ่งย่อยไปเป็นชนิดไหลย้อนออก และ (b) ชนิดไหลตรงออก ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน สามารถบำบัดก๊าซที่อัตราการไหลสูงถึงสามเท่าของแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสโดยที่ความดันสูญเสียมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงมักใช้ ในลักษณะวางขนานกันหลายๆ ลูก คือ มัลติ-ไชโคลน (Multi-Cyclone) เหตุที่ไม่ไช้ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสมาทำเป็นมัลติ-ไชโคลน เพราะการกระจายของก๊าซเข้าไชโคลน แต่ละลูกจะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งต่างกับกรณีของไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน เกือบทั้งหมดที่ไ้จะเป็นชนิดไหลย้อนออก ซึ่งมีความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซประมาณ 12 เมตรวินาที และความดันสูญเสียประมาณ 80 มม  $H_2O$  ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกนชนิดไหลตรงออกจะกินเนื้อที่ในการติดตั้งน้อยกว่า และความดันสูญเสียต่ำกว่า (ประมาณ 50 มม  $H_2O$ ) แต่ในปัจจุบันไม่นิยมใช้กันเพราะความดันภายในไชโคลนมักจะเสียนสมดุล และทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นเลวลงด้วย ภาพประกอบ 21 แสดงตัวอย่างของประสิทธิภาพ ภาพย่อย  $\Delta\eta$  ของไชโคลนชนิดนี้ด้วย

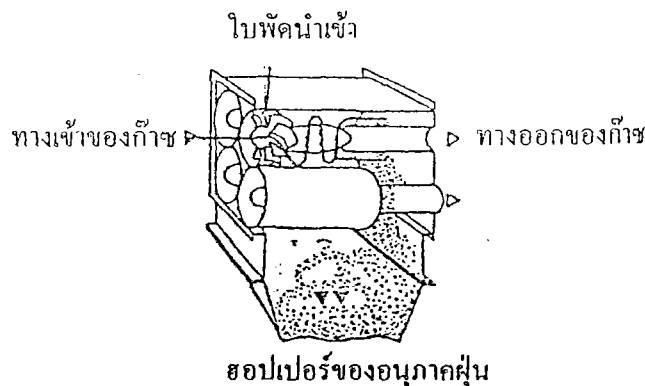


ภาพประกอบ 22 ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน

- มัลติ-ไชโคลน ไชโคลนจะจับอนุภาคละเอียด ได้ก็ต่อเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกมีขนาดเล็กพอ แต่เมื่อไชโคลนมีขนาดเรียวยาว ปริมาณของก๊าซที่จะบำบัดได้ก็น้อยลงด้วย ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการบำบัดก๊าซปริมาณมาก และมีประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นสูงด้วย จะติดตั้งไชโคลนรูปเรียวยาวจำนวนมากในลักษณะขนานกัน ผลที่ได้คือไชโคลนที่มีชื่อเรียกว่า มัลติ-ไชโคลน (Multi-Cyclone) หรือ มัลติ-โคลน (Multi-Clone) ภาพประกอบ 23 และ 24 แสดงตัวอย่างการวางเรียงของมัลติ-ไชโคลนเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของแบบมัลติ-ไชโคลนคือ 150 มม ในกรณีที่กำจัดเขม่าและควันจากการเผาไหม้น้ำมัน และ 100 มม ในกรณีที่กำจัดเขม่า ควัน หรืออนุภาคฝุ่นทั่วไป



ภาพประกอบ 23 มัลติ-ไซโคลน (แบบไหลเข้าในแนวแกนและไหลย้อนออก)

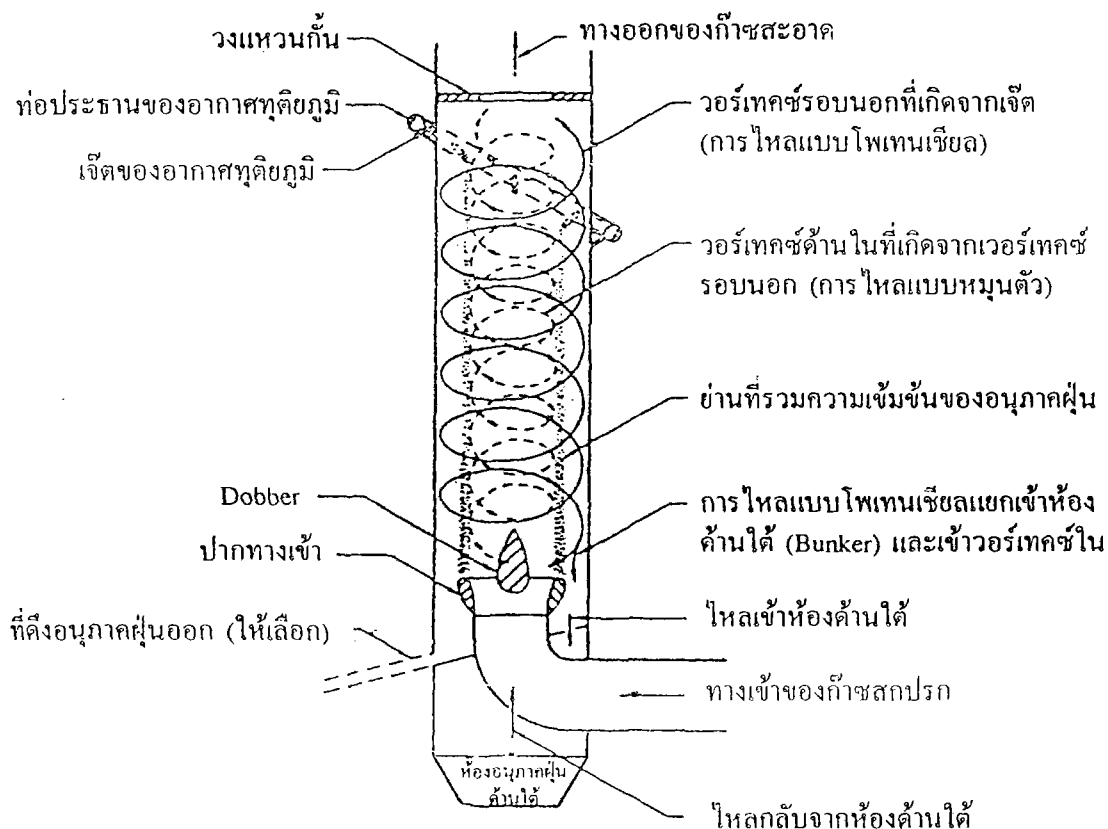


ภาพประกอบ 24 มัลติ-ไซโคลน (แบบไหลเข้าในแนวแกนและไหลย้อนออก)

- แบบเป่าลง เครื่องไซโคลนแบบเป่าลง (Blowdown Type) ไม่แตกต่างกับไซโคลนธรรมดา หรือมัลติ-ไซโคลนในแง่โครงสร้าง แต่จะดูดปริมาณร้อยละ 5-10 ของก๊าซที่บำบัดผ่านออกทางฮอปเปอร์ (Hopper) เก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนเดี่ยวหรือมัลติ-ไซโคลน เพื่อป้องกันการหลุดหนีของอนุภาคฝุ่นที่แยกได้ออกไปกับกระแสก๊าซที่ไหลขึ้น ผลก็คือ ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะสูงขึ้น

- เครื่องแยกอนุภาคฝุ่นแบบกระแสนวน แม้ว่าจะไม่ตรงตามคำนิยามของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบไซโคลนนัก แต่เครื่องแยกอนุภาคฝุ่นแบบกระแสนวน (Rotary Stream Dust Separator) ก็คล้ายคลึงกับไซโคลนในแง่ที่ว่า ใช้แรงหนีศูนย์กลางในวอร์เท็กซ์ที่กักไว้ (Confined Vortex) เป็นหลักในการแยกอนุภาคฝุ่นและปราศจากชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เครื่องแยกอนุภาคฝุ่นนี้ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกภายใน ซึ่งกระแสหลักจะสร้างวอร์เท็กซ์ด้านใน (Inner Vortex) วอร์เท็กซ์ด้านในนี้จะเผชิญหน้ากับวอร์เท็กซ์ด้านนอก (Outer Vortex) ซึ่งมีทิศทางไหลเหมือนกันในแนวสัมผัส แต่ตรงกันข้ามในแนวแกน ผลก็คือ แรงหนีศูนย์กลางในวอร์เท็กซ์ด้านในกับการไหลเข้าในทิศทางรัศมีของก๊าซในวอร์เท็กซ์ด้านนอก และช่วยกันรวบรวมอนุภาคฝุ่นไว้ในย่านวงแหวนระหว่างวอร์เท็กซ์ทั้งสอง ภาพประกอบ 25 แสดงตัวอย่างของ

เครื่องแบบนี้ ก๊าซสกปรกจะไหลเข้าท่อโดยผ่านเนื้อที่วงแหวนระหว่าง Dobber ที่อยู่ใจกลางของผนังด้านในของปากทางเข้า เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปากทางเข้าจะเปิดกว้างขึ้นเล็กน้อยทางด้านปลายเปิด Dobber จะทำหน้าที่สร้างเสถียรภาพให้รูปแบบการไหล (Flow Pattern) และช่วยให้วอร์เท็กซ์สามารถสถาปนาตัวได้ที่ตำแหน่งต่ำลงในท่อนอก วอร์เท็กซ์ด้านนอกซึ่งเกิดจากเจ็ต (Jet) ของอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) จะเป็นตัวสร้างการไหลแบบวอร์เท็กซ์ให้กับกระแสหลัก เจ็ตของอากาศทุติยภูมิซึ่งพุ่งเข้าในแนวสัมผัสใกล้ด้านบนของท่อ จะก่อให้เกิดวอร์เท็กซ์ด้านนอกซึ่งเป็นการไหลแบบโพเทนเชียล (Potential Flow) และมีองค์ประกอบของความเร็วในทิศแนวแกนลงและองค์ประกอบในทิศรัศมีวิ่งเข้าด้วย การไหลแบบโพเทนเชียลนี้จะทำให้กระแสหลักเกิดเป็นวอร์เท็กซ์ด้านในซึ่งเป็นการไหลแบบหมุน (Rotational Flow) และมีทิศทางการหมุนเหมือนกับวอร์เท็กซ์ด้านนอก แต่มีองค์ประกอบของความเร็วในทิศแนวแกนขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือการรวมอนุภาคฝุ่นในย่านวงแหวนระหว่างวอร์เท็กซ์ ซึ่งเรียกว่าย่าน “การไหลผสม” (“Mixed Flow” Region) ชั้นวงแหวนที่มีฝุ่นหนาแน่นนี้จะเคลื่อนตัวลงโดยปริมาตรปากนอกของช่องทางเข้าแล้วเข้าไปในถังเก็บฝุ่นด้านใต้พร้อมกับการไหลทิ้ง (Purge Flow) หรือถูกถ่ายออกโดยตรงจากท่อก็ได้ ในกรณีแรก จะให้มีการไหลกลับของอากาศจากถังเก็บอนุภาคฝุ่นไปยังทางเข้าของก๊าซสกปรกเพื่อชดเชยการไหลทิ้งที่เกิดขึ้น

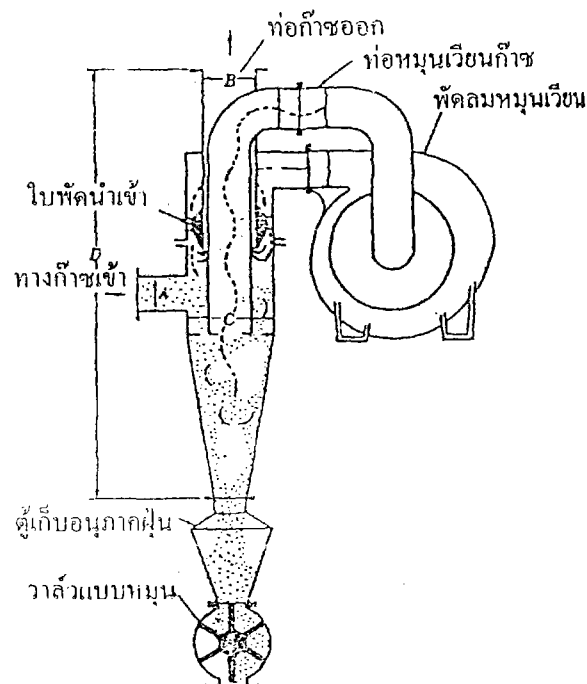


ภาพประกอบ 25 เครื่องแยกอนุภาคฝุ่นแบบกระแสหมุน (Rotary Stream)

แผ่นกันวงแหวนที่ด้านบนของท่อ ทำหน้าที่กั้นการไหลหนีของเจ็ตด้านบนสุด ออกจากท่อและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นอย่างเห็นได้ชัด ความดันที่เกี่ยวข้องมีสองชนิด คือ ความดันสถิตของกระแสหลัก และความดันที่ต้องใช้ในการฉีดเจ็ตของอากาศทุติยภูมิอย่างเหมาะสม ยกตัวอย่างกรณีของ

ท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. ซึ่งนำบดก๊าซที่มีอนุภาคฝุ่นในอัตรา 500 ลบ.ม/ชม ความดันของเจ็ตที่ใช้คือ 480 มม  $H_2O$  เหนือบรรยากาศและความดันสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นคือ 200 มม  $H_2O$  จากการทดลองกับอนุภาคฝุ่นต่าง ๆ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่างๆ จาก 2.5 ถึง 10 ไมโครเมตร พบว่าประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นมีตั้งแต่ร้อยละ 92 ถึง 98 ภายใต้เงื่อนไขความดันข้างต้น มีกล่าวกันว่า ประสิทธิภาพยอมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 สำหรับอนุภาคขนาด 5 ไมโครเมตรและร้อยละ 90 สำหรับอนุภาค 1 ไมโครเมตร เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 2.65 กรัม/ลบ.ซม. ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 และ 500 มม. มีลักษณะที่ พุดไว้เหมือนกัน แต่ท่อขนาดโตขึ้นอีก (เช่น 1,000 มม.) จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง จากการทดลองกับ “อนุภาคฝุ่นถ่านหินเม็ดละเอียด” (“Fine Grain Coal Dust”) พบว่าท่อ 200 และ 500 มม. มีประสิทธิภาพร้อยละ 98 ส่วนท่อ 1,000 มม. มีค่าร้อยละ 97

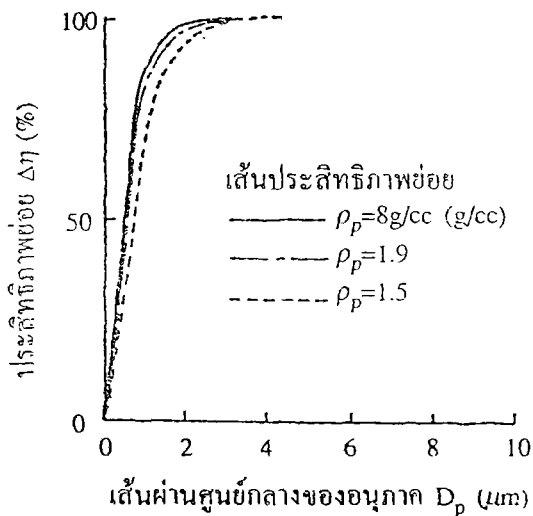
- เจ็ตโคลน(Jetclone) เป็นเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบกระแสมุนที่พัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพประกอบ 26 เครื่องเป่าลมจะดูดเอากระแสก๊าซส่วนหนึ่งจากย่านใจกลางแล้วเป่าหมุนเวียนกลับ เพื่อสร้างกระแสก๊าซหมุนทุติยภูมิจากด้านบน ภาพประกอบ 27 แสดงตัวอย่างของประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของเจ็ตโคลน ส่วนภาพประกอบ 28 แสดงผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของ เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลางชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเจ็ตโคลนและเครื่องแบบกระแสมุน มีค่าสูงกว่าของไซโคลนประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Cyclone) แต่ก็มีจุดอ่อนคือต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่อนข้างมากทางด้านกระแสอากาศทุติยภูมิ (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 180-196)



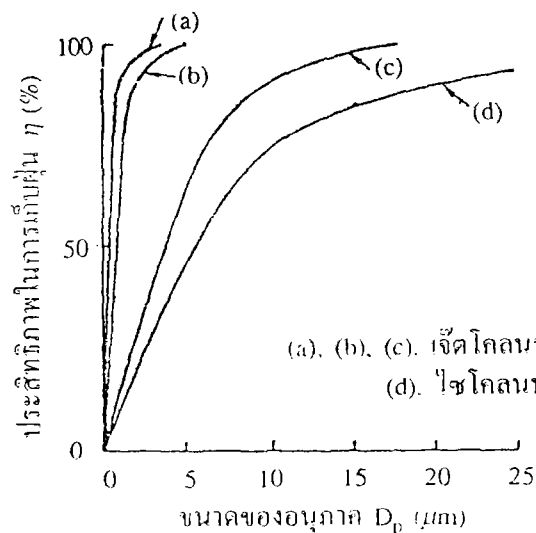
ภาพประกอบ 26 เจ็ตโคลน (Jetclone)

#### 2.2.4.3 ลักษณะสมบัติทั่วไปของไซโคลน ไซโคลนมีคุณสมบัติทั่วไปดังต่อไปนี้

- ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอก มีขนาดยิ่งเล็กลง จะจับอนุภาคยิ่งละเอียดได้
- ถ้าความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซยิ่งสูงความดันสูญเสีย และค่าไฟฟ้าจะยิ่งมาก ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นจะสูงขึ้นด้วย (แต่เมื่อความเร็วสูงกว่าค่าๆ หนึ่ง ประสิทธิภาพจะกลับลดลง ค่าขีดจำกัดนี้จะขึ้นกับลักษณะสมบัติของอนุภาคสัดส่วนของไซโคลน เป็นต้น)
- ถ้าอนุภาคมีลักษณะสมบัติเกาะกันเป็นก้อนได้ดี การเพิ่มประสิทธิภาพรวมของการเก็บฝุ่นสามารถทำได้โดยการติดตั้งไซโคลนขนาดเท่ากันอนุกรมกันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพรวมได้น้อย)
- ฮอปเปอร์เก็บอนุภาคฝุ่น (Dust Hopper) ของไซโคลนควรออกแบบให้มีโครงสร้างที่ป้องกันการหลุดหนีของอนุภาคฝุ่นไปกับกระแสก๊าซที่ไหลวนขึ้น นอกจากนี้ ฮอปเปอร์ที่ใช้ควรมีความจุเพียงพอ โดยคำนึงเผื่อกรณีที่ว่าส่วแบบหมุน (Rotary Valve) ของไซโคลน และสายพานลำเลียงฝุ่นขัดข้องชั่วคราว



ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของเจ็ตโคลน



ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องเก็บฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลางชนิดต่างๆ

เนื่องจากไซโคลนมีโครงสร้างที่ง่าย ๆ มีราคาถูก และสามารถจับอนุภาคที่มีขนาดหลายไมโครเมตรหรือโตกว่า ดังนั้น จึงมีใช้กันกว้างขวางในอุตสาหกรรม ทั้งในฐานะเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นตัวเดียว หรือในฐานะเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นด้านหน้าถังกรอง หรือเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

2.2.4.4 รูปทรงที่เหมาะสมที่สุดของไซโคลน ภาพประกอบ 29 แสดงผลสรุปของรายงานที่ดีที่สุดพิมพ์ในประเทศเยอรมนี เกี่ยวกับรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Shape) ของไซโคลน ในที่นี้  $H=h/r_i$ ,  $R=r_a/r_i$ ,  $u=u/v_i$ ,  $F=F_e/F_i$ ,  $\alpha'=V_e/u_a$ ,  $\xi=\Delta R/[\rho/2 \times v_i^2]$  ซึ่งทั้งหมดดังกล่าวเป็นตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless Numbers) อนึ่ง  $h$  คือความสูงของไซโคลน  $r_i$  คือรัศมีของท่อทางออกจากก๊าซ  $r_a$  คือรัศมีของทรงกระบอกของไซโคลน  $u_i$  คือความเร็วของการหมุนที่ค่ารัศมี  $r_i$ ,  $v_i$  คือค่าเฉลี่ยของความเร็วในแนวแกนภายในท่อทางออก  $F_e$  คือพื้นที่หน้าตัดของปากทางเข้า  $F_i$  คือพื้นที่หน้าตัดของปากทางออก  $V_e$  คือความเร็วที่พื้นที่หน้าตัดของปากทางเข้า  $u_a$  คือความเร็วของการหมุนที่ค่ารัศมี  $r_a$  (ผนังทรงกระบอก)  $\Delta P$  คือความดันสูญเสีย และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของก๊าซส่วนแกนตั้งและแกนนอนของภาพประกอบ 29 คือ เลขลักษณะสมบัติไร้มิติ (Dimensionless Characteristic Number) ต่อไปนี้

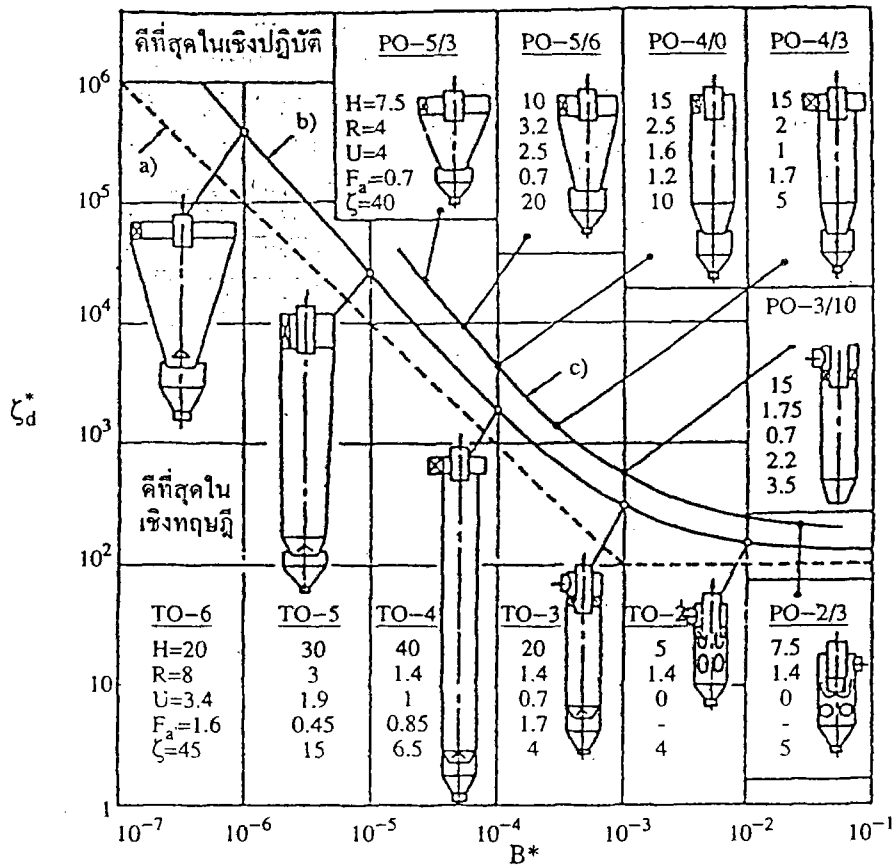
$$\xi_d = \Delta P / \left\{ \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q}{\pi u_a^{4/3} h^{2/3}} \right)^2 \right\} \quad (21)$$

$$B^* = \frac{V_i r_i Q}{\pi u_i^2 r_a^2 h} \quad (22)$$

ในที่นี้  $Q$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ  $V_i$  คือ ความเร็วในแนวรัศมี ซึ่งให้ค่าเท่ากับความเร็วตกตัวบั้นปลาย (Terminal settling Velocity) ของอนุภาคนาควิกฤต (Critical Particle Size) เส้นตรงไขว้ปลา a) ในภาพประกอบ 29 คือเส้นขีดจำกัดในเชิงทฤษฎี เส้นโค้ง b) คือเส้นเหมาะสมที่สุดในเชิงทฤษฎี (TO หรือ Theoretical Optimum) ส่วนเส้นโค้ง c) คือเส้นเหมาะสมที่สุดในเชิงปฏิบัติ (PO หรือ Practical Optimum) เมื่อคำนึงถึงความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ด้วย รูปร่างของไซโคลนที่ใช้กันมากจะอยู่ในบริเวณใกล้ PO-5/6

- พื้นที่หน้าตัดของปากทางเข้าของก๊าซ ก่อนอื่นมีความจำเป็นต้องกำหนดความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซ  $V_i$  โดยทั่วไป ความเร็วที่นิยมใช้คือ 10-20 ม/วินาที ถ้าเลือกใช้ความเร็ว  $V_i$  ต่ำเกินไป ขนาดของไซโคลนจะโตขึ้น และประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่น  $\eta$  จะลดลง แต่ถ้าเลือก  $V_i$  ให้สูงขึ้น ความดันสูญเสียจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในภาคปฏิบัติจะเลือกค่า  $V_i$  ในบริเวณ 15 ม/วินาที เมื่อเป็นเช่นนั้นจะได้พื้นที่หน้าตัดของทางเข้าของไซโคลน a เท่ากับ

$$a = \frac{Q}{V_i} = \frac{1}{15} = 0.0667 \text{ ตร.ม}$$



ภาพประกอบ 29 รูปร่างที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Shape) ของไอโคลน

- สัดส่วนต่างๆ ของไอโคลน ถ้าเลือกไอไอโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสมาตรฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ 29 จะสามารถหาสัดส่วนต่างๆ ของไอโคลนได้ดังต่อไปนี้ชนิดปากทางเข้าในแนวสัมผัส (ภาพประกอบ 29 (a)) ในกรณีนี้  $a = 0.4$   $d \times 1.2$   $d = 0.48$   $d^2 = 0.0667$  ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทางออกของก๊าซ คือ สัดส่วนอื่นๆ ที่เหลือสามารถหาได้จากค่า  $d$  โดยอ้างอิงภาพประกอบ 29 (a)

$$d = \frac{\sqrt{0.0667}}{0.48} = 0.373 \text{ (ม)} = 37.3 \text{ (ซม.)}$$

ชนิดมีห้องวงแหวนเพื่อให้ไหลวนเข้าตลอดเส้นรอบวงจากภาพประกอบ 29(b) สัดส่วนอื่นๆ ที่เหลือสามารถหาได้จากค่า  $d$  โดยอ้างอิงภาพประกอบ 29 (b) เช่นกัน

$$a = 0.4 \text{ } d \times 1 \text{ } d = 0.4 \text{ } d^2 = 0.0667$$

$$\therefore d = \frac{\sqrt{0.0667}}{0.4} = 0.408 \text{ (ม)} = 40.8 \text{ (ซม.)}$$

- ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น  $\eta$  วิธีประเมินประสิทธิภาพไซโคลนมาตรฐานอย่างง่าย ๆ คือ การอาศัยภาพประกอบ 28 โดยใช้  $\rho_p = 2$  (กรัม/ลบ.ซม) ชนิดปากทางไหลในแนวสัมผัส เนื่องจาก  $D = 2d = 0.746$  (ม) จากภาพประกอบ 28 อ่านค่า  $D_{pc}$  ได้เท่ากับ 4 [ไมโครเมตร] นั่นคือ ร้อยละเชิงน้ำหนักของสารอนุภาคในก๊าซเข้าที่มีขนาดโตกว่า 4 [ไมโครเมตร] ชนิดมีห้องวงแหวน เนื่องจาก  $D = 2d = 0.816$  (ม) จากภาพประกอบ 28 อ่านค่า  $D_{pc}$  ได้ประมาณ 4.2 [ไมโครเมตร] ค่าของ  $\eta$  จะเท่ากับ ค่าของ  $R$  [%] ที่  $D_{pc} = 4.2$  [ไมโครเมตร]

- ความดันสูญเสียของก๊าซในไซโคลน ความดันสูญเสีย  $\Delta P$  ในไซโคลนสามารถประเมินได้โดยอาศัยสมการ (19) และสัดส่วนต่างๆ ที่ใช้ของไซโคลนทั้งสองชนิดข้างต้น โดยทั่วไป เพื่อความปลอดภัย จะถือว่าความดันสูญเสียจริงในเครื่องจะเป็น 1.2 ถึง 1.3 เท่าของค่าที่คำนวณได้ ถ้าค่า  $\eta$  และ  $\Delta P$  ที่ประเมินอยู่ในเกณฑ์ที่พอใจ การคำนวณออกแบบก็จะสิ้นสุดลง แต่ถ้า  $\eta$  มีค่าต่ำเกินไปก็อาจทำการคำนวณใหม่หมด โดยสมมุติค่า  $V_1$  ที่สูงขึ้น แต่ไม่ควรเกิน 20-25 ม/วินาที ถ้าพบว่าทำอย่างไรก็ยังไม่ได้ค่า  $\eta$  และ  $\Delta P$  ที่ยอมรับได้ ก็ไม่มีทางเลือกอื่น นอกจากเปลี่ยนไปใช้ไซโคลนรูปแบบอื่น เช่น มัลติ-ไซโคลน เป็นต้น

#### 2.2.4.5 การบำรุงรักษาไซโคลน

- การสึกหรอและฝุ่นร่อน โดยทั่วไป สารอนุภาคที่ต้องการกำจัดโดยไซโคลน จะมีเนื้อแข็งและขนาดหยาบ นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซก็มีมาก ดังนั้น ปัญหาการสึกหรอของผนังไซโคลน (ผนังทรงกระบอก) และใบพัด (Vanes) จึงเกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขปฏิบัติการ หรือการเบี่ยงตัวของไซโคลนในเวลาหยุดเครื่ององค์ประกอบต่างๆ ในก๊าซอาจควบแน่นและกัดกร่อนตัวไซโคลนได้ด้วย

- การกระจายป้อนก๊าซและฝุ่นเข้ามัลติ-ไซโคลน การกระจายป้อนอย่างสม่ำเสมอของเขม่าและควันเข้าไซโคลนที่วางขนาดกันหลายลูก สามารถทำได้ง่าย ถ้ามัลติ-ไซโคลนเป็นแบบไหลเข้าในแนวแกนชนิดไหลย้อนออก แต่จะทำให้ลำบากถ้าเป็นแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส เมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน ก๊าซจะไม่กระจายเข้าอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการกองสะสมของอนุภาคฝุ่น หรือการรั่วของก๊าซที่รอยต่อด้านล่างของทรงกระบอกนอก ดังนั้น เมื่อใช้มัลติ-ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสควรมีการตรวจสอบสภาพการปิดผนึกก๊าซและการกระจายป้อนเข้าของก๊าซและอนุภาคฝุ่นเป็นประจำ

- ควันมีสีและความดันสูญเสียลดลง ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุหนึ่งสาเหตุใดต่อไปนี้

(1) ก๊าซสกปรกไหลลัดออก โดยผ่านรูรั่วบนทรงกระบอกในหรือนอก ซึ่งเกิดจากการสึกหรอหรือฝุ่นร่อน

(2) ก๊าซสกปรกไหลลัดออกเนื่องจากการปิดผนึกก๊าซมีไม่สมบูรณ์ ที่รอยต่อระหว่างแผ่นของท่อบนและทรงกระบอกใน หรือระหว่างแผ่นของท่อล่างและทรงกระบอกนอก

(3) การสึกหรอของใบพัด (Vane) ทำให้ไม่สามารถก่อให้เกิดการไหลวนของก๊าซที่จะบำบัด

(4) อากาศภายนอกแทรกซึมเข้าด้านล่างของฮอปเปอร์ เก็บอนุภาคฝุ่นเพราะการปิดผนึกก๊าซไม่สมบูรณ์

- คิวมีลีและความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคฝุ่นที่แยกออกถูกพัดพาไปกับกระแสลมขึ้น เพราะมีอนุภาคฝุ่นสะสมมากเกินไปที่ด้านล่างของทรงกระบอกนอก (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. 2542 : 196-201)

### 2.3 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบกรอง

การกรองเป็นวิธีกำจัดสารอนุภาคออกจากก๊าซที่มีประสิทธิภาพ ความสะดวกและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจสูงวิธีหนึ่ง การกรองยังเป็นวิธีหนึ่งในจำนวนเพียงไม่กี่วิธีที่สามารถบรรลุมาตรฐานปล่อยออกที่เข้มงวดของสารอนุภาคด้วย ในงานควบคุมมลภาวะอากาศในอุตสาหกรรม เครื่องกรองก๊าซสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทแรกคือเครื่องกรองแบบผ้า (Fabric or Cloth Filters) และประเภทที่สองคือเครื่องกรองแบบเนื้อลึกหรือชั้น (In-Depth or Bed Filters) ตัวแทนที่พบเห็นทั่วไปของเครื่องกรองแบบแรกคือ ถุงกรอง (Bag Filter) หรือบ้านถุงกรอง (Bag House) ส่วนตัวแทนของเครื่องกรองแบบที่สองที่พบเห็นกันบ่อยคือ ชั้นเส้นใย กระดาษกรอง และในบางครั้ง ชั้นหนาของเม็ดวัสดุ เครื่องกรองแบบผ้าโดยทั่วไปจะใช้บำบัดก๊าซ หรืออากาศสกปรกที่มีความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในย่าน 1 กรัม/ลบ.ม ส่วนชั้นเส้นใย กระดาษกรอง และชั้นไส้วัสดุจะใช้กับความเข้มข้นของอนุภาคที่มีค่าน้อยกว่าเป็นหลายร้อยหรือพันเท่าคือในย่าน 1 มล.กรัม/ลบ.ม ตาราง 6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถุงกรอง และชั้นกรองอากาศ (Air Filter) (ชั้นเส้นใยและกระดาษกรอง)

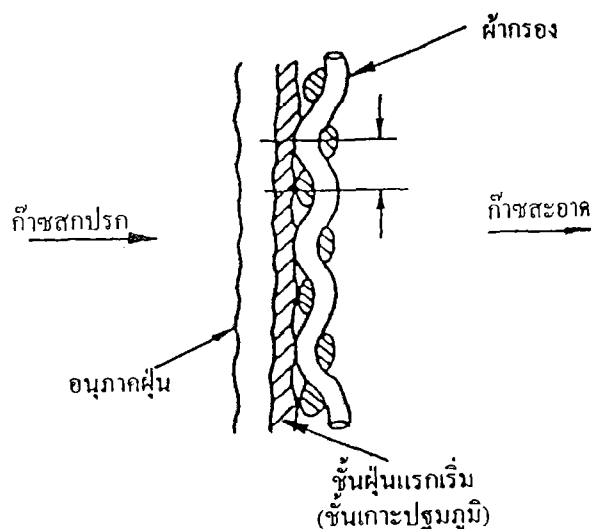
ตาราง 6 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของถุงกรอง และชั้นกรองอากาศ

| รูปแบบ                                    | ถุงกรอง                                       | ชั้นกรองอากาศ                                           |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| วัสดุใช้กรอง                              | ผ้าทอหรือล็กหลาด                              | ชั้นเส้นใย วัสดุกรองที่รูปพรุน กระดาษกรอง ผ้าไม้ไผ่ทอ   |
| วัฏจักร (Cycle)                           | เขย่าชั้นอนุภาคฝุ่นออก แล้วใช้ใหม่            | ทั้งวัสดุกรองแล้วเปลี่ยนใหม่                            |
| ความเข้มข้นของฝุ่นในก๊าซที่เข้า           | 0.1-50 กรัม/ลบ.ม                              | 0.1-100 มล.กรัม/ลบ.ม                                    |
| ความดันสูญเสีย                            | 100-200 มม. H <sub>2</sub> O                  | 10-100 มม. H <sub>2</sub> O                             |
| ความเร็วของการกรอง                        | 0.5-5 ม/นาที่ (1-10 ซม./วินาที)               | 0.1-3 ม/วินาที                                          |
| ประสิทธิภาพการเก็บ                        | ร้อยละ 90-99.9                                | ร้อยละ 20 - 99.99                                       |
| ค่าใช้จ่ายในการลงทุน                      | ราคาสูง                                       | ราคาถูก                                                 |
| ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยน วัสดุกรองต่อปี     | ไม่แพงนัก                                     | ค่อนข้างแพง                                             |
| การใช้งาน                                 | กระบวนการในอุตสาหกรรม<br>สภาวะแวดล้อมในโรงงาน | สภาวะแวดล้อมในห้อง<br>Clean Room โรงไฟฟ้า<br>นิวเคลียร์ |
| การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (การประเมินสมรรถนะ) | เกือบเป็นไปไม่ได้                             | เป็นไปได้ (การไหล 2 มิติ รอบทรงกระบอก)                  |

ที่มา : Manual of Dust Collection Technology. 1972

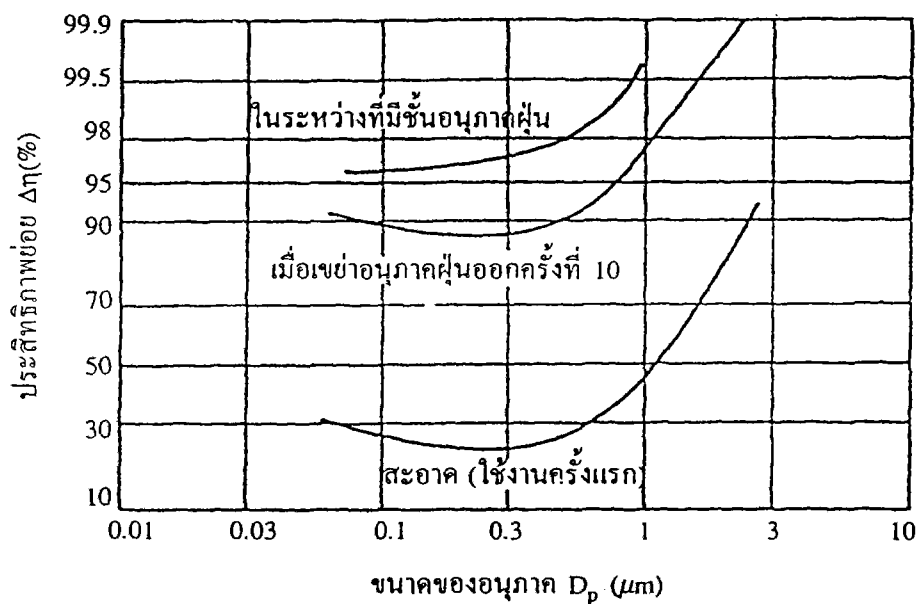
เกณฑ์ตัดสินสมรรถนะของเครื่องกรองมี 3 อย่างคือ ความดันสูญเสีย ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นและอายุใช้งาน โดยทั่วไป จะแสดงค่าความดันสูญเสียในหน่วยมิลลิเมตรของน้ำ (มม.  $H_2O$ ) กำลังม้าของพัดลมหรือเครื่องเป่าลม (Blower) และพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้จะแปรผันโดยตรงกับค่าความดันสูญเสียนี้ ดังนั้นความดันสูญเสียจึงเป็นดัชนีสำคัญในการบ่งบอกค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องของระบบกรอง ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นคงเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการประเมินสมรรถนะของเครื่องกรอง โดยทั่วไป จะประเมินประสิทธิภาพในรูปของเปอร์เซ็นต์หรือร้อยละของมวลของอนุภาคฝุ่นที่เครื่องกรองเก็บได้ แต่ในบางครั้ง อาจอาศัยการวัดความหนาแน่นเชิงแสง (Optical Density) ของปริมาณอนุภาคฝุ่นที่เกาะอยู่บนแผ่นกรอง อายุใช้งาน (Lifetime) ของเครื่องกรองมีความสำคัญมากในแง่เศรษฐศาสตร์ เพราะราคาของวัสดุ (ตัวกลาง) ที่ใช้กรองจะเป็นสัดส่วนใหญ่อันหนึ่งของต้นทุนครั้งแรกและของค่าใช้จ่ายเดินเครื่องในระยะยาวด้วย ตัวกลางที่ใช้กรองก๊าซจะทำจากเส้นใย สารรวมก้อนหรือสารเนื้อพูน ยกตัวอย่างเช่น ผ้าทอสังเคราะห์ (Felt) ขึ้นไยวุ้น และกระดาษกรอง ล้วนทำมาจากเส้นใยทั้งสิ้น ขึ้นวัสดุแน่นทำจากการอัดเศษหรือชิ้นเล็กๆ จำนวนมาก เพื่อกรองก๊าซหยาบที่ไหลผ่าน ขึ้นอัดวัสดุจะมีโครงสร้างแข็งแรง หรือกึ่งแข็งแรง ซึ่งภายในมีทางทะลุผ่านจำนวนมาก วัสดุกรองมีทั้งที่หาได้จากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น การเลือกใช้วัสดุกรองสำหรับงานกรองแต่ละงานต้องคำนึงถึงทั้งค่าใช้จ่าย (เศรษฐศาสตร์) และลักษณะสมบัติในการเก็บอนุภาค วัสดุที่นิยมกันมากที่สุดคือ ผ้าทอโพลีเอสเตอร์หรือผ้าแก้วสำหรับเครื่องกรองแบบผ้า และเส้นใยสังเคราะห์หรือเส้นใยแก้ว สำหรับเครื่องกรองแบบแผ่น ขึ้นอัดวัสดุหนาอาจทำด้วยหินหรืออิฐบดตะแกรงลวด หรือเส้นใยประเภทต่างๆ ในลักษณะเนื้อเดียวหรือผสมกัน

2.3.1 กลไกและประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นของถุงกรอง แสดงในภาพประกอบ 31 ถุงกรองอาศัยผ้ารูปทรงกระบอกหรือแผ่นราบในการกรอง ชั้นของฝุ่นที่เกาะครั้งแรกบนผิวของผ้ากรองจะทำหน้าที่เป็นชั้นกรอง ซึ่งมีความพรุนสูงและจับอนุภาคได้ดีมาก ถุงกรองและเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตมีใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมในฐานะเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นสมรรถนะสูง ถุงกรองจะทำจากผ้าทอที่มีขนาดเมช



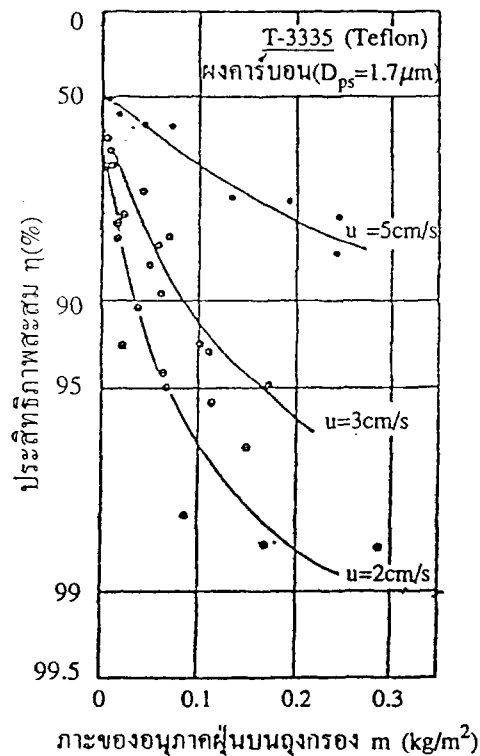
ภาพประกอบ 30 การเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง (การกรองที่ผิว)

(Mesh) ตั้งแต่ 10 ถึง 50 ไมโครเมตรโดยทั่วไป จะเลือกใช้เมชโตกับผ้าทอเส้นใยธรรมชาติ และเมชเล็กกับผ้าทอเส้นใยสังเคราะห์ ในปัจจุบันผ้าทอเส้นใยสังเคราะห์ขนาดเมชประมาณ 10 ไมโครเมตรจะมีใช้กันมากที่สุด ในระหว่างที่ผ้ากรองยังไม่สะอาด อนุภาคฝุ่นจะหนีทะลุตาผ้าได้ง่าย ดังนั้นประสิทธิภาพในช่วงนี้จะค่อนข้างต่ำ แต่ในภาพปฏิบัติ แต่ในภาคปฏิบัติ การกรองที่ดีจะเกิดบนผ้ากรองในสภาพที่มีอนุภาคฝุ่นเกาะอยู่ในปริมาณพอสมควร ดังนั้น โดยทั่วไปจึงคาดหวังประสิทธิภาพเกินร้อยละ 99 ได้ เมื่อผ้ายังสะอาด อนุภาคฝุ่นจะเริ่มเกาะติดบนเส้นด้าย และเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นสะพานอนุภาคฝุ่นเชื่อมระหว่างเส้นด้าย ชั้นของอนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นนี้ มีชื่อเรียกว่า “ชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิ” หรือ “ชั้นอนุภาคฝุ่นแรกเริ่ม” ชั้นอนุภาคฝุ่นนี้มีรูเล็กซับซ้อนจำนวนมาก ความพรุน (Porosity) ของผ้าทอมีค่าร้อยละ 30 ถึง 40 แต่ความพรุนของชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิอาจสูงถึงร้อยละ 85 ถึง 90



ภาพประกอบ 31 ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง

ภาพประกอบ 31 แสดงตัวอย่างของผลการทดลองวัดเปอร์เซ็นต์หรือร้อยละของอนุภาคขนาดต่างๆ ที่ถุงกรองเก็บได้ที่สภาพการกรองต่างๆ จะเห็นได้ชัดเจนว่า ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคละเอียดของผ้ากรองในสภาพสะอาดจะต่ำมาก แต่หลังจากที่เกิดชั้นอนุภาคฝุ่นกรองขึ้นแล้ว การเก็บอนุภาคละเอียดจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก เพราะการกรองเกิดที่รูเล็กละเอียดของชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิ ประมาณของอนุภาคฝุ่นที่กรองได้ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของผ้ากรองมีชื่อเรียกว่า “ภาระของอนุภาคฝุ่น (Dust Load)” ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม/ตร.ซม หรือ กก/ตร.ม ค่าภาระของอนุภาคฝุ่นนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาเดินเครื่องและทำให้ความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นมีความจำเป็นต้องเขย่าอนุภาคฝุ่นที่เกาะติดออกเมื่อความดันสูญเสียสูงถึงค่าๆ หนึ่ง แม้ว่าอนุภาคฝุ่นจะถูกเขย่าออก อนุภาคเกือบทั้งหมดของชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิจะไม่หลุดออกโดยการเขย่านี้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของผ้ากรองที่เขย่าอนุภาคฝุ่นออกใหม่ๆ จะไม่ลดลงเท่าไร



ภาพประกอบ 32 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพสะสมของถุงกรองตามภาระของอนุภาคฝุ่น

ภาพประกอบ 32 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพสะสม (Cumulative Efficiency) ของถุงกรองตามภาระของอนุภาคฝุ่น (หรือเวลากรอง) นอกจากแสดงให้เห็นการเพิ่มของประสิทธิภาพสะสมตามภาระของอนุภาคฝุ่นแล้ว รูปนี้ยังชี้ให้เห็นผลกระทบของความเร็วของก๊าซกรองอย่างชัดเจนด้วย ตัวอย่างนี้เป็นกรณีที่ประสิทธิภาพถุงกรองมีค่าน้อยกว่าปกติ

2.3.2 ความดันสูญเสียของถุงกรอง ถ้าให้  $\Delta P_o$  เป็นความดันสูญเสียเนื่องจากผ้ากรอง และ  $\Delta P_d$  เป็นความดันสูญเสียเนื่องจากชั้นอนุภาคฝุ่น ความดันสูญเสียรวม  $\Delta P$  ของก๊าซในถุงกรองจะเป็น

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_o + \Delta P_d \\ \Delta P &= (\xi_o + m\alpha) \mu v / g_c\end{aligned}\quad (23)$$

|          |              |                                                                           |
|----------|--------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ในที่นี้ | $\Delta P$   | คือความดันสูญเสียรวม (มม. $H_2O$ หรือ $kg_{\text{แรง}}/\text{ตร.ม.}$ )    |
|          | $\Delta P_o$ | คือความดันสูญเสียเนื่องจากผ้ากรอง (มม. $H_2O$ )                           |
|          | $\Delta P_d$ | คือความดันสูญเสียเนื่องจากชั้นฝุ่น (มม. $H_2O$ )                          |
|          | $\xi_o$      | คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของผ้ากรอง ( $m^{-1}$ )                   |
|          | $m$          | คือภาระของฝุ่นบนผ้ากรอง ( $kg/\text{ตร.ม.}$ )                             |
|          | $\alpha$     | คือความต้านทานจำเพาะของชั้นอนุภาคฝุ่น ( $m/kg$ )                          |
|          | $\mu$        | คือความหนืดของก๊าซ ( $kg/(m \text{ วินาที})$ )                            |
|          | $v$          | คือตัวเร็วปรากฏของการกรอง ( $m/\text{วินาที}$ )                           |
|          | $g_c$        | คือตัวแปรหน่วย ( $9.8 \text{ } kg.m/(kg_{\text{แรง}} \text{ วินาที}^2)$ ) |

จะเห็นได้ว่า ความดันสูญเสีย  $\Delta P$  จะแปรผันโดยตรงกับความเร็วปรากฏของการกรอง และ  $\mu$  ความหนืดของก๊าซ ซึ่งทั้งสองตัวนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิของก๊าซ ในภาคปฏิบัติ  $m = 0.1 \sim 0.3$  กก/ตร.ม และ  $\alpha$  จะมีค่าประมาณ  $10^{10}$  (ม/กก) ในกรณีที่ผ้ากรองเป็นผ้าทอ และในภาคปฏิบัติทั่วไป ความดันสูญเสียเนื่องจากผ้ากรองจะมีค่าน้อยกว่าความดันสูญเสียเนื่องจากชั้นฝุ่นมาก นั่นคือ  $\xi_0 \ll m \alpha$

### 2.3.3 ลักษณะสมบัติของผ้ากรอง

ตาราง 7 ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนของราคาของผ้ากรองทั่วไป

| ประเภทวัสดุ / ลักษณะสมบัติ            | อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°ซ) | ความทนกรด | ความทนด่าง | ความแข็งแรง | ลักษณะสมบัติดูดกลืนความร้อน | อัตราส่วนของราคา |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|------------|-------------|-----------------------------|------------------|
| ฝ้าย                                  | 80                        | เลว       | พอใช้      | 1           | 8                           | 1                |
| ขนแกะ                                 | 82                        | พอใช้     | เลว        | 0.4         | 1.6                         | 6                |
| Polyvinylidene Chloride Fiber (Saran) | 80                        | พอใช้     | เลว        | 0.6         | 0                           | 4                |
| Polyvinyl Chloride Fiber (Tevron)     | 95                        | ดี        | ดี         | 1           | 1.04                        | 2.2              |
| Polyvinyl Alcohol Fiber (Vinyon)      | 100                       | ดี        | ดี         | 1.5         | 5                           | 1.5              |
| Polyacrylonitrile Fiber (Kanealon)    | 100                       | ดี        | ดี         | 1.1         | 0.5                         | 6                |
| Polyacrylonitrile Fiber (Orlon)       | 150                       | ดี        | เลว        | 1.6         | 0.4                         | 4.2              |
| Polyamide Fiber (Nylon)               | 110                       | พอใช้     | ดี         | 2.5         | 4                           | 6.5              |
| Polyester Fiber (Nylon)               | 150                       | ดี        | เลว        | 1.6         | 0.4                         | 6.5              |
| Polyester Fiber (Tetoron)             | 150                       | ดี        | เลว        | 1.6         | 0.4                         | 7                |
| เส้นใยแก้ว                            | 250                       | ดี        | เลว        | 1           | 0                           | 7                |
| เส้นใยคาร์บอน                         | 250                       | พอใช้     | ดี         | 1           | 10                          |                  |

ที่มา : Manual of Dust Collection Technology. 1972

ตาราง 7 แสดงลักษณะสมบัติและราคาของผ้ากรองที่ทำจากวัสดุต่างๆ วัสดุที่ทำผ้ากรองจำเป็นต้องมีความแข็งแรงเชิงกล (เพื่อว่าจะไม่เกิดความเสียหายในเวลาเก็บฝุ่นและเวลาเขย่าฝุ่นออก) ตลอดจนต้องมีความทนต่อความร้อน ความทนกรด ความทนด่าง และความชอบไอน้ำ (Hygroscopicity) ซึ่งเหมาะกับลักษณะสมบัติของเขม่าและควันที่ต้องการบำบัด โดยทั่วไปจะใช้ผ้าทอจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์เป็นส่วนใหญ่ ถ้าอุณหภูมิจากก๊าซต่ำกว่า  $150^{\circ}\text{ซ}$  และต้องการความทนกรด ความชอบไอน้ำ และความคงทน ถ้าอุณหภูมิของก๊าซสูงถึง  $250^{\circ}\text{ซ}$  จะใช้ผ้าทอจากเส้นใยแก้ว

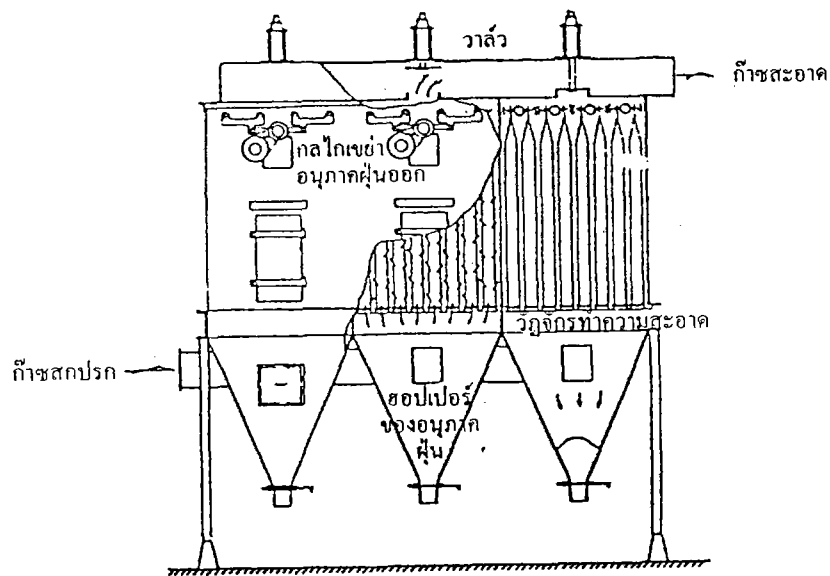
ในระยะหลัง ได้มีการใช้เส้นใยแกรไฟต์เพื่อให้ผ้ากรองมีความทนต่อความร้อนและค่าต่าง นอกจากนี้ ได้มีการใช้ผ้ากรองที่ทำให้เป็นแกรไฟต์ (Graphitized) หรือผ้าที่ฝังที่เส้นใยสแตนเลส เพื่อกำจัดอนุภาคฝุ่นที่มีประจุไฟฟ้าสถิต

2.3.4 ประเภทโครงสร้างและวิธีแยกอนุภาคฝุ่นออก รูปร่างของถุงกรองที่ใช้ทำอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมมี 2 แบบคือ รูปทรงกระบอกและรูปแผ่นราบ

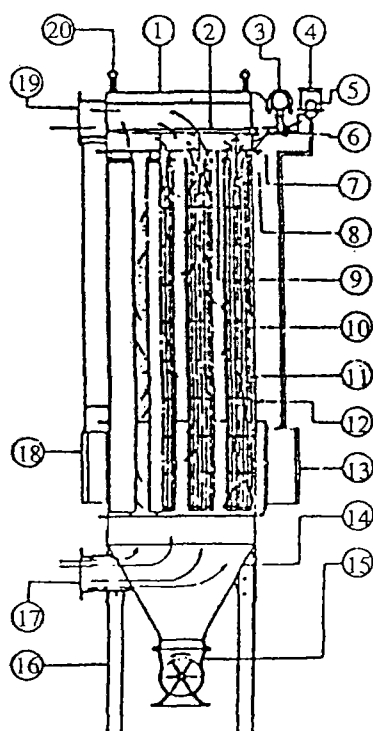
ตาราง 8 วิธีแยกอนุภาคฝุ่นออกแบบต่างๆ

| วิธีแยกอนุภาคฝุ่นออก              | วิธีการทำงาน                                                                                                                                                | ลักษณะสมบัติ                                                                                        |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การสั่นทางกล<br>(ที่ละห้อง)       | การสั่นในแนวระดับมีมากกว่าการสั่นขึ้นลง มีทั้งแบบขับเคลื่อนด้านบนของถุงและแบบขับเคลื่อนตรงกลาง                                                              | ถ้าไม่ใช้ร่วมกับการไหลย้อนของก๊าซอาจไม่พอดี หรือทำให้ผ้าเสียหาย                                     |
| การไหลย้อนของก๊าซ<br>(ที่ละห้อง)  | มีทั้งแบบดูดอากาศผ่านและแบบเป่าลมผ่าน ถ้าทำซ้ำๆ จะได้ผลมาก แบบที่เพียงแต่หยุดการไหลของก๊าซสักระยะเพื่ออัดความดันก๊าซให้ขึ้นฝุ่นหลุดก็มี                     | จำเป็นต้องเปิดปิด Damper สามารถใช้กับถุงรูปแผ่นราบด้วย                                              |
| การไหลย้อนของก๊าซเฉพาะแห่ง        | มีทั้งแบบพ่นก๊าซเฉพาะแห่ง จากด้านบน เข้าด้านในถุงโดยการเคลื่อนขึ้นลงของหัวฉีดรูปวงแหวน และแบบใส่กระแสอากาศที่สั่น (vibrating Flow) ให้ ครึ่งละ 1 ถึงหลายถุง | สลับซับซ้อนขึ้น ปริมาณก๊าซที่บำบัดมากขึ้น กรองได้อย่างต่อเนื่อง                                     |
| ฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์<br>(Pulse Jet) | ในระหว่างที่กรอง ฉีดพ่นอากาศแบบพัลส์เป็นห้วง ๆ จากด้านบนภายในเครื่อง ในทิศทางจากด้านในออกเข้าด้านนอกของถุง                                                  | ใช้กับสักลาด ปริมาณก๊าซที่บำบัดมากสลับซับซ้อนขึ้น อาจเสียหายโดยกรอบของผ้ากรอง กรองได้อย่างต่อเนื่อง |

ที่มา : มลภาวะทางอากาศ. 2542

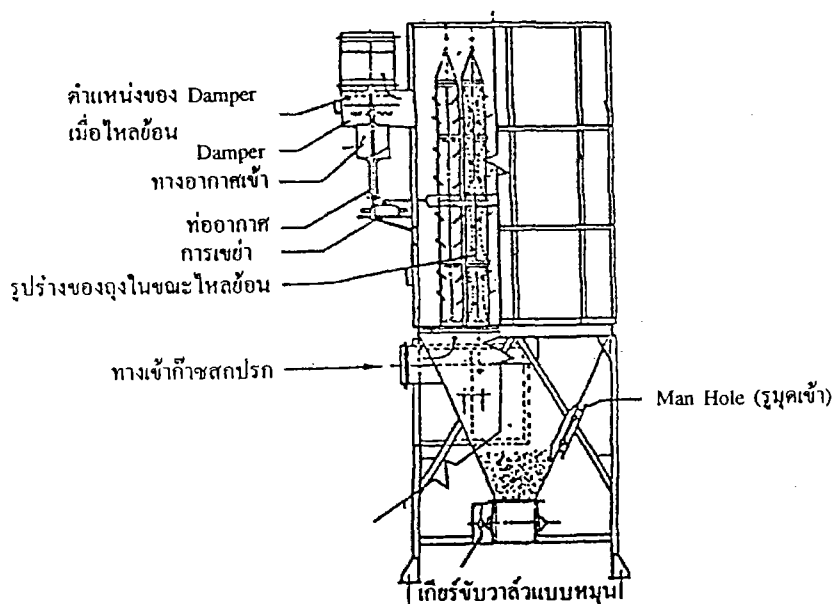


ภาพประกอบ 33 โครงสร้างของถุ่่งกรอ่งที่ไ้ใช้ทั้วไป



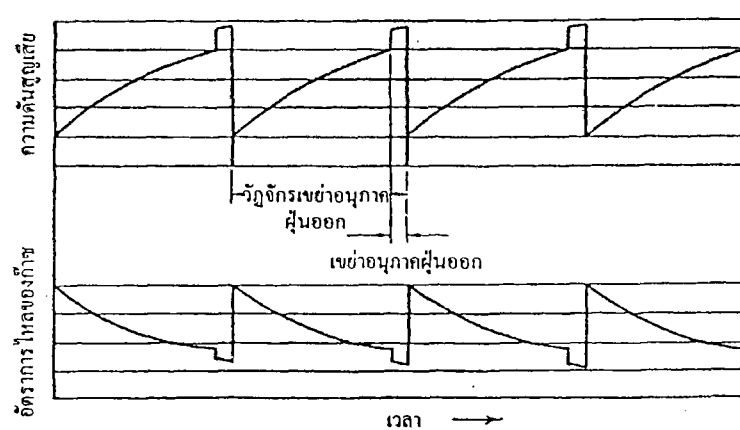
1. หอ่่งค้้านบน
2. ท่อเป้้า
3. ท่อประธาน
4. Pilot Valve
5. วาล์วควบคุม
6. วาล์วไคอาแฟรม
7. ปลอ่ก (collar)
8. เวนทุรี่
9. แผ่นยึ่ดท่อ
10. ที่เก้บสงวนทุ่่ง
11. ทุ่่ง
12. ที่ไ้ใส่ (Housing)
13. เครื่องจับเวลา
14. สอปเปอร์
15. วาล์วแบบหมุน
16. ที่ร่อ่งรับ
17. ทางก้้าซเข้า
18. มาโนมิเตอร์
19. ทางก้้าซออก
20. ห่วงขก

ภาพประกอบ 34 ทุ่่งกรอ่งแบบ Pluse Jet

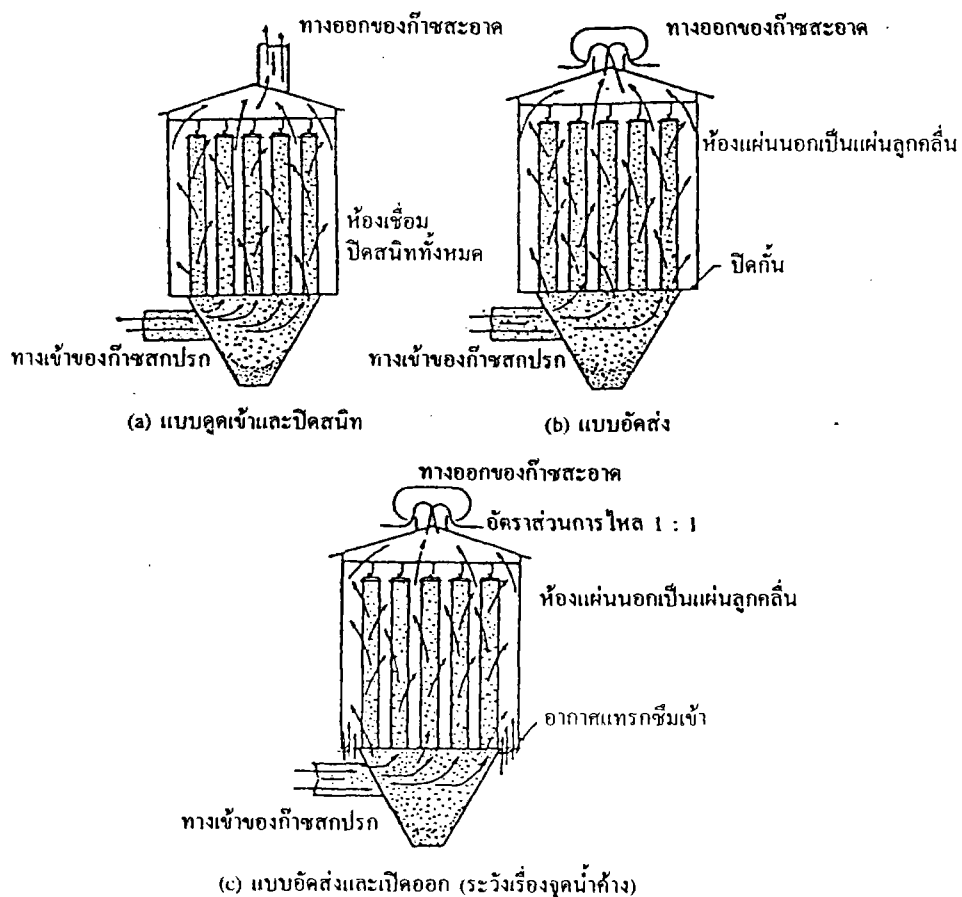


ภาพประกอบ 35 ถุงกรองแบบเขย่าอนุภาคฝุ่นออกโดยการสั่นวงแหวน  
ที่อยู่ช่วงกลางของถุงด้วยแรงกล และส่งอากาศไหลย้อน

ตาราง 8 แสดงการแบ่งประเภทของวิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออกที่นิยมใช้กัน วิธีเขย่าออกจะเป็นลักษณะประจำตัวของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรองที่ผลิตขาย ภาพประกอบ 33 แสดงโครงสร้างของถุงกรองที่ใช้กันทั่วไป ส่วนภาพประกอบ 34 แสดงถุงกรองแบบ Pulse-Jet ทั้งสองแบบนี้ใช้ถุงกรองรูปทรงกระบอกเหมือนกัน แต่ มีทิศทาง การไหลของอากาศสกปรกผ่านถุงในทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ จากด้านในของถุงออกด้านนอกในกรณีของภาพประกอบ 33 และจากด้านนอกเข้าด้านในในกรณีของภาพประกอบ 34 นอกจากนั้นในกรณีแรก วิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออกจะอาศัยการสั่นถุงกรองและส่งอากาศผ่านถุงย้อนทางปกติ ส่วนในกรณีหลังจะเขย่าอนุภาคฝุ่นออก โดยการฉีดเจ็ตของอากาศด้านในของถุงออกด้านนอก (ย้อนทางของก๊าซสกปรก) ในกรณีแรกเขย่าอนุภาคฝุ่นออกจะทำได้ก็ต่อเมื่อหยุดการกรองก๊าซสกปรกชั่วคราว แต่ในกรณีหลังสามารถทำได้เป็นระยะๆ โดยไม่ต้องหยุดการกรองชั่วคราว ข้อเสียของกรณีหลังก็คือไม่สามารถใช้ถุงกรองที่มีขนาดโตมากได้ มิฉะนั้นการเขย่าอนุภาคฝุ่นออกจะได้ผลไม่ดี แต่มีข้อดีคือสามารถกรองก๊าซด้วยความเร็วเป็น 2 ถึง 5 เท่าของกรณีแรก ดังนั้นจึงสามารถบำบัดก๊าซได้ในอัตราที่สูงๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า อนึ่งภาพประกอบ 35 เป็นโครงสร้างของถุงกรองที่เขย่าอนุภาคฝุ่นออกโดยการสั่นวงแหวนที่อยู่ช่วงกลางของถุงด้วยแรงกลและส่งอากาศไหลย้อน สรุปแล้ว วิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออกสามารถแบ่งออกกว้างๆ เป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่เขย่าออกอย่างดีและอย่างรุนแรงเพื่อให้ได้ถุงกรองในสภาพที่สะอาดมากและสามารถใช้ความเร็วของการกรองที่สูงและรูปแบบที่เขย่าชั้นอนุภาคฝุ่นบนถุงกรองออกไม่สมบูรณ์เพื่อทำการกรองด้วยชั้นอนุภาคฝุ่นที่คงเหลืออยู่ อนึ่งในกรณีของรูปแบบหลัง การเขย่าอนุภาคฝุ่นออกจะทำให้ผลิตภัณฑ์ละห้อยของเครื่องที่แบ่งออกเป็นหลายห้อง ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันสูญเสียและอัตราการไหลของก๊าซของทั้งเครื่องจะเป็นไปตามวัฏจักร (Cycle) ของการเขย่าออก ดังแสดงในภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 การเปลี่ยนแปลงของความดันสูญเสียและอัตราการไหลของก๊าซตามวัฏจักรการเขย่าอนุภาคฝุ่นออก



ภาพประกอบ 37 รูปแบบของบ้านถุงกรอง (Filter Bag House)

ในส่วนของโครงสร้าง ถ้าไม่จำเป็นต้องสร้างบ้านถุงกรอง (Filter Bag House) ให้มิดชิดอากาศ (Air Tight) ค่าสร้างจะถูกลงร้อยละ 20 ถึง 30 เมื่อเทียบกับบ้านถุงกรองที่มิดชิดอากาศ ดังนั้น ถ้าลักษณะสมบัติของอนุภาค

ฝุ่นและสภาวะของก๊าซสกปรกอนุโลมให้สามารถติดตั้งเครื่องเป่าลมไว้ก่อนหน้าถุงกรอง ก็ควรใช้วิธีอัดส่งก๊าซดังในภาพประกอบ 37 (b) และ (c) เพราะในกรณีเช่นนี้บ้านถุงกรองไม่จำเป็นต้องมีติดอากาศก็ทำงานได้

2.3.5 ลักษณะสมบัติทั่วไปของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรอง ความเร็วปรากฏของการกรองและประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น ความเร็วปรากฏของการกรอง (Apparent Filtering Velocity) คำนวณได้จาก

$$V = (Q/A) * 100 \quad (24)$$

ในที่นี้

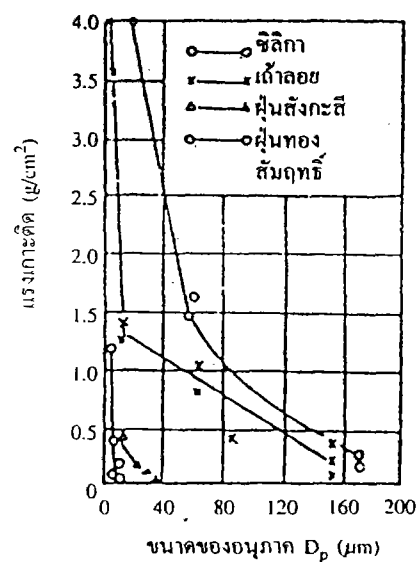
V คือความเร็วปรากฏของการกรอง (ชม./วินาที)

Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ (ลบ.ม/วินาที)

A คือพื้นที่รวมเชิงประสิทธิภาพผลของผ้ากรอง (ตร.ม)

ความเร็วปรากฏของการกรองจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง (ภาพประกอบ 37 เป็นตัวอย่าง) ความเร็วที่เหมาะสมนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของอนุภาคฝุ่นและโดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออก โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 10 ชม./วินาที ความเร็วที่เหมาะสมจะมีค่าสูงในกรณีของผ้าทอและค่าต่ำในกรณีของผ้ากรองอื่นๆ ในกรณีที่ต้องการเก็บอนุภาคละเอียดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ความเร็วนี้ควรใช้ค่าประมาณ 1 ถึง 2 ชม./วินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่เก็บได้ร้อยละ 50 โดยถุงกรองคือประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ค่าวิกฤตนี้จะขึ้นกับประเภทของอนุภาคฝุ่นและการออกแบบถุงกรอง หลังจากที่เกิดชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิเรียบร้อยแล้วภาวะของอนุภาคฝุ่นจะแทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของถุงกรอง

2.3.6 การบำรุงรักษาลักษณะสมบัติเกาะติดของเขม่าและควัน ในกรณีของเขม่าและควัน ถ้าสารอนุภาคมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวของสารอนุภาคจะยิ่งมาก และปริมาณของความชื้นในก๊าซทั้งหมดจนปริมาณของกรดกำมะถันที่ดูดซับหรือดูดกลืนโดยสารอนุภาคก็จะมากขึ้น



ภาพประกอบ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเกาะติดกับขนาดอนุภาค

ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเกาะติด (Adhesion) กับขนาดของอนุภาคฝุ่น จะเห็นว่าแรงเกาะติดของเขม่าและอนุภาคฝุ่นแตกต่างกันได้มากขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและส่วนประกอบของอนุภาคฝุ่น ถ้าอนุภาคฝุ่นมีความต้านทานไฟฟ้าสูง แรงเกาะติดจะมีค่าสูงขึ้นและการเขย่าอนุภาคฝุ่นออกมักทำได้ลำบาก

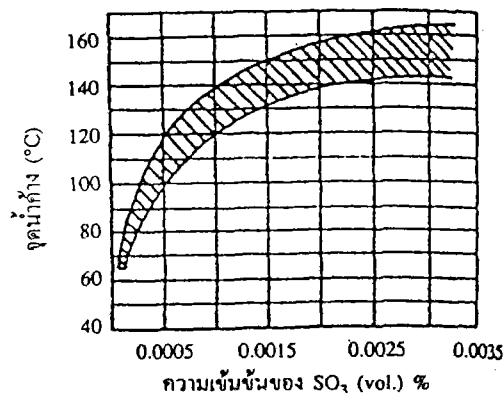
### 2.3.7 รายการที่ต้องตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง

2.3.7.1 ในกรณีที่บำบัดก๊าซอุณหภูมิสูง ก่อนเดินเครื่องอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรอง ควรตรวจสอบการปฏิบัติการของเครื่องลดอุณหภูมิของก๊าซและของหัวฉีดสเปรย์

2.3.7.2 ก่อนเริ่มเดินเครื่อง ควรตรวจสอบความเข้มข้นของ CO และ O<sub>2</sub> และอุณหภูมิของก๊าซเพื่อป้องกันการระเบิดและเพื่อพิทักษ์ผ้ากรอง

### 2.3.8 การเดินเครื่องควรทำที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ความพรุนของชั้นอนุภาคฝุ่นปฐมภูมิมีค่าประมาณร้อยละ 85 และชั้นอนุภาคฝุ่นนี้มีรูเปิดเล็กมากจำนวนนับไม่ถ้วน ถ้าอุณหภูมิของก๊าซลดต่ำกว่าจุดน้ำค้าง (Dew Point) ของกรดกำมะถันในก๊าซนั้น องค์ประกอบที่ควบแน่นได้จะควบแน่นออกจากก๊าซและอุดตันรูเปิดเหล่านั้นได้



ภาพประกอบ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SO<sub>3</sub> และจุดน้ำค้างของกรดในก๊าซทิ้ง

ภาพประกอบ 39 แสดงตัวอย่างของผลการวัดความเข้มข้นของ SO<sub>3</sub> และจุดน้ำค้างของกรดในก๊าซทิ้ง โดยทั่วไปควรปรับอุณหภูมิของก๊าซที่เข้าถุงกรองให้เท่ากับจุดน้ำค้างของกรดบวก 20°C

2.3.9 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบกรอง ชั้นเส้นใยกรองและแบบอื่นๆ ชั้นเส้นใยกรอง (Fibrous Mat Filters) เป็นเครื่องกรองประเภทที่ลักษณะสมบัติการทำงานเป็นที่เข้าใจกันดีที่สุด การศึกษาชั้นเส้นใยกรองได้เริ่มต้นตั้งแต่วางปี ค.ศ.1950 และกระทำกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่คำนึงและไม่คำนึงถึงอิทธิพลของประจุไฟฟ้าสถิตและแรงโน้มถ่วงของโลก ได้มีการศึกษาผลที่รูปร่างของเส้นใยมีต่อสมรรถนะการกรอง ทั้งในแง่ความยาวของเส้นใยและความกลม (Circularity) ของเส้นใย อย่างไรก็ตาม การประมาณสมรรถนะของแผงกรองที่เก็บสะสมอนุภาคฝุ่นไว้แล้ว โดยการคำนวณทางทฤษฎียังทำได้ไม่สมบูรณ์ในปัจจุบัน

2.3.10 กลไกและประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของชั้นเส้นใยกรอง กลไกสำคัญในการเก็บสารอนุภาคละเอียดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและแขวนลอยอยู่ในกระแสก๊าซ โดยใช้ ชั้นเส้นใยกรอง ได้แก่ ผลของแรงเฉื่อย การสกัดกั้นโดยตรง และการแพร่ (การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน) แรงโน้มถ่วงจะมีผลต่อการเก็บอนุภาคค่อนข้างโตเท่านั้น ผลของแรงเฉื่อยมีความสำคัญเมื่อทำให้อนุภาคมีเส้นโคจรที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นทางไหลเดิมในก๊าซ ในขณะที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวาง แม้ว่าอนุภาคจะเบี่ยงเบนออกจากเส้นการไหลของก๊าซ

อนุภาคนั้นก็อาจหรือไม่อาจสัมผัสกับสิ่งกีดขวาง การสัมผัสหรือไม่ย่อมขึ้นกับขนาดของสิ่งกีดขวาง ขนาดและแรงเฉื่อยของอนุภาค และตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งกีดขวางในขณะที่เริ่มเข้าใกล้ แรงเฉื่อยจะมีความสำคัญน้อยต่อการเก็บอนุภาคนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร แต่จะมีความสำคัญเพิ่มขึ้นมากเมื่อขนาดของอนุภาคโตขึ้น การเก็บอนุภาคโดยการสกัดกันโดยตรง (Direct Interception) มีความสำคัญสูงสุดสำหรับอนุภาคนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 ถึง 1 ไมโครเมตร แม้ว่าอนุภาคนาดนี้จะไม่ถึงกับไร้แรงเฉื่อย แต่แรงเฉื่อยที่มีจะค่อนข้างไม่สำคัญ อนุภาคนาด 0.2 ถึง 1 ไมโครเมตรมีแนวโน้มที่จะวิ่งตามเส้นการไหลของก๊าซอ้อมรอบสิ่งกีดขวาง และจะสัมผัสกับสิ่งกีดขวางก็ต่อเมื่อเส้นการไหลนั้นอยู่ใกล้กับสิ่งกีดขวางอย่างเพียงพอ อนุภาคนาดเล็กมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร) จะไม่วิ่งเกาะตามเส้นการไหลของก๊าซเพราะการชนกับโมเลกุลแต่ละโมเลกุลของก๊าซรอบๆ จะทำให้อนุภาคกระเด็นไปมา ผลที่เกิดขึ้นก็คือการเคลื่อนไหวแบบบราวเนียน (Brownian Motion) การเคลื่อนตัวอย่างไม่มีการกำหนด (Random) นี้จะเพิ่มโอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสกับผิวเก็บ และเป็นกลไกการเก็บที่เด่นมากสำหรับอนุภาคนาดเล็กมากกลไกต่างๆ ที่กล่าวมาอาจจะทำงานร่วมกันต่ออนุภาคได้ ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มเติมในภายหลัง

2.3.11 ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคของชั้นเส้นใย ประสิทธิภาพของชั้นเส้นใยสามารถคำนวณได้ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคทรงกลมโดยเส้นใยทรงกระบอกเพียงเส้นเดียว แล้วรวมหาจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่เส้นใยทั้งหมดจับได้ นั่นคือประสิทธิภาพแรกเริ่มของชั้นกรอง (ประสิทธิภาพเมื่อเริ่มใช้งาน) จะหาได้จาก

$$E_o = 1 - \exp [-4 (1-E_f) L \eta_c / (\pi E_f D_f)] \quad (25)$$

ซึ่งมีชื่อเรียกว่า กฎการวิ่งทะลุเชิงล็อก (Log-Penetration Law)

|          |          |                                                         |
|----------|----------|---------------------------------------------------------|
| ในที่นี้ | $E_o$    | คือประสิทธิภาพแรกเริ่มของชั้นกรอง (ชั้นเส้นใย) (-)      |
|          | $\eta_c$ | คือประสิทธิภาพแรกเริ่มของเส้นใยเดี่ยว (-)               |
|          | $E_f$    | คืออัตราส่วนของชั้นเส้นใยที่เป็นช่องว่าง (Porosity) (-) |
|          | $L$      | คือความหนาของชั้นกรอง (ม)                               |
|          | $D_f$    | คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในชั้นกรอง (-)             |

ประสิทธิภาพแรกเริ่ม  $\eta_c$  ของเส้นใยเดี่ยวในสมการ (25) ควรเป็นของกรณีที่กำลังถึงผลกระทบจากเส้นใยข้างเคียงด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการเก็บแรกเริ่ม  $\eta_o$  ของเส้นใยที่อยู่โดดเดี่ยว (นั่นคือประสิทธิภาพในกรณีที่ไม่มียผลกระทบจากเส้นใยข้างเคียง) กับประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว  $\eta_c$  ข้างต้น เป็นดังนี้

$$\eta_c = \eta_o [1 + \beta (1-E_f)] \quad (26)$$

ในที่นี้ พารามิเตอร์  $\beta$  มีค่าระหว่าง 5 และ 20 ถ้าผลของแรงเฉื่อยมีความสำคัญกว่ากลไกอื่นๆ อย่างไรก็ดี ไม่ใช่ว่าอนุภาคทุกชิ้นที่สัมผัสกับเส้นใยจะเกาะติดเสมอ การเกาะติดหรือไม่เกาะติดของอนุภาคเมื่อเกิดการกระทบกับเส้นใย ย่อมขึ้นกับปัจจัยต่างๆ รวมทั้งมุมของการกระทบ การหลุดลอยหนีใหม่ (Reentrainment) ของอนุภาคที่เกาะติดอยู่จะเกิดมาก หลังจากการปะทะของอนุภาคฝุ่นได้เพิ่มสะสมจนถึงค่าๆหนึ่งในชั้นกรอง เงื่อนไขแน่นอนที่เกิดปรากฏการณ์ย่อมขึ้นโดยหลักใหญ่กับตัวกลางที่ใช้กรอง อนุภาคนาด และความเร็วก๊าซ

ในปัจจุบันยังไม่สามารถทำนายเงื่อนไขดังกล่าวได้ดี ในบางครั้งการรั่วไหลรอบๆ ตัวกลางที่ใช้กรองก็เป็นสาเหตุของการเลวลงของประสิทธิภาพรวมในการกรอง

### 2.3.12 สำหรับการไหลแบบ (มีความ)หนืด (viscous Flow)

$$\eta_{c1} = 1 - \frac{[2(1+R)\ln(1+R) - (1+R) + 1/(1+R)]}{2K} \quad (27)$$

โดยที่ K คือ Hydrodynamic Factor และ R คือ พารามิเตอร์การสกัดกัน (Interception Parameter)

$$R = D_p/D_f \quad (28)$$

$$K = 2 - \ln Re \quad (29)$$

โดยที่  $\alpha$  คืออัตราส่วนของเนื้อที่ในชั้นกรองที่เป็นของเส้นใย ( $\alpha = 1 - \epsilon_r$ ) การไหลแบบหนืดจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$Re = \rho V D_f / \mu < 1$$

### 2.3.13 สำหรับการไหลแบบโพเทนเชียล (Potential Flow)

$$\eta_{c1} = 1 + R - 1 / (1 + R) \quad (30)$$

### 2.3.14 การเคลื่อนไหลแบบการแพร่ ประสิทธิภาพแรกเริ่มในการเก็บอนุภาคของเส้นใยเดี่ยว

$\eta_{ED}$  โดยกลไกการแพร่อย่างเดียวเป็นดังต่อไปนี้ สำหรับการไหลแบบ(มีความ)หนืด

$$\eta_{ED} = 2.9K^{-1/3} Pe^{-2/3} + 0.624 / Pe \quad (31)$$

$$K = \text{Hydrodynamic Factor}$$

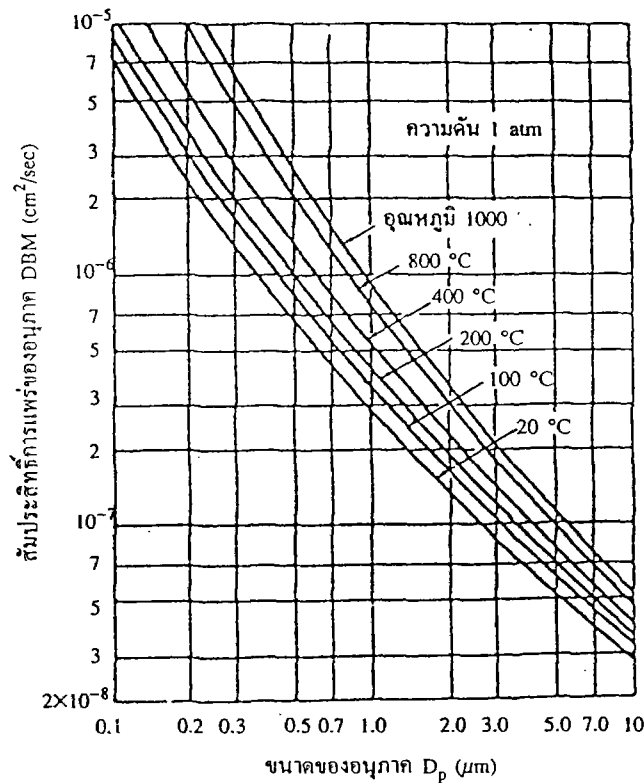
สำหรับการไหลแบบโพเทนเชียล

$$\eta_{ED} = 3.19 Pe^{-1/2} \quad (32)$$

ในที่นี้ Pe คือตัวเลขเพคเลต (Peclet Number) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Pe = V D_f / D_{BM} \quad (33)$$

โดยที่  $D_{BM}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคซึ่งแสดงค่าไว้ในรูปที่ 7.58 สำหรับการแพร่ในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพประกอบ 40 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค

2.3.15 การแพร่และการสกັดกัน สมการทั่วไปสำหรับประสิทธิภาพการเก็บแรกเริ่มของเส้นใยเดี่ยว ซึ่งคำนึงถึงทั้งกลไกการแพร่และการสกັดกันเป็นดังนี้

$$\eta_{\text{ed}} = \eta_{\text{ed}} + \eta_{\text{sc}} + f(\text{Pe}, R) \quad (34)$$

$$f(\text{Pe}, R) = 1.24 K^{1/2} \text{Pe}^{-1/2} R^{2/3} \quad (35)$$

2.3.16 แรงโน้มถ่วงและการสกັดกัน ประสิทธิภาพการเก็บแรกเริ่มของเส้นใยโดดเดี่ยวโดยกลไกของแรงโน้มถ่วง และการสกັดกันหาได้จากการแก้สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยวิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ตาราง 9 แสดงสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพดังกล่าวที่ได้จากการวิเคราะห์ ในตารางนี้ พารามิเตอร์แรงโน้มถ่วง (gravitational Parameter)  $G$  คำนวณได้จาก

$$G = C_m D_p^2 g / (18\mu) \quad (36)$$

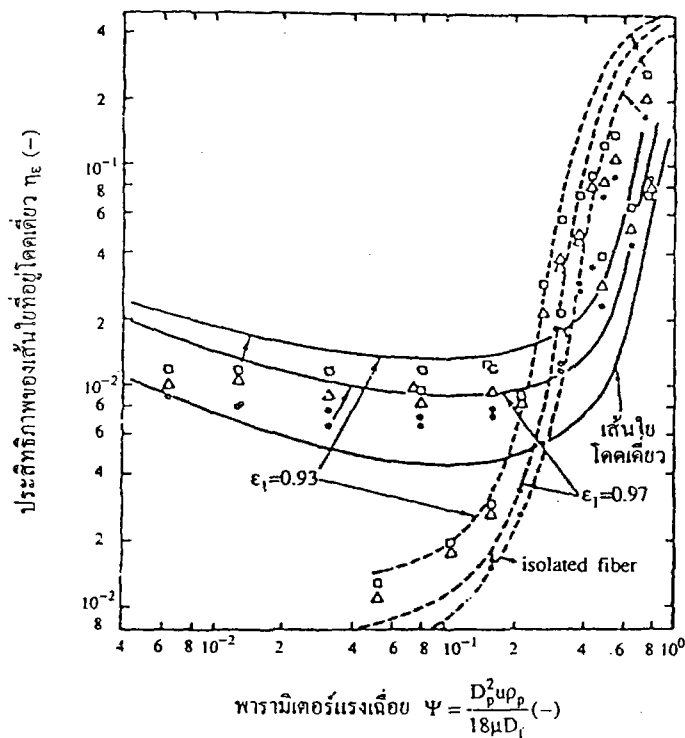
โดยที่  $C_m$  คือตัวชดเชยของค่านิ่งแอม การไหลทะลุผ่านชั้นกรองของอนุภาคในกรณีของการไหลขึ้นจะเท่ากับหรือมากกว่ากรณีของการไหลลงเสมอ

ตาราง 9 สูตรคำนวณประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่น ของเส้นใยโศดเดี่ยวโดยกลไกแรงโน้มถ่วงและการ  
สถักกัน

| ลักษณะการไหล          | ทิศทางการไหล | ประสิทธิภาพโดยแรงโน้มถ่วงและการสถักกัน                                                                                             | ประสิทธิภาพโดยแรงโน้มถ่วง |
|-----------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| แบบชั้นๆ<br>(Laminar) | แนวระดับ     | $\frac{1+R}{(1+G^2)\sqrt{G^2+R^2/2-\ln Re}^2} \cdot \left[ \frac{R^2 [(1/(1-R)^2 - 1 + \ln(1+R)^2) + G^2]}{2(2-\ln Re)^2} \right]$ | $\frac{G}{\sqrt{1+G^2}}$  |
| แบบชั้นๆ<br>(Laminar) | แนวตั้งลง    | $\frac{1+R}{1+G} \left\{ \frac{1}{2(2-\ln Re)} \cdot \frac{1}{(1+R^2)} \left[ -1 + \ln(1+R)^2 + G \right] \right\}$                | $\frac{G}{1+G}$           |
| แบบโพเทนเชียล         | แนวระดับ     | $1 + \frac{\sqrt{(1+R)^4 G^2 + [(1+R)^2 - 1]^2}}{(1+R)\sqrt{1+G^2}}$                                                               | $\frac{G}{\sqrt{1+G^2}}$  |
| แบบโพเทนเชียล         | แนวตั้ง      | $\frac{1}{1+G} \left[ G(1+R) - \frac{1}{1+R} + (1+R) \right]$                                                                      | $\frac{G}{1+G}$           |

ที่มา : มลภาวะทางอากาศ. 2542

2.3.17 แรงเฉื่อยแรงโน้มถ่วงและการสถักกัน การแก้สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในกรณีนี้ ต้องทำเชิงตัวเลข (Numerically) โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ คำตอบที่ได้เป็นค่าเชิงทฤษฎีของประสิทธิภาพการเก็บแรกเริ่มของเส้นใยที่อยู่โศดเดี่ยว จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพรวมของชั้นไส้กรองได้โดยอาศัยค่าข้างต้น และกฎการวิงทะลุเชิงลือก (สมการ (25))



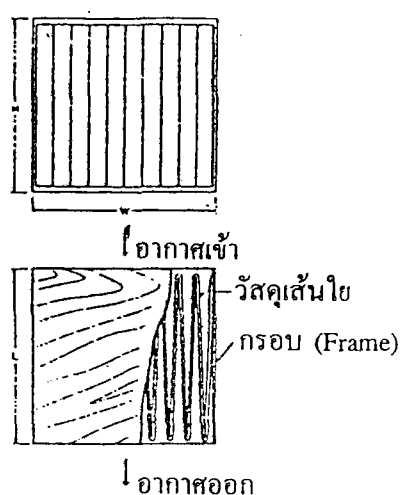
ภาพประกอบ 41 การเปรียบเทียบค่าคำนวณและค่าทดลองของประสิทธิภาพ  
แรกเริ่มของเส้นใยที่อยู่โดดเดี่ยว

ภาพประกอบ 41 เปรียบเทียบค่าคำนวณและค่าทดลองของประสิทธิภาพการเก็บแรกเริ่มของเส้นใยโดดเดี่ยวในเงื่อนไขการกรองที่แรงเฉือนของอนุภาคมีความสำคัญ อย่างไรก็ตาม การประมาณประสิทธิภาพการเก็บในเงื่อนไขที่มีการระของอนุภาคฝุ่นยังเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ทั้งๆ ที่ประสิทธิภาพดังกล่าวจะมีความสำคัญมากในภาคปฏิบัติ

2.3.18 อายุใช้งานของตัวกลางกรอง (ความสามารถในการจุอนุภาคฝุ่น) ความสามารถในการจุอนุภาคฝุ่น (Dust Holding Capacity) คือการระของอนุภาคฝุ่นสูงสุดต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยของตัวกลางกรองที่ขีดจำกัดค่าหนึ่งของผลลดความดัน ในภาคปฏิบัติความสามารถในการจุ อนุภาคฝุ่นที่มีค่าสูงเป็นสิ่งที่พึงปรารถนา เพราะทำให้ตัวกลางกรองมีอายุใช้งานยาวนานขึ้น ค่าความสามารถในการจุทั่วไปจะประมาณ 0.3 ถึง 2 กก ของอนุภาคฝุ่นต่อผิวกรอง 1 ตร.ม.

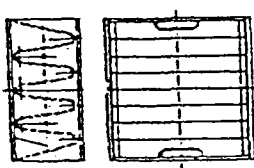
2.3.18.1 ประเภท โครงสร้าง และหน้าที่ เครื่องกรองแบบเส้นใยเป็นเครื่องกรองอากาศแบบหนึ่งที่ใช้กันกว้างขวางมากและเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นมีน้อย การบำรุงรักษาเครื่องกรองแบบเส้นใยทำได้ง่ายเพราะมีโครงสร้างที่ง่าย ๆ เครื่องกรองแบบเส้นใยอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ประเภทแรกคือ แบบโยนแผงทิ้ง (Throw-Away Panel Type) ซึ่งเป็นแบบที่สะดวกไว้ในกรอบและจะเปลี่ยนทั้งกรอบและวัสดุกรองเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง ประเภทที่สองคือแบบ ที่เปลี่ยนเฉพาะวัสดุกรองโดยปฏิบัติการเปลี่ยนใหม่ (renewal Operation) ส่วนประเภทที่สามคือเครื่องกรองที่มีกลไกทำความสะอาดวัสดุกรองติดอยู่ นั่นคือเป็นแบบที่ทำความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning Type)

2.3.18.2 เครื่องกรองแบบโยนแผงทิ้ง โดยทั่วไป เครื่องกรองแบบนี้จะสร้างโดยการบรรจุเส้นใยโลหะ แก้ว หรือพลาสติก ลงอย่างหลวมๆในกรอบ ซึ่งโดยปกติมีพื้นที่ประมาณ 50 ตร.ซม. และความหนา 2 ถึง 5 ซม. ความเร็วผิวผิว (Superficial Velocity) ที่ใช้งานกับแผงกรองเหล่านี้จะมีค่าจาก 0.3 ถึง 2 ม/วินาที และความดันสูญเสียมีค่าตั้งแต่ 5 ถึง 50 มม H<sub>2</sub>O ภาพประกอบ 42 แสดงตัวอย่างของเครื่องกรองแบบโยนแผงทิ้ง ส่วนใหญ่แผงกรองแบบโยนแผงทิ้ง มักติดตั้งในลักษณะคดเคี้ยวไปมา (Zigzag) เพื่อเพิ่มพื้นที่กรองให้มากขึ้น อนึ่ง วัสดุกรองที่ทำด้วยเส้นใยเซรามิก เส้นใยแร่ หรือเส้นใยที่ทำให้เป็นโลหะ (Metalized) ก็มีใช้สำหรับกรณีฉุกเฉินที่มีก๊าซสูงๆ แต่มีขีดจำกัดในการใช้เพราะราคาแพง

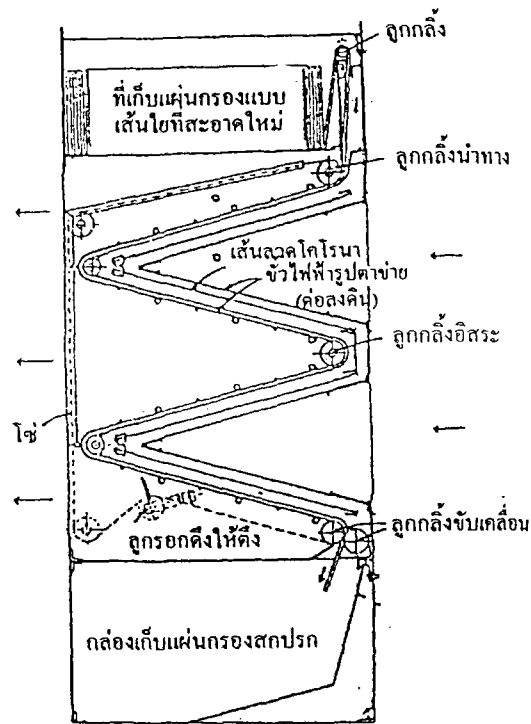


ภาพประกอบ 42 เครื่องกรองแบบโยนแผงทิ้ง

2.3.18.3 เครื่องกรองแบบเปลี่ยนวัสดุกรองได้ เครื่องกรองแบบนี้จะใช้วัสดุกรองที่ทำเป็นม้วนหรือห่อ และการเปลี่ยนวัสดุกรองจะกระทำเป็นระยะๆ อย่างอัตโนมัติ ในกรณีของแบบที่เปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราว ส่วนหนึ่งของวัสดุกรองในย่านการกรองจะถูกเปลี่ยนด้วยวัสดุใหม่อย่างไม่ต่อเนื่องหลังจากใช้งานไปพักหนึ่ง ส่วนในกรณีของแบบที่เปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่อง วัสดุกรองจะถูกเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องในอัตราความเร็วที่ตั้งไว้ (ภาพประกอบ 43)

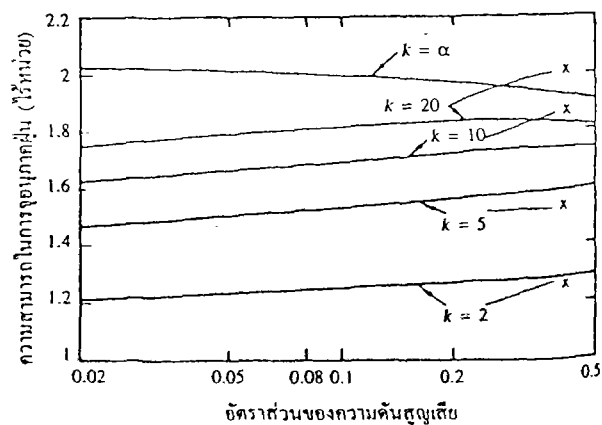


ภาพประกอบ 43 เครื่องกรองแบบเปลี่ยนวัสดุกรองได้



ภาพประกอบ 44 เครื่องกรองแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราว (เส้นใยเชิงไดอิเล็กตริกและปล่อยโคโรนา)

หนึ่งวิธีที่ใช้กำหนดจังหวะการเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราวก็มีสองวิธีคือ วิธีที่ใช้สวิตช์ความดัน (Pressure Switch) และวิธีที่ใช้เครื่องตั้งเวลา (Timer) ภาพประกอบ 44 แสดงตัวอย่างของแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราว ซึ่งใช้ชั้นเส้นใยเชิงไดอิเล็กตริก (Dielectric Fibrous Mat) และมีการปล่อยประจุโคโรนา (Corona Discharge) ด้วย ในแง่เศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวกับการประหยัดวัสดุกรองและในแง่การลดการแปรค่าขึ้นลงของความดันสูญเสียของอัตราการไหลให้น้อยลงแล้ว ทั้งเครื่องกรองแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราวและอย่างต่อเนื่องจะดีกว่าแบบโยนแผงทิ้งมาก ได้มีรายงานผลการทดลองที่น่าสนใจว่าเครื่องกรองแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราว ซึ่งควบคุมการเปลี่ยนโดยสวิตช์ความดันสามารถรับภาระของอนุภาคฝุ่นได้ในปริมาณประมาณสองเท่าของแบบเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องและแบบโยนแผงทิ้ง การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของเครื่องกรองแบบเปลี่ยนใหม่อย่างครั้งคราวและอย่างต่อเนื่องก็สนับสนุนผลการทดลองข้างต้น



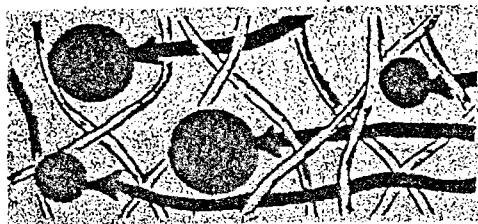
ภาพประกอบ 45 ความสามารถในการจับอนุภาคฝุ่นของเครื่องกรองแบบเส้นใยชนิดเปลี่ยนวัสดุใหม่บางส่วน(เส้นทึบ : การคำนวณ ; X ; การทดลอง)

ภาพประกอบ 45 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการจุณภาคฝุ่น (ไร้หน่วย) กับอัตราส่วนระหว่างความดันสูญเสียแรกเริ่มและความดันสูญเสียสูงสุด ค่า  $k$  ในรูปคืออัตราส่วนการเปลี่ยนใหม่ นั่นคือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของย่านการกรองกับความยาวของส่วนที่เปลี่ยนใหม่แต่ละครั้ง หนึ่งวิธีการยืดอายุการใช้งานของวัสดุกรองอีกวิธีก็คือการใช้เครื่องกรองล่วงหน้า (Prefilter) ที่มีค่าความดันสูญเสียและประสิทธิภาพในการเก็บน้อยกว่าของเครื่องกรองหลัก

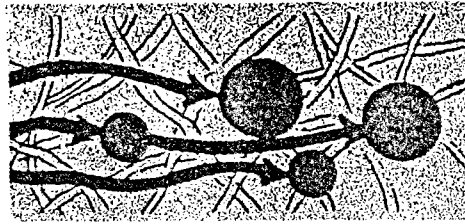
2.3.18.4 เครื่องกรองทำความสะอาดตัวเอง ในรูปแบบหนึ่งของเครื่องกรองแบบทำความสะอาดตัวเอง ชั้นเส้นใยจะถูกติดตั้งในลักษณะที่สามารถฉีดน้ำใส่โดยตรงเพื่อทำความสะอาด น้ำล้างที่ไหลตกลงมาจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในอ่าง (Basin) ถ้าภาระของอนุภาคฝุ่นมีค่าค่อนข้างน้อย และทำการเปลี่ยนน้ำล้างเป็นระยะๆ เครื่องกรองแบบนี้จะใช้งานได้เป็นเวลายาวนานโดยไม่ต้องเปลี่ยนวัสดุกรอง ในอีกแบบหนึ่งของเครื่องกรองแบบทำความสะอาดตัวเอง แผงกรอง (Filter Panels) ซึ่งต่อกันด้วยบานพับและวางซ้อนกัน จะถูกติดตั้งในลักษณะที่เป็นคล้ายม่านในแนวดิ่ง ม่านนี้จะเคลื่อนที่ตามโซ่ซึ่งเกี่ยวติดกันเพื่อยึดที่อยู่ด้านบนและด้านล่าง แผงแต่ละแผงจะเคลื่อนที่ครบรอบในเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ก๊าซที่ต้องการกรองจะไหลผ่านแผงสองชั้นที่วางซ้อนกัน แผงด้านที่เคลื่อนลงจะจมลงใต้น้ำในอ่างน้ำมันที่มีการกวานเมื่อเคลื่อนลงถึงจุดต่ำสุดของรอบหมุนเพื่อชะล้างอนุภาคฝุ่นที่ติดสะสมอยู่หลังจากล้างสะอาดและทำให้เปียกน้ำมันอีกครั้งแล้ว แผงดังกล่าว จะเคลื่อนตัวขึ้นเพื่อยึดกลับไปยังตำแหน่งที่วางซ้อนกันเพื่อทำหน้าที่เป็นม่านกรองอีกครั้ง (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์และคณะ 2542. 222-245)

## 2.4 ไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์

ไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์(cartridge filter)นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้ได้สะดวก เชื่อถือได้ ใช้งานได้ ในการผลิตเครื่องกรองของไหล (น้ำ/ของเหลว/อากาศ/ก๊าซ) ให้ใสหรือมีความบริสุทธิ์ตามต้องการได้ อย่างไรก็ตามก็มีการเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการใช้ไส้กรองยังมีอยู่ไม่มาก ไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์ เหมาะสมกับการใช้กรองของไหล(liquid) ที่มีอนุภาคหรือตะกอนแขวนลอยตั้งแต่ 100 ไมครอนลงไป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคอยู่ในช่วง 0.006 ถึง 300 ไมครอน (1 ไมครอน = 1/1,000 มิลลิเมตร) กรองของเหลวที่มีความหนืดได้สูงถึง 100,000 เซนติพอยส์ (centipoise) ทนแรงดันของระบบถึง 3,000 psig และใช้ได้ถึงอุณหภูมิ 750 องศาฟาเรนไฮต์ สำหรับของไหลที่ปนเปื้อนมาก ควรกรองด้วยเครื่องกรองหยาบ เช่น ตะแกรงหรือผ้ากรองเสียก่อนแล้วจึงทำให้ใสหรือบริสุทธิ์ยิ่งขึ้นด้วยไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์ งานที่เหมาะสมใช้ไส้กรองแบบนี้ ได้แก่การกรองวัตถุดิบ ในกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ที่เสร็จแล้วให้มีความใสหรือบริสุทธิ์สูงขึ้น การขจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรีย และความขุ่นจากเครื่องดื่ม อาหาร เครื่องสำอาง เวชภัณฑ์ การขจัดเศษตัวเร่งปฏิกิริยา ขจัดผงวัตถุขนาดใหญ่เกินกำหนดออกจากสีหมึกพิมพ์ และสารเคลือบอื่นๆ การรักษาความบริสุทธิ์ของน้ำ deionized หรือ ultrapure ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และไฮเทคอื่นๆ นอกจากนี้ ก็ยังมีงานบางประเภทที่จำเป็นต้องใช้เครื่องกรองชนิดนี้ แม้จะมีปริมาณอนุภาคอยู่มาก โดยเฉพาะงานกรองแบบ เททีละครั้ง (batch) เช่นการกรองโลหะมีค่าหรือตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ การกรองสารมีพิษ หรือ สารกัมมันตรังสี เนื่องจากไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์ให้ความสะดวก ความปลอดภัยและสมรรถนะสูงกว่าการใช้เครื่องกรองแบบอื่นๆ ข้อความนี้จะเน้นไปที่ไส้กรองทำจากเส้นใย (fiber) ซึ่งใช้อย่างแพร่หลาย ในการขจัดอนุภาคหรือตะกอนแขวนลอย ขนาดเล็กถึง 1 ไมครอน ก่อนที่ผู้ใช้จะเลือกใช้ไส้กรองและประเมินความสามารถในการกรองของมันได้ถูกต้อง จำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการกรองที่สำคัญ 2 ชนิดเสียก่อน คือกลไกเชิงกลและกลไกดูดซับติดผิวตามภาพประกอบ 46 ก และ ข



ก. กลไกการสกัดกั้นให้อนุภาคหยุดเคลื่อนที่



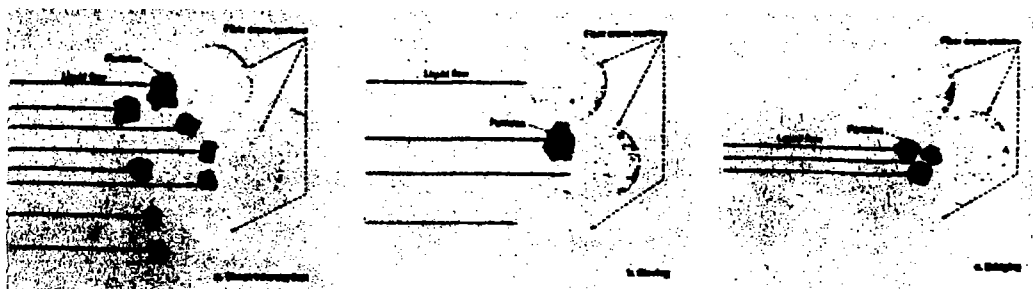
ข. กลไกการจับอนุภาคเชิงดูดซับ  
ติดผิวจัดเป็นการจับอนุภาคเชิงกล

ภาพประกอบ 46 กลไกเชิงกลและกลไกดูดซับติดผิว

2.4.1 การจับอนุภาคเชิงกล การสกัดกั้นโดยตรง (direct interception) เป็นกลไกเชิงกลที่สำคัญของการกรองของเหลว อนุภาคจะถูกสกัดกั้นเมื่อเข้าใกล้เส้นใยใดๆ ในระยะทางเท่ากับหรือน้อยกว่ารัศมีตัวมัน (ภาพประกอบ 47 ก) เส้นใยทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวางได้เนื่องจากอนุภาคมีโอกาสเคลื่อนเบี่ยงเบนจากกระแสการไหลด้วยแรงเฉื่อยแล้ววิ่งตรงไปที่เส้นใย แทนที่จะลอดผ่านช่องพรุน (pore) ในไส้กรองไป การที่ไส้กรองสามารถเก็บกักอนุภาคที่ถูกสกัดกั้นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับเส้นใย ว่าเป็นแรงดูดหรือแรงผลัก แรงดูดได้แก่แรง ไฟฟ้าสถิต พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ ส่วนแรงผลักได้แก่แรง ลากไฮโดรไดนามิกแรงตึงผิวจะลดลงหรือหายไปเมื่อของเหลวมีความหนืดสูงขึ้น ความเร็วในการกรอง (อัตราไหล/พื้นที่กรอง 1 หน่วย) เพิ่มขึ้น ความแตกต่างแรงดันเพิ่มขึ้นหรือการไหลเกิดในลักษณะไม่คงที่ กลไกการจับอนุภาคเชิงกลที่พบบ่อย 2 แบบ คือกลไกการร่อนและกลไกการเชื่อมเป็นสายสะพาน อาจพิจารณาได้ว่าเป็นกรณีพิเศษของการสกัดกั้นแบบหนึ่ง

2.4.1.1 การร่อน (sieving) อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า screenig หรือ straining ก็ได้เกิดขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างเส้นใยใกล้กันสองเส้น (ขนาดช่องพรุน) เล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค อนุภาคจะถูกร่อนกักไว้ เมื่อมันไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ภาพประกอบ 47 ข) กลไกนี้เกิดได้ที่ผิวสัมผัส (interface) ระหว่างไส้กรอง/ของไหล หรือตลอดเนื้อสัมผัสทั้งหมด ซึ่งพบได้ชัดเจนมากในไส้กรองแบบเส้นใยพรอกที่มีโครงสร้าง แบบความหนาแน่นลดหลั่น (graded density) หรือเมมเบรน ที่มีโครงสร้างไม่สมมาตร (asymmetric membrane) แม้ว่าการร่อนจะเป็นกลไกที่เข้าใจง่ายที่สุด แต่ก็ไม่ใช่กลไกเดียวหรือที่สำคัญที่สุดของการกรองด้วยไส้กรอง ทำจากเส้นใย

2.4.1.2 การเชื่อมเป็นสายสะพาน (bridging) เป็นกลไกที่สำคัญมากสำหรับงานกรองบางอย่างเกิดได้เมื่ออนุภาคที่ถูกสกัดกั้นเกิดการรวมตัวหรือเชื่อมกันเป็นชั้นๆ หรือก้อนๆ (filter cake) จากการที่ค่อยๆ อุดช่องพรุนในสารกรองจะทำให้โครงสร้างช่องพรุนเล็กลงไป เป็นผลดีต่อการจับอนุภาคที่ถูกสกัดกั้นในครั้งต่อไป (ภาพประกอบ 47 ค)



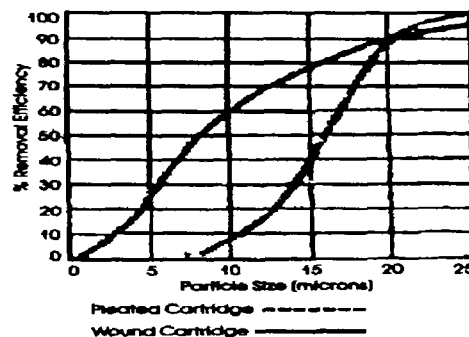
ก. การสกัดกั้นอนุภาคของเส้นใยโดยตรง

ข. การร่อน

ค. การเชื่อมเป็นสายพาน

ภาพประกอบ 47 การจับอนุภาคที่ถูกสกัดกั้นในครั้งต่อไป

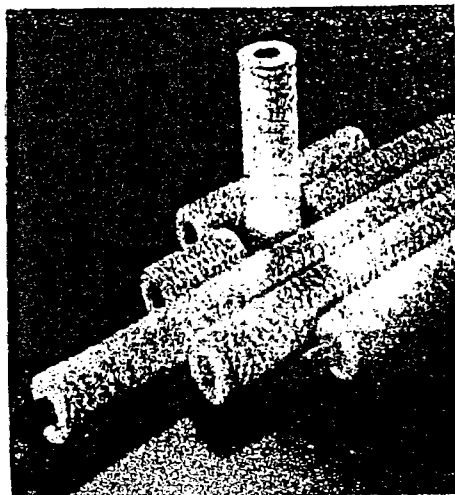
การจับแบบดูดซับติดผิว (Adsorptive Capter) เกิดเมื่ออนุภาคชนปะทะกับผนังช่องพรุนแล้วเกาะติดกับผิวของผนังนั้นเลย การจับลักษณะนี้เกิดได้แม้ช่องพรุนจะมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค การเกาะติดเกิดจากแรงดึงดูดชนิดต่างๆ อย่างไรก็ดี กลไกนี้ศึกษาได้ยากกว่าแบบเชิงกล เนื่องจากขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีทางผิว (surface chemistry) ระหว่างอนุภาคกับสารกรอง ซึ่งทำการวัดได้ยากมาก รวมทั้งยังขึ้นกับสภาวะอย่างอื่นของการกรองด้วย เราสามารถเน้นกลไกนี้ให้เกิดมากขึ้นได้โดยทำให้ของไหลมีความหนืดน้อยลง (เพิ่มอุณหภูมิ) ลดอัตราไหลพื้นที่กรอง 1 หน่วย (flux) ด้วยการเพิ่มพื้นที่การกรอง (ใช้ไส้กรองหลายตัวหรือต่อเครื่องกรองอีกตัวขนานเข้าไปในเครื่องกรองเดิม) ออกแบบระบบกรองให้มีความดันลดต่ำที่สุด การเปลี่ยนไส้กรองก่อน แรงดันตกต่างเกินค่าที่ผู้ผลิตกำหนดไว้โดยปกติ ไม่ควรเกิน 35 psid จำไว้เสมอว่า โครงสร้างเส้นใยในไส้กรองมิใช่เป็นเพียงตะกรรอร่อนหรือตาข่ายเท่านั้น และวิธีในการจับอนุภาคก็มีความซับซ้อนมากกว่าการมีเพียงช่องพรุนขนาดเล็กกว่าอนุภาคทำให้อนุภาคลอดผ่านไม่ได้ไส้กรองเส้นใยสามารถจับอนุภาคเล็กกว่าขนาดเฉลี่ยของช่องพรุนได้ค่อนข้างมาก นอกจากนี้การจับอนุภาคยังขึ้นกับความสามารถของผู้ผลิตว่าสามารถผลิตไส้กรองในแต่ละรุ่นได้เหมือนกันเพียงใด รวมทั้งขึ้นกับสภาวะการใช้งานจริง เรื่องเหล่านี้เองก่อให้เกิดความสับสนในเรื่องอัตราของไมครอน (Micron rating) อัตราของไมครอน เราประเมินความสามารถของไส้กรองว่าสามารถกรองอนุภาคที่ต้องกำจัดหรือเก็บ เก็บเอาไว้ได้ดีเพียงใดในหน่วย “ไมครอน” อย่างไรก็ดี สิ่งที่เราเรียกว่า “ไมครอน” มักก่อให้เกิดความสับสนเวลาเลือกใช้ไส้กรองมาก อัตราสมบูรณ์ (Absolute Rating) เป็นค่าแสดงขนาดอนุภาคเล็กที่สุดที่ไส้กรองจะจับได้ ดังนั้นจะต้องไม่มีอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่านี้ลอดผ่านไส้กรองไปได้ อัตราสมบูรณ์ส่วนใหญ่แล้วขึ้นกับกลไกการร่อนโดยตรง เพราะการจับอนุภาคใดๆ ด้วยกลไกดูดซับติดผิวจะไม่เคยเกิดได้สมบูรณ์เลย อัตรานามินัล (Nominal Rating) เป็นค่าแสดงขนาดอนุภาคเล็กที่สุดที่ไส้กรองจับได้ แต่การจับเกิดไม่สมบูรณ์ 100% โดยทั่วไปแล้วอัตรานี้จะใช้กับการกรองทั่วไป ยกเว้นการกรองด้านเวชภัณฑ์ที่จำเป็นต้องใช้อัตราสมบูรณ์ คำว่า “อัตรานามินัล” ยังไม่สามารถกำหนดค่าจำกัดความเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรม การกรองได้ โดยแท้จริงแล้วอัตรานามินัลที่เท่ากันสำหรับผู้ผลิตต่างรายกันจะมีความหมายต่างกัน เช่น ไส้กรอง 25 ไมครอน ของผู้ผลิตรายหนึ่ง สามารถจับอนุภาคขนาด 25 ไมครอนได้ร้อยละ 90 ขณะที่ผู้ผลิตอีกรายจับได้ร้อยละ 85 หรือร้อยละ 50 ทั้งนี้ขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้กำหนดอัตรานามินัลของผู้ผลิตรายนั้น สำหรับสารกรอง (media) ใดๆ ที่นำมาทำไส้กรอง พบว่าประสิทธิภาพในการสะสมอนุภาคจะลดลง อนุภาคมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีนำเขียนเป็นกราฟแล้วจะได้เส้นโค้งลดลงตามภาพประกอบ 48



ตามภาพประกอบ 48 Collection Curve ของไส้กรองพันรอบและไส้กรองทบจีบ

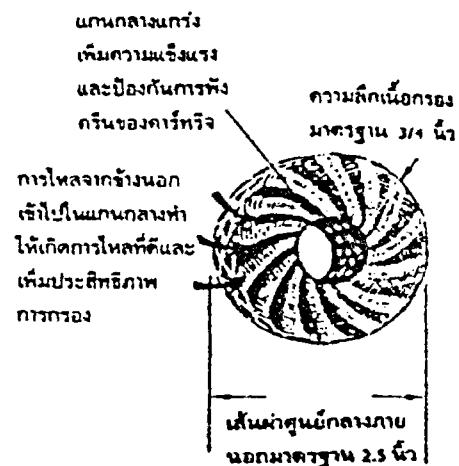
นอกจากนี้ ลักษณะของเส้นโค้งคอลเลกชัน ยังขึ้นกับกลไกการจับอนุภาค ชนิดสารกรอง ชนิดของไหล ที่มากรองลงและสภาวะในการกรอง ดังอย่างเช่น ไส้กรองที่ได้รับการประเมินค่าสัมบูรณ์ 25 ไมครอนจะสามารถจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอนได้บ้าง อย่างไรก็ดี เส้นโค้งคอลเลกชันของไส้กรองอาจดูชันก็ได้ ดังที่พบในเส้นโค้งของไส้กรองทบจีบภาพประกอบ 48 เราพบว่าไส้กรองทบจีบนี้สามารถจับอนุภาคที่ 25 ไมครอนและที่ใหญ่กว่าได้ร้อยละ 100 แต่มันสามารถจับอนุภาคขนาด 12 ไมครอน ได้เพียง 20 ไมครอน ได้เพียงร้อยละ 20 เท่านั้น ในทางตรงข้ามไส้กรองพันรอบซึ่งกลไกส่วนใหญ่ขึ้นกับการสกัดกั้นจะมีคอลเลกชันเคอร์ฟชันน้อยกว่า จากภาพประกอบ 48 แม้ว่าไส้กรองนี้จับอนุภาค ขนาด 25 ไมครอนได้เพียงร้อยละ 95 แต่ประสิทธิภาพในการจับอนุภาค 12 ไมครอน ยังมีอยู่ถึงร้อยละ 70 ไส้กรองทบจีบในตามภาพประกอบ 49 ได้รับการประเมินว่ามีค่าอัตราสัมบูรณ์ 25 ไมครอน แต่ไส้กรองพันรอบเราสามารถประเมินอัตราอามินัลได้ตั้งแต่ 5-25 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นกับเกณฑ์ในการประเมินของผู้ผลิตและนี่คือสาเหตุทำไมอัตราอามินัล ที่เท่ากันอาจมีความหมายต่างกันหลุมพรางอีกอย่างของอัตราไมครอน อยู่ตรงที่เส้นโค้งคอลเลกชัน (บอกอัตราไมครอน) ยังขึ้นกับสภาวะการทดสอบ เป็นต้นว่าชนิดของเหลวและอนุภาคทดสอบที่ใช้ รวมทั้งสภาวะขณะที่กรองทดสอบเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างของไหลกับสารกรอง สามารถทำให้ขนาดช่องพรุนหรือลักษณะการดูดซับเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งและสารกรองแต่ละชนิดก็มีแบบแผนจำเพาะทางผิวที่ต่างกัน เรื่องนี้มีผลต่อการดูดซับได้ ยิ่งกว่านั้นอนุภาคที่เปลี่ยนรูปร่างได้ (deformable particles) เช่น เจล ก็สามารถบีบตัวลอดผ่านช่องพรุนของสารกรองไปได้ ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการกรอง ปัจจัยสำคัญที่ต้องระลึกถึงในการประเมินความสามารถการเก็บกักอนุภาคจึงมีดังนี้ ค่าสัมบูรณ์แล่อตราอามินัล เป็นค่าขึ้นกับการวัดขนาดอนุภาค มิใช่ค่าที่บอกขนาดช่องพรุนของไส้กรอง การประเมินการกรองขึ้นกับวิธีและผลทดลองในห้องปฏิบัติการของผู้ผลิตรายนั้นๆ สภาวะการทดสอบอาจมีลักษณะแตกต่างกัน เช่น อนุภาคสารปนเปื้อนที่ใช้อาจเป็นฝุ่นทดลองละเอียดหรือหยาบ เม็ดลาเท็กซ์ ผงคาร์บอน หรือแบคทีเรีย ของไหลที่ใช้ทดสอบอาจเป็นน้ำหรือน้ำมันโดยมีสารปนเปื้อนอยู่ในระดับใดๆ ก็ได้ สภาวะในการกรองก็อาจต่างกัน เช่น เป็นการกรองให้ไหลผ่านเพียงครั้งเดียว หรือเป็นแบบไหลหมุนเวียน การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอหรือไม่จะหยุดการกรองช่วงใด เช่น กำหนดความดันลดสุดท้ายเอาไว้ ยิ่งกว่านั้นวิธีในการเก็บตัวอย่างก็มีมากมาย จะเก็บตัวอย่าง อย่างไร เมื่อไร ตรงไหน เช่น เก็บใน in-line หรือสุ่มเก็บตัวอย่างในตอนเริ่มต้น กลางๆ หรือตอนปลายของการกรอง นอกจากนี้เทคนิคที่ใช้จับอนุภาคก็แตกต่างกันได้อีกด้วย ดังนั้นในฐานะผู้ใช้แล้ว จึงควรตระหนักถึง ไม่มีหนทางใดที่บอกได้ว่าไส้กรองใช้กับงานกรองนั้นๆ ได้หรือไม่ นอกจากทำการทดสอบ อัตราไมครอนของผู้ผลิตต่างรายอาจไม่สามารถใช้เปรียบเทียบกันได้ควรใช้อัตราไมครอนเพียงแนวทางในการเลือกใช้ไส้กรองเท่านั้น

2.4.2 ชนิดของไส้กรองเส้นใย ไส้กรองที่จะกล่าวต่อไปล้วนทำมาจากเส้นใยทั้งสิ้น เส้นใยที่ใช้เป็นได้ทั้งเส้นใยธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้น การประดิษฐ์เส้นใยทำได้หลายแบบ เช่นนำมาเป่าหลม (meltblown) ปั่นเชื่อม (spunbonded) หรือเสริมแรงด้วยเรซิน (resin-impregnated) ไส้กรองแบบเส้นใยพันรอบแกน (Wound Cartridge) ไส้กรองแบบพันรอบกอลให้เกิดผลการกรองเช่นเดียวกับการนำผ้ากรองหลายๆ ผืนมารวมกัน แต่แทนที่จะนำเส้นใยมาดักอย่างผ้าจะนำเส้นใยมาประดิษฐ์เป็นเส้นด้ายเดี่ยว (yam) แล้วนำมาพันรอบแกนกลาง (ตามภาพประกอบ 49) ลักษณะการกรองของไส้กรองพันรอบนี้ขึ้นกับชนิดของเส้นใย วิธีที่ใช้ประดิษฐ์เส้นด้าย และวิธีในการพันรอบแกน นอกจากนี้ความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางและความตึงของเส้นด้าย เทคนิคในการพัน (เช่นความตึงของเส้นด้าย แบบแผนการพันและระยะห่างระหว่างเส้นด้าย) ล้วนมีผลต่อวิธีการไหล นอกจากนี้ลักษณะของผิวส่วนในและปริมาณผิวกรองภายในว่ามีมากน้อยเท่าไรก็มีผลต่อการสะสมอนุภาค ลักษณะเช่นนี้สามารถผันเปลี่ยนได้ตลอด ความลึกของสารกรองที่นำมาทำไส้กรองพันรอบ เส้นใยที่ใช้ทำมี 2 ชนิดคือ สเตเปิล (staple) และโมโนฟิลาเมนต์ (monofilament) เส้นใยสเตเปิล เช่น ขนแกะ หรือฝ้าย จะถูกนำมาปั่นเป็นเส้นด้าย จากนั้นจึงนำมาพันรอบแกน การแปรขนเส้นด้ายที่ทำจากเส้นใยสเตเปิลได้ถูกต้องทำให้เกิดพื้นผิวกรองหรือปูขน (nap) มากทำให้ไส้กรองมีผิวกรองมากสำหรับการกรองแบบดูดซับ รวมทั้งก่อให้เกิดทางวากวนสำหรับขัดขวางและสกัดกั้นอนุภาคได้มากขึ้นและง่ายขึ้น ส่วนเส้นใยโมโนฟิลาเมนต์จะไม่ถูกนำมาปั่นเป็นเส้นด้าย แต่จะถูกขั้วเป็นเกลียวอย่างต่อเนื่อง เส้นใยชนิดนี้ต้องผ่านการถักหรือทำให้เป็นลอนเสียก่อนเพื่อทำให้ได้ “เส้นด้าย” ที่เหมาะกับการใช้ผลิตไส้กรองพันรอบ



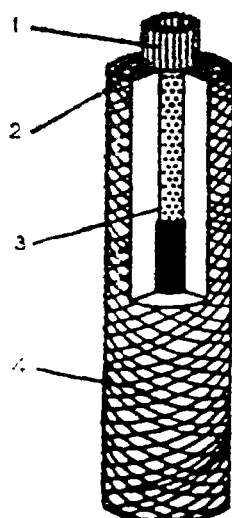
ภาพประกอบ 49 ไส้กรองพันรอบทำจากเส้นด้ายเดี่ยว

เส้นใยสังเคราะห์ส่วนมากแล้ว เช่น โพลีพรอพิลีน โพลีเอสเตอร์ สามารถผลิตได้ทั้งแบบสเตเปิล และแบบโมโนฟิลาเมนต์ การพันรอบแกนมีความสำคัญมากเพราะหากพันไม่ดีแล้วไส้กรองพันรอบจะไม่สามารถเก็บกักอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมากๆ ได้ พบว่าการพันลักษณะเป็นรูปข้าวหลามตัด (diamond pattern) สามารถทำให้โครงสร้างช่องพรุนในไส้กรองมีขนาดลดหลั่น (graded pores) ได้ดีที่สุด โดยช่องพรุนหรือรูกรองจะค่อยๆ เล็กลงไล่จากบริเวณผิวไส้กรองเข้ามายังแกนตามภาพประกอบ 50



ภาพประกอบ 50 การพันรอบแกนลักษณะโค้ง Diamond ทำให้อนุภาคถูกจับทั่วทั้งกรอง  
ไม่ใช่เกิดบริเวณผิวเท่านั้น

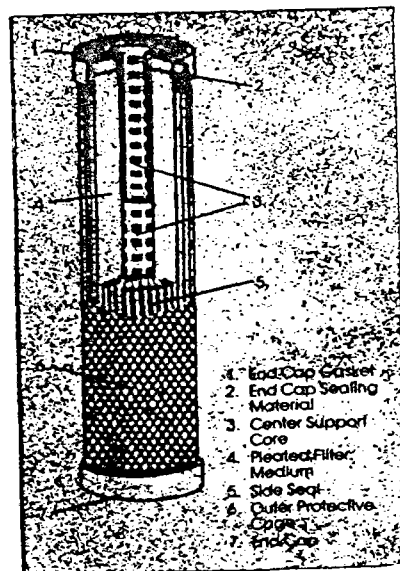
อย่างไรก็ตาม ไล์กรองพันรอบมักประสบปัญหาเรื่องเส้นใยหลุดออกมาปนกับส่วนที่กรองแล้ว หรือก็อนุภาคที่ถูกกักไว้ในเนื้อกรองถูกปลดปล่อยออกมา เมื่อหยุดเครื่องแล้วเริ่มเดินเครื่องกรองใหม่ ดังนั้นไล์กรองพันรอบที่ดีจึงควรมีสวนหุ้มแกนกลาง และเทคนิคปิดหัวท้าย (end treatment) ที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ควรมีแกนกลางแบบยื่นออก เพื่อตัดปัญหาเรื่องของไหลไม่ไหลผ่านไล์กรองอีกด้วย ตามภาพประกอบ 51



1. แกนกลางยื่นออก 2. เทคนิคปิดหัวท้าย 3. ส่วนหุ้มแกนกลาง 4. เส้นใยกรองที่พันรอบแกน

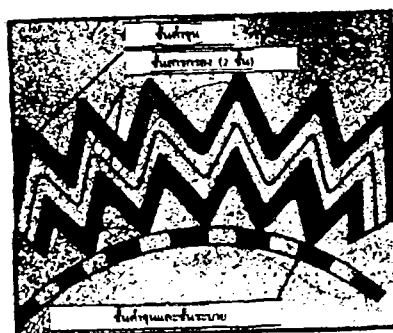
ภาพประกอบ 51 รูปร่างลักษณะของไล์กรองแบบพันรอบ รวมทั้งโครงสร้างภายใน

2.4.3 ไล์กรองทบจีบ (Pleated Cartridge) ไล์กรองทบจีบถูกผลิตขึ้นจากแผ่นหรือผืนผ้า (fabric) รูปพรุนที่ไม่ผ่านการทอ โดยนำเส้นใยหรือใยละเอียดคมอัดประสมแล้วเชื่อมติดด้วยเรซิน ความร้อน หรือวิธีเชิงกลอื่นๆ เกิดเป็นโครงสร้างผืนกรองรูปพรุนที่มั่นคงแข็งแรง แล้วนำมาทบเป็นจีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว กรองและความแข็งแรง ตามภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 รูปร่างลักษณะของไล์กรองทบจีบ รวมทั้งโครงสร้างภายใน

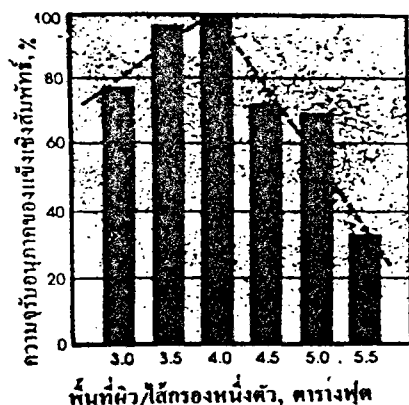
การควบคุมขนาดช่องพรุนทำได้โดยการกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใย ที่ใช้ทำเยื่อประสานรูกรองหรือช่องพรุนที่เล็กที่สุดต้องใช้เส้นใยขนาดประมาณ 0.1 ไมครอน เนื่องจากไล์กรองทบจีบใช้เส้นใยขนาดเล็กมากจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าแบบพันรอบ แต่มีความพรุน สภาพให้ของไหลไหลผ่านและจุ่มสารปนเปื้อนได้มากกว่าแบบพันรอบ ไล์กรองทบจีบอาจใช้สารกรองมากกว่าชั้นเดียวก็ได้ เพื่อเพิ่มความลึกและพื้นที่การกรอง โดยนำชั้นสารกรองอัดสอดใส่ระหว่างชั้นค้ำจุนซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความสามารถของการระบายส่วนที่กรองแล้ว ทำให้การไหลของของไหลสม่ำเสมอและช่วยป้องกันการพังทลายของจีบเวลาอยู่ภายใต้ความดันลดลง ภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 ชั้นกรองและชั้นจุนต่างๆที่ใช้ในไล์กรองทบจีบบางแบบหนึ่ง

ไล์กรองขนาดความยาว 10 นิ้วที่ดีควรมีพื้นที่ผิวกรองตั้งแต่ 3 ถึง 8 ตารางฟุต โดยมีความหนาของผืนกรองเป็นตัวกำหนดความสูงและจำนวนทบจีบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ทบจีบแข็งแรงและมีพื้นที่จุ่มสารปนเปื้อน

มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการเพิ่มจำนวนทบจิบเพียงอย่างเดียว บางครั้งไม่ได้ช่วยให้อายุการใช้งานยืนยาวขึ้นมากนักตามภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 ปริมาณพื้นที่ผิวเหมาะสมสำหรับไส้กรองตัวนี้มีค่าเท่ากับ 4 ตารางฟุต

จากภาพประกอบ 54 เมื่อทดสอบกับของไหลที่ทราบแบบแผนการกระจายขนาดอนุภาค พบว่าไส้กรองตัวนี้รับสารปนเปื้อนได้สูงสุดเมื่อมีพื้นที่กรอง 4 ตารางฟุต การเพิ่มพื้นที่ผิวมากกว่านี้ไม่ได้ช่วยให้ความจุรับเพิ่มขึ้นเลย ตรงกันข้ามกลับทำให้ลดน้อยไป โดยปกติแล้วการกรองของไส้กรองทบจิบขึ้นกับกลไกการร่อนมากกว่าแบบพันรอบและมีเส้นโค้งคอลเลคชันมากกว่าด้วย

2.4.4 สมรรถนะของไส้กรอง ก่อนที่จะกล่าวเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างไส้กรองพันรอบกับทบจิบ ขอให้พิจารณาว่าไส้กรองที่ดีควรมีลักษณะอย่างไรเสียก่อน ไส้กรองที่ดีควรมีลักษณะที่ดีดังต่อไปนี้ คือ

2.4.4.1 เก็บกักอนุภาคได้มาก (ประสิทธิภาพในการกรองสูง)

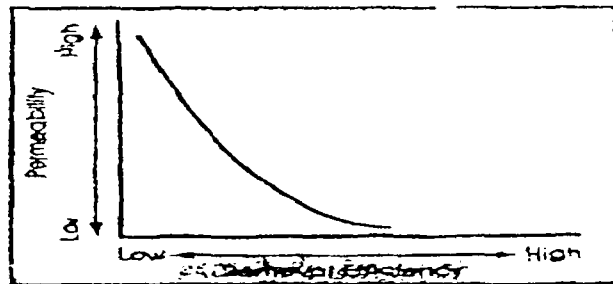
2.4.4.2 ให้ของไหลผ่านได้ดี (ให้อัตราการกรองสูง)

2.4.4.3 ทนสารเคมีและอุณหภูมิได้ดี

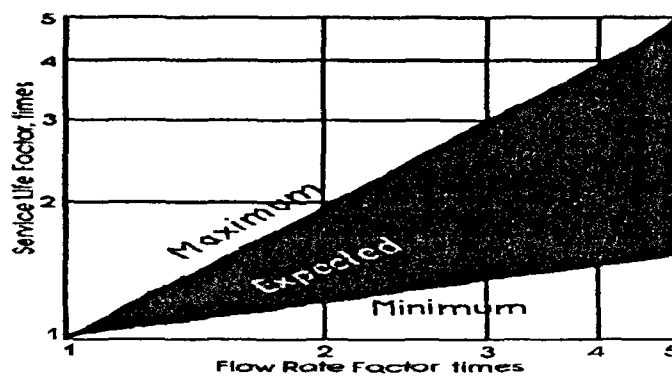
2.4.4.4 อายุการใช้งานยาวนาน

สภาพให้ของไหลไหลผ่าน (permeability) เป็นการวัดอัตราไหลของไหลเมื่อผ่านตัวกลางรูพรุน ณ ความแตกต่างแรงดันที่กำหนด นั่นคือ บอกว่าสารกรองนั้นยอมให้ของไหลไหลผ่านได้ยากง่ายเพียงไร ความหนา สภาพรูพรุน และธรรมชาติของสารกรองล้วนมีผลกระทบต่อสภาพนี้ สภาพให้ของไหลไหลผ่านนี้แปรผกผันกับประสิทธิภาพการจับอนุภาคของสารกรอง จากภาพประกอบ 55 พบว่าไส้กรองที่มีประสิทธิภาพในการจับอนุภาคสูงจะมีสภาพให้ของไหลไหลผ่านน้อยกว่าไส้กรองที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า กล่าวอีกนัยหนึ่ง ไส้กรอง 1 ไมครอน จะต่อต้านการไหลมากกว่าไส้กรองพันรอบและทบจิบ ณ อัตราไหลหนึ่งๆ ไส้กรองทบจิบจะมีค่าความดันลดต่ำกว่าแบบพันรอบ เพราะสารกรองในทบจิบมีความหนาน้อยกว่า พื้นที่ผิวกรองมากกว่า ลักษณะเช่นนี้ทำให้ไส้กรองทบจิบให้ของไหลซึมผ่านได้ดีกว่าแบบพันรอบที่มีอัตราไมครอนเท่ากัน อายุการใช้งานของไส้กรองได้รับผลกระทบโดยตรงจากค่าความดันลดเริ่มแรก ดังนั้นเพื่อยืดอายุการใช้งานของไส้กรองให้ได้นานที่สุด ผู้ใช้ต้องจำเป็นให้ระบบกรองที่มีค่าความดันลดแรกเริ่มต่ำที่สุดเท่าที่ทำได้ เช่น ให้ของไหลไหลด้วยอัตราต่ำ ภาพประกอบ 56 แสดงผลของการลดอัตราไหลที่มีต่ออายุการใช้งานของไส้กรองทบจิบ เมื่อใช้กรองอนุภาคที่เปลี่ยนรูปได้ สังเกตให้ดูจะพบว่าเมื่อลดอัตราไหลลง 5 เท่า (จาก 10GPM ลงเหลือ 2 GPM) จะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของไส้กรองได้ตั้งแต่ 1.5 จนถึง 5 เท่า วิธีหนึ่งในการลดอัตราไหลต่อพื้นที่กรอง 1 หน่วย ทำได้ง่ายมากเพียงแค่เพิ่มจำนวนไส้กรองให้มากขึ้นขณะที่รักษาอัตราไหลของระบบให้

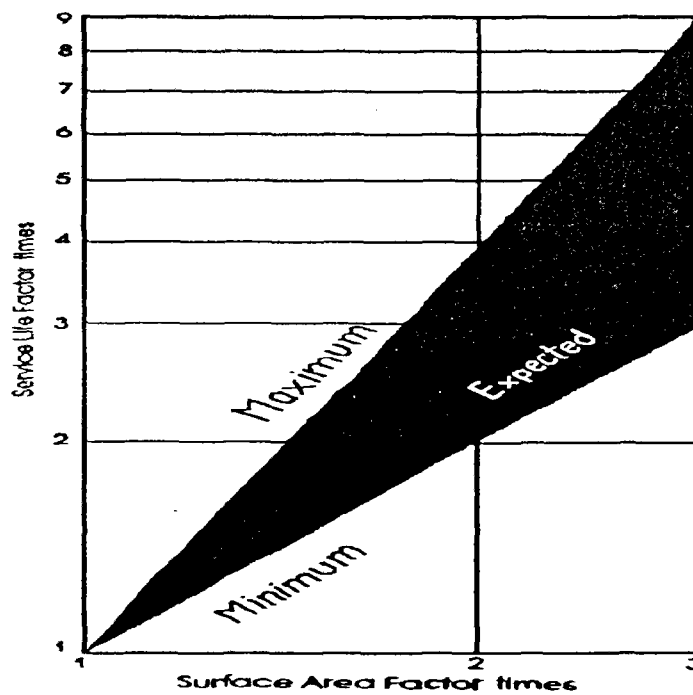
คงเดิม กาเพิ่มไส้กรอง จาก 1 ตัว เป็น 3 ตัว สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น 3 เท่า เพื่อที่ผิวที่เพิ่มขึ้น 3 เท่า อาจเพิ่มอายุการใช้งานให้ยางออกไปถึง 9 เท่า ก็เป็นไปได้ ดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 55 สภาพให้ของไหลซึมผ่านแปรผกผันกับประสิทธิภาพการขจัดอนุภาค



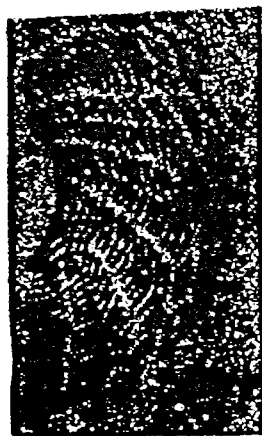
ภาพประกอบ 56 ผลของอัตราการไหลต่ออายุการใช้งานของไส้กรองทบจับ



ภาพประกอบ 57 ผลของพื้นที่กรองต่ออายุการใช้งานของไส้กรอง

ในทางปฏิบัติแล้ว ไส้กรองพันรอบ 10 นิ้ว หนึ่งตัวควรให้มีอัตราไหลสูงสุดไม่เกิน 5 GPM ส่วนไส้กรองทบจีบขนาดเดียวกันสามารถใช้ได้สูงสุดถึง 10 GPM

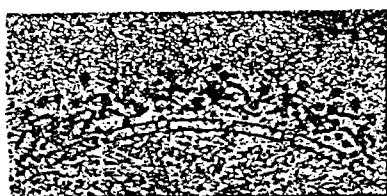
2.4.5 สมรรถนะของไส้กรองพันรอบ ไส้กรองพันรอบนิยมใช้ขจัดอนุภาคที่มองเห็นด้วยตาเปล่า (ใหญ่กว่า 20-30 ไมครอน) หรือใช้เป็นไส้กรองด่านแรก (prefilter) เพื่อปกป้องไส้กรองที่ใช้กำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าให้มีอายุการใช้งานยืนยาวขึ้น งานที่เหมาะสมกับไส้กรองชนิดนี้ได้แก่ การกำจัดความขุ่นมัวในเครื่องต้มปอกป้องกันน้ำหล่อเย็นให้ปราศจากตะกอน ซึ่งมักเป็นปัญหาของการอุดตันในอุปกรณ์และท่อต่างๆ รวมทั้งกรองสารเคมีที่ปนเปื้อนด้วยอนุภาคของแข็ง ไส้กรองพันรอบยังใช้กรองของเหลวในขั้นสุดท้าย (polishing) หลังจากผ่านการกรองด้วยเครื่องกรองธรรมดา เช่น vacuum rotary filter หรือ diatomaceous-earth filter ที่บ่อยครั้งอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน สามารถเล็ดลอดออกมาได้ เนื่องจากเราสามารถใช้วัสดุเกือบทุกชนิดผลิตเส้นด้ายได้ ดังนั้นไส้กรองพันรอบจึงเหมาะที่จะใช้กรองสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคการพันในลักษณะทำให้ความหนาแน่นของพรมลดหล่นลงไปตลอดความลึกของไส้กรอง ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ถูกสกัดกั้นอยู่ใกล้ผิวหรือข้างนอกสารกรองได้โดยไม่ก่อให้เกิดการอุดตันขึ้นกับสารกรองที่มีความละเอียดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกัน เมื่อเร็วๆ นี้ บริษัท FILTERITE สามารถผลิตไส้กรองพันรอบให้กรองอนุภาคขนาด 0.5 ไมครอนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง สมรรถนะเช่นนี้ทำได้โดยใช้เส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมาก ทุกลดหล่นลักษณะรูปข้าวหลามตัด เมื่อของไหลมีสารปนเปื้อนขนาดต่างกันมาก ไส้กรองพันรอบจะมีความสามารถในการจับสารปนเปื้อนหรือความสกปรกได้สูง เนื่องจากมีปริมาตรว่าง (void volume) มาก ความพรุนสูง และความสามารถของสารกรองในการจับอนุภาคของแข็งได้ตลอดความลึกทั่วไปไส้กรองด้วยกลไกการร่อนและการดูดซับตามภาพประกอบ 58



ภาพประกอบ 58 ไส้กรองพันรอบจับสารปนเปื้อนได้ทั่วเนื้อสารกรอง

อย่างไรก็ดี การกรองในลักษณะไหลไม่สม่ำเสมอ สามารถทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลงไปได้ การไหลอย่างรุนแรงอาจปลดปล่อยอนุภาคที่ถูกจับด้วยกลไกการดูดซับ ความดันลดลงที่สูงก็สามารถผลักดันให้อนุภาคเจลเปลี่ยนแปลงรูปร่างลอดผ่านไส้กรองออกไป ดังนั้นความจุสารปนเปื้อนและประสิทธิภาพในการสะสมอนุภาคของไส้กรองพันรอบจะสูงเมื่อใช้อัตราการกรองต่ำ ลักษณะเช่นนี้จะเห็นเด่นชัดขึ้นเมื่ออัตราไมครอนของไส้กรองมีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.6 สมรรถนะของไส้กรองทบจีบ เนื่องจากไส้กรองทบจีบ มีเส้นโค้งคอลเลคชันกว่า จึงมักถูกใช้ในงานที่ต้องการประสิทธิภาพการสะสมอนุภาคนาขนาดใหญ่เกิน ต้องการออกจากสารชั้นเหนียว (slurries) และอิมัลชัน หรืองาน ที่ต้องการการกรองอย่างสมบูรณ์เพื่อขจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าไมครอนเรตติ้งให้ออกไปจนหมดสิ้น ไส้กรองทบจีบให้ความจุรับสารได้ดีย่อมสำหรับงานกรองที่ต้องการกำจัดอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดจะสะสมรวมกลุ่มกันบริเวณผิวไส้กรองในลักษณะก้อนเล็กที่ยอมให้ของไหลไหลผ่านได้ ยิ่งกว่านี้ไส้กรองทบจีบยังมีค่าความดันลดต่ำกว่าแบบพันรอบหลายเท่าตัว ลักษณะนี้เห็นชัดมากในไส้กรองที่มุ่งกำจัดอนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนลงไปตามภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 ไส้กรองทบจีบก่อให้เกิด Filter cake ที่ผิวสารกรอง

สภาพการกรองมีผลกระทบต่อไส้กรองทบจีบแบบพันรอบ เนื่องจากตัวไส้กรองมีการกระจายตัวของช่องพรุนที่แน่นอนและอยู่ในช่วงแคบ แต่เช่นเดียวกันกับไส้กรองพันรอบ อนุภาคเจลก็มีผลกระทบต่อสมรรถนะการกรองได้ เพราะก้อนเล็กที่ถูกอัดบนผิวไส้กรองสามารถลดสภาพความพรุนหรือสภาพให้ของไหลไหลผ่านลงไป ค่าความดันที่ลดลงก็สามารถผลักดันให้เจลเล็ดลอดผ่านไส้กรองออกมาหรืออุดตันอยู่ในช่องพรุน

2.4.7 การเลือกใช้ไส้กรอง เป็นเรื่องง่ายและได้ผลน่าพอใจมากกว่าหากเรากำหนดการใช้ไส้กรองในเชิงปฏิบัติเลยแทนที่จะคำนึงถึงเรื่องไมครอน เช่นกำหนดว่า “ต้องการกำจัดตะกอนในท่อเพื่อปกป้องเครื่องสูบ” จะดีกว่าการกำหนดว่า “จะกำจัดเศษสนิมขนาด 50 ไมครอน หรือที่ใหญ่กว่าให้ออกไปร้อยละ 85 จากสารละลายไฮโดรคาร์บอน” เพราะแม้ว่าไส้กรองได้รับการประเมินในเรื่องขนาดอนุภาคที่มันจับได้แต่ก็เห็นแล้วว่า อัตราไมครอนเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับทำนายสมรรถนะของไส้กรองได้ยิ่งกว่านี้ การเก็บรวบรวมข้อมูลเรื่องอัตราไมครอนและสมรรถนะไส้กรองเป็นเรื่องสิ้นเปลืองมาก เราควรใช้อัตราอนิมัลในเชิงเปรียบเทียบความสามารถเท่านั้น ดังอย่างหากให้ไส้กรอง 50 ไมครอน ไม่สามารถกำจัดอนุภาคตามต้องการแล้วให้ลองใช้ขนาด 30 ไมครอนหรือลองใช้ไส้กรอง 50 ไมครอนของอีกยี่ห้อ หรือใช้ไส้กรองยี่ห้อเดิมแต่ทำจากวัสดุต่างชนิด ในการทดสอบว่าไส้กรองใช้ในงานใดงานหนึ่งได้หรือไม่ จำเป็นต้องให้ไส้กรองอยู่ภายใต้สภาพการใช้งานจริง บ่อยครั้งที่ค่าความดันลดค่าสูงสุดเกินกำหนดสามารถทำให้ทั้งสารกรองและอนุภาคของแข็ง ที่ถูกจับไว้เคลื่อนตัวผ่านไส้กรองออกมาได้นอกจากนี้สภาพการกรองอย่างรุนแรงก็อาจก่อให้เกิดการปลดปล่อยเส้นใยออกมาได้เช่นเดียวกัน การมีอนุภาคของแข็งที่เปลี่ยนรูปได้เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ผิวไส้กรองทบจีบเกิดการอุดตันได้อย่างรวดเร็ว แม้ยิ่งไปกว่านี้ก็คืออนุภาคเจลเช่นนี้ สามารถบีบตัวผ่านสารกรองออกมาเป็นอนุภาคนาที่กรองแล้ว การกรองอนุภาคเจลนี้ควรใช้ไส้กรองพันรอบเนื่องจากภายในไส้กรองมีโครงสร้างวาววน ของเหลวต่างชนิดกันมีผลต่อประสิทธิภาพของไส้กรองต่างกัน เช่นนี้ จะทำให้เส้นใยเซลลูโลสขยายตัวขึ้น ช่องพรุนในไส้กรองจะเล็กลงไป ดังนั้นประสิทธิภาพในการสะสมอนุภาคจึงเพิ่มขึ้น เรื่องเช่นนี้เป็นคาบสองคม เนื่องจากขนาดช่องพรุนที่เล็กลงไปสามารถลดความสามารถในการจับอนุภาคของแข็งและอายุการใช้งานของไส้กรองลงไป หรือไม่เช่นนั้นแล้ว ของเหลวบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับไส้กรองได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพของไส้กรองลดลงไป เมื่อเลือกไส้กรองที่ให้ผลกรองได้ตามต้องการแล้ว เรื่องที่สำคัญอยู่ที่ไส้กรองเหล่านั้น ทั้งหมดต้องทำงานได้เหมือนกันหมด นั่นคือประสิทธิภาพในการสะสมอนุภาค

ค่าความดันลด และความจุรับสารปนเปื้อนได้เท่ากัน สำหรับไส้กรองพันรอบ air permeability เป็นวิธีทดสอบที่ง่าย ไม่แพง และไม่ทำลายไส้กรอง และผลสอดคล้องกับสมรรถนะของไส้กรอง ดังนั้นจึงใช้เป็นวิธีควบคุมคุณภาพที่ให้ผลสูง โดยแท้จริงแล้ว air permeability มักให้ผลสอดคล้องกับสมรรถนะการใช้งานจริงมากกว่าค่าอัตราไมครอน และผู้ผลิตส่วนใหญ่แล้วสามารถทำการทดสอบด้วยวิธีนี้ได้ ไส้กรองทบจีบจะทำการทดสอบ bubble-point เพื่อหาขนาดช่องพรุนที่ใหญ่ที่สุดในสารกรอง และยืนยันถึงความสมบูรณ์ของบไส้กรอง (ไม่เกิดการฉีกขาด หลุดลุ่ย) หลักการวิธีนี้มีอยู่ว่า ความดันอากาศที่ทำให้ของเหลวไหลผ่านช่องพรุนไส้กรองออกมาเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดช่องพรุน ข้อมูลที่ได้จาก bubble-point ก็ให้ผลสอดคล้องกับสมรรถนะของไส้กรองจริง การตรวจสอบไส้กรองด้วยตาเปล่าก็เป็นวิธีง่าย ๆ ที่มีประโยชน์ ไส้กรองที่ดีต้องมีลักษณะเหมือนกันหมด มีปุยขน ขนาด และปริมาตรว่างเหมือนกันหมด

2.4.8 ความประหยัดที่ได้ระหว่างคาร์ทริดจ์แบบพันรอบกับแบบทบจีบ ดังกล่าวไว้แล้วในตอนต้น ไส้กรองทบจีบมีพื้นที่ผิวกรองมากกว่าแบบพันรอบ โดยมีพื้นที่อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 ตารางฟุต ต่อไส้กรองทบจีบความยาว 10 นิ้ว ขณะที่แบบพันรอบขนาด 10 นิ้ว มีพื้นที่เพียง 0.5 ตารางฟุต เท่านั้น (เมื่อพิจารณาเป็นรูปทรงกระบอก) เมื่ออนุภาคมีการกระจายในช่องแคบ ๆ นั่นคือ การกรองแบบลึกเข้าไปในเนื้อกรองเกิดน้อย ไส้กรองทบจีบซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าแบบพันรอบ 6 ถึง 16 เท่าจะใช้งานลักษณะนี้ได้ดีกว่า (แต่ราคาไม่แพงในลักษณะ 6 ถึง 16 เท่า)

ตาราง 10 ไส้กรองทบจีบอาจใช้ประหยัดกว่าคาร์ทริดจ์พันรอบ

| ชนิดคาร์ทริดจ์  | การจุรับอนุภาคของ<br>ของแข็ง(กรัม) | ค่าใช้จ่าย/ของแข็ง<br>1 ปอนด์(บาท) | ค่าใช้จ่าย/ของเหลว<br>1,000 แกลอน(บาท) |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|
| 3 ไมครอน ทบจีบ  | 130                                | 1,014                              | 8.32                                   |
| 3 ไมครอน พันรอบ | 25                                 | 1,456                              | 12.22                                  |

ที่มา : ฝ่ายวิศวกรรมบริษัทโปรเซล จำกัด. 2535

พิจารณาตาราง 10 พบว่าไส้กรองทบจีบระดับ 3 ไมครอน สิ้นค่าใช้จ่ายในการกรองน้อยกว่าแบบพันรอบอย่างมีนัยสำคัญ เท่าที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นเรื่องค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้ไส้กรองคาร์ทริดจ์ชนิดต่างๆ และในระดับไมครอนที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเรายังไม่ได้รวมต้นทุนที่ใช้ซื้อเฮาส์ซึ่ง การติดตั้งระบบการกรอง ค่าแรง ค่าบำรุงรักษา แต่เรื่องที่เขียนไว้พอเป็นแนวทางให้ผู้ที่ใช้ไส้กรองคาร์ทริดจ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี (ฝ่ายวิศวกรรมบริษัทโปรเซล จำกัด. 2535 : 261-269)

### 3. การออกแบบและการสร้าง

เครื่องจักรกลเป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนต่างๆ ที่ต้องอยู่ด้วยกัน เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน และส่งแรงจากแหล่งต้นกำลังเพื่อเอาชนะความต้านทานต่างๆ ของเครื่องจักรและใช้ทำงานได้ ชิ้นส่วนของเครื่องจักรโดยทั่วไปจะเป็นชิ้นส่วนเกร็ง (rigid) ข้อต่อที่ใช้จะต้องเลือกและจัดให้ทำงานสัมพันธ์กันโดยอาจเปลี่ยนพลังงานรูปอื่นให้อยู่ในรูปพลังงานกลหรืออาจรับพลังงานกลจากแหล่งภายนอกส่งเข้ามา และเปลี่ยนแปลงให้ทำงานได้ในลักษณะที่ต้องการ การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกี่ยวกับการออกแบบรูปร่าง พื้นฐานทาง

ด้านการคำนวณและหลักการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำชิ้นส่วนตามความเหมาะสม กับการใช้เครื่องจักรกลกับงานลักษณะต่างกัน การออกแบบเครื่องจักรกลเป็นศิลปะของการพัฒนาทางด้านความคิดใหม่ๆ ทางด้านเครื่องจักรแล้วแสดงความคิดเห็นลงบนกระดาษในรูปของแบบ เครื่องจักรกลใหม่ๆ เกิดขึ้นได้ก็เพราะความต้องการในการใช้งาน และเกิดจากมโนภาพที่ได้จากบุคคลหลายฝ่าย เช่น ผู้ใช้เครื่องจักรกล ผู้ผลิตเครื่องจักรกล ดังนั้นด้วยผลจากความคิดเห็นต่างๆ ทำให้เกิดการดัดแปลงปรับปรุงเครื่องจักรกลอยู่ตลอดเวลา ค้นพบวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ อย่างมากจนกระทั่งพบวิธีที่ดีที่สุด สิ่งหนึ่งที่จะขาดเสียมิได้ก็คือศิลปะในการออกแบบ ผู้ออกแบบที่ดีควรมีศิลปะในการออกแบบด้วย ศิลปะการออกแบบอาจอธิบายได้ดังนี้คือ “ผู้ออกแบบใช้ความสามารถในการประยุกต์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์สร้างแบบที่สามารถผลิตได้โดยวิธีการทางวิศวกรรมซึ่งไม่เพียงแต่จะทำงานได้เท่านั้นแต่จะต้องผลิตได้โดยวิธีที่ประหยัดที่สุด และทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพที่สุด”

### 3.1 ปรัชญาของการออกแบบ

ผู้ออกแบบจะเริ่มต้นด้วยการขีดเขียนและสร้างสรรค์แบบใหม่ๆ ขึ้นมา แม้ว่าในการสร้างเครื่องจักรกลชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีใช้มาก่อน จะต้องใช้ความคิดโดยอาศัยพื้นความรู้ต่างๆ อาศัยประสบการณ์และใช้เวลามากหรือน้อยก็ตาม ผู้ออกแบบจะได้ผลกำไรจากความรู้ทางด้านวิศวกรรมและด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นหลายประการ การออกแบบส่วนมากจะทำตามแบบอย่างที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องกลึงรุ่นใหม่มักมีลักษณะคล้ายกับเครื่องกลึงรุ่นเก่า รถยนต์รุ่นใหม่ก็คล้ายกับรถยนต์รุ่นเก่า เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงให้ดีขึ้น เพราะมีความรู้มากขึ้น มีประสบการณ์มากขึ้น ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงจะทำได้เมื่อต้องการประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มหรือรักษาระดับราคาหรือเพิ่มผลการแข่งขันทางการตลาด ปรัชญาของการออกแบบงานเฉพาะอย่างขึ้นอยู่กับลักษณะของอุตสาหกรรมหรือชนิดของเครื่องจักรกล การออกแบบในบางครั้งจะมีแบบต่างๆ หลายแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบประสงค์จะให้งานออกมาในรูปใด งานออกแบบบางชนิดผู้ออกแบบจะต้องค่อยเปลี่ยนแปลงปรัชญาให้เหมาะสมกับธรรมชาติของงานนั้น เช่น เมื่อออกแบบเครื่องบินจะต้องทำด้วยความแม่นยำสูง ระมัดระวังด้านความต้านแรงและน้ำหนัก ซึ่งเป็นการออกแบบที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เมื่อเปรียบเทียบกับออกแบบถึงความต้านขนาดใหญ่ ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความแม่นยำสูงเหมือนกับเครื่องบินหรือไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนัก ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ไม่ได้ตั้งใจจะกล่าวถึงปรัชญาของการออกแบบทั้งหมด ในอุตสาหกรรม แต่ประสงค์จะชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างบางอย่างบางประการ ซึ่งในการออกแบบจริงๆ แล้ว ควรจะต้องพิจารณาถึงปรัชญาที่เหมาะสมกับงานนั้นๆ เป็นหลักสำคัญ

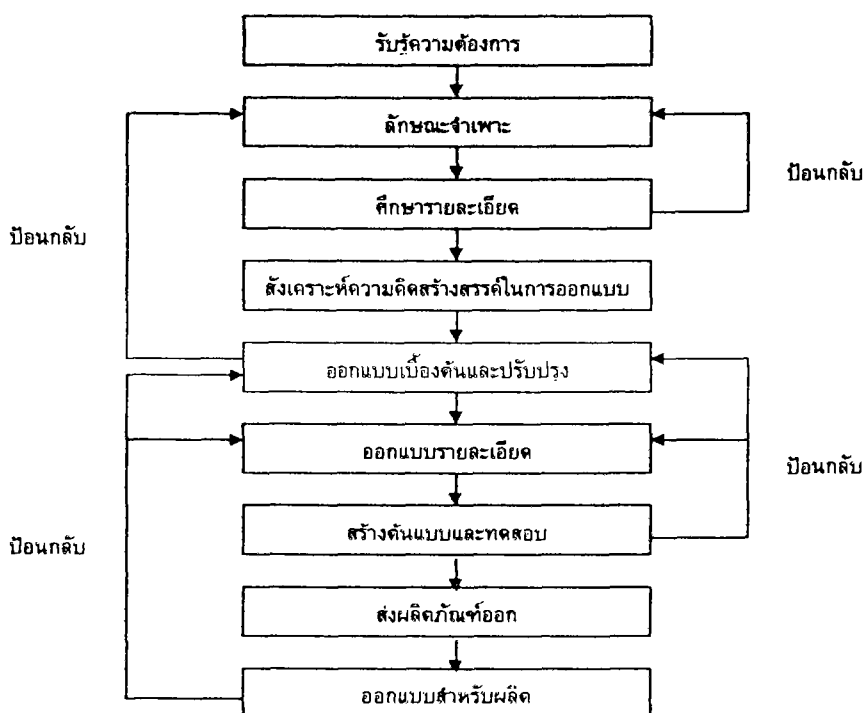
### 3.2 พื้นฐานของผู้ออกแบบเครื่องกล

ผู้ออกแบบเครื่องจักรที่ดีจะต้องมีพื้นฐานความรู้ดังต่อไปนี้เป็นอย่างดี มีพื้นฐานความรู้ทางด้านความแข็งแรงของวัสดุเป็นอย่างดี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเค้น ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจะต้องแข็งแรงและแข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้มีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุวิศวกรรมที่ใช้กับเครื่องจักรกลเป็นอย่างดี ทั้งทางด้านโลหะวิทยา กรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ และติดตามการพัฒนาทางด้านวัสดุอยู่ตลอดเวลา เพื่อจะได้นำวัสดุที่เหมาะสมที่สุดมาใช้มีความรู้ทางด้านกรรมวิธีการผลิตต่างๆ หลักเศรษฐศาสตร์ของวิธีการผลิต เพราะชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตขึ้นมาจะต้องแข่งขันกันทางด้านราคา บางครั้งการออกแบบชิ้นส่วนหนึ่งอาจเหมาะกับโรงงานผลิตแห่งหนึ่ง แต่ไม่เหมาะกับโรงงานผลิตอีกแห่งหนึ่งก็ได้ เช่น โรงงานผลิตที่มีแผนกเชื่อมที่ดี แต่ไม่มีแผนกหล่อ จะพบว่าการผลิตโดยวิธีเชื่อมจะประหยัดที่สุด แต่ในขณะเดียวกันโรงงานอีกแห่งหนึ่งอาจตัดสินใจใช้วิธีหล่อเพราะมีแผนกหล่อที่ดีอยู่ (และอาจมีแผนกเชื่อมหรือไม่ก็ได้) มีความรู้เป็นพิเศษเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่จะมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ เช่น บรรยากาศที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน อุณหภูมิต่ำมากๆ หรือสูงมากๆ เป็นต้นเตรียมพร้อมสำหรับการตัดสินใจอย่างฉลาดได้ว่าควรเลือกใช้ชิ้นส่วนที่มีจำหน่ายอยู่แล้วหรือต้องการออกแบบใหม่ควรใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากประสบการณ์ในการ

ออกแบบชิ้นส่วนหรือไม่ควรทดสอบชิ้นส่วนก่อนการผลิตหรือไม่ต้องออกแบบเป็นพิเศษเพื่อควบคุมการสัน  
 สะเทือน ระดับเสียงดัง และอื่นๆ หรือไม่มีความเข้าใจถึงความสวยงามบางประการ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์  
 และดึงดูดใจผู้ใช้มีความรู้ทางด้านเศรษฐศาสตร์และการแข่งขันทางด้านราคา เพราะเหตุว่าวิศวกรมีหน้าที่ใน  
 การประหยัดเงินของผู้ว่าจ้าง การจะเพิ่มราคาสินค้าได้จะต้องมีการปรับปรุง เปลี่ยนแปลง เช่นเพิ่มสมรรถนะ  
 เพิ่มสิ่งดึงดูดใจ หรือเพิ่มความทนทานให้มากขึ้นมีลักษณะเฉพาะในการเป็นนักประดิษฐ์และสร้างสรรค์ สิ่ง  
 สำคัญที่สุดก็คือจะต้องทำให้เกิดประสิทธิผลสูงที่สุด ความคิดสร้างสรรค์อาจเกิดขึ้นเพราะมีความขยันขันแข็ง  
 ที่จะแก้ไขสิ่งที่ไม่ถูกใจ และมีความเต็มใจที่จะทำตามปกติแล้วยังมีอีกหลายสิ่งหลายอย่างที่ควรพิจารณา  
 โดยละเอียดอีก เช่น เครื่องจักรกลจะใช้งานได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ มีอะไรป้องกันการเคลื่อนหรือใช้งาน  
 ของผู้ใช้เครื่องจักรหรือไม่ มีการสันสะเทือนจนอาจเกิดอันตรายหรือไม่ การประกอบชิ้นส่วนหรือการซ่อมบำรุง  
 ทำได้ยากหรือง่ายเป็นต้น เป็นสิ่งที่แน่นอนที่สุดว่า ไม่มีวิศวกรคนใดที่จะมีความรู้เป็นพิเศษเกี่ยวกับสิ่งที่  
 กล่าวมาแล้วทั้งหมดและตัดสินใจในการแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างดีที่สุด องค์การขนาดใหญ่ขึ้นย่อมจะมีผู้ชำนาญ  
 พิเศษในด้านต่างๆ มากขึ้นซึ่งจะช่วยในการเป็นที่ปรึกษาได้อย่างดี วิศวกรส่วนมากจะรู้ขั้นตอนการออกแบบ  
 แล้วเป็นอย่างดีและจะดียิ่งขึ้นถ้าได้ใช้บุคคลหลายฝ่ายที่มีความชำนาญพิเศษต่างกัมารวมมือกันออกแบบ  
 การออกแบบเป็นงานอาชีพอย่างหนึ่งซึ่งมีเสน่ห์ดึงดูดใจผู้ออกแบบ เพราะต้องใช้พื้นความรู้อย่างกว้างขวางทั้ง  
 ทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ งานวิศวกรรมก็คืองานออกแบบ

### 3.3 ขั้นตอนของการออกแบบ

การออกแบบเป็นกระบวนการที่น่าสนใจมากกว่าควรจะเริ่มต้นอย่างไร ควรจะเริ่มต้นจากกระดาษ  
 เปล่าแผ่นหนึ่ง แล้วเริ่มลงมือแสดงความคิดเห็นลงไป ต่อไปจะเกิดอะไรขึ้น มีอะไรน่าที่เป็นตัวควบคุมหรือมีผล  
 ต่อการตัดสินใจ และสุดท้ายงานออกแบบจะสิ้นสุดลงที่ใด ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบทั่วไปซึ่ง  
 งานบางประการอาจไม่เป็นไปตามขั้นตอนดังกล่าวนี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบและกรรมวิธี  
 ในการออกแบบ ดังจะเขียนเป็นแผนภาพได้ดังภาพประกอบ 60



ภาพประกอบ 60 แผนภาพของการออกแบบที่มีวงป้อนกลับ

3.3.1 รับรู้ความต้องการ การออกแบบอาจเริ่มต้นขึ้นจากการที่วิศวกรรับรู้ความต้องการและตัดสินใจที่จะทำอะไรบางอย่างบางอย่างขึ้น หรืออาจได้รับข้อมูลจากลูกค้าที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ในด้านการใช้งานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจเป็นแรงผลักดันให้มีการออกแบบขึ้นได้ การแข่งขันกันทางด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความต้องการในการออกแบบอุปกรณ์ กระบวนการ และเครื่องจักรกลใหม่ๆ สิ่งสำคัญก็คือ ต้องยอมรับรู้ว่าเกิดความต้องการขึ้นแล้ว ใช้ประสบการณ์พื้นฐานที่มีอยู่ทำความเข้าใจกับความต้องการนั้นให้ถ่องแท้

3.3.2 ลักษณะจำเพาะ รวบรวมรายละเอียดของสิ่งที่ต้องการออกแบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งอาจประกอบไปด้วย คุณสมบัติ ขนาด ราคา จำนวนที่ต้องการผลิต อายุการใช้งาน อุณหภูมิใช้งาน ความเชื่อถือได้ และสิ่งที่คาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง เช่น น้ำหนัก ขนาดต่างๆ พร้อมทั้งบางสิ่งบางอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการออกแบบ เช่น กรรมวิธีการผลิต ความชำนาญของช่าง และการแข่งขันทางตลาด เป็นต้น การออกแบบบางประเภทต้องทำตามเกณฑ์ (code) เช่น หม้อไอน้ำ ภาชนะความดัน ก็จำเป็นต้องศึกษาเกณฑ์นั้นให้ทราบถึงสิ่งสำคัญต่างๆ ที่เป็นข้อควรระมัดระวังและปฏิบัติตาม

3.3.3 ศึกษารายละเอียด เมื่อได้ลักษณะจำเพาะต่างๆ แล้วขั้นต่อไปก็คือศึกษารายละเอียดทั้งนี้ก็เพื่อแยกแยะถึงสิ่งที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายหรือความล้มเหลว ทั้งทางด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์โดยปกติแล้วผู้ที่รับผิดชอบในการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นวิศวกรที่ผ่านงานออกแบบมาแล้วอย่างมาก มีพื้นความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ต่างๆ เป็นอย่างดี รู้วิธีการเลือกวัสดุ วิธีการผลิตและความต้องการของแผนกขาย ผู้ที่ทำการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นผู้รับผิดชอบโครงการทั้งหมดมีบ่อยครั้งที่ผลจากการศึกษารายละเอียดจะทำให้ลักษณะจำเพาะต้องเปลี่ยนไปเพื่อความสำเร็จของโครงการ จึงทำให้มีวงป้อนกลับไปยังลักษณะจำเพาะดังภาพประกอบ 60

3.3.4 สังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ เมื่อศึกษารายละเอียดแล้ว ต่อไปก็จะถึงการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ท้าทายและน่าสนใจที่สุดในการออกแบบ เพราะถ้าไม่มีสิ่งขัดจำกัดอันใดแล้ว ผู้ออกแบบจะทำหน้าที่เป็นวิศวกร นักประดิษฐ์ และจิตรกรในเวลาเดียวกัน ซึ่งในขณะนี้เขาจะเป็นนักสร้างสรรค์การสังเคราะห์คือการวิเคราะห์และทำให้อำนวยประโยชน์ที่สุด ในขั้นนี้จะต้องสังเคราะห์ความคิดใหม่กับความคิดเก่าเพื่อทำให้เกิดความคิดใหม่ขึ้น ความคิดสร้างสรรค์เป็นสิ่งที่สั่งสอนกันไม่ได้แม้ว่าจะใช้วิธีการตุนักก็ตาม แต่ก็เชื่อได้ว่าการศึกษาที่เหมาะสมทำให้มนุษย์มีกระบวนการคิดสร้างสรรค์กว้างขวางขึ้น

3.3.5 ออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบแล้ว อาจจะมีวิธีการออกแบบที่เหมาะสมกับลักษณะจำเพาะและความต้องการหลายวิธี จึงจำเป็นที่จะต้องตัดสินใจเลือกเอาวิธีหนึ่งเป็นแบบเบื้องต้นและปรับปรุงต่อไปในขั้นนี้จำเป็นจะต้องมีแบบแสดงเครื่องจักรกลหรือระบบที่มีความเกี่ยวข้องกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ ของระบบทั้งหมด แบบควรมีขนาดสำคัญพร้อมทั้งรูปประกอบรูปด้านข้างอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นต้องพิจารณาทางด้านคิเนมาติก (kinematic) ของระบบด้วยเพื่อความมั่นใจว่าจะทำงานได้ โดยปกติแล้วในขั้นนี้ก็ยังไม่ได้ผลสมบูรณ์ จึงต้องมีวงป้อนกลับไปยังลักษณะจำเพาะดังภาพประกอบ 60 เพื่อทำให้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน พร้อมกันนั้นก็จะมีการปรับปรุง เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงแนวความคิด เพื่อหาวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม เพื่อประเมินผลของอุปกรณ์หรือค้นหาสิ่งที่ยังไม่แน่ชัดจากข้อมูลทางเทคนิคและประสบการณ์ที่ผ่านมา ดังนั้นช่วงการออกแบบเบื้องต้นนี้อาจจะซ้ำหรือเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลที่ได้ อันที่จริงแล้วการปรับปรุงจะเกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไปของแผนภาพในภาพประกอบ 60

3.3.6 ออกแบบรายละเอียด การออกแบบรายละเอียดเกี่ยวข้องกับขนาดจริง และขนาดของส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดทั้งที่จะผลิตขึ้นเอง หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จที่จะซื้อมาใช้ ซึ่งจะประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดเป็นระบบ ดังนั้นจึงต้องมีแบบรายละเอียดของชิ้นส่วนทุกชิ้น แสดงรูปด้านต่างๆ เท่าที่จำเป็นโดยต้องกำหนดทั้งขนาด พิกัดความเผื่อไว้ให้ครบถ้วน วัสดุที่ใช้ กรรมวิธีทางความร้อน (ถ้ามี) จำนวนชิ้นส่วน ชื่อชิ้นส่วน และบางครั้งอาจจะต้องใช้แบบประกอบของชิ้นงานสำเร็จด้วย โดยปกติช่างเขียนแบบจะทำงานไปพร้อมกับวิศวกร เพื่อเขียนแบบที่วิศวกรกำหนดขึ้น วิศวกรจะต้องให้ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็น เช่น รูปแบบเบื้องต้นที่วิศวกรควรจะร่างขึ้นมาก่อน จะต้องให้ขนาดชนิดของวัสดุโดยใช้เทคนิคในการวิเคราะห์และประสบการณ์ที่ผ่านมาก ซึ่งหมายความว่าวิศวกรต้องใช้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ กลศาสตร์ ความแข็งแรงของวัสดุ กลศาสตร์ของไหล การสั่นสะเทือน โลหะวิทยา กระบวนการผลิต โดยที่วิศวกรอาจจะหาผู้ช่วยที่มีความชำนาญพิเศษเฉพาะสาขามาช่วยได้

3.3.7 สร้างต้นแบบและทดสอบ หลักจากที่มีรายละเอียดต่างๆ สมบูรณ์มีแบบแยกชิ้น แบบประกอบ รวมทั้งวัสดุและรายการชิ้นส่วนต่างๆ แล้ว จึงส่งแบบที่สมบูรณ์ทั้งหมดไปยังโรงงานเพื่อสร้างต้นแบบเมื่อสร้างต้นแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วก็เตรียมประเมินผลและทดสอบ ผลจากการทดสอบอาจทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงการออกแบบเบื้องต้น หรือแบบรายละเอียดบางประการ ซึ่งแสดงไว้เป็นวงป้อนกลับดังภาพประกอบ 60 หลังการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงชิ้นส่วนบางชิ้นแล้วจะทดสอบและประเมินผลใหม่อีกครั้ง หรืออาจต้องทำอีกหลายครั้ง จนกระทั่งวิศวกรผู้ออกแบบพึงพอใจที่งานของเขามีสมรรถนะตามต้องการ เมื่อถึงขั้นนี้แล้วจะส่งแบบชิ้นส่วนและรายการวัสดุไปยังแผนกวิศวกรรมการผลิต เพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมกับการผลิตต่อไป

3.3.8 ออกแบบสำหรับผลิต ในขั้นนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงบางอย่าง เพื่อความเหมาะสม (โดยมากจะพิจารณาจากหลักเศรษฐศาสตร์) ของวิธีการผลิตที่ดีที่สุด เนื่องจากผลิตชิ้นงานน้อยชิ้นกับชิ้นงานมากชิ้นอาจต้องใช้วิธีการผลิตต่างกัน จึงต้องหาวิธีการผลิตที่ประหยัดที่สุด บางครั้งอาจรวมชิ้นงานหลายชิ้นเข้าเป็นชิ้นเดียวกัน หรือเปลี่ยนใช้ชิ้นส่วนที่มีในท้องตลาดแทนอีก ประการหนึ่งวิศวกรการผลิตอาจเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันแต่ราคาถูกกว่าก็ได้ จากนั้นจึงเขียนแบบแก้ไขใหม่ให้เรียบร้อยแล้วจึงส่งฝ่ายผลิต เพื่อผลิตและส่งผลิตภัณฑ์ออกจำหน่าย

3.3.9 ส่งผลิตภัณฑ์ออก โดยปกติมักจะผลิตชิ้นงานต้นแบบแล้วทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ถ้ามีปัญหาที่แก้ไขไม่ได้ก็จะส่งกลับไปยังแผนกออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง หรืออาจเสนอแนะข้อคิดเห็นไปได้ดังที่ได้แสดงโดยวงป้อนกลับในภาพประกอบ 60 (วรินทร์ อึ้งภากรณ์และชาญ ถนัดงาน. 2534 : 11-17)

#### 3.4 ระบบของหน่วย

ระบบของหน่วยที่ใช้คือระบบหน่วยเอสไอ (S.I. Units) ซึ่งเป็นระบบหน่วยระหว่างประเทศ หน่วยพื้นฐานที่ใช้ในกลศาสตร์ของไหลคือ

ตาราง 11 ระบบของหน่วย

| มิติ             | หน่วยเอสไอ          | สัญลักษณ์ |
|------------------|---------------------|-----------|
| ความยาว (L)      | เมตร (Meter)        | M         |
| มวล (M)          | กิโลกรัม (Kilogram) | Kg        |
| เวลา (T)         | วินาที (Second)     | S         |
| แรง (F)          | นิวตัน (Newton)     | N         |
| อุณหภูมิสัมบูรณ์ | เคลวิน (Kelvin)     | K         |
| อุณหภูมิ         | เซลเซียส (Celsius)  | °C        |

หน่วยอนุพันธ์ (Derived Units) ที่ใช้ในกลศาสตร์ของไหลและมิติที่ใช้ทั่วไปในเทอมของ L, M, T และ F มีดังนี้

ตาราง 12 ระบบหน่วยอนุพันธ์

| ปริมาณ                      | มิติที่ใช้ทั่วไป | หน่วยเอสไอ                               |
|-----------------------------|------------------|------------------------------------------|
| กำลัง ( $W_p$ )             | $FLT^{-1}$       | Watt, W                                  |
| ความดัน (P)                 | $FL^{-2}$        | Pascal, Pa ( $N/m^2$ )                   |
| ความถี่                     | $T^{-1}$         | Hertz, Hz                                |
| ความเร็ว (V)                | $LT^{-1}$        | meter/second, m/s                        |
| ความเร่ง (a)                | $LT^{-2}$        | meter./ (second) <sup>2</sup> , $m/s^2$  |
| ความหนาแน่น ( $\rho$ )      | $ML^{-3}$        | Kilogram/(meter) <sup>3</sup> , $kg/m^3$ |
| ความหนืด ( $\mu$ )          | $FTL^{-2}$       | Pascal, second, Pa.s                     |
| ความหนืดคิเนมาติก ( $\nu$ ) | $L^2T^{-1}$      | (meter) <sup>2</sup> /second, $m^2/s$    |
| น้ำหนักจำเพาะ ( $\gamma$ )  | $FL^{-3}$        | Newton/(meter) <sup>3</sup> , $N/m^3$    |
| ปริมาตร (vol)               | $L^3$            | (meter) <sup>3</sup> , $m^3$             |
| พื้นที่ (A)                 | $L^2$            | (meter) <sup>2</sup> , $m^2$             |
| พลังงาน, งาน                | $F^L$            | Joule, J (N.m)                           |
| อัตราไหล (Q)                | $L^3T^{-1}$      | (meter) <sup>3</sup> /second, $m^3/s$    |

### 3.4.1 ข้อนแนะนำในการใช้หน่วยเอสไอ

3.4.1.1 การใช้อุปสรรค (prefix) เติมหน้าหน่วย เพื่อใช้แทนจำนวนเลขที่มีค่าสูงมากหรือต่ำมาก, อุปสรรคที่ใช้ทั่วไปดังนี้

## ตาราง 13 การใช้อุปสรรค

| ตัวคูณ | อุปสรรค | สัญลักษณ์ | ตัวคูณ    | อุปสรรค | สัญลักษณ์ |
|--------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|
| $10^9$ | Giga    | G         | $10^{-2}$ | Centi   | C         |
| $10^6$ | Mega    | M         | $10^{-3}$ | Milli   | m         |
| $10^3$ | Kilo    | K         | $10^{-6}$ | Micro   | $\mu$     |

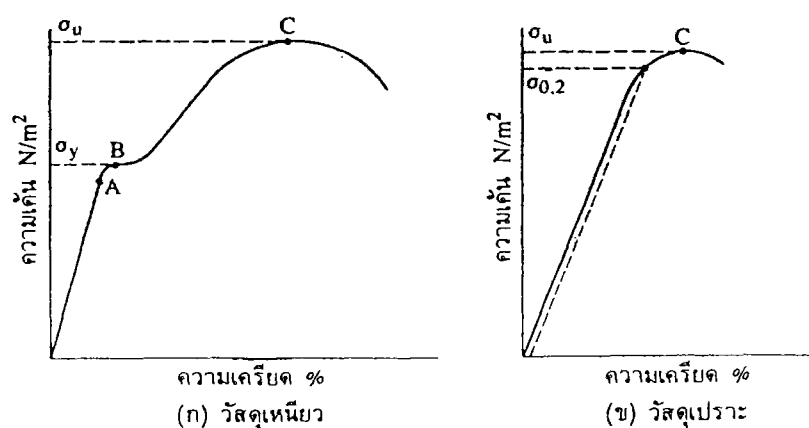
3.4.1.2 การเขียนหน่วยให้เขียนอย่างชัดเจน เช่นหน่วยของความเร่งคือ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ให้เขียนว่า  $\text{m/s}^2$  หรือ  $\text{ms}^{-2}$  ไม่ควรเขียนว่า  $\text{m/s/s}$  หน่วยที่คูณกันให้ใช้จุดคั่น เช่นนิวตัน-เมตร ให้เขียนว่า  $\text{N}\cdot\text{m}$  เป็นต้น

3.4.1.3 การเขียนกลุ่มตัวเลข ไม่แนะนำให้ใช้จุดภาคคั่นระหว่างจำนวนเลขหลักร้อยกับหลักพัน แต่ให้เว้นช่องว่างไว้แทน เช่น 12, 345.543, 22 ให้ 12 345.543 22 เป็นต้น ในกรณีที่มีจำนวนเลขเพียงหลักพันอนุโลมให้เขียนติดกันได้โดยไม่ต้องเว้นช่องว่าง เช่น 1980 (ชาญ ถนัดงาน. 2523 : 2-3)

### 3.5 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะต้องคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นสำคัญ ซึ่งจะพบว่ามีชื่อเรียกต่างๆ อยู่มาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงจะได้นิยามความหมายของชื่อต่างๆ ไว้พอสังเขปดังต่อไปนี้

3.5.1 ความต้านทานแรงดึงอัลติเมต (ultimate tensile strength),  $\sigma_u$  เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้ ซึ่งคำนวณได้จากการนำแรงที่ใช้ดึงวัสดุตัวอย่างหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม และแทนด้วยจุด C บนกราฟความเค้น-ความเครียดในภาพประกอบ 61 ในบางครั้งอาจเรียกให้สั้นลงได้ว่าความต้านแรงดึง (tensile strength)



ภาพประกอบ 61 แผนภาพความเค้น-ความเครียด

3.5.2 ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit) เป็นค่าความเค้นค่าสุดท้ายที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดดังจุด A ในภาพประกอบ 61(a) เมื่อพ้นจุดนี้ไปแล้วกราฟจะเป็นเส้นโค้ง ในทางปฏิบัติจะหาจุดนี้ยากมาก ฉะนั้นในการคำนวณจึงนิยมใช้ความต้านแรงดึงคราก (yield strength) แทน

3.5.3 ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) อยู่ระหว่างจุด A และ B ในภาพประกอบ 61 (ก) เป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อเอาแรงภายนอกออกแล้วชิ้นตัวอย่างทดสอบจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม กราฟในช่วง AB นี้ จะมีความโค้งเล็กน้อย

3.5.4 ความต้านแรงดึงคราก (yield strength),  $\sigma_y$  เป็นจุดที่ชิ้นทดสอบยืดออกได้มากโดยที่เพิ่มแรงอีกเล็กน้อยเท่านั้น (หรือไม่ได้เพิ่ม) ซึ่งแทนด้วยจุด B หรือเรียกว่าจุดคราก ความเค้นที่จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบทั่วไป สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึงเป็นหลักในการออกแบบหรืออาจจะหาความเค้นที่เรียกว่า ความเค้นที่จุดยืดถาวร (proof stress) มาใช้แทนความต้านแรงดึงคราก โดยการลากเส้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟตามเปอร์เซ็นต์ของความเครียดที่ต้องการ ดังภาพประกอบ 61(ข) โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้ร้อยละ 0.2 และเพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างความเค้นที่จุดยืดถาวรกับความต้านแรงดึงคราก จึงใช้สัญลักษณ์แทนความเค้นที่จุดยืดถาวรร้อยละ 0.2 ว่า  $\sigma_{0.2}$  หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่าความเค้นพิสูจน์ร้อยละ 0.2

3.5.5 ยั่งส์โมดูลัส (Young's modulus) หรือโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดในส่วนที่กราฟเป็นเส้นตรง

3.5.6 โมดูลัสเฉือน (shear modulus) หรือโมดูลัสความแข็งแกร่ง (modulus of rigidity) ในการทดสอบชิ้นส่วนโดยใช้แรงเฉือนแล้วเขียนกราฟระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับความเครียดเฉือน (shear strain) ก็จะได้กราฟลักษณะเดียวกับการทดสอบแรงดึง อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนในส่วนที่กราฟเป็นเส้นตรงเรียกว่า โมดูลัสเฉือน

### 3.6 ค่าความปลอดภัย

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัยหมายถึง ตัวเลขที่นำไปหารค่าความต้านแรงดึงหรือความต้านแรงดึงครากของวัสดุ เพื่อให้ได้ความเค้นใช้งาน (working stress) ในชิ้นส่วนที่กำลังออกแบบ ซึ่งเรียกสั้นๆ ว่า ความเค้นออกแบบ (design stress) หรือความเค้นใช้งาน ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าชนิดหนึ่งมีความต้านแรงดึงและความต้านแรงดึงครากเท่ากับ  $700 \text{ MN/m}^2$  และ  $420 \text{ MN/m}^2$  ตามลำดับ และในการออกแบบชิ้นงานหนึ่งโดยใช้เหล็กกล้าชนิดนี้ ผู้ออกแบบคิดว่าตามลักษณะการใช้งานแล้วความเค้นใช้งานควรจะไม่เกิน  $140 \text{ MN/m}^2$  ฉะนั้นค่าความปลอดภัยเมื่อถือความต้านแรงดึงเป็นหลักคือ

$$N_u = \frac{700}{140} = 5$$

และค่าความปลอดภัยเมื่อถือความต้านแรงดึงครากเป็นหลักคือ

$$N_y = \frac{420}{140} = 3$$

ในกรณีที่ได้มีการกำหนดขนาดของชิ้นงานมาแล้ว ค่าความปลอดภัยของชิ้นงานนั้นคือ

$$N_u = \frac{\text{ความต้านแรงดึง}}{\text{ความเค้นที่คำนวณได้}}$$

$$N_y = \frac{\text{ความต้านแรงดึงคราก}}{\text{ความเค้นที่คำนวณได้}}$$

สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear) เช่น ท่อโลหะ หรือเสาที่อาจจะเสียหาย เนื่องจากการโก่งงอ จะต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงที่มากระทำโดยตรงที่จะใช้กับความเค้น ทั้งนี้เพราะในปัญหามันไม่ใช่เชิงเส้น ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจจะไม่ได้แปรผันโดยตรงกับแรง ในกรณีเช่นนี้

$$N = \frac{\text{แรงที่ทำให้แตกหัก}}{\text{แรงที่ใช้ออกแบบ}}$$

ค่าความปลอดภัยที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบจำนวนมากดังนี้ ชนิดของแรงที่มากระทำต่อชิ้นงานว่าเป็นแรงที่จัดอยู่ในประเภทอยู่นิ่ง หรือเปลี่ยนแปลงขนาดอยู่ตลอดเวลาขณะใช้งานลักษณะการใช้ของงานชิ้นงานว่าเกี่ยวข้องกับการที่อาจจะสูญเสียชีวิต หรือทรัพย์สินจำนวนมากหรือไม่น้ำหนักของชิ้นงานว่ามีความจำเป็นที่จะต้องเบาที่สุดหรือไม่ เช่น ชิ้นส่วนสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้การใช้ค่าความปลอดภัยจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดเป็นพิเศษ จำนวนของชิ้นงานที่จะผลิตออกมา ถ้าผลิตครั้งละมากๆ ควรระมัดระวังในการใช้ค่าความปลอดภัยที่ไม่สูงจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อให้ประหยัดวัสดุได้มากที่สุด เนื้อวัสดุที่ผลิตออกมาอาจไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความสามารถในการรับแรงต่างกันสำหรับผู้ที่มีความชำนาญในการออกแบบน้อย ก็อาจจะใช้ค่าที่แนะนำไว้ในตาราง 14 เป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบได้

ตาราง 14 ค่าความปลอดภัย

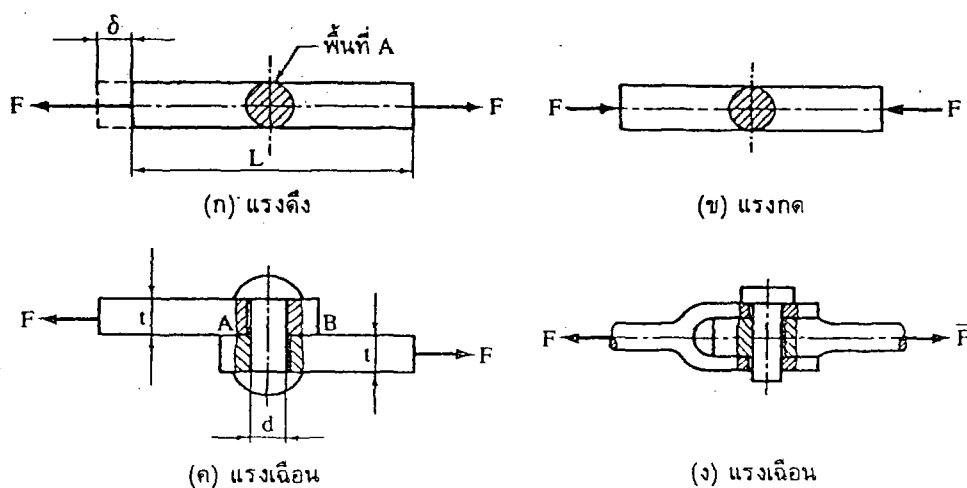
| ชนิดของแรง                                 | เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว |         | เหล็กหล่อและโลหะเปราะ |
|--------------------------------------------|--------------------------|---------|-----------------------|
|                                            | $N_y$                    | $N_u$   | $N_u$                 |
| แรงอยู่นิ่ง                                | – 2                      | 3 – 4   | 5 – 6                 |
| แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือ<br>แรงกระแทกเล็กน้อย | 3                        | 6       | 7 – 8                 |
| แรงซ้ำสองทิศทางหรือ<br>แรงกระแทกเล็กน้อย   | 4                        | 8       | 10 – 12               |
| แรงกระแทกอย่างหนัก                         | 5 – 7                    | 10 – 15 | 15 – 20               |

ค่าความปลอดภัยสำหรับแรงซ้ำทิศทางเดียว (repeated, one direction) หรือแรงซ้ำสองทิศทาง (repeated and reversed) ที่ให้ไว้ในตาราง 14 หมายถึงค่าความปลอดภัยที่จะนำไปใช้เมื่อสมมติให้เป็นแรงนิ่ง (dead load) ในขณะที่ออกแบบสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาโดยคิดละเอียดลงไปถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรง และความทนของวัสดุต่อแรงที่เปลี่ยนอยู่เสมอจะใช้ค่าความปลอดภัยแตกต่างกันไป (วรินทร์ อึ้งภากรณ์และชาญ ถนัดงาน. 2534 : 21-24)

### 3.7 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างง่าย จำเป็นจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุ พลศาสตร์ วัสดุศาสตร์ และอื่นๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานและการนำไปใช้งาน สิ่งสำคัญก่อนที่จะออกแบบชิ้นงานได้ก็คือ ความเข้าใจทางด้านพลศาสตร์และกลศาสตร์วัสดุอย่างถ่องแท้ ในบทนี้จะเป็นการทบทวนเนื้อความและสูตรที่สำคัญทางด้านกลศาสตร์วัสดุ ซึ่งจะต้องใช้ประกอบการคำนวณ ออกแบบอยู่เสมอ รวมทั้งแสดงถึงวิธีการคำนวณออกแบบชิ้นงานอย่างง่ายอีกด้วย

3.7.1 ความเค้นอย่างง่าย นิยามของความเค้นคือ แรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง ความเค้นอย่างง่าย (simple stress) มีอยู่ 3 ชนิดคือ ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน



ภาพประกอบ 62 แรงชนิดต่างๆ

พิจารณาภาพประกอบ 62(ก) และ (ข) ซึ่งเป็นท่อนโลหะกลมอยู่ภายใต้แรงดึง และแรงกด  $F$  ตามลำดับ ความเค้นดึงและความเค้นกดคือ

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad \text{และ} \quad \sigma_c = \frac{F}{A} \quad (37)$$

ในกรณีที่แผ่นโลหะยึดติดกัน ด้วยหมุดย้ำ ดังภาพประกอบ 62(ค) ตัวหมุดย้ำจะขาดเนื่องจากแรงเฉือนกระทำที่หน้าตัด AB ถ้าพื้นที่หน้าตัดของหมุดย้ำเท่ากับ  $A$  ความเค้นเฉือนในหน้าตัดของหมุดย้ำคือ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (38)$$

ถ้าหน้าตัดของชิ้นงานที่รับแรงเฉือนมีมากกว่าหนึ่งแห่ง ดังเช่นในภาพประกอบ 62 (ง) ซึ่งมีสองแห่ง พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงคือ  $2A$  ในกรณีเช่นนี้เรียกว่า หมุดย้ำรับแรงเฉือนคู่ (double shear) เพราะฉะนั้น ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของหมุดย้ำนี้จะเท่ากับ

$$\tau = \frac{F}{2A}$$

พิจารณาหมุดย้ำในภาพประกอบ 62(ค) จะเกิดการอัดกันระหว่างด้านข้างของตัวหมุดย้ำกับแผ่นโลหะด้วยความเค้นที่ผิวโลหะที่สัมผัสกันนี้ไม่สม่ำเสมอนัก ในทางปฏิบัติจึงหาความเค้นกดนี้โดยใช้พื้นที่ภาพฉาย (projected area) ของส่วนที่อัดกันอยู่ แทนการใช้พื้นที่จริงรอบหมุดย้ำ และมีชื่อเรียกว่าความเค้นอัด (bearing stress) ถ้าหมุดย้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ความเค้นอัดนี้คือ

$$\sigma_c = \frac{F}{dt} \quad (39)$$

3.7.2 ความเครียด (strain)  $\epsilon$  หมายถึงอัตราส่วนระหว่างที่ยืดหรือหดของชิ้นงานกับความยาวเดิมจากภาพประกอบ 62(ก) ส่วนที่ยืดออกเนื่องจากแรงดึง  $F$  เท่ากับ  $\sigma$  เพราะฉะนั้นความเครียดนี้จะเท่ากับ

$$\epsilon = \frac{Q}{L} \quad (40)$$

จากกฎของฮุก

$$\sigma = E\epsilon \quad (41)$$

แต่  $\sigma = F/A$  ฉะนั้นเมื่อแทนค่า  $\epsilon$  จากสมการที่ (40) ลงในสมการที่ (41) จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{FL}{AE} \quad (42)$$

จากกลศาสตร์วัสดุยังทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างยังส์โมดูลัสและโมดูลัสเฉือนอีกคือ

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (43)$$

โดยที่  $\nu$  เป็นอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

3.7.3 การบิด ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีหน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (torque) จะบิดไปเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{\pi L}{GJ} \quad (44)$$

โดยที่ T คือโมเมนต์บิด

L คือความยาว

J คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (Polar area moment of inertia)

$$= \frac{\pi d^4}{32} \quad \text{สำหรับท่อนกลมตัน}$$

$$= \frac{\pi (d^4 - d_i^4)}{32} \quad \text{สำหรับท่อนกลมกลวง}$$

d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

$d_i$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการบิดจะมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกของท่อนกลมนี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (45)$$

โดยที่ r คือรัศมีนอกของท่อนกลม

ในการที่จะใช้สมการที่ (45) มักจะจำเป็นที่จะต้องหาค่าโมเมนต์บิดให้ได้เสียก่อน สำหรับเครื่องจักรกลที่ส่งกำลังมาตามเพลลา จะคำนวณหาค่าโมเมนต์บิดได้จาก

$$Wp = T\omega = 2\pi nT \quad (46)$$

โดยที่  $Wp$  คือกำลังงานเป็น W

T คือโมเมนต์บิดเป็น Nm

$\omega$  คือความเร็วเชิงมุมเป็น rad/s

n คือความเร็วรอบเป็น rev/s

สำหรับในระบบหน่วยอังกฤษซึ่งยังมีใช้กันอยู่จะบอกกำลังงานเป็นแรงม้า และคำนวณโมเมนต์บิดได้จาก

$$hp = \frac{Tn}{6300} \quad (47)$$

โดยที่ T คือโมเมนต์บิดเป็น in-lb

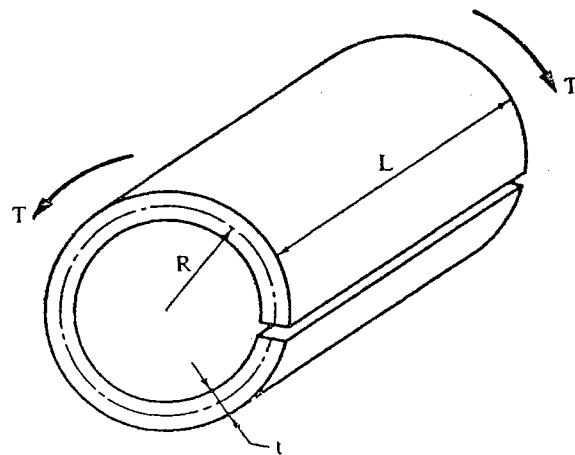
n คือ ความเร็วรอบ เป็น rev/min

ในกรณีของท่อนกลมผนังบาง (thin-walled tube) ซึ่งมีรัศมีเฉลี่ย R และผ่าตลอดความยาว ในภาพประกอบ 63

มุมบิดและค่าความเค้นเฉือนโดยประมาณคือ

$$\theta = \frac{3TL}{2\pi Rl^3 G} \quad (48)$$

$$\tau = \frac{3T}{2\pi Rl^2} \quad (49)$$



ภาพประกอบ 63 ท่อกลมผนังบางผ่าตลอดความยาว

### 3.8 เสา

เสามีลักษณะเป็นท่อนตรงและรับแรงกดในแนวแกน ถ้าแรงมีค่าไม่มากนักเสาที่เรียวยาวก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ตรงได้ แต่ถ้าแรงเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง เสาดังกล่าวก็อาจจะเกิดการโก่งงอขึ้น (buckling) แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอนี้เรียกว่า แรงวิกฤต (critical load) ความเค้นที่เกิดในเสาสถานะที่จะเริ่มเกิดการโก่งงออาจจะต่ำกว่าความเค้นใช้งานก็ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการโก่งงอแล้ว ชิ้นงานนั้นก็ไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ได้ตามต้องการ ฉะนั้นการออกแบบอาจจะจำกัดแรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอแทนที่จะจำกัดความเค้นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจำนวนมากก็ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเสา เช่น ก้านสูบ สูตรที่ใช้กับเสาจะจำแนกออกตามอัตราส่วนความเพียว (slenderness ratio)  $L_e/k$  โดยที่

$L_e$  คือความยาวสมมูล (equivalent length)

$k$   $I/A^{1/2}$  รัศมีจอยเรชัน

$I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

$A$  คือพื้นที่หน้าตัด

เนื่องจากการออกแบบเสาที่อาจจะเกิดการโก่งงอจะจำกัดแรงกด แทนที่จะจำกัดความเค้น ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงกด ถ้าให้  $F_c$  เป็นแรงวิกฤต แรงกดใช้งานคือ  $F = F_c/N$

สำหรับเสาที่มีขนาดยาวจะนิยมใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler) คือ

$$F = \frac{\pi^2 EA}{N(L_e/k)^2} \quad (50)$$

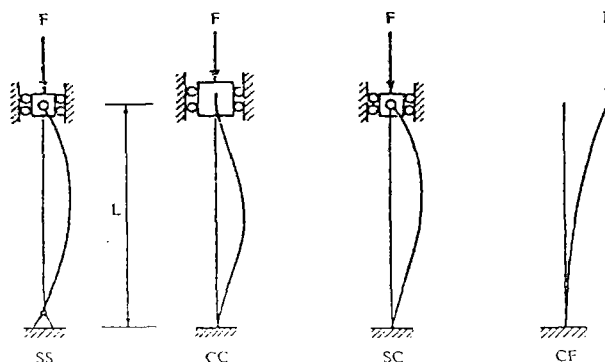
ซึ่งถ้าเป็นเหล็กโครงสร้างแล้วจะใช้สูตรของออยเลอร์เมื่ออัตราส่วนความเพรียวมากกว่า 115 จาก สูตรจะเห็นว่าเสาจะเกิดการโก่งรอบแกน ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดหรือรัศมีจายเรชันมีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่าความปลอดภัยสำหรับเสายาวนี้ ในทางการออกแบบเครื่องกลแนะนำให้ใช้ประมาณ 3.5 สำหรับค่าความยาวสมมูลนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายชิ้นงานที่ยึดอยู่ ภาพประกอบ 64

ปลายยึดแบบธรรมดา (SS:simply supported)  $L_e = L$  (51)

ปลายยึดแน่นสองข้าง (CC : clamped)  $L_e = L/2$  (52)

ปลายยึดแบบธรรมดา – ยึดแน่น (SC : simply supported-clamped)  $L_e = 0.70L$  (53)

ปลายยึดแน่น - อิสระ (CF : clamped – free)  $L_e = 2 L$  (54)

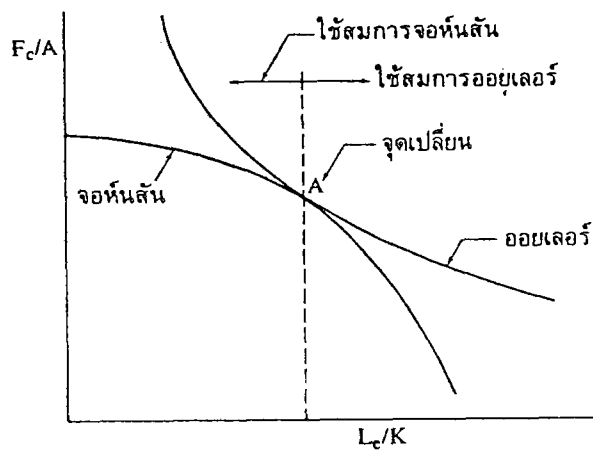


ภาพประกอบ 64 แสดงการยึดปลายเสาวิธีต่างๆ

จะเห็นว่าปลายแบบ CC มีความแข็งแรงสูงสุดและปลายแบบ CF รับแรงกดได้น้อยที่สุด ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเสา ปลายมักจะเป็นแบบ SS, SC หรือ CF ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะที่แท้จริงของชิ้นงานนั้น สำหรับเสาที่มีขนาดสั้นลงมาก สูตรของออยเลอร์จะใช้งานไม่ได้ดีนัก ทั้งนี้เพราะความเสียหายที่แท้จริงอาจจะเนื่องมาจากการโก่งงอ และการที่ความเค้นในเสาเกินขีดจำกัด ยึดหยุ่นพร้อมกันในการนี้ผู้ออกแบบมักจะนิยมใช้สูตรของจอห์นสัน (Johnson) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สูตรพาราโบลา (parabolic formula) คือ

$$F = \frac{\sigma_y A}{N} \left[ 1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (55)$$

สำหรับ เหล็กโครงสร้างแล้ว จะใช้สูตรของจอร์นสันเมื่ออัตราส่วนความเพียรมีค่าประมาณ  $40 < L_e/k \leq 115$  เนื่องจากเส้นกราฟจากสูตรของออยเลอร์และจอร์นสันจะสัมผัสกันที่จุด A ดังภาพประกอบ 65 ซึ่งเรียกว่าจุดเปลี่ยน (transition point) และค่า  $L_e/k = 115$  ดังกล่าวมาแล้วก็คือค่าประมาณที่จุด A นี้ เพราะฉะนั้น สำหรับวัสดุอื่นๆ ที่มีค่า E แตกต่างกันไปอีกมาก ก็อาจจะหาจุดเปลี่ยนเพื่อเลือกใช้สูตรที่ถูกต้องได้ โดยการให้ความลาด (slope) ของกราฟที่ได้จากสมการที่ (54) และสมการที่ (55) เท่ากัน คือ



ภาพประกอบ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเพียว  
จากสูตรของออยเลอร์และจอร์นสัน

$$\left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{\text{ออยเลอร์}} = \left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{\text{จอร์นสัน}}$$

ซึ่งจะได้จุดเปลี่ยนคือ

$$\frac{L_e}{k} = \frac{\sqrt{2\pi^2 E}}{\sigma_y} \quad (56)$$

สำหรับสูตรของเสาอื่นๆ ที่มีอยู่ แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบเครื่องกลก็คือ สูตรเส้นตรงและสูตรซีแคนต์ (secant formula) จะไม่กล่าวในที่นี้ ผู้อ่านที่สนใจจะหาจุดได้จากหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไปสมการที่ (55) และสมการที่ (56) อาจจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_c = \alpha \frac{F}{A} \quad (57)$$

โดยที่

$$\alpha = \frac{\sigma_y (L_e/k)_2}{\pi^2 E} \text{ สำหรับสูตรของออยเลอร์}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)_2}{4\pi^2 E}} \text{ สำหรับสูตรของจอร์นสัน}$$

ค่า  $\sigma_e$  นี้เรียกว่า ความเค้นสมมูล (equivalent stress) ซึ่งได้มาจากการให้

$$N = \frac{F_c}{F} = \frac{\sigma_y}{\sigma_e}$$

และเป็นการบอกถึงความปลอดภัยอีกวิธีหนึ่งว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงดึงครากเท่าไร

### 3.9 คาน

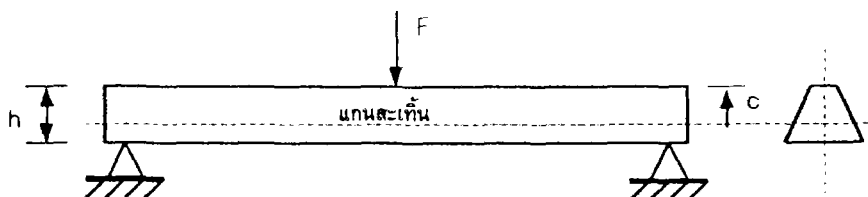
ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากรับแรงในแนวตั้งลักษณะเช่นเดียวกับคานทั่วไป ฉะนั้นจึงใช้ความเค้นดัด (bending stress) และการยุบตัว (deflection) เป็นข้อจำกัดในการออกแบบ ความเค้นดัดสูงสุดเกิดที่ผิวนอกสุดของคาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด (bending moment) มีค่าสูงสุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \quad (58)$$

โดยที่  $M$  คือ โมเมนต์ดัด

$c$  คือ ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปยังผิวนอกสุดดังในภาพประกอบ 66

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่



ภาพประกอบ 66 คานและแกนสะเทิน

สำหรับค่า  $I$  ของหน้าตัดบางชนิด ส่วนค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและการยุบตัวของคาน ถึงแม้ว่าจะมีตารางทั้งสองนี้ช่วยในการคำนวณ แต่ผู้อ่านก็ต้องเข้าใจถึงวิธีการหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและการยุบตัวของคานจากกลศาสตร์วัสดุเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพราะลักษณะของแรง

และชนิดของคานาอาจจะไม่ตรงกับในตารางซึ่งแสดงไว้อย่างจำกัดก็ได้ โดยทั่วไปแล้วความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานาจะมีค่าน้อยมาก จนกระทั่งไม่ต้องนำมาคิดในการออกแบบได้ แต่ถ้าคานาสั้นและมีหน้าตัดสูงมาก ความเค้นเฉือนก็อาจจะมีค่ามากได้ สำหรับคานาที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดที่แกนสะเทิน และมีค่า 1.5 เท่าของความเค้นเฉือนเฉลี่ยหรือเท่ากับ

$$l = \frac{3V}{2A} \quad (59)$$

สำหรับหน้าตัดกลม

$$l = \frac{4V}{3A} \quad (60)$$

โดยที่  $V$  คือ แรงเฉือนสูงสุด  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด

### 3.10 ภาวะความคืบหน้า

ภาวะคืบหน้าบาง หมายถึงภาวะที่ความหนาของผนังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง ถ้าให้  $t$  เป็นความหนา และ  $R$  เป็นรัศมีความโค้ง ถ้า  $R/t$  มีค่ามากกว่า 10 ก็อาจจะจัดได้ว่าเป็นภาวะคืบหน้าบางสำหรับภาวะคืบหน้าบางทรงกลมซึ่งภายในบรรจุก๊าซความดัน  $p$  ความเค้นที่เกิดขึ้นในผนังตามทฤษฎีของภาวะคืบหน้าบางมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad (61)$$

ส่วนภาวะคืบหน้าบางทรงกระบอกกลม ความเค้นสูงสุดจะเกิดในแนวความโค้งเรียกว่า ความเค้นรัศ (hoop stress) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (circumferential stress) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$\sigma_h = \frac{pR}{t} \quad (62)$$

ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของทรงกระบอก เรียกว่า ความเค้นในแนวแกน (longitudinal stress) มีค่าน้อยกว่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงครึ่งหนึ่ง นั่นคือ

$$\sigma_l = \frac{pR}{2t} \quad (63)$$

โดยปกติแล้วทำการภาวะความคืบหน้าส่วนมากจะมีตะเข็บหรือรอยต่อ ซึ่งบริเวณตะเข็บจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณเนื้อผนัง เพราะฉะนั้นความหนาของผนังที่คำนวณได้จากสมการที่ ( 62 ) หรือสมการที่ ( 63 ) จึงไม่ได้ความปลอดภัยเท่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงควรใช้ความหนาของผนังที่คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

สำหรับภาชนะผนังบางกลม

$$t = \frac{pR}{2\eta\sigma} \quad (64)$$

สำหรับภาชนะผนังบางทรงกระบอก

$$t = \frac{pR}{\eta\sigma} \quad (65)$$

โดยที่  $\eta$  คือประสิทธิภาพของตะเข็บหรือรอยต่อ

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบภาชนะความดันจะต้องทำตามเกณฑ์ของภาชนะความดัน เช่น ของสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความปลอดภัยและภาชนะความดันที่ได้มาตรฐานเพียงพอ รายละเอียดการออกแบบตามเกณฑ์นี้จะได้กล่าวถึงภายหลัง (วรินทร์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2534 : 21-24)

### 3.11 การจัดยึดชิ้นงาน

หน้าที่ของแม่แบบนอกจากจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่ง ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวจับยึดชิ้นงานด้วย ตัวจับยึดชิ้นงานจะต้องมีความแข็งแรงมากพอเพื่อให้งานได้ตำแหน่งขณะมีการตัดเฉือนโดยทั่วไปจะพิจารณาถึงตำแหน่งที่แรงจับยึดกระทำต่อชิ้นงานรวมถึงทิศทางและความโต พร้อมกันนั้นต้องคำนึงถึง

3.11.1 รูปร่างและชนิดของชิ้นส่วนกำหนดตำแหน่งและชิ้นส่วนตั้งยัน

3.11.2 ชนิดของงาน

3.11.3 ความโตและทิศทางแรงตัดที่เกิดขึ้น

3.11.4 รูปร่างและการเกร็งตัวของชิ้นงาน

3.11.5 ความเที่ยงตรงที่ต้องการ

3.11.6 การป้องกันอุบัติเหตุ

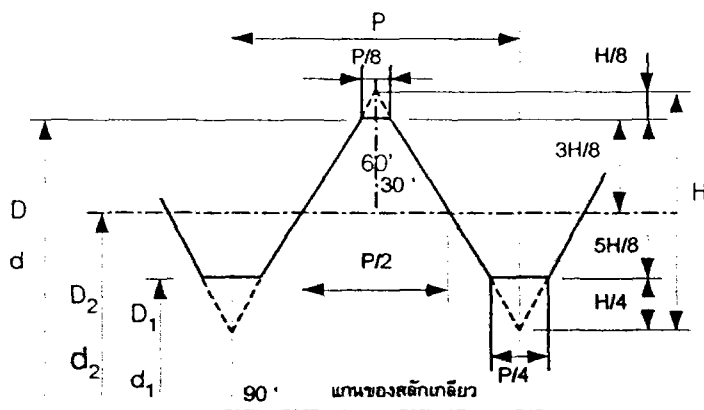
ชิ้นส่วนจับงานต้องสามารถถ่ายแรงให้แก่ชิ้นงานด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุด ชิ้นส่วนกำหนดตำแหน่งและชิ้นส่วนจับงานของแม่แบบจับงานต้องมีความเกร็งตัวมากพอ เพื่อเมื่อจับงานจะมีการหนีตัวหรือเปลี่ยนรูปแรงที่ใช้จับชิ้นงานจะถูกกำหนดด้วยความแข็งแรงและความเกร็งตัวของชิ้นงาน แรงที่ใช้จับชิ้นงานจะเฉลี่ยไว้บนตำแหน่งจับงานต่างๆ ชิ้นส่วนแม่แบบไม่ควรขัดขวางการตัดเฉือนชิ้นงาน แม่แบบจับงานควรออกแบบสร้างง่ายใช้เวลาจับงานน้อย รูปแบบการจับงานสามารถจำแนกได้สองลักษณะได้สองลักษณะคือ การจับแบบตายตัวด้วยแรงกล้ามเนื้อมนุษย์และการจับแบบหุ่นตัว(ดำรง ไชยธีรานุวัณศิริ. 2537 : 186- 187)

### 3.12 การยึดด้วยสลักเกลียว

เครื่องจักรกลประกอบด้วยชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากที่ยึดอยู่ด้วยกัน วิธีการยึดชิ้นส่วนมีด้วยกันหลายวิธีแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลบางชิ้นต้องการความสะดวกในการถอด

ประกอบโดยที่ชิ้นส่วนต้องไม่เกิดการเสียหายได้แก่ งานประเภทจับยึด ปรับแต่ง ตรวจสอบ ซ่อมแซม เปลี่ยนชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์หรือประกอบเป็นต้น งานลักษณะนี้นิยมใช้สลักเกลียวบางครั้งยังอาจใช้สลักเกลียวในการปรับอย่างละเอียดของมาตรวัดต่างๆ ด้วยการยึดด้วยสลักเกลียวมีความไวใจได้มากในการใช้งาน สะดวกในการถอดหรือประกอบ และใช้ได้กับงานชนิดต่างๆ นอกจากนั้นยังมีราคาถูก หามาใช้ได้ง่ายเนื่องจากมีขนาดเป็นมาตรฐานและมีกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง แต่สลักเกลียวมีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่งคือ จะมีความเค้นหนาแน่นมากที่บริเวณยอดเกลียวและโคนเกลียวซึ่งเป็นจุดอ่อนเมื่อใช้งานภายใต้แรงที่เปลี่ยนแปลง การเลือกวิธีการยึดและตำแหน่งยึดมีความสำคัญมาก การยึดจะต้องมีให้อุปกรณ์ยึดอยู่ภายใต้แรงตึง แต่ควรให้อยู่ภายใต้แรงดึงและแรงเฉือนหรือถ้าจำเป็นก็ให้อยู่ภายใต้แรงตึงก็จะต้องพยายามให้มีแรงตึงกระทำน้อยที่สุด โดยใช้อุปกรณ์อย่างอื่นมาช่วย

3.12.1 ระบบของเกลียวเพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนชิ้นส่วนของรอยต่อด้วยสลักเกลียว องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) จึงได้กำหนดมาตรฐานของสลักเกลียวเป็นหน่วยระหว่างประเทศขึ้น ลักษณะเกลียวสำหรับใช้งานทั่วไปตามมาตรฐานระหว่างประเทศ ISO/R 68-1969 (E) มีแบบรากฐานของเกลียวดังภาพประกอบ 67



ภาพประกอบ 67 แบบรากฐานของเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ (  $D, d$  ) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตที่สุดของเกลียว การบอกขนาดเกลียวมักจะบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เป็นขนาดระบุ (normal size) ของเกลียว สัญลักษณ์ที่ใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่หมายถึงขนาดของเกลียวใน อักษรตัวพิมพ์เล็กหมายถึงขนาดของเกลียวนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ของเกลียว (  $D_2, d_2$  ) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กับเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย (  $D_1, d_1$  ) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดของเกลียว หรืออาจเรียกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางโคนเกลียว

ระยะพิทช์ (  $P$  ) เป็นระยะที่วัดตามแนวแกนของเกลียวจากจุดจุดหนึ่งบนเกลียวหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่สมนัยกันบนอีกเกลียวหนึ่ง

ความสูงของสามเหลี่ยมมูลฐาน (  $H$  ) เป็นระยะที่วัดตั้งฉากกับแกนของเกลียวจากโคนเกลียวถึงยอดเกลียว ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสามเหลี่ยมมูลฐานกับระยะพิทช์คือ

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = 0.866025404P$$

$$5/8 H = 0.541265877 P$$

$$3/8 H = 0.324759526 P$$

$$H/4 = 0.216506351 P$$

$$H/8 = 0.108253175 P$$

ค่าต่างๆเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญพื้นฐานในการกำหนดขนาด และสัดส่วนของเกลียว

3.12.2 การให้ชื่อ การบอกขนาดเกลียวตามแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ บอกโดยใช้อักษรย่อแทนชนิดของเกลียวตามด้วยขนาดระบุเป็น mm. ตามด้วยระยะพิทช์เป็น mm. โดยมีเครื่องหมาย x คั่นอยู่ ในกรณีที่เกลียวแบบธรรมดาไม่ต้องแสดงระยะพิทช์ เช่นเกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ แบบเกลียวธรรมดา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 16 mm. (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่) เรียกว่า M16 และเกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศแบบเกลียวละเอียด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 20 mm. ระยะพิทช์ 2 mm. เรียกว่า M 20 X 2 นอกจากนี้ยังมีการบอกลักษณะเกลียวที่เป็นพิเศษอีก เช่นถ้าเป็นเกลียวซ้ายจะบอกเป็น M30 – LH (LH = Left Hand เป็นชื่อย่อมาตรฐานของเกลียวซ้าย) องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศได้กำหนดมาตรฐานของเกลียว สำหรับใช้งานทั่วไปไปขอมาตรฐานระหว่างประเทศ ISO/R 261-1969 (E) ดังแสดงในตาราง 15 และตาราง 16 โดยมีคำแนะนำว่า

3.12.2.1 ควรเลือกใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุในช่องที่ 1 ก่อน ถ้ามีความจำเป็นมากจึงเลือกใช้ช่องที่ 2

3.12.2.2 คำว่า "หยาบ" และ "ละเอียด" ที่กำหนดไว้มิได้หมายความว่าถึงคุณภาพของการผลิต แต่หมายถึงระยะพิทช์ของเกลียว

3.12.2.3 พยายามหลีกเลี่ยงขนาดที่อยู่ในวงเล็บ  
(วรินทร์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2534 : 148-153)

ตาราง 15 เกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ |           | ระยะพิตช์<br>P | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์<br>$d_2, D_2$ | ขนาดผ่าศูนย์กลางน้อย |        | พื้นที่รับความ<br>เค้น (AS)<br>$\text{mm}^2$ |
|--------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------------|----------------------|--------|----------------------------------------------|
| ช่องที่ 1                | ช่องที่ 2 |                |                                         | $d_2$                | $D_2$  |                                              |
| 1.00                     |           | 0.25           | 0.838                                   | 0.639                | 0.729  | 0.456                                        |
| 1.20                     |           | 0.25           | 1.038                                   | 0.893                | 0.929  | 0.730                                        |
| 1.60                     |           | 0.35           | 1.373                                   | 1.170                | 1.221  | 1.720                                        |
| 2.00                     |           | 0.40           | 1.740                                   | 1.509                | 1.567  | 2.070                                        |
| 2.50                     |           | 0.45           | 2.208                                   | 1.948                | 2.013  | 3.390                                        |
| 3.00                     |           | 0.50           | 2.675                                   | 2.367                | 2.459  | 5.020                                        |
| 4.00                     | 3.50      | 0.60           | 3.110                                   | 2.764                | 2.850  | 6.780                                        |
|                          |           | 0.70           | 3.645                                   | 3.141                | 3.242  | 8.780                                        |
|                          | 4.50      | 0.75           | 4.013                                   | 3.580                | 3.688  | 11.300                                       |
| 5.00                     |           | 0.80           | 4.480                                   | 4.019                | 4.134  | 14.200                                       |
| 6.00                     |           | 1.00           | 5.350                                   | 4.773                | 4.917  | 20.100                                       |
| 8.00                     |           | 1.25           | 7.183                                   | 6.466                | 6.647  | 36.600                                       |
| 10.00                    | ( 9 )     | 1.25           | 8.188                                   | 7.466                | 7.647  | 48.100                                       |
|                          |           | 1.50           | 9.026                                   | 8.160                | 8.376  | 58.000                                       |
|                          | ( 11 )    | 1.50           | 10.026                                  | 9.160                | 9.376  | 72.300                                       |
| 12.00                    |           | 1.75           | 10.863                                  | 9.853                | 10.106 | 84.300                                       |
| 16.00                    | 14.00     | 2.00           | 12.701                                  | 11.546               | 11.835 | 115.000                                      |
|                          |           | 2.00           | 14.701                                  | 13.546               | 13.835 | 157.000                                      |
| 20.00                    | 18.00     | 2.50           | 16.376                                  | 14.933               | 15.924 | 192.000                                      |
|                          |           | 2.50           | 18.376                                  | 16.933               | 17.924 | 245.000                                      |
|                          | 22.00     | 2.50           | 20.376                                  | 18.933               | 19.924 | 303.000                                      |
| 24.00                    |           | 3.00           | 22.051                                  | 20.319               | 20.752 | 353.000                                      |
| 30.00                    | 27.00     | 3.00           | 25.051                                  | 23.319               | 23.752 | 459.000                                      |
|                          |           | 3.50           | 27.727                                  | 25.706               | 26.211 | 561.000                                      |
| 36.00                    | 33.00     | 3.50           | 30.727                                  | 28.706               | 29.211 | 694.000                                      |
|                          |           | 4.00           | 33.402                                  | 31.093               | 31.670 | 817.000                                      |
|                          | 39.00     | 4.00           | 36.402                                  | 34.093               | 34.670 | 976.000                                      |
| 42.00                    |           | 4.50           | 39.077                                  | 36.479               | 37.129 | 1120.000                                     |
| 48.00                    | 45.00     | 4.50           | 42.077                                  | 39.479               | 40.129 | 1300.000                                     |
|                          |           | 5.00           | 44.752                                  | 41.866               | 42.587 | 1470.000                                     |
| 56.00                    | 52.00     | 5.00           | 48.752                                  | 45.866               | 46.587 | 1760.000                                     |
|                          |           | 5.00           | 52.428                                  | 49.252               | 50.046 | 2030.000                                     |
|                          | 60.00     | 5.50           | 56.428                                  | 53.252               | 54.046 | 2360.000                                     |
| 64.00                    |           | 6.00           | 60.103                                  | 56.639               | 57.505 | 2680.000                                     |
|                          | 68.00     | 6.00           | 64.103                                  | 60.639               | 61.505 | 3060.000                                     |

ที่มา : วรินทร์ อิงภากรณ์ และชาญ ทัศนังงาน. 2534 ออกแบบเครื่องกล เล่ม 1

ตาราง 16 เกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ - เกลียวละเอียด

| สัญลักษณ์ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>ระบุ x ระยะพิทช์ P) | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>พิทช์ $d_2$ | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>นอຍ $d_1$ | พื้นที่รับความเค้น<br>( $A_s$ ) $\text{mm}^2$ |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| M 8 X 1                                                | 7.35                                | 6.773                             | 39.2                                          |
| M 10 X 1                                               | 9.35                                | 8.773                             | 64.5                                          |
| M 12 X 1                                               | 11.35                               | 10.773                            | 96.1                                          |
| M 16 X 1                                               | 15.35                               | 14.773                            | 178.0                                         |
| M 20 X 1                                               | 19.35                               | 18.773                            | 285.0                                         |
| M 24 X 1                                               | 23.35                               | 22.773                            | 418.0                                         |
| M 30 X 1                                               | 29.35                               | 28.773                            | 663.0                                         |
| M 12 X 1.25                                            | 11.026                              | 10.16                             | 88.1                                          |
| M 16 X 1.5                                             | 15.026                              | 14.016                            | 167.0                                         |
| M 20 X 1.5                                             | 19.026                              | 18.16                             | 272.0                                         |
| M 20 X 1.5                                             | 23.026                              | 22.16                             | 401.0                                         |
| M 30 X 1.5                                             | 29.026                              | 28.16                             | 642.0                                         |
| M 36 X 1.5                                             | 35.026                              | 34.16                             | 940.0                                         |
| M 42 X 1.5                                             | 41.026                              | 40.16                             | 1290.0                                        |
| M 48 X 1.5                                             | 47.026                              | 46.16                             | 1710.0                                        |
| M 56 X 1.5                                             | 55.026                              | 54.16                             | 2340.0                                        |
| M 64 X 1.5                                             | 63.026                              | 62.16                             | 3080.0                                        |
| M 72 X 1.5                                             | 71.026                              | 70.16                             | 3910.0                                        |
| M 80 X 1.5                                             | 79.026                              | 78.16                             | 4850.0                                        |
| M 20 X 2                                               | 18.701                              | 17.546                            | 258.0                                         |
| M 24 X 2                                               | 22.701                              | 21.546                            | 384.0                                         |
| M 30 X 2                                               | 28.701                              | 27.546                            | 621.0                                         |
| M 36 X 2                                               | 34.701                              | 33.546                            | 915.0                                         |
| M 42 X 2                                               | 40.701                              | 39.546                            | 1260.0                                        |
| M 48 X 2                                               | 46.701                              | 45.546                            | 1670.0                                        |
| M 56 X 2                                               | 54.701                              | 53.546                            | 2300.0                                        |
| M 64 X 2                                               | 62.701                              | 61.546                            | 3030.0                                        |
| M 72 X 2                                               | 70.701                              | 69.546                            | 3860.0                                        |
| M 80 X 2                                               | 78.701                              | 77.546                            | 4790.0                                        |
| M 90 X 2                                               | 88.701                              | 87.546                            | 6100.0                                        |
| M 100 X 2                                              | 98.701                              | 97.546                            | 7560.0                                        |
| M 110 X 2                                              | 108.701                             | 107.546                           | 9180.0                                        |
| M 125 X 2                                              | 123.701                             | 122.546                           | 11900.0                                       |
| M 30 X 3                                               | 28.051                              | 26.319                            | 581.0                                         |
| M 36 X 3                                               | 34.051                              | 32.319                            | 865.0                                         |
| M 42 X 3                                               | 40.051                              | 38.319                            | 1210.0                                        |

ที่มา : วรินทร์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2534 ออกแบบเครื่องกล เล่ม 1

ตาราง 16 (ต่อ)

| สัญลักษณ์ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>ระบุ x ระยะพิทช์ P) | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>พิทช์ $d_2$ | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>นอຍ $d_1$ | พื้นที่รับความเค้น<br>( $A_s$ ) $\text{mm}^2$ |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| M 48 X 3                                               | 46.051                              | 44.319                            | 1600.0                                        |
| M 56 X 3                                               | 54.051                              | 52.319                            | 2220.0                                        |
| M 64 X 3                                               | 62.051                              | 60.319                            | 2940.0                                        |
| M 72 X 3                                               | 70.051                              | 68.319                            | 3760.0                                        |
| M 80 X 3                                               | 78.051                              | 76.319                            | 4680.0                                        |
| M 100 X 3                                              | 98.051                              | 96.319                            | 7420.0                                        |
| M 125 X 3                                              | 123.051                             | 121.319                           | 11700.0                                       |
| M 140 X 3                                              | 138.051                             | 136.319                           | 14800.0                                       |
| M 160 X 3                                              | 158.051                             | 156.319                           | 19400.0                                       |
| M 42 X 4                                               | 39.402                              | 37.093                            | 1150.0                                        |
| M 48 X 4                                               | 45.402                              | 43.093                            | 1540.0                                        |
| M 56 X 4                                               | 53.402                              | 51.093                            | 2140.0                                        |
| M 64 X 4                                               | 61.402                              | 59.093                            | 2850.0                                        |
| M 72 X 4                                               | 69.402                              | 67.093                            | 3560.0                                        |
| M 80 X 4                                               | 77.402                              | 75.093                            | 4570.0                                        |
| M 90 X 4                                               | 87.402                              | 85.093                            | 5840.0                                        |
| M 100 X 4                                              | 97.402                              | 95.093                            | 7280.0                                        |
| M 125 X 4                                              | 122.402                             | 120.093                           | 11500.0                                       |
| M 140 X 4                                              | 137.402                             | 135.093                           | 14600.0                                       |
| M 160 X 4                                              | 157.402                             | 155.093                           | 19200.0                                       |
| M 180 X 4                                              | 177.402                             | 175.093                           | 24400.0                                       |
| M 72 X 6                                               | 68.103                              | 64.639                            | 3460.0                                        |
| M 80 X 6                                               | 76.103                              | 72.639                            | 4340.0                                        |
| M 90 X 6                                               | 86.103                              | 82.639                            | 5590.0                                        |
| M 100 X 6                                              | 96.103                              | 92.639                            | 7000.0                                        |
| M 110 X 6                                              | 106.103                             | 102.639                           | 8560.0                                        |
| M 125 X 6                                              | 121.103                             | 117.639                           | 12200.0                                       |
| M 140 X 6                                              | 136.103                             | 132.639                           | 14200.0                                       |
| M 160 X 6                                              | 156.103                             | 152.639                           | 18700.0                                       |
| M 180 X 6                                              | 176.103                             | 172.639                           | 23900.0                                       |

ที่มา : วรินทร์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2534 ออกแบบเครื่องกล เล่ม 1

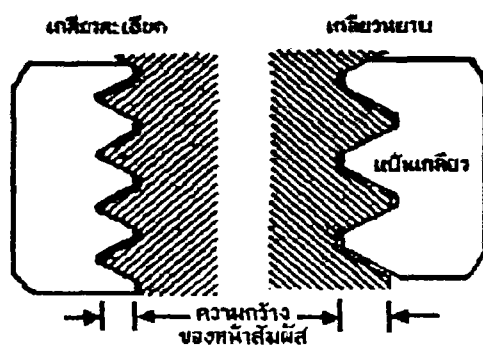
3.12.3 สลักเกลียว (Bolt) และแป้นเกลียว (Nut) เป็นเครื่องยึดทางกลที่ถูกใช้กันอย่างเคยชินจนบางครั้งผู้ใช้ลืมนึกไปว่าสลักเกลียวและแป้นเกลียวเป็นชิ้นส่วนในงานวิศวกรรมที่มีความสำคัญมากชิ้นหนึ่งที่จะต้องเลือกใช้ด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้เกิดผลทางการยึดที่เหมาะสมโดยเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

3.12.3.1 การเลือกใช้สลักเกลียว สลักเกลียวชนิดความแข็งแรง (ISO เกรด 8.8 หรือ SAE เกรด 5 สลักเกลียวชนิดมาตรฐาน (ISO) เกรด 5 สลักเกลียว ชนิดมาตรฐาน ISO หรือ SAE เกรด 2

จะมีน้ำหนักและรูปเหมือนกันทุกประการเพราะทำจากเครื่องเดียวกัน จะแตกต่างกันก็ตรงแรงยึดที่ได้ตัวสลักเกลียวและราคาของสลักเกลียว สลักเกลียวที่มีความแข็งแรงสูงปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าสูงกว่าสลักชนิดมาตรฐานและต้องผ่านกรรมวิธีความร้อน ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นทำให้ราคาสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงการพิจารณาเลือกใช้สลักใช้สลักควรพิจารณาความแข็งแรงที่ได้จากการสลักเกลียวกับต้นทุนที่จะต้องเสียไปเป็นต้นว่าถ้าเลือกสลักเกลียวที่มีความแข็งแรงสูง แม้ว่าจะแพงกว่าแต่ก็ใช้จำนวนน้อยกว่ากรณีเช่น การใช้สลักเกลียวชนิดความแข็งแรงสูงจะประหยัดกว่าได้ นอกจากสลักเกลียว ISO เกรด หรือ SAE เกรด 5 แล้วยังมีสลักเกลียวความแข็งแรงสูงกว่านี้อีก สลักเกลียวชนิดทำจากเหล็กกล้าผสมและต้องอบชุบอย่างไรก็ตามราคาของสลักเกลียวชนิดความแข็งแรงสูง ๆ นี้ก็สูงตามไปด้วย และมักเป็นการสิ้นเปลือง โดยใช้เหตุ

สรุปได้ว่า การเลือกใช้ชนิดของสลักเกลียวน่าจะต้องพิจารณา เรื่องรายจ่ายต่อหน่วยแรงยึดที่ได้ด้วย ยกเว้นในกรณี ที่หลีกเลี่ยงได้ต้องใช้สลักเกลียวมากตัวในการประกอบชิ้นงาน กรณีอย่างนี้ก็ควรเลือกสลักเกลียวราคาต่อตัวถูกที่สุดเป็นหลักจะเห็นว่าเมื่อต้องการแรงยึด หากใช้สลักเกลียว SAE เกรด 5 ก็ใช้สลักเกลียวขนาด 5 นิ้ว แต่ถ้าเลือก ใช้สลักเกลียว SAE เกรด 2 ก็ต้องใช้สลักเกลียวขนาด 3 นิ้ว ซึ่งมีขนาดโตกว่าน้ำหนักมากกว่าทำให้การใช้สลักเกลียวเกรด 2 แพงกว่า โดยปริยาย

3.12.3.2 การเลือกขนาดของเกลียว รูปร่างของเกลียวนับว่ามีความสำคัญมากที่สุด เพราะจะต้องขบกัน (ระหว่างสลักเกลียวและแป้นเกลียว) อย่างพอดี เพื่อที่จะเกิดแรงยึดอย่างพอเหมาะไม่ลื่นไถลหรือรูด ภาควัดขวางของเกลียวนั้นลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมตัดปลายมีเส้นเกลียวของสลักเกลียวและแป้นเกลียวสัมผัสกันคอยรับแรงดึงดังนั้นพื้นที่ของหน้าสัมผัสจึงเป็นส่วนสำคัญมาก ยังมีพื้นที่สัมผัสมากก็จะมีแรงยึดที่มั่นคงมาก เพราะปกติเกลียวของแป้นเกลียวมีแนวโน้มที่จะเย็นหรืออ่อนตัวเมื่อถูกขันให้ตึง จากภาพประกอบ 68 จะเห็นว่าเกลียวหยาบมีพื้นที่หน้าสัมผัสมากกว่าแบบเกลียวละเอียด ดังนั้นสลักเกลียวหยาบจึงให้ความมั่นคงได้ดีกว่าชนิดเกลียวละเอียดเพราะความเค้นที่เกิดขึ้นเกลียวหยาบน้อยกว่าความเค้นที่เกิดบนเกลียวละเอียด เกลียวหยาบมีพื้นที่รับแรงมากกว่า



ภาพประกอบ 68 เปรียบเทียบการขบกันระหว่างสลักเกลียวกับแป้นเกลียว  
ชนิดหยาบและชนิดละเอียด

3.12.3.3 จำนวนเกลียวในแป้นเกลียว เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ถ้าจะคลี่เกลียวออกไปจะเห็นว่า เป็นรูปพื้นเอียงเป็นส่วนสัมผัสของสลักเกลียวและแป้นเกลียวดังนั้นระนาบสัมผัสนี้ยิ่งยาวก็ยิ่งดี จะเห็นว่าเมื่อเกลียว 1 เกลียว เท่านั้น(เกลียวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน) เกลียวหยาบจะมีความหยาบหน้าสัมผัสมากกว่าเกลียวละเอียดในทางปฏิบัติเกลียวหยาบนอกจากจะให้ความแข็งแรงดีแล้ว ยังเสียเวลาในการขันเพียง 2 ใน 3 ของเวลาในการขันเกลียวละเอียด ทำให้ประหยัดเวลามาก นอกจากนี้

เกลียวหยานยังมีโอกาสป็นเกลียว น้อยกว่า อย่างเกลียวละเอียดอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เกลียวละเอียดใช้ว่า จะมีแต่ข้อเสีย ในงานขันละเอียดเกลียวละเอียด ย่อมให้ผลดีกว่า ใช้แรงขันน้อยกว่า และในงานประกอบโครงสร้างที่มีการสั่นสะเทือนเกลียวละเอียดก็คลายเกลียวได้ยากกว่า ส่วน ในเรื่องข้อเสียด้านการรับแรงยึดก็อาจจะแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนเกลียวในแป้น เกลียวให้มากขึ้น เพื่อกระจายแรงยึดแต่ก็ต้องเสียเวลาในการขันเพิ่มขึ้นไปอีก

### 3.13 การออกแบบเพลลา

แม้ว่าจะได้กล่าวถึงทฤษฎีในการออกแบบเพลลามานแล้วในบทความต้นผสม แต่เนื่องจากว่าเพลลาเป็นชิ้นส่วนที่มีใช้อยู่ในเครื่องกลเกือบทุกชนิด ดังนั้นจึงสมควรที่จะได้พิจารณาถึงการออกแบบเพลลาโดยเฉพาะ เพลลาอาจจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานดังต่อไปนี้คือ เพลลา (shaft) เป็นชิ้นส่วนที่หมุนและใช้ในการส่งกำลังแกน (axle) เป็นชิ้นส่วนลักษณะเดียวกันกับเพลลาแต่ไม่หมุน ส่วนมากเป็นตัวยึดรับชิ้นส่วนที่หมุน เช่น ล้อ ล้อสายพาน เป็นต้น อย่างไรก็ตามทั้งเพลลาและแกนก็นิยมเรียกรวมกันว่าเพลลา ไม่ว่าชิ้นส่วนนั้นจะหมุนหรืออยู่นิ่งก็ตามสปินเดิล (spindle) เป็นเพลลาขนาดสั้นที่ไม่หมุน เช่น เพลลาที่หัวแท่นกลึง (Head – stock spindle) เป็นต้น สัตบชาฟต์ (sub shaft) หรือบางครั้งเรียกเฮดชาฟต์ (head shaft) เป็นเพลลาที่ติดเป็นชิ้นส่วนต่อเนื่องกับเครื่องยนต์ มอเตอร์ หรือเครื่องต้นกำลังอีกอื่น ๆ มีขนาด รูปร่าง และส่วนที่ยื่นออกมาสำหรับใช้ต่อกับเพลลาอื่น ๆ แจ็คชาฟต์ (jackshaft) หรือเคาน์เตอร์ชาฟต์ (counter shaft) เป็นเพลลาขนาดสั้นที่ต่อระหว่างเครื่องต้นกำลังกับเพลลาเมนหรือเครื่องจักรกลเพลลาอ่อน (flexible shaft) เป็นเพลลาที่สามารถอ่อนตัวหรือโค้งได้ เพลลาประเภทนี้ทำด้วยสายลวดใหญ่ (cable) ลวดสปริงหรือลวดเกลียว (wire rope) ใช้ในการส่งกำลังในลักษณะที่แกนหมุนทำมุมกันได้ แต่ส่งกำลังได้น้อยเพลลาอาจจะรับแรงดึง แรงกด แรงบิด หรือแรงคด หรือแรงหลายอย่างรวมกันก็ได้ ดังนั้นการคำนวณจึงต้องใช้ความเค้นผสมเข้าช่วยแรงเหล่านี้ยังอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลาทำให้เพลลาเสียหายเพราะความล้าได้ ฉะนั้นจึงต้องออกแบบเพลลาให้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้ นอกจากนั้นเพลลาจะต้องมีความแข็งแรง (rigidity) เพียงพอเพื่อลดมุมบิดภายในเพลลาให้อยู่ในขีดจำกัดที่เหมาะสม ระยะโก่ง (deflection) ของเพลลาเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขนาดเพลลาเช่นเดียวกัน เพราะถ้าเพลลามีระยะโก่งมากก็จะเกิดการแกว่งขณะหมุน ทำให้ความเร็ววิกฤต (critical speed) ของเพลลาลดลง ซึ่งอาจทำให้เพลลาเกิดการสั่นอย่างรุนแรง ในขณะที่ความเร็วของเพลลาเข้าใกล้ความเร็ววิกฤตนี้ได้ ระยะโก่งนี้ยังมีผลต่อการเลือกชนิดของที่รองรับเพลลา เช่น บอลเบริง (ball bearing) ก็ต้องมีการเบี่ยงแนว (misalignment) ในการใช้งานที่เหมาะสมกับเพลลาด้วย

3.13.1 วัสดุเพลลาที่ใช้สำหรับทำเพลลาทั่วไปคือเหล็กกล้าละมุน (mild steel) แต่ถ้าต้องการให้มีความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระตุกเป็นพิเศษแล้วมักจะใช้เหล็กกล้าผสมโลหะอื่นทำเพลลา เช่น AISI 1347 3140 4150 4340 เป็นต้น เพลลาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า 90 mm มักจะกลึงมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผ่านการรีดร้อน อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพลลามีราคาถูกที่สุด ผู้ออกแบบควรพยายามเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาก่อนที่จะเลือกใช้เหล็กกล้าชนิดอื่น

3.13.2 ขนาดของเพลลาเพื่อให้เพลลามีมาตรฐานเหมือนกัน องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ จึงได้กำหนดขนาดมาตรฐานของเพลลาซึ่งเป็นขนาดระบุ (nominal size) ใน ISO/R 775-1969 เอาไว้สำหรับให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ทั้งนี้เพื่อให้สามารถหาซื้อได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของแบบร่างที่ใช้รองรับเพลลาด้วยขนาดระบุของเพลลาได้จากตาราง 15

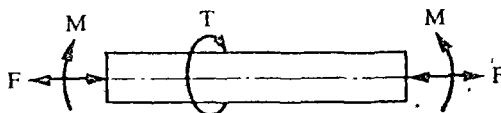
ตาราง 15 ขนาดระบุของเพลตามาตรฐาน ISO/R775-1969

| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น mm |    |     |     |     |
|------------------------------|----|-----|-----|-----|
| 6                            | 25 | 70  | 130 | 240 |
| 7                            | 30 | 75  | 140 | 260 |
| 8                            | 35 | 80  | 150 | 280 |
| 9                            | 40 | 85  | 160 | 300 |
| 10                           | 45 | 90  | 170 | 320 |
| 12                           | 50 | 95  | 180 | 340 |
| 14                           | 55 | 100 | 190 | 360 |
| 18                           | 60 | 110 | 200 | 380 |
| 20                           | 65 | 120 | 220 |     |

3.13.3 การพิจารณาในการออกแบบ การคำนวณหาขนาดของเพลที่พอเหมาะสมควร ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในบางครั้งการหาขนาดเพลเพื่อให้เพลทนต่อแรงที่มากกระทำอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ เช่น ในกรณีของเพลลูกเบี้ยว (cam shaft) ในเครื่องยนต์สันดาปภายในต้องการให้มีตำแหน่งเพียงตรง ดังนั้นมุมบิดของเพลที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ เป็นต้น นั่นคือเพลจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ในพิกัดที่ต้องการ ถ้ามุมบิดมากเกินไปนอกจากจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้วยังอาจจะก่อให้เกิดความสั่นสะเทือน ซึ่งมีผลทำให้เพืองและแบร้งที่รองรับเพลอยู่เกิดความเสียหายได้ง่ายขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานสำหรับพิกัดมุมบิดของเพลไว้ก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วมักจะให้มุมบิดของเพลในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน  $0.3^\circ$  ต่อความยาวเพล 1 m [1] สำหรับเพลส่งกำลังทั่วไปอาจจะให้มีมุมบิดได้ถึง  $1^\circ$  ต่อความยาวเพล 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล ในกรณีของเพลลูกเบี้ยวสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้วจะให้มุมบิดได้ไม่เกิน  $0.5^\circ$  ตลอดความยาวของเพล ความแข็งแรงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความแข็งแรงทางด้านระยะโก่ง เพราะจะต้องใช้ระยะโก่งของเพลที่อยู่ภายใต้แรงภายนอกเป็นตัวสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อสายพาน เพือง โครงของเครื่องจักร ตลอดจนการเลือกชนิดของแบร้งสำหรับรองรับเพลให้เหมาะสม ถ้าเพลมีระยะโก่งมากเกินไปจะทำให้ความยาวของฟันเพืองส่วนที่สัมผัสหรือขบกันลดลงเป็นผลทำให้อัตราส่วนการขบ (contact ratio) ของเพืองลดลงด้วย ทำให้การส่งกำลังของเพืองไม่ราบเรียบเท่าที่ควร การเลือกแบร้งมารองรับเพลก็เช่นกันจำเป็นจะต้องเลือกแบร้งชนิดที่อนุญาตให้มีการเยื้องแนวสำหรับการใช้งานได้พอเหมาะกับระยะโก่งของเพลที่จะเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นแบร้งแบบธรรมดาหรือแบร้งแบบปรับแนวได้เอง (self-aligning bearing) ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าระยะโก่งเป็นสำคัญระยะโก่งดังกล่าวมานี้ก็ไม่มีมาตรฐานกำหนดเป็นแนวทางไว้ โดยทั่วไปแล้วผู้ออกแบบอาจจะถือค่าต่อไปนี้เป็นแนวทางในการกำหนดความแข็งแรงทางด้านระยะโก่งได้ดังนี้คือ สำหรับเพลเครื่องจักรกลทั่วไป ค่าระยะโก่งระหว่างจุดที่รองรับด้วยแบร้งควรจะไม่เกิน 0.08 mm/m [4] สำหรับเพลที่มีเพืองตรง (spur gear) คุณภาพคืออยู่ด้วย ระยะโก่ง ณ ตำแหน่งที่มีเพืองขบกันไม่ควรเกิน 0.125 mm และความลาดเอียงของเพล ณ ตำแหน่งนี้ควรจะไม่เกิน  $0.0286^\circ$  สำหรับเพลที่มีเพืองคอกจอก (bevel gear) คุณภาพดีคืออยู่ ระยะโก่ง ณ ตำแหน่งที่เพืองขบกันไม่ควรเกิน 0.075 mm จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นว่าขนาดของเพลอาจจะหามาได้โดยใช้ความแข็งแรงที่ต้องการแทนที่จะเป็นความแข็งแรงในการรับแรงภายใน

นอกจากนี้ การหาระยะโค้งของเพลามีขนาดเท่ากันตลอดอาจทำได้โดยใช้วิธีที่ได้เรียนรูมาแล้วในวิชากลศาสตร์ เช่น วิธีการอินทิเกรตสองครั้ง (double integration) วิธีพื้นที่ของโมเมนต์ดัด (moment area) เป็นต้น และจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ สำหรับเพลามีขนาดไม่เท่ากันตลอด (stepped shaft) การใช้วิธีดังกล่าวมาแล้วอาจจะลำช้าและเสียเวลา โดยเฉพาะวิธีการอินทิเกรตสองครั้งเพราะต้องใช้สภาพของขอบเขต (boundary condition) ใหม่ทุกครั้งที่เพลามีขนาดเปลี่ยน วิธีที่นิยมใช้กัน (แต่ก็ยังใช้เวลามาก) คือวิธี graphical integration และ numerical integration สำหรับวิธีแรกนี้ผู้อ่านอาจจะหาได้จากเอกสารไม่กล่าวถึงในที่นี้อีกเช่นกัน สำหรับผู้อ่านที่สนใจอาจหาได้จากเอกสารอ่านประกอบหมายเลข 5 หรือ 6 ซึ่งได้แสดงขั้นตอนสำหรับการคำนวณไว้แล้วอย่างละเอียด

3.13.4 การออกแบบเพลตามโค้ดของ ASME ก่อนปี พ.ศ. 2497 ได้มีการยอมรับวิธีการคำนวณหาขนาดของเพลาส่งกำลังซึ่งกำหนดเป็นโค้ด (code) โดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) ถึงแม้ว่าเวลาจะล่วงเลยมานานแล้วก็ตาม วิธีการออกแบบเพลตามโค้ดของ ASME ก็ยังมีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปวิธีการดังกล่าวนี้ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพล ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (static design method) ในการหาสมการสำหรับการออกแบบเพลให้พิจารณาเพลในภาพประกอบที่ 69 ให้เพลเป็นแบบกลมและกลวง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ  $d_i$  และ  $d$  ตามลำดับ ความเค้นต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนเพลามีดังต่อไปนี้คือ



ภาพประกอบ 69 เพลอยู่ภายใต้แรงต่างๆ

ความเค้นดึงหรือกด

$$\sigma_a = \frac{4F}{\pi(d^2 - d_i^2)} \quad (86)$$

ความเค้นดัด

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{32Md}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad (87)$$

ความเค้นเฉือน

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Td}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad (88)$$

ในกรณีที่เป็นแรงกด อาจมีผลจากการโก่งงอ (buckling) ได้ ดังนั้นสมการที่ (86) จะกลายเป็น

$$\sigma_a = \frac{4\alpha F}{\pi(d^2 - d_i^2)} \quad (89)$$

เพลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เป็นวัฏจักร ทั้งนี้เพราะเพลามุนอยู่ตลอดเวลา นอกจากนั้นแรงที่กระทำยังอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้ ดังนั้นเพลาก็เกิดความเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่ สำหรับวิธีการคำนวณของ ASME ใช้วิธีการแบบสถิติศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบความล้า (fatigue factor) มาเกี่ยวข้องด้วย

ถ้าให้  $C_m$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัด  
 $C_t$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

ดังนั้นสมการที่ (87) และสมการที่ (88) จึงกลายเป็น

$$\sigma_b = \frac{32C_m M d}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad (90)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16C_t T d}{\pi(d^4 - d_i^4)} \quad (91)$$

ความเค้นกดหรือความเค้นดึงรวมกันคือ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_b \quad (92)$$

จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau = \left[ \tau_{xy}^2 + \left( \frac{\sigma}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

แทนค่าสมการที่ (89) , (90) , (91) และสมการที่ (92) ลงในสมการข้างบนนี้แล้วจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau (1 - K^4)} \left[ (C_t T)^2 + \frac{[\alpha F d (1 + K^2) + C_m M]^2}{8} \right]^{1/2} \quad (93)$$

โดยที่  $K = d_i / d$

ในกรณีที่ไม่มีแรง  $F$  กระทำอยู่ด้วย สมการที่ (93) จะลดรูปเหลือเพียง

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau (1 - K^4)} [(C_t T)^2 + (C_m M^2)]^{1/2} \quad (94)$$

หรือในกรณีของเพลาค้น  $K = d_i / d = 0$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (95) ก็จะได้สมการที่มีรูปคล้ายกับในหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไปคือ

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau} [(C_t T)^2 + (C_m M^2)]^{1/2} \quad (95)$$

ค่าประกอบความล้าสมัยสามารถเลือกใช้ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ ซึ่งหาได้จากตารางที่ 16

ตาราง 16 ค่าตัวประกอบความล้า

| ชนิดของแรง                   | $C_m$     | $C_t$     |
|------------------------------|-----------|-----------|
| เพลายูนิ่ง :                 |           |           |
| แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ | 1.0       | 1.0       |
| แรงกระตุก                    | 1.5 – 2.0 | 1.5 – 2.0 |
| เพลามุมน :                   |           |           |
| แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ | 1.5       | 1.0       |
| แรงกระตุกอย่างเบา            | 1.5 – 2.0 | 1.0 – 1.5 |
| แรงกระตุกอย่างแรง            | 2.0-3.0   | 1.5 - 3.0 |

สำหรับตัวประกอบของการโก่งงอ ASME ได้แนะนำให้ใช้ค่าดังนี้

$$\alpha = 1 \text{ เมื่อ } F \text{ เป็นแรง} \quad (96)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - 0.0044(L/K)} \quad \text{เมื่อ } L/K \leq 115 \quad (97)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_y (L/K)^2}{\pi 2 n E} \quad \text{เมื่อ } L/K > 115 \quad (98)$$

โดยที่  $n = 1.00$  เมื่อปลายเป็นแบบ SS

$n = 2.25$  เมื่อปลายเป็นแบบ CC

$n = 1.60$  เมื่อปลายเพลาดูกขึ้นเป็นบางส่วน (partially restrained)

$L$  = ความยาวจริงของเพล

จะเห็นว่าสมการที่ (97) เป็นสมการของสูตรเส้นตรง (straight line formula) และสมการที่ (98) เป็นสมการของออยเลอร์ ซึ่งแก้ไขค่าคงที่ใหม่

$$\tau_d = 55 \text{ N/mm}^2 \text{ สำหรับเพลที่ไม่มีร่องลิ้ม}$$

$$\tau_d = 41 \text{ N/mm}^2 \text{ สำหรับเพลที่มีร่องลิ้ม}$$

แต่ถ้ากำหนดวัสดุของเพลที่บอกถึงหมายเลขของโลหะ หรือส่วนผสมของโลหะให้ใช้ค่าความเค้นเฉือนใช้งานสมการที่ (99) โดยเลือกใช้ค่าน้อยมาคำนวณคือ

$$\tau_d = 0.3\sigma_u \quad \text{หรือ} \quad \tau_d = 0.18\sigma_y \quad (99)$$

และถ้าเพลมีร่องลิ้มให้ลดค่าความเค้นเฉือนใช้งานโดยใช้เพียงร้อยละ 75 ของค่าในสมการที่ (99)

3.11.5 ความแข็งแรงทางด้านการบิด สำหรับเพลที่มีขนาดสม่ำเสมอ มุมบิดเป็น rad จะหาค่าได้จากสมการ

$$\theta = TL/GJ \quad (100)$$

สำหรับเพลกลมตัน

$$J = \frac{\pi}{32} d^4$$

ดังนั้นจึงหาค่ามุมบิดเป็นองศาได้จากสมการ

$$\theta = \frac{584TL}{Gd^4} \quad (101)$$

ถ้าเป็นเพลกลมกลวง

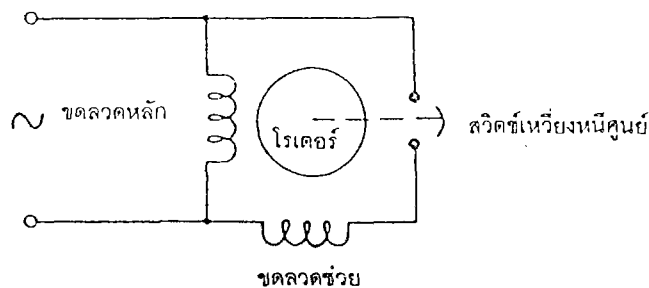
$$\theta = \frac{584TL}{(1-K^4) Gd^4} \quad (102)$$

ฉะนั้นถ้าต้องการให้เพลมีความแข็งแรงตามลักษณะการใช้งานแล้ว ก็ควรที่จะใช้สมการที่ (102) นี้ตรวจสอบมุมบิดให้อยู่ในค่าที่ต้องการ(วิธีที่ อังภากรณและชาญ ถนัดงาน. 2534 : 70-73)

### 3.14 มอเตอร์ไฟฟ้า

ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วไป จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว แต่ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวมีหลายประเภท ในส่วนของงานวิจัยที่จะกล่าวถึงเฉพาะที่นิยมใช้ และนำมาใช้สำหรับงานวิจัยได้ มีรายละเอียดดังนี้

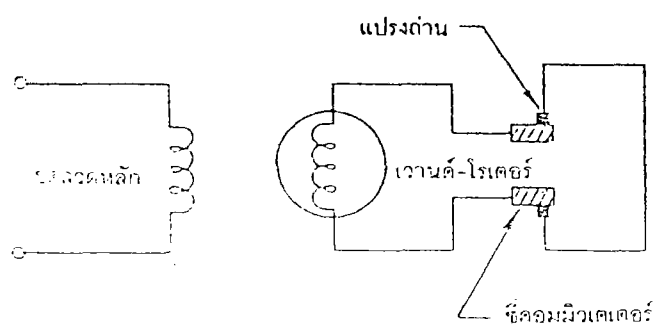
3.14.1 สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split-phase Motors) สัญลักษณ์ย่อ SP เป็นมอเตอร์ที่มีราคาไม่แพง นิยมใช้ งานที่กำลังม้าต่ำกว่า 1 hp กลไกที่ใช้ในการสตาร์ทมอเตอร์นี้ก็คือ ขดลวดช่วย (Auxiliary Winding) ที่ต่อขนาดับขดลวดหลักของสเตเตอร์ (Main Stator Winding)



ภาพประกอบ 70 ผังแสดงขดลวดของสปลิตเฟสมอเตอร์

ขดลวดช่วยจะมีจำนวนรอบน้อยกว่าขดลวดหลัก ด้วยเหตุนี้กระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดก่อนขดลวดหลัก โรเตอร์จะถูกผลักด้วยอำนาจแม่เหล็กของขดลวดช่วย และของขดลวดหลักตามลำดับเพื่อให้เกิดการสตาร์ท (เริ่มหมุน) ของมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์หมุนได้ความเร็วประมาณ  $\frac{1}{4}$  ของความเร็วสูงสุด กระแสไฟฟ้าที่มาเลี้ยงขดลวดช่วยจะถูกตัดออกด้วยสวิตช์เหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Switch) ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนด้วยการกลับขั้วต่อกับขดลวดช่วย

3.14.2 เวานด์โรเตอร์มอเตอร์ (Wound-rotor Motor) มอเตอร์ชนิดนี้เกิดจากการต่อขดลวดเข้ากับวงแหวนคอมมิวเตเตอร์ (Commutator Ring) แปลงถ่านจะถูกต่อให้ลัดวงจรและเลื่อนตำแหน่งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นขดลวดสเตเตอร์ที่สอง (Second Stator Winding)

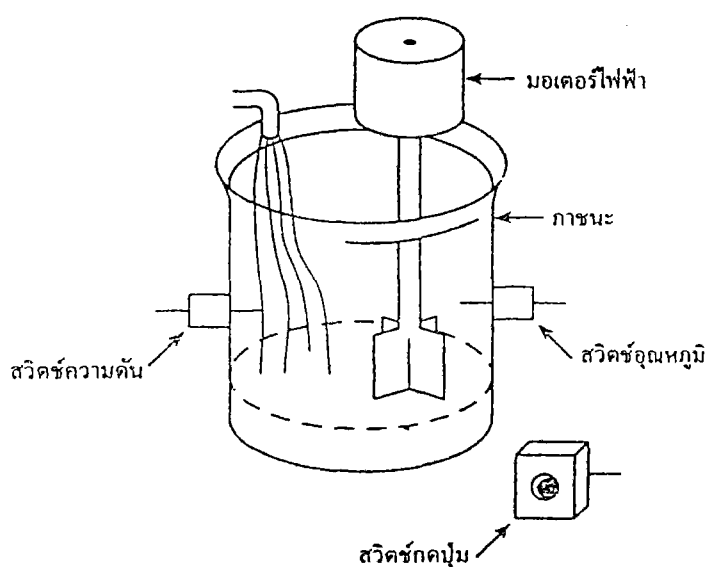


ภาพประกอบ 71 เวานด์โรเตอร์มอเตอร์

กระแสในขดลวดสเตเตอร์จะเหวี่ยงนำกระแสในขดลวดโรเตอร์ อำนาจแม่เหล็กทั้งสองจะตรงกันข้ามกัน ซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์หมุนหรือทอร์ก (Torque) ดังนั้น มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีทอร์กขณะเริ่มหมุนค่อนข้างสูง โดยใช้กระแสในการสตาร์ทต่ำ ข้อเสียก็คือ มีราคาแพงกว่าแบบสปลิตเฟส และต้องการการบำรุงรักษามากกว่า เช่น การสึกหรอของแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์

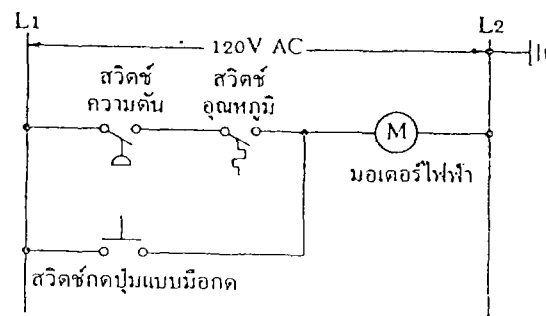
### 3.15 การทำงานของ PROGRAM LOGIC CONTROL (PLC)

เครื่องจักรที่ควบคุมด้วย PLC จะมีความสามารถเขียนโปรแกรมการทำงานของเครื่องจักร และมีความยืดหยุ่นในการเขียนโปรแกรม เช่น การเปลี่ยนแปลงแก้ไขเพิ่มเติมก็สามารถทำได้ซึ่งรวมถึงมีไทมเมอร์ (Timer) เคาน์เตอร์ (Counter) หรือคำสั่งพิเศษต่างๆ เช่น MOV Data และอื่นๆ อีกมากมายเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ โซลินอยด์ (Solenoid) หลอดไฟ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการติดต่อสื่อสารระหว่าง PLC กับคอมพิวเตอร์ เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันหรืออาจจะติดต่อกับจอชนิดสัมผัส (Touch Screen) เพื่ออำนวยความสะดวกต่อสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ยิ่งไปกว่านั้นการติดต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม PLC อีกทีหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ขีดความสามารถในการควบคุมสูงขึ้นอีก และต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงการทำงานของ PLC โดยเริ่มจากตัวอย่างการควบคุมมอเตอร์กวนของเหลวในภาชนะโดยมีเงื่อนไขต่างๆ

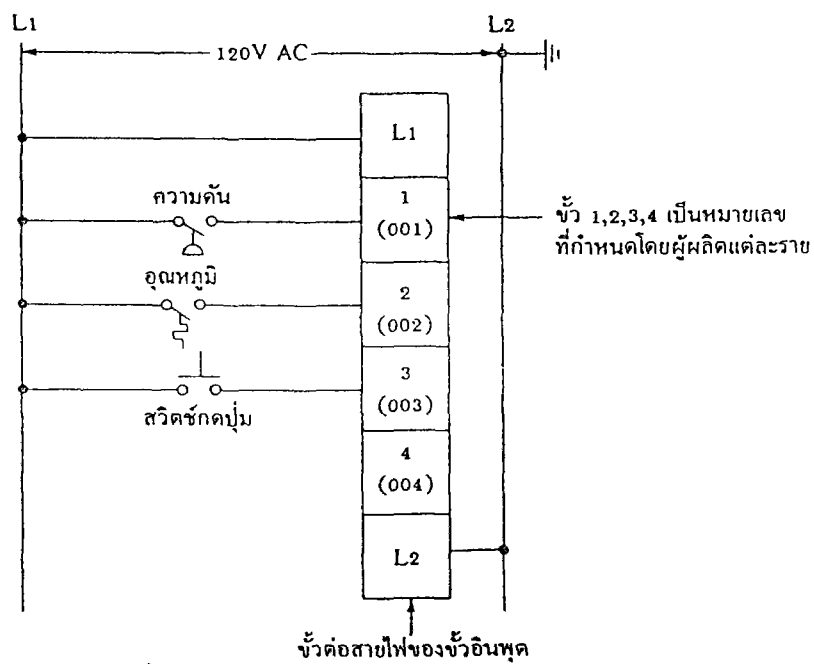


ภาพประกอบ 72 การกวนของเหลว

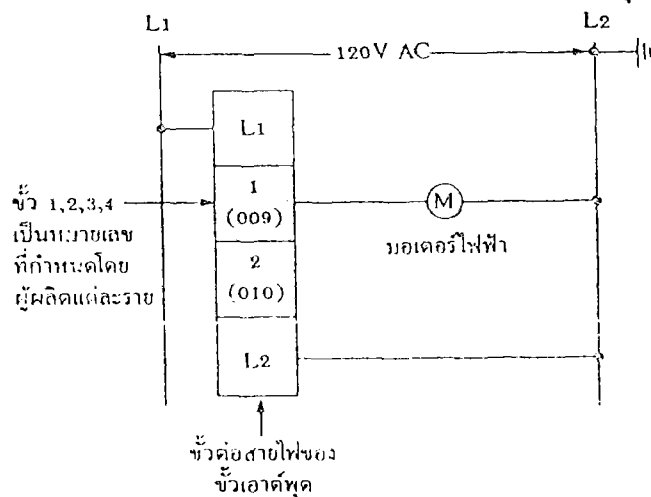
ภาพประกอบ 72 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับกวนของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะ เมื่อมีเงื่อนไขว่า มีอุณหภูมิและความดันถึงค่าที่กำหนดเท่านั้น หรือสามารถให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานด้วยการกดสวิทช์ โดยแยกสวิทช์กดออกมาต่างหาก มอเตอร์ไฟฟ้าจะหมุนได้ก็ต่อเมื่อหน้าคอนแทคของเซนเซอร์อุณหภูมิ และเซนเซอร์ความดันต่อกัน การต่อวงจรทำได้จากการใช้วงจรรีเลย์ (Relay) ภาพประกอบ 73 และการใช้ PLC ตามภาพประกอบ 74 และ 75 ในกรณีของการใช้วงจรรีเลย์นั้น มอเตอร์ (M) ทำงานได้เมื่อสวิทช์ของอุณหภูมิและความดันต่อกันหรือสวิทช์มีอกกดถูกกด แต่ถ้าใช้ PLC ทำงานภาพประกอบ 74 เป็นการต่ออุปกรณ์ด้านอินพุต ซึ่งมีคอนแทคของความดัน คอนแทคของอุณหภูมิ และคอนแทคของสวิทช์กดปุ่มแบบมีอกกด ซึ่งต่อเข้าไปยังขั้วสัญญาณเข้า (Input Module) ส่วนภาพประกอบ 75 เป็นการต่ออุปกรณ์ทำงาน (มอเตอร์ไฟฟ้า) เข้ากับขั้วต่อสัญญาณออก (Output Module)



ภาพประกอบ 73 วงจรการใช้รีเลย์

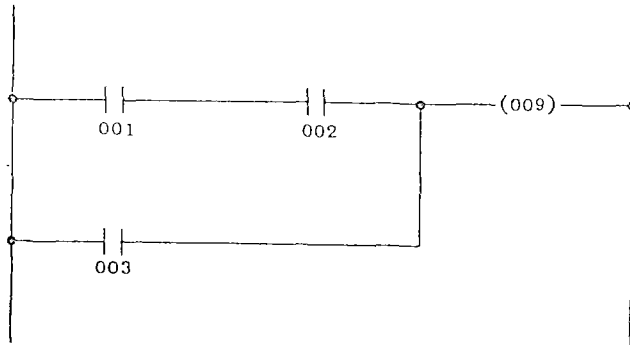


ภาพประกอบ 74 วงจรการใช้ PLC (อินพุต โมดูล)



ภาพประกอบ 75 วงจรการใช้ PLC (เอาต์พุต โมดูล)

การเขียน PLC แลตเตอร์ (PLC Ladder Logic Diagram) เพื่อส่งโปรแกรมเข้าไปยังหน่วยความจำของ CPU ดูได้จากภาพประกอบ 76



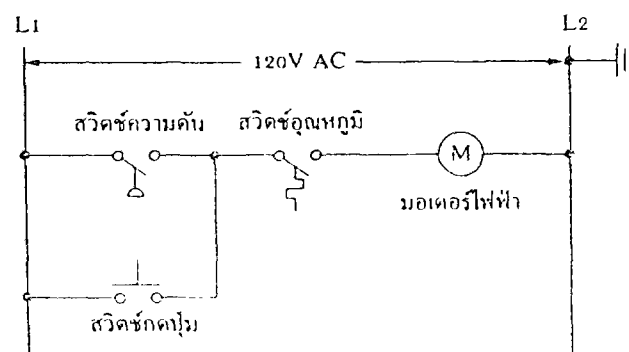
หมายเหตุ : หมายเลข 001, 002, 003 ใช้แทนสวิตช์ความดัน สวิตช์อุณหภูมิ และสวิตช์กดปุ่มตามลำดับ

ภาพประกอบ 76 วงจรแลตเตอร์ (PLC Ladder Logic Diagram)

3.15.1 การทำงานของวงจรแลตเตอร์ เมื่อ PLC อยู่ในสภาวะพร้อมทำงาน (RUN Mode) แล้วเมื่อมีโปรแกรมถูกป้อนเข้าไปยังหน่วยความจำของ CPU ประมวลผลและได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณเอาต์พุตหน้าคอนแทคตามภาพประกอบ 77 ซึ่งเป็นชนิดปกติเปิด (Normally Open) เพราะฉะนั้น ถ้าคอนแทค 001 และ 002 ต่อกัน ก็ทำให้เกิดเอาต์พุต 009 หรือหน้าคอนแทค 003 ต่อกัน ก็ทำให้เกิดเอาต์พุต 009 ได้เช่นกัน ลักษณะนี้เรียกว่า รัง (Rung) คือ มีสัญญาณอินพุตหนึ่งหรือมากกว่าที่ทำให้เกิดเอาต์พุตหนึ่งหรือมากกว่า

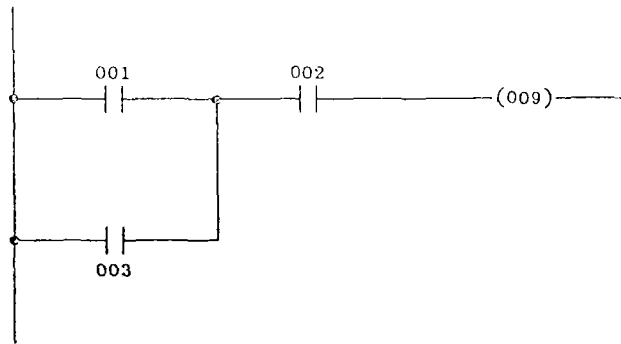
3.15.1.1 หลักการทำงานของ PLC อธิบายตามเหตุการณ์ต่างๆ มีดังต่อไปนี้คือ เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาจะถูกเก็บเป็นความจำไว้ในส่วนของความจำ (หน้าคอนแทคที่ต่อกัน เรียกว่า ลอจิก 1 ส่วนคอนแทคที่ไม่ต่อกัน เรียกว่า ลอจิก 0) หลังจากนั้นแลตเตอร์โคอะแกรมก็จะสรุปผลรวมกับคอนแทคภายในว่าเป็นคอนแทคเปิด (Open) หรือปิด (Close) ขึ้นอยู่กับการบันทึกของหน่วยความจำ ถ้าหากต้องการสัญญาณเอาต์พุต ค่าของลอจิกต้องเป็นเลข 1 ซึ่งหมายถึงชุดหน้าคอนแทคของโมดูล อินเทอร์เฟซ (Module Interface) ต่อกัน แต่ถ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรทำให้ชุดลอจิกความจำของคอยล์ (Coil Memory) มีความเป็นลอจิกเลข 0 และโมดูลอินเทอร์เฟซ (Module Interface) ไม่ต่อกัน การทำงานของ PLC เมื่อครบ 1 รอบของลำดับดังกล่าวนี้เรียกว่า สแกน (Scan) ส่วน Scan Time คือเวลาที่ต้องการสำหรับ 1 รอบการทำงาน ซึ่งเป็นตัววัดค่าความเร็วการทำงานของ PLC 1 สแกน ใช้เวลาประมาณ 1-100 ms ขึ้นอยู่กับความยาวของโปรแกรมและชนิดของอินพุต/เอาต์พุต

3.15.1.2 การปรับปรุงหรือการแก้ไขวงจร



ภาพประกอบ 77 วงจรรีเลย์ที่แก้ไขใหม่

จากที่กล่าวในส่วนของการผสมของเหลวมาแล้วข้างต้นนั้น ถ้าต้องการปรับปรุงวงจรเสียใหม่ตามภาพประกอบ 77 นี้ คือเปลี่ยนแปลงในส่วนของสวิตช์กดปุ่ม (Push Button Switch) ที่สามารถทำงานได้ด้วยความดันใดๆ ก็ได้แต่ต้องมีอุณหภูมิตามค่าที่กำหนดเท่านั้น ทำได้โดยให้สวิตช์กดปุ่มกับสวิตช์ความดันต่อกันแบบขนาน (OR)



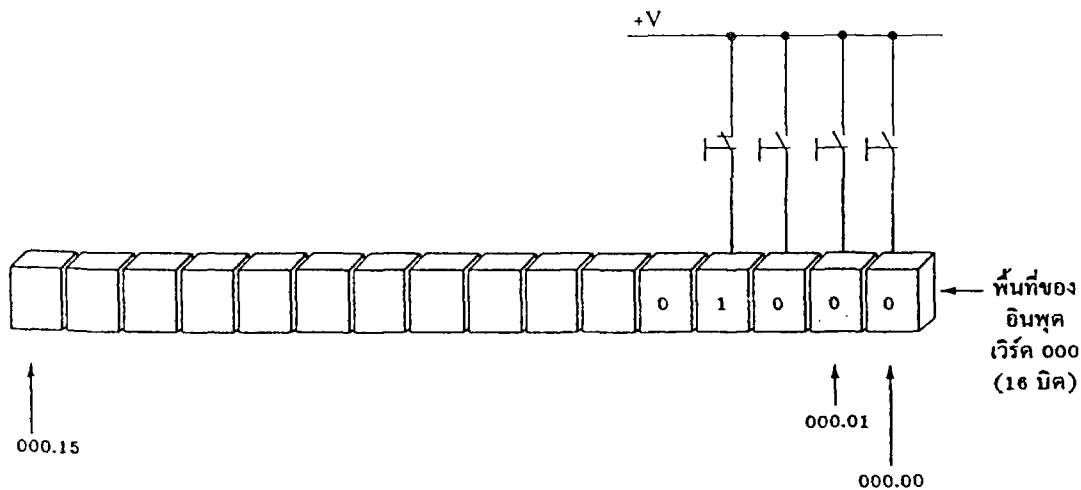
ภาพประกอบ 78 แลadder ลอจิก โค้ดโปรแกรมของ PLC ที่แก้ไขใหม่

เมื่อปรับปรุงแก้ไขวงจรของรีเลย์ก็ต้องเดินสายไฟฟ้าใหม่ แต่ถ้าใช้ PLC เป็นตัวควบคุมนั้น ไม่จำเป็นต้องเดินสายไฟฟ้าที่เข้ากับอุปกรณ์ใหม่ เพียงแต่เขียนแลadder ลอจิก โค้ดโปรแกรมของ PLC ใหม่เท่านั้นตามภาพประกอบ 78

3.15.3 วงจรตรรก (ลอจิก) หลักการทำงานของ PLC ยังใช้วงจรตรรก (ลอจิก) เพื่อให้เกิดสัญญาณเอาต์พุตที่มีเงื่อนไข (สัญญาณอินพุต) ชนิดต่างๆ หลักการของวงจรตรรก มีดังต่อไปนี้วงจรตรรก หมายถึง วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบรีเลย์ที่มีสัญญาณเพียง 2 ระดับ หรือ 2 สถานะเท่านั้น PLC ใช้สัญญาณไฟฟ้า 2 ระดับ แทน 2 เหตุการณ์ที่ต่างกัน เช่น การปิดเปิดวาล์ว การปิดเปิดสวิตช์ เป็นต้น วงจรตรรกมี 2 ชนิด คือ แบบบวก (Positive Logic) แบบลบ (Negative Logic) ลอจิกแบบบวกจะใช้สัญญาณไฟฟ้าระดับสูง แทนสถานะลอจิก '1' และใช้สัญญาณไฟฟ้าระดับต่ำ แทนสถานะลอจิก '0' ส่วนวงจรลอจิกแบบลบจะใช้สัญญาณไฟฟ้าระดับต่ำ แทนสถานะลอจิก '1' และใช้สัญญาณไฟฟ้าระดับสูง แทนสถานะลอจิก '0' สถานะทางลอจิก คือสถานะ '1' หรือ '0' ใช้แทนการทำงานของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลง 2 สถานะ ระบบควบคุมที่ใช้ระบบรีเลย์ และ PLC จะนำเอาสถานะของอุปกรณ์เหล่านี้มาปฏิบัติลอจิกด้วยกันเพื่อให้เข้ากันกับเงื่อนไขการควบคุม ปฏิบัติการลอจิกประกอบด้วย AND OR และ NOT เพื่อทำให้สถานะอินพุตต่างๆ เช่น A, B ทำให้เกิดเอาต์พุต Y เป็นต้น พิจารณาดูตัวอย่างต่อไปนี้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ทางลอจิก ทำให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างสมการบูลีนของภาพประกอบ 75 เขียนได้ว่า  $Y$  (แสงไฟฟ้า) =  $A$  (สวิตช์) \*  $B$  (หลอดไฟ) วงจรลอจิกที่ใช้วิธีการเดินสายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น รีเลย์ สวิตช์ ซึ่งมีความยุ่งยากและแก้ไขเพิ่มเติมได้ยาก ส่วน PLC ใช้โปรแกรมลอจิกกำหนดเงื่อนไขการควบคุม แทนการเดินสายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว จึงทำให้ง่ายขึ้น PLC แทนวงจรรีเลย์ด้วยปฏิบัติการทางลอจิก AND OR และ NOT ซึ่งกำหนดตามเงื่อนไขที่ต้องการควบคุม โดยใช้คำสั่งหรือภาษา PC (PC Language) ภาษาพื้นฐานที่ PLC ใช้ในการควบคุมแบบ 'ON' หรือ 'OFF' คือ ภาษาแลadder และภาษาบูลีน ภาษาแลadder ใช้สัญลักษณ์ของหน้าสัมผัสในการเขียนโปรแกรม การเปลี่ยนวงจรรีเลย์ให้เป็นโปรแกรม PLC ทำได้โดยใช้หน้าสัมผัสภาษาแลadderแทนสัญญาณรีเลย์

3.15.4 การต่อสายควบคุม PLC เมื่อทราบหลักการทำงานเกี่ยวกับลอจิกต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานใน PLC แล้ว ต่อไปจะเป็นการทำงานของ PLC ที่ต้องต่อสายควบคุมให้อุปกรณ์ทำงานตามต้องการ โดยจะเริ่มต้นจากหลักการของอินพุต เอาต์พุต และวงจรควบคุม

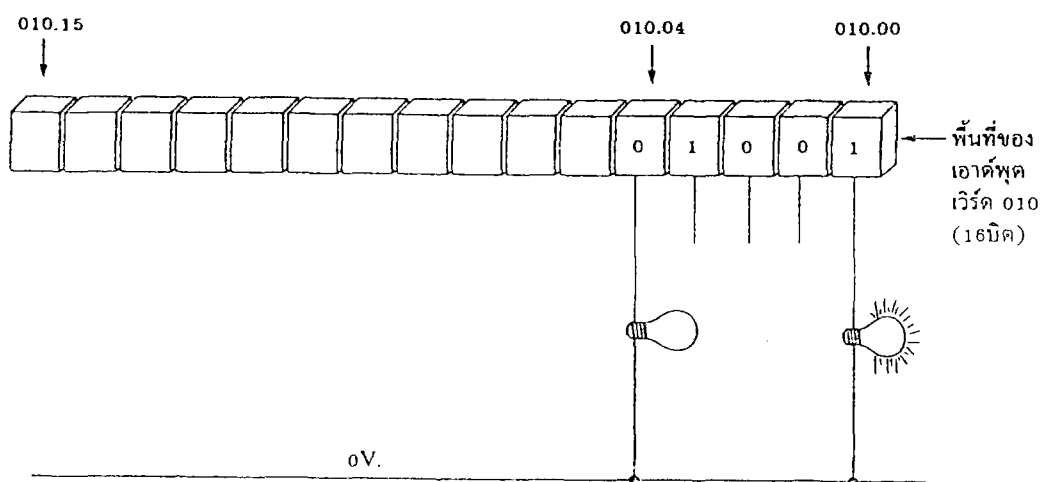
#### 3.15.4.1 การทำงานของภาคอินพุต



ภาพประกอบ 79 การทำงานภาคอินพุต (Input)

จากภาพประกอบข้างบนแสดงให้เห็นว่า ถ้ามีสัญญาณไฟฟ้าจ่ายเข้ามาที่ภาคอินพุตจะทำให้ข้อมูลของ Input Area (พื้นที่ของอินพุต) ที่บิตนั้นเป็น '1' แต่ถ้าไม่มีสัญญาณไฟฟ้าจ่ายเข้ามาที่ภาคอินพุตจะทำให้ข้อมูลของ Input Area ที่บิตนั้นเป็น '0'

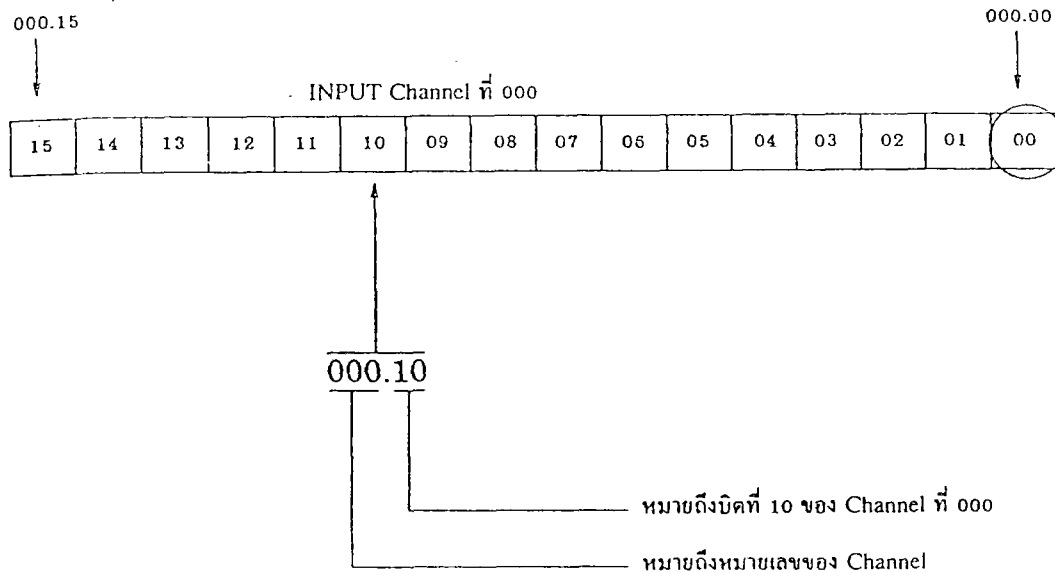
#### 3.15.4.2 การทำงานของภาคเอาต์พุต



ภาพประกอบ 80 การทำงานของภาคเอาต์พุต

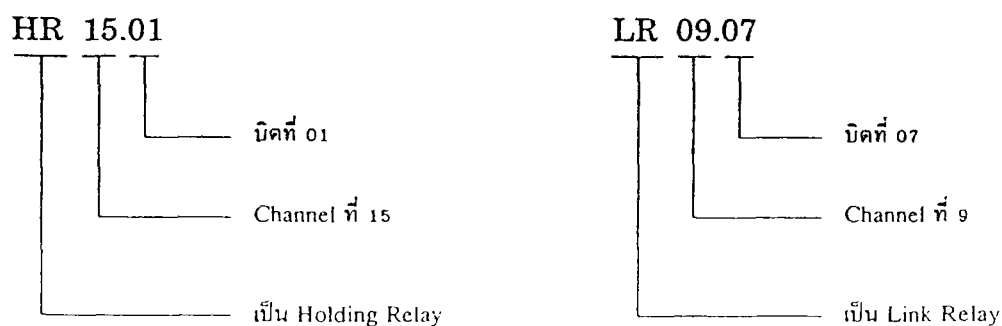
สถานะข้อมูลของ Output Area (พื้นที่ของเอาต์พุต) จะเป็น '1' หรือ '0' ขึ้นอยู่กับโปรแกรมภายใน PLC โดยจะใช้ผลของโปรแกรมหลังสุดเป็นหลัก

3.15.4.3 การกำหนดเบอร์รีเลย์ใน CPM1 (OMRON) โดยปกติแล้ว PLC ของ OMRON จะกำหนดพื้นที่รีเลย์ (Relay) เป็นเวิร์ด (Word) หรือ Channel (แชนแนล) ซึ่งแต่ละ Channel จะประกอบด้วย 16 บิต ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 81 คือ Channel ที่ 000



ภาพประกอบ 81 การกำหนดเบอร์รีเลย์

ในกรณีของเอาต์พุตก็เช่นกัน แต่เริ่มที่ Channel ที่ 010 จนถึง 019 นอกจากอินพุตและเอาต์พุตแล้ว ยังมีรีเลย์ชนิดอื่นๆ อีกที่มีการกำหนดเบอร์เหมือนกัน เช่น Holding Relay, Link Relay ดังตัวอย่างต่อไปนี้



ภาพประกอบ 82 การกำหนดเบอร์ของ Holding และ Link Relay

## 3.15.4.4 พื้นที่ความจำ (Memory Area) ของ CPM1

ตาราง 17 พื้นที่หน่วยความจำของ CPM1

| พื้นที่ของข้อมูล                   |        | เวิร์ด                                                    | บิต                                 | หน้าที่                                                                                                             |
|------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IR area <sup>1</sup>               | Input  | IR 000 to IR 009<br>(10 words)                            | IR 00000 to IR 00915<br>(160 bits)  | บิตเหล่านี้ใช้สำหรับต่อกับ<br>อินพุต/เอาต์พุตภายนอก                                                                 |
|                                    | Output | IR 010 to IR 019<br>(10 words)                            | IR 01000 to IR 01915<br>(160 bits)  |                                                                                                                     |
|                                    | Work   | IR 200 to IR 231<br>(32 words)                            | IR 20000 to IR 23115<br>(512 bits)  | เวิร์กบิตเป็นบิตอิสระที่ใช้<br>ในโปรแกรม                                                                            |
| SR area                            |        | SR 232 to SR 255<br>(24 words)                            | SR 23200 to SR25507<br>(384 bits)   | บิตเหล่านี้ใช้สำหรับหน้าที่<br>เฉพาะ เช่น flags และการ<br>ควบคุมบิต                                                 |
| TR area                            |        |                                                           | TR 0 to TR 7<br>(8 bits)            | บิตเหล่านี้ใช้สำหรับเก็บ<br>สถานะ 'ON' 'OFF' ชั่ว<br>คราวที่สาขาของโปรแกรม                                          |
| HR area <sup>2</sup>               |        | HR 00 to HR 19<br>(20 words)                              | HR 0000 to HR 1915<br>(320 bits)    | บิตเหล่านี้ใช้สำหรับเก็บข้อ<br>มูล และรักษาสถานะ<br>'ON'- 'OFF' เมื่อไม่มี<br>กระแสไฟฟ้า                            |
| AR area <sup>2</sup>               |        | AR 00 to AR 15<br>(16 words)                              | AR 0000 to AR 1515<br>(256 bits)    | บิตเหล่านี้ใช้สำหรับหน้าที่<br>เฉพาะเช่น flags และการ<br>ควบคุมบิต                                                  |
| LR area <sup>1</sup>               |        | LR 00 to LR 15<br>(16 words)                              | LR 0000 to LR 1515<br>(256 bits)    | ใช้สำหรับเชื่อมต่อข้อมูล<br>1:1 กับ PLC ตัวอื่นๆ                                                                    |
| Timer/Counter area <sup>2</sup>    |        | TC 000 to Tc 127                                          | (Timer/counternumbers) <sup>3</sup> | หมายเลขเดียวกันใช้<br>สำหรับไทมเมอร์และ<br>เคาน์เตอร์                                                               |
| DM area<br>Read/write <sup>2</sup> |        | DM 0000 to DM 0999<br>DM 1022 to DM 1023<br>(1,002 words) |                                     | ข้อมูลของพื้นที่ DM<br>สามารถเข้าถึงหน่วยของ<br>เวิร์ดเท่านั้น และค่าของเว<br>รียังคงมีอยู่เมื่อไม่มี<br>กระแสไฟฟ้า |

ตาราง 17 (ต่อ)

| พื้นที่ของข้อมูล       | เวิร์ด                        | บิต | หน้าที่                                                                                                                           |
|------------------------|-------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Error log <sup>4</sup> | DM 1000 to DM 1021(22 words)  |     | ใช้สำหรับเก็บเวลาที่เกิดขึ้นและค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น เวิร์ดเหล่านี้สามารถใช้เป็น read/write DM เมื่อ log function ผิดพลาดจะไม่ใช้ |
| Read-only <sup>4</sup> | DM 6144 to DM 6599(456 words) |     | ไม่สามารถเขียนมากกว่าจากโปรแกรม                                                                                                   |
| PC Setup <sup>4</sup>  | DM 6600 to DM 6655 (56 words) |     | ใช้สำหรับเก็บพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ควบคุมการทำงานของ PLC                                                                            |

## 3.15.4.5 โครงสร้างของข้อมูล

|              |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |                     |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------------------|
| Digit number | 3  |    |    |    | 2  |    |    |    | 1  |    |    |    | 0  |    |    |    |                     |
| Bit number   | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 09 | 08 | 07 | 06 | 05 | 04 | 03 | 02 | 01 | 00 |                     |
| IR word 000  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | = 2E4 <sub>16</sub> |
| IR word 001  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | = B16 <sub>16</sub> |

## ภาพประกอบ 83 โครงสร้างของข้อมูล

## 3.15.5 ขั้นตอนการใช้ PLC

## 3.15.5.1 กำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

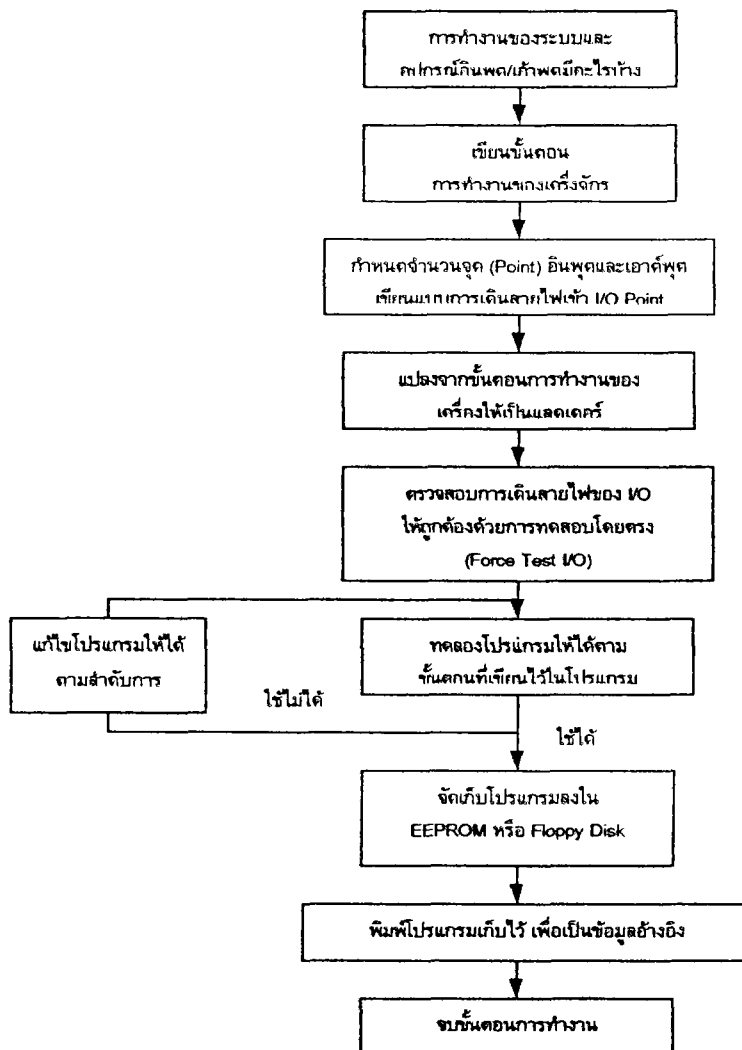
3.15.5.2 กำหนดอินพุตและเอาต์พุตคือการทำหนด Address ของสวิตช์กดปุ่ม (Push Button) หรือแมกเนติก Magnetic ว่าอยู่ในแชนแนลที่เท่าใด เช่น สวิตช์กดปุ่ม (Push Button) จะต่อเข้ากับขั้วต่อสาย (Terminal) 1 ก็คือ Bit 00 เป็นต้น

3.15.5.3 เดินสายไฟจากอินพุตเข้าที่ขั้วต่อสายด้านอินพุต (Input Terminal) และจากขั้วต่อสายด้านเอาต์พุต (Output Terminal) เข้าที่โหลด (Load) หรือรีเลย์ (Relay)

3.15.5.4 เขียนโปรแกรมลงใน CPU ของ PLC เขียนตามขั้นตอนการทำงานของเครื่อง อาจจะเป็นในรูปของนิมอนิก (Mnemonic) หรือแลตเตอร์ก็ได้

3.15.5.5 การให้ PLC ทำงานตามโปรแกรม และการมอนิเตอร์ (Monitor) โปรแกรม หลังจากเขียนโปรแกรมจบแล้ว ตั้ง (Run) คือให้เครื่องจักรทำงานตามขั้นตอนที่เขียนไว้ในโปรแกรมตามต้องการ และดูสภาวะการทำงานที่หน้าจอ (Monitor)

### 3.15.6 แผนผังการใช้ PLC



ภาพประกอบ 84 แผนผังการใช้ PLC

### 3.16 คุณสมบัติของของไหล

กลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) เป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ประยุกต์ (Applied mechanics) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับกลศาสตร์ของของเหลวและแก๊ส การศึกษากลศาสตร์ของไหลใช้แนวคิดเช่นเดียวกับการศึกษาวิชากลศาสตร์ของแข็ง (Mechanics of solids หรือ Strength of materials), แต่กลศาสตร์ของไหลมักเกี่ยวข้องกับกระแส (Stream) ของของไหล, ส่วนกลศาสตร์ของแข็ง มักเกี่ยวข้องกับการพิจารณาวัตถุ (Body) หรืออนุภาคของแข็ง (Particle) กลศาสตร์ของไหลอาจแบ่งออกได้เป็นสาขา คือ ของไหลสถิต (Fluid statics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับของไหลที่นิ่ง คิเนมาติก (Kinematics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเร็วและกระแสของไหลโดยไม่พิจารณาถึงแรง หรือพลังงานที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่และ ไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วความเร่ง พร้อมทั้งแรงที่กระทำหรือแรงที่เกิดขึ้นจากการที่ของไหลเคลื่อนที่ ของไหลไม่มีแรงต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเหมือนของแข็ง ของไหลจะไหลไปได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง และมีรูปร่างเปลี่ยนไปตามภาชนะที่บรรจุของไหลการ

เปลี่ยนรูปร่างของของไหลเกิดขึ้นจากแรงเฉือน (Shear force) ดังนั้นเมื่อมีแรงเฉือนกระทำกับของไหลจะทำให้เกิดการไหลขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าของไหลอยู่นิ่ง จะไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้น และแรงที่เกิดขึ้นจากของไหลทั้งหมดจะกระทำตั้งฉากกับระนาบที่ของไหลสัมผัส ของไหลแบ่งออกเป็นของเหลวและแก๊ส ของเหลวมีคุณสมบัติอัดตัวได้ยาก (Incompressible) ของเหลวจำนวนหนึ่งจะมีปริมาตรคงที่เสมอไม่ว่าบรรจุอยู่ในภาชนะรูปร่างอย่างไร และของเหลวจะมี “ผิวอิสระ” (Free surface) เกิดขึ้นเป็นขอบเขตกันไว้ระหว่างของเหลวกับอากาศที่อยู่เหนือของเหลว แก๊ส มีคุณสมบัติอัดตัวได้ง่าย (Compressible) แก๊สจะขยายตัวเต็มภาชนะที่บรรจุและไม่มีผิวอิสระเหมือนของเหลว ความแตกต่างระหว่างของแข็งกับของเหลว ภายในช่วงยืดหยุ่น (elastic limit) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของแข็งจะเป็นไปในลักษณะที่ว่า ความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นกับของแข็งเป็นสัดส่วนกับความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก ส่วนของไหล อัตราการเกิดความเครียดเป็นสัดส่วนกับความเค้น ความเครียดของของแข็งไม่ขึ้นกับเวลาที่แรงภายนอกกระทำ และถ้าอยู่ภายในช่วงยืดหยุ่น เมื่อเอาแรงภายนอกออก ของแข็งจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม แต่ของไหลจะเกิดการไหลต่อไปเรื่อยๆ ขณะที่รับแรงภายนอก และจะไม่กลับคืนสู่รูปร่างเดิม เมื่อเอาแรงภายนอกออก

### 3.16.1 นิยาม

3.16.1.1 ความหนาแน่น (density) ความหนาแน่นของของไหล  $\rho$  (rho) คือมวลต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้น

$$\text{ความหนาแน่น } \rho = \frac{m}{\text{vol}} \quad (103)$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลของไหล มีหน่วยเป็น kg,  
 $\text{vol}$  เป็นปริมาตรของไหล มีหน่วยเป็น  $\text{m}^3$

ดังนั้น หน่วยของความหนาแน่น คือ  $\text{kg}/\text{m}^3$

3.16.1.2 น้ำหนักจำเพาะ (specific weight) น้ำหนักจำเพาะ  $\gamma$  (gamma) คือแรงที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลกที่กระทำกับของไหลหนึ่งหน่วย ดังนั้นจึงมีหน่วยเป็นหน่วยของแรงต่อหน่วยปริมาตร นั่นคือ  $\text{N}/\text{m}^3$  ความหนาแน่นและน้ำหนักจำเพาะมีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \text{ หรือ } \gamma = \rho g \quad (104)$$

3.16.1.3 ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ปริมาตรจำเพาะคือปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยมวล, มักใช้กับแก๊ส, และมีหน่วยเป็น  $\text{m}^3/\text{kg}$  ดังนั้น

$$v_s = \frac{1}{\rho} \quad (105)$$

เมื่อ  $v_s$  เป็นปริมาตรจำเพาะ

3.16.1.4 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ความถ่วงจำเพาะ  $s$  ของของเหลว คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวต่อ ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิมาตรฐาน ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) ดังนั้น

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ } s = \frac{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์}} \quad (106)$$

ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย ความถ่วงจำเพาะบางครั้งอาจเรียกว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) ความถ่วงจำเพาะของแก๊สคืออัตราส่วนของความหนาแน่นของแก๊สต่อความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิและความดันค่าหนึ่ง

### 3.16.2 สมการของสถานะ

ในการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สไม่อาจทดลองวัดค่าต่างๆ ได้เหมือนของเหลว ดังนั้นจึงมักต้องใช้การคำนวณประกอบกันไป สมการที่ใช้ในการคำนวณเรียกว่า สมการของสถานะ (equation of state) ซึ่งใช้ได้กับแก๊สสมบูรณ์ (perfect gas) แก๊สจริงไม่ใช่แก๊สสมบูรณ์ แต่ก็มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สสมบูรณ์มาก จึงพอจะอนุโลมให้ใช้สมการสำหรับแก๊สสมบูรณ์ได้ความสัมพันธ์ ระหว่างความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure)  $p$ , ปริมาตร  $v$  ของแก๊สมวล  $m$ , และอุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)  $T$  ของแก๊สสมบูรณ์ คือ

$$\begin{aligned} pv &= mRT \\ \text{หรือ} \\ p &= \rho RT \end{aligned} \quad (107)$$

เมื่อ  $\rho$  เป็นความหนาแน่นของแก๊ส

$R$  เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (Gas constant) สำหรับอากาศมีค่าเท่ากับ  $287 \text{ J/kg.K}$ .

สมการนี้เรียกว่า สมการของสถานะ สำหรับแก๊สสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามสมการนี้ก็ให้ค่าประมาณได้อย่างดีสำหรับแก๊สต่างๆ ซึ่งไม่อยู่ในสถานะของเหลว หรือในขณะแตกตัว

### 3.16.3 ความสามารถอัดตัวได้

ของเหลวทั่วไปเมื่อได้รับความดัน ปริมาตรของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไป ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปคือค่า bulk modulus,  $K$  ของของเหลว ซึ่ง

$$\begin{aligned} \text{bulk modulus} &= \frac{\text{ความดันที่เปลี่ยนแปลง}}{(\text{ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง/ปริมาตรเดิม})} \\ R &= - \frac{dp}{dv/v} = - v \frac{dp}{dv} \end{aligned} \quad (108)$$

เมื่อ  $v$  เป็นปริมาตรของเหลว

$p$  เป็นความดันของเหลว

ในการคำนวณทั่วไปเกี่ยวกับของเหลวมักถือว่า ของเหลวอัดตัวไม่ได้ (incompressible) เพราะปริมาตรของของเหลวเปลี่ยนไปน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ส่วนแก๊สถือว่าสามารถอัดตัวได้ (compressible) ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้โดยใช้กฎของแก๊ส (Gas laws) และจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

### 3.16.4 ของไหลสถิต

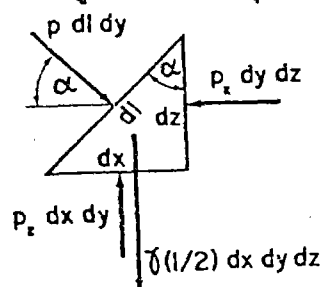
3.16.4.1 ความดันมีค่าเท่ากันทุกทิศทางพิจารณาของไหลรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากประกอบ 93 ซึ่งมีความหนา  $dy$  ในแนวตั้งฉากกับระนาบกระดาษ ให้  $p \times d \times dy \times \cos \alpha - P_x \times dy \times dz = 0$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad P &= P_x \\ \text{และ} \quad P_z \times dy \times dx - p \times d \times dy \times \sin \alpha - 1/2 \gamma \times dx \times dy \times dz &= 0 \end{aligned}$$

เนื่องจากเทอมสุดท้ายของค่าน้อยมาก จึงอาจตัดทิ้งไปได้ ดังนั้น

$$\begin{aligned} P &= P_z \\ \text{นั่นคือ} \quad P &= P_x = P_z \end{aligned}$$

จึงสรุปได้ว่าความดันที่จุดใดๆ ในของเหลวที่อยู่หนึ่ง มีค่าเท่ากับทุกทิศทาง



ภาพประกอบ 85 ของไหลรูปสี่เหลี่ยม

### 3.16.4.2 ความดันสัมบูรณ์และความดันเกจ

- ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) เนื่องจากโลกมีบรรยากาศห่อหุ้มอยู่หนาหลายร้อยกิโลเมตร ดังนั้นความดันบรรยากาศพื้นผิวโลกจึงขึ้นอยู่กับความสูงของอากาศเหนือผิวโลก สำหรับความดันบรรยากาศมาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลมีค่าประมาณ 101.3 kPa ซึ่งเปรียบเทียบกับ head ของน้ำ 10.34 m หรือปรอทสูงประมาณ 760 mm และที่ระดับสูงขึ้นไปจากผิวโลกความดันบรรยากาศจะมีค่าลดลง

- สุญญากาศ (vacuum) คือบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ  
สุญญากาศสมบูรณ์ (perfect vacuum) คือบรรยากาศที่ว่างเปล่า ดังนั้นจึงมีความดันเป็นศูนย์

- ความดันเกจ (gage pressure) คือระดับความดัน ที่วัดเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันเกจที่วัดได้จึงอาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าความดันบรรยากาศ และจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อวัดที่ความดันบรรยากาศปกติ

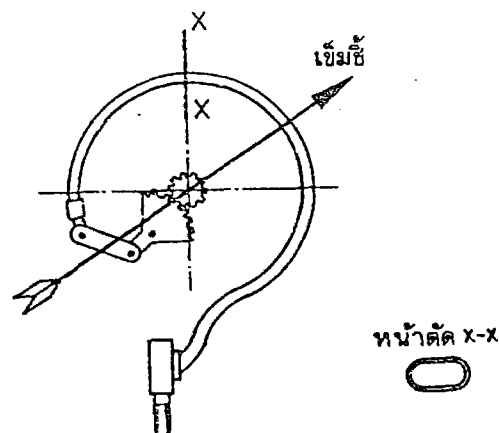
- ความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure) คือระดับความดันที่วัดเหนือความดันศูนย์สัมบูรณ์ (absolute zero) ซึ่งเป็นสุญญากาศสมบูรณ์ ดังนั้น

$$\text{ความดันสัมบูรณ์} = \text{ความดันเกจ} + \text{ความดันบรรยากาศ}$$

และเนื่องจากคุณสมบัติของของเหลวไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันเท่าใดนัก ดังนั้นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับของเหลวจึงใช้ความดันเกจเป็นหลักในการพิจารณา

### 3.16.4.3 การวัดความดันของของไหล

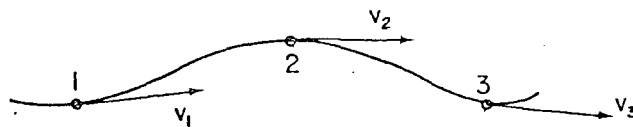
- บูดองเกจ (bourdon gage) บูดองเกจใช้วัดความดันและสุญญากาศ มีลักษณะภายในดังภาพประกอบ 86 ซึ่งประกอบด้วยท่อบางๆ หน้าที่ควรระวังซึ่งเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้งได้ เมื่อความดันภายในเปลี่ยนแปลง เมื่อรัศมีความโค้งของท่อเปลี่ยนไป จะมีกลไกต่อไปยังเข็มชี้เพื่อทำให้ปลายเข็มชี้เปลี่ยนตำแหน่งบนหน้าปัทม์ ค่าความดันที่อ่านได้จากหน้าปัทม์ของบูดองเกจ ถือว่าเป็นความดันที่จุดศูนย์กลางของเกจ



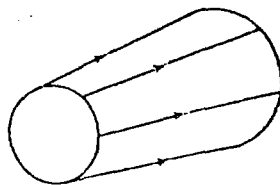
ภาพประกอบ 86 บูดองเกจ

3.16.5 ของไหลเคลื่อนที่ ในขณะที่ของไหลอยู่นิ่ง ไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นในของไหล แต่เมื่อของไหลเคลื่อนที่就会有แรงเฉือนเกิดขึ้นเนื่องจากความหนืด และเทอร์บิวเลนซ์ (turbulence) อันเป็นผลทำให้เกิดความเสียดทานต่อการเคลื่อนที่ ปัญหาส่วนมากในทางปฏิบัติถือว่าของไหลเป็นของไหลอุดมคติ (ideal fluid) คือเป็นของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทาน ซึ่งก็ได้ผลออกมาใกล้เคียงกับความเป็นจริงพอสมควร อันเป็นที่ยอมรับกันได้ในการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรม ของไหลประกอบไปด้วยอนุภาคของของไหล (fluid particles) จำนวนมากเคลื่อนที่ในทิศทางที่ของไหลเคลื่อนที่ อนุภาคต่างๆ เหล่านี้ไม่ได้เคลื่อนที่ขนานกันไปตลอด แต่เคลื่อนที่ไปอย่างอิสระในหลายทิศทาง ความเร็วของอนุภาคเป็นปริมาณ เวกเตอร์ มีทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ถ้าลากเส้นไปตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค เส้นที่ได้นี้ชื่อเรียกว่า path

line ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคหลายๆ อนุภาค โดยการลากเส้นโค้งสัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ในชั่วขณะของหลายๆ อนุภาค ภาพประกอบ 87 เส้นโค้งที่ได้นี้ เรียกว่า streamline และโดยทั่วไปมักเป็นเส้นโค้งในสามมิติ (three-dimension) เนื่องจากความเร็วของอนุภาคที่จุดใดๆ บน streamline มีทิศทางสัมผัสกับ streamline ดังนั้นอนุภาคของไหลจึงไม่มีการเคลื่อนที่ข้าม streamline



ภาพประกอบ 87 streamline



ภาพประกอบ 88 stream tube

เมื่อต้องการวิเคราะห์ถึงการเคลื่อนที่ของของไหลจำนวนมาก อาจมีวิธีการที่ สะดวกในการวิเคราะห์คือ การพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลบนพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ (ซึ่งคล้ายการพิจารณา element เล็กๆ ในวิชา strength of materials) ถ้าลากเส้นผ่านทุกๆ จุดบนเส้นรอบรูปพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ นี้แล้ว จะทำให้เกิด stream tube ขึ้นดังภาพประกอบ 88 เส้นที่เกิดขึ้นรอบๆ stream tube นี้คือ streamline เนื่องจากของไหลไม่มีการเคลื่อนที่ข้าม streamline ดังนั้นของไหลใน stream tube จึงไม่สามารถไหลออกจาก stream tube ได้ ฉะนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์ปัญหาทำได้สะดวกขึ้น เพราะเป็นการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติ (one-dimension) เท่านั้น

#### 3.16.5.1 ประเภทของการไหลการไหลของของไหลแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- การไหลเทอร์บิวเลนต์ (turbulent flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีตำแหน่งไม่แน่นอน เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคอื่นๆ บนหน้าตัดของการไหลใดๆ

- การไหลลามินาร์ (laminar flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ มีตำแหน่งแน่นอน เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคอื่นๆ บนหน้าตัดของการไหลใดๆ

เลนท์ (ชาญ ถนัดงาน.2523 : 139-140)

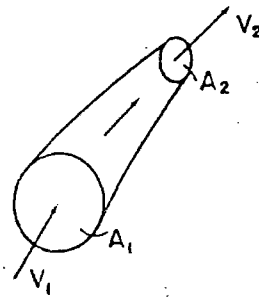
## 4 การวัดประสิทธิภาพของไส้กรอง

### 4.1. อัตราไหลและความเร็วเฉลี่ย

4.1.1 อัตราไหล (flow rate) ของของไหล คือปริมาตรของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดในหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยของอัตราไหลจึงเป็นหน่วยของปริมาตรต่อหน่วยของเวลา นั่นคือ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที,  $m^3/s$ , และใช้สัญลักษณ์แทนอัตราไหลว่า  $Q$  ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity) บนหน้าตัดที่กำหนดคือ ค่าอัตราไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด ถ้าให้  $V$  เป็นความเร็วเฉลี่ย,  $Q$  เป็นอัตราไหล และ  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น

$$V = \frac{Q}{A} \quad (109)$$

4.1.2 สมการความต่อเนื่อง สมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) เป็นสมการที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหล



ภาพประกอบ 89 stream tube

พิจารณา stream tube ดังภาพประกอบ 89 จากคุณสมบัติของ stream tube ทราบว่า ของไหลไม่สามารถข้ามออกมาจาก stream tube ได้ ดังนั้น ของไหลที่ไหลเข้าทางหน้าตัด  $A_1$  จะไหลออกมาทางหน้าตัด  $A_2$  ด้วยมวลเท่าเดิม เมื่อเป็นการไหลแบบ steady flow มวลของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (110)$$

หรือ

$$\gamma_1 A_1 V_1 = \gamma_2 A_2 V_2 \quad (111)$$

ถ้าเป็นของไหลชนิดที่อัดตัวไม่ได้ นั่นคือ  $\rho_1 = \rho_2$  ซึ่งเป็นข้อสมมติที่ใช้งานทางจันปฏิบัติสำหรับของเหลวทั่วไป สมการ(111) อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (112)$$

สมการ (110) ถึง (112) นี้มีชื่อเรียกว่าสมการความต่อเนื่อง

4.1.3 พลังงานในการไหล ในที่นี้จะพิจารณาถึงพลังงานที่เกิดขึ้น จากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งอยู่ในรูปต่างๆ กัน

- พลังงานจลน์ วัตถุมวล  $m$ , เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V$  จะมีพลังงานจลน์ (kinetic energy)  $E_k = 1/2 mV^2$  ดังนั้น ถ้าของไหลเคลื่อนที่โดยที่อนุภาคของของไหลมีความเร็วเท่ากัน พลังงานจลน์ของของไหลก็จะมีค่า  $1/2 mV^2$  ด้วยเช่นกัน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า :

$$\frac{E_k}{\text{น้ำหนัก}} = \frac{1/2 mV^2}{\gamma(\text{ปริมาตร})} = \frac{1/2(\rho(\text{ปริมาตร}))V^2}{\gamma(\text{ปริมาตร})} = \frac{V^2}{2g} \quad (113)$$

เมื่อ  $V$  เป็นความเร็วของของไหล,  $m/s$

$g$  เป็นความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก,  $9.81 \text{ m/s}^2$  หน่วยของ  $V^2/2g$  จึงมีหน่วยเป็น  $N \cdot m/N = m$

- พลังงานศักย์ (potential energy) ของอนุภาคของไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เปรียบเทียบกับระนาบอ้างอิงที่สมมติขึ้น โดยปกติมักจะสนใจถึงระดับแตกต่างของสองตำแหน่งเท่านั้น เพราะฉะนั้น การเลือกระนาบอ้างอิงจึงเลือกโดยใช้ความสะดวกเป็นหลัก อนุภาคของไหลน้ำหนัก  $W$  ที่อยู่เหนือระนาบอ้างอิงเป็นระยะ  $z$  มีพลังงานศักย์  $E_p = Wz$  ดังนั้นเมื่อคิดพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนัก จึงเขียนเป็นสมการได้ว่า :

$$\frac{E_p}{\text{น้ำหนัก}} = \frac{Wz}{W} = z \quad (114)$$

เมื่อ  $z$  เป็นระยะที่วัดจากระนาบอ้างอิง,  $m$  หน่วยของ  $z$  จึงมีหน่วยเป็น  $N \cdot m/N = m$

- พลังงานความดัน (pressure energy) เมื่อของไหลเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ภายใต้ความดัน ของไหลก็จะสามารถทำงานได้ถ้าของไหลมีพื้นที่หน้าตัดการไหล  $A$ , แรงบนพื้นที่หน้าตัดซึ่งเกิดจากความดัน  $p$  ในของไหลคือ  $pA$  ถ้าของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดนี้มีน้ำหนัก  $W$  ปริมาตรของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด  $= W/\gamma$  ระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่  $= W/\gamma^A$

งานที่เกิดจากของไหล = แรง  $\times$  ระยะทาง

$$= pA \times \frac{W}{\gamma^A} = \frac{pW}{\gamma}$$

$$\text{พลังงานความดันต่อหน่วยน้ำหนัก} = \frac{pW}{\gamma W} = \frac{p}{\gamma} \quad (115)$$

หน่วยของ  $p/\gamma$  จึงมีหน่วยเป็น  $N \cdot m/N = m$

4.1.4 สมการพลังงาน (energy equation) เป็นสมการที่ได้จากการใช้หลักการทรงพลังงาน (principle of conservation of energy) กับของไหลเคลื่อนที่ พลังงานที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่ประกอบไปด้วย พลังงานจากความดัน, ความเร็ว, และตำแหน่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจมีพลังงานที่เพิ่มให้กับของไหล หรือพลังงานที่สูญเสียเกิดขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการแสดงผลรวมของพลังงาน ทั้งหมดในทิศทางที่ของไหลเคลื่อนที่ได้เป็น:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_M + Q_H - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (116)$$

เมื่อ  $P_1, P_2$  เป็นความดันที่ตำแหน่ง 1 และ 2, kPa

$V_1, V_2$  เป็นความเร็วที่ตำแหน่ง 1 และ 2, m/s

$z_1, z_2$  เป็นระดับความสูงที่ตำแหน่ง 1 และ 2, m

$\gamma_1, \gamma_2$  เป็นน้ำหนักจำเพาะของของไหลที่ตำแหน่ง 1 และ 2, kN/m<sup>3</sup>

$h_M$  เป็นพลังงานกลที่ใส่ให้กับของไหลต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล, N\*m/N = m

$Q_H$  เป็นพลังงานความร้อนที่ใส่ให้กับของไหลต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล, J/N = m

$h_L$  เป็นพลังงานที่สูญเสียไประหว่างตำแหน่ง 1 และ 2, m

สมการ (116) มีชื่อเรียกว่า สมการพลังงาน ในกรณีที่เป็นการไหลแบบ steady flow ของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ของไหลไม่มีความเสียดทาน (frictionless) จึงไม่มีการสูญเสียพลังงาน และไม่มีการให้พลังงานกับของไหลระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2 แล้ว สมการ (60) อาจเขียนในรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (117)$$

หรือ

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{ค่าคงที่} \quad (118)$$

สมการ (117) และ (118) มีชื่อเรียกว่า สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) เพื่อเป็นเกียรติแก่ Daniel. Bernoulli, ผู้คิดสมการนี้ได้ในปี พ.ศ. 2281 โปรดสังเกตว่าสมการของเบอร์นูลลีใช้ได้กับของไหลที่ไม่มีความเสียดทาน แบบอัดตัวไม่ได้แต่อย่างไรก็ตาม สามารถนำไปใช้กับของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่มีความเสียดทานน้อยมากได้ โปรดสังเกตว่าเทอมต่างๆ ในสมการ (117) และ (118) มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกเป็นพิเศษ คือ

$P / \gamma$  เรียกว่า pressure head, เทนพลังงานความดันต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากความดันในการไหล;

$V^2 / 2g$  เรียกว่า velocity head, เทนพลังงานจลน์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากความเร็วของของไหล;

$z$  เรียกว่า elevation head, เทนพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากระดับของของไหล

ผลรวมของเทอมทั้งสามนี้มีชื่อเรียกว่า total head ใช้สัญลักษณ์ว่า,  $H$ , ซึ่ง

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (119)$$

ข้อควรระวังก็คือ แม้ว่าแต่ละเทอมในสมการ (119) จะมีหน่วยเป็นหน่วยความยาว แต่มีความหมายว่าเป็นพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล

#### 4.1.5 แรงและโมเมนตัมในของไหล

4.1.5.1 หลักการแรงดล-โมเมนตัม หามาได้โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน การไหลของของไหลอาจเป็นแบบ steady หรือ unsteady flow ของไหลอาจเป็นแบบอัดตัวได้ หรืออัดตัวไม่ได้ อาจเป็นของไหลจริงหรือของไหลอุดมคติได้ ในการพิจารณาเกี่ยวกับโมเมนตัมจะไม่พิจารณาถึงการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่

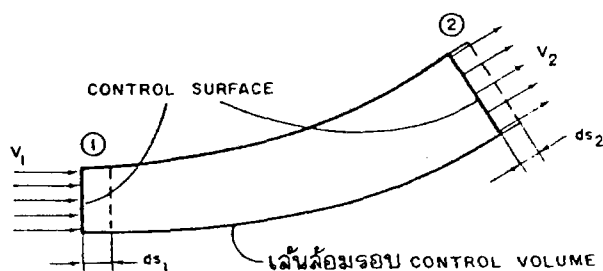
กฎข้อที่สองของนิวตัน เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m\vec{a} \\ \text{หรือ} \quad \sum \vec{F} &= \frac{d(m\vec{V})}{dt} \end{aligned} \quad (120)$$

ซึ่งมีความหมายว่า ผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ มีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของวัตถุ เนื่องจาก  $\vec{F}$  และ  $\vec{V}$  เป็นปริมาตรเวกเตอร์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจึงเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันกับที่ที่แรงกระทำ สมการ (120) อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$\sum \vec{F} (dt) = d(m\vec{V}) \quad (121)$$

ซึ่งมีความหมายว่า แรงดล(impulse)มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม อันเป็นหลักการแรงดล-โมเมนตัมต่อไปจะใช้สมการ 121 กับวัตถุ ซึ่งมีมวลอยู่ใน control volume ดังภาพประกอบ 90 ในที่นี้ถือว่า control volume มีตำแหน่งแน่นอน ไม่มีการเคลื่อนที่ ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือขนาด



ภาพประกอบ 90 ของไหลใน control volume

พิจารณาของไหลใน control volume ดังภาพประกอบ 90 เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์มักเลือกให้ control surface ตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วคงรูป สมมติว่าความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้ง control surface เมื่อเวลา  $t$ , ของไหลบรรจุอยู่เต็ม control volume ระหว่างหน้าตัด 1 กับ 2 เมื่อเวลาผ่านไป  $dt$  ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ สมมติว่าหน้าตัด 1 เคลื่อนที่ไป  $ds_1$  และที่หน้าตัด 2 เคลื่อนที่ไป  $ds_2$  พิจารณาเฉพาะกรณีของไหลเคลื่อนที่แบบ steady flow

โมเมนตัมที่ผ่าน control surface ที่หน้าตัด 1 ในช่วงเวลา  $dt$  คือ  $(\rho_1 A_1 ds_1) V_1$

โมเมนตัมที่ผ่าน control surface ที่หน้าตัด 2 ในช่วงเวลา  $dt$  คือ  $(\rho_2 A_2 ds_2) V_2$

จากสมการ 121 เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}\sum \vec{F} &= \frac{d(mV)_{\text{ออก}}}{dt} - \frac{d(mV)_{\text{เข้า}}}{dt} \\ &= \frac{1}{dt} (\rho_2 A_2 ds_2) \vec{V}_2 - \frac{1}{dt} (\rho_1 A_1 ds_1) \vec{V}_1\end{aligned}$$

แต่เนื่องจาก  $V = ds/dt$  และ  $Q = AV$  ดังนั้น

$$\sum \vec{F} = \rho_2 Q_2 \vec{V}_2 - \rho_1 Q_1 \vec{V}_1 \quad (123)$$

จากสมการความต่อเนื่อง และของไหลเคลื่อนที่แบบ steady flow

$$\rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$

ดังนั้น

$$\sum \vec{F} = \rho Q (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) = \rho Q (\Delta \vec{V}) \quad (124)$$

ทิศทาง  $\sum \vec{F}$  จะอยู่ในทิศทางเดียวกับ  $\Delta \vec{V}$  ข้อสังเกตสำหรับการใช้สมการนี้คือ สมการนี้ได้จากกฎข้อที่สองของนิวตัน  $\sum \vec{F}$  เป็นแรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ เป็นแรงกิริยา เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับ  $\Delta \vec{V}$  ในที่นี้วัตถุที่แรงกระทำคือการไหล ดังนั้น ค่าที่คำนวณได้จากสมการ 124 จึงเป็นแรงจากภายนอกที่กระทำกับของไหล ถ้าต้องการหาแรงที่ของไหลกระทำกับสิ่งอื่นที่อยู่นอก control volume แรงนี้ก็คือแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ  $\sum \vec{F}$  แต่มีขนาดเท่ากัน  $\sum \vec{F}$  นี้เป็นผลรวมของแรงซึ่งประกอบด้วยแรงภายนอกทั้งหมด รวมทั้งแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหล แรงเฉือน และแรงซึ่งเกิดจากความดันภายในของไหล อีกทั้งแรงเนื่องจากความดันระหว่างผิวสัมผัสของของไหลกับของแข็ง สมการ 124 เป็นสมการเวกเตอร์ ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการสเกลาร์ได้ดังนี้คือ

$$\sum F_x = \rho_2 Q_2 V_{2x} - \rho_1 Q_1 V_{1x} = \rho Q (\Delta V_x) \quad (125 \text{ ก})$$

$$\sum F_y = \rho_2 Q_2 V_{2y} - \rho_1 Q_1 V_{1y} = \rho Q (\Delta V_y) \quad (125 \text{ ข})$$

$$\sum F_z = \rho_2 Q_2 V_{2z} - \rho_1 Q_1 V_{1z} = \rho Q (\Delta V_z) \quad (125 \text{ ค})$$

4.1.5.2 ตัวประกอบแก้ไขค่าโมเมนตัม เนื่องจากความเร็วของไหลมีค่าไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดการไหล ค่าโมเมนตัมที่ผ่านหน้าตัดพื้นที่เล็กๆ  $dA$  ของไหลมีความเร็ว  $u$  คือ  $(\rho u \cdot dA)u$

$$= \rho u^2 dA \text{ และโมเมนตัมที่ผ่านหน้าตัดทั้งหมดคือ } \rho \int_A u^2 dA \text{ ถ้าคำนวณโดยใช้ความเร็วเฉลี่ย จะได้}$$

โมเมนตัม  $\rho QV = \rho AV^2$  ดังนั้นจะต้องมีตัวประกอบมากคูณกับจำนวน  $\rho AV^2$  เพื่อให้ได้ค่าโมเมนตัมอย่างถูกต้อง ตัวคูณนี้คือ

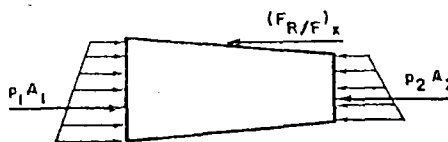
$$\beta = \frac{1}{AV^2} \int_A u^2 dA \quad (126)$$

สำหรับการไหลลามินาร์ในท่อกลม  $\beta = 4/3$  แต่ถ้าเป็นการไหลเทอร์บิวเลนต์ในท่อกลม  $\beta$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.005 – 1.050 ดังนั้นถ้าไม่มีข้อมูลกำหนดมาให้แล้ว ก็ถือว่า  $\beta = 1.00$

4.1.5.3 แรงบนท่อความดัน พิจารณากรณีนี้ของไหลเคลื่อนที่ผ่าน ท่อลดในแนวระดับดังภาพประกอบ 91(1) ซึ่งสามารถเขียน free diagram ของมวลของไหล แสดงแรงที่กระทำกับมวลของของไหลได้ดังภาพประกอบ 91(2)



1



2

ภาพประกอบ 91 ของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อลด

ใช้สมการ (125 ก) กับมวลของของไหลเพื่อหาแรงที่กระทำกับมวลของของไหลในแนวแกน  $x$  จะได้ว่า

$$\sum F_x = P_1 A_1 - P_2 A_2 - (F_{R/F})_x = \rho Q(V_2 - V_1) \quad (127)$$

หรือ

$$(F_{R/F})_x = P_1 A_1 - P_2 A_2 - \rho Q(V_2 - V_1) \quad (128)$$

ซึ่ง  $(F_{R/F})_x$  เป็นแรงที่ท่อลดกระทำกับมวลของของไหลในแนวแกน  $x$  ส่วนแรงที่มวลของของไหลกระทำกับท่อลดจะมีขนาดเท่ากับแรง  $(F_{R/F})_x$  แต่มีทิศตรงกันข้าม ดังนั้นถ้าให้  $(F_{FR})_x$  เป็นแรงที่มวลของของไหลกระทำกับท่อลด

$$\begin{aligned} (F_{FR})_x &= - (F_{R/F})_x \\ &= - P_1 A_1 + P_2 A_2 + \rho Q(V_2 - V_1) \end{aligned} \quad (129)$$

โปรดสังเกตการใช้สัญลักษณ์แทนแรง  $(F_{R/F})$  เป็นแรงที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำกับมวลของไหล ใช้ subscript R/F ส่วนแรงที่เกิดจากมวลของของไหลใช้สัญลักษณ์  $(F_{FR})$  ซึ่งมี subscript เป็น F/R พิจารณาใน

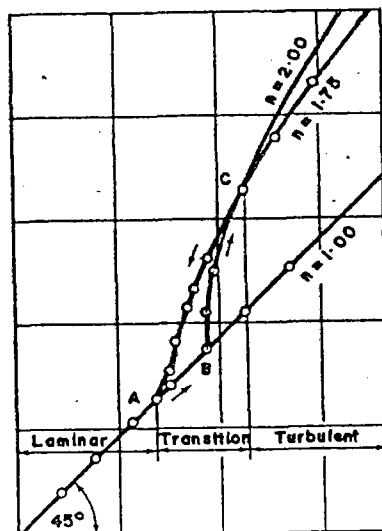
แนวแกน  $y$  ไม่มีแรงอื่นใดกระทำกับท่อลด นอกจากน้ำหนักของของไหลในท่อลด ดังนั้นแรงในแนวแกน  $y$  จึงมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลในท่อลด

#### 4.1.6 การไหลในท่อ

4.1.6.1 การไหลลามินาร์และเทอร์บิวเลนต์ การไหลลามินาร์ (laminar Flow) เป็นการไหลโดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ขนาดกันไปคล้ายๆ กับการไหลเป็นชั้นๆ (laminae) ความเร็วของของไหลในชั้นที่อยู่ใกล้ๆ กันมีค่าไม่เท่ากัน แต่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย การไหลลามินาร์เป็นไปตามกฎของความสัมพันธ์ระหว่างความดันเฉือน กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ angular deformation ซึ่งก็คือผลคูณของความหนืดของของไหลกับ velocity gradient นั่นคือ  $\tau = \mu(dv/dy)$  ความหนืดของของไหลเป็นสิ่งที่ส่งผลทำให้การไหลเปลี่ยนไปเป็นเทอร์บิวเลนต์ได้ การไหลเทอร์บิวเลนต์ (turbulent flow) เป็นการไหลโดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปอย่างไม่เป็นระบบ ความเร็วของอนุภาคของของไหลแตกต่างกันทั้งขนาดและทิศทางความดันเฉือนสำหรับการไหลเทอร์บิวเลนต์สามารถเขียนได้ในภาพประกอบ

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy}$$

เมื่อ  $\eta$  (eta) เป็นตัวประกอบที่แสดงผลจากการเป็นเทอร์บิวเลนต์



ภาพประกอบ 92 การพล็อตกราฟ log - log แสดงการไหลในท่อ

ความหนืดของของไหลมีผลทำให้เกิดการสูญเสีย head หรือ head loss การเกิด head loss ในการไหลลามินาร์และเทอร์บิวเลนต์แตกต่างกัน จากผลการทดลองซึ่งนำมาเขียนเป็นกราฟบนสเกล log - log ดังภาพประกอบ 92 พบว่า: เมื่อเป็นการไหลลามินาร์ head loss เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว  $V$  กำลังหนึ่ง ส่วนการไหลเทอร์บิวเลนต์ head loss เป็นสัดส่วนกับ  $V^n$  โดยที่  $n$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.75 ถึง 2.00 ค่า 1.75 เกิดขึ้นเมื่อเป็นการไหลเทอร์บิวเลนต์ในท่อผิวเรียบมาก ถ้าท่อขรุขระขึ้น ค่า  $n$  จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.00 จากภาพประกอบ 100 จะเห็นได้ว่า จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลลามินาร์ไปเป็นการไหลเทอร์บิวเลนต์อาจเกิดขึ้นได้สองจุด คือ จุด A ซึ่งเรียกว่าจุดวิกฤตต่ำ (lower critical point) และจุด B เรียกว่าจุด

วิกฤตสูง (higher critical point) แต่อย่างไรก็ตาม ความเร็วไม่ใช่สิ่งเดียวที่ชี้ชัดได้ว่าการไหลเป็นลามินาร์หรือเทอร์บิวเลนต์ สิ่งที่ยกได้อย่างแน่นอนก็คือ เรย์โนลด์สจำนวน (Reynolds number) ซึ่งก็คือ

$$N_R = \frac{DV\rho}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (130)$$

เมื่อ  $N_R$  เป็นเรย์โนลด์สจำนวน ไม่มีหน่วย  
 $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ m  
 $V$  เป็นความเร็วเฉลี่ยในท่อ m/s  
 $\rho$  เป็นความหนาแน่นของของไหลในท่อ kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu$  เป็นความหนืดของของไหลในท่อ Pa · s  
 $\nu$  เป็นความหนืดคินแมติกของของไหลในท่อ m<sup>2</sup>/s

ถ้าของไหลไม่ได้ไหลผ่านท่อกลม ก็ให้แทนค่า  $D$  ในสมการ 130 ด้วยรัศมีไฮดรอลิก (hydraulic radius) ซึ่ง

$$R = \frac{A}{P} \quad (131)$$

เมื่อ  $R$  เป็นรัศมีไฮดรอลิก m

$A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลผ่าน m<sup>2</sup>

$P$  เป็น wetted perimeter คือความยาวของเส้นรอบหน้าตัดที่ของไหลไหลผ่าน เฉพาะบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผิวท่อ m

ตัวอย่าง 2 ท่อกลมที่มีน้ำไหลผ่านครึ่งท่อ  $A = (\pi/8)D^2$  และ  $P = \pi D/2$  ดังนั้น รัศมีไฮดรอลิก

$$R = \frac{(\pi/8)D^2}{\pi D/2} = \frac{D}{4}$$

เรย์โนลด์สจำนวนในเทอมของรัศมีไฮดรอลิก คือ :

$$N_R = \frac{V(4R)}{\nu} \quad (132)$$

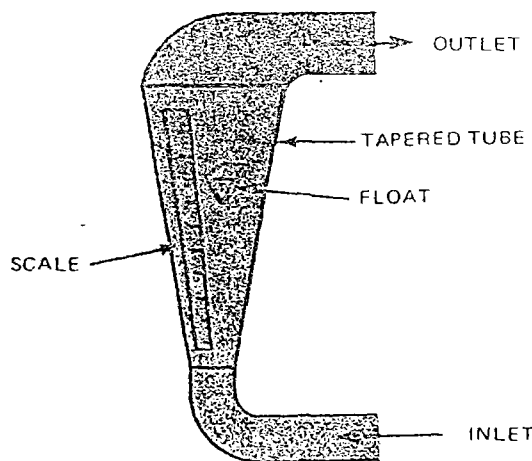
ในทางปฏิบัติพบว่า ถ้าค่า  $N_R$  น้อยกว่า 2000 การไหลในท่อตรงจะไม่มีโอกาสเป็นเทอร์บิวเลนต์ ดังนั้น ถ้าค่า  $N_R$  น้อยกว่า 2000 การไหลในท่อจะเป็นลามินาร์เสมอ ในกรณีทั่วไป ถ้าเป็นการไหลผ่านท่อตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ และท่อก็มีความขรุขระตามปกติ ค่าวิกฤตของเรย์โนลด์สจำนวนที่บอกได้ว่าการไหลเป็นลามินาร์ หรือเทอร์บิวเลนต์ คือ:

$$N_R = 2000 \quad (133)$$

ถ้า  $N_R$  น้อยกว่า 2000 ก็เป็นการไหลลามินาร์ แต่ถ้าสูงกว่า 2000 ก็เป็นการไหลเทอร์บิวเลนต์(ชาญ ถนัดงาน.2523 : 139-141)

#### 4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลแบบกีดขวางการไหล (Obstruction Flow Sensor)

4.2.1 โรตัมมิเตอร์ (Rotameter) ข้อเสียอย่างหนึ่งของการวัดอัตราการไหลด้วยแผ่นออริฟิส ก็คือ การเกิดความดันตกคร่อมที่ตัววัดซึ่งจะแปรผันไปกับค่าของการไหล เราจะพบว่าเมื่อการไหลเพิ่มมากขึ้น ความดันตกคร่อมก็จะมีค่ามากขึ้นด้วยและในกรณีที่มีการไหลค่าต่ำๆ ค่าความแม่นยำก็จะน้อยตามไปด้วย มีอุปกรณ์อีกแบบหนึ่ง ที่สามารถรักษาระดับความดันตกคร่อมให้มีค่าเกือบคงที่ตลอดย่านของการวัดแต่จะเปลี่ยนขนาดพื้นที่ให้ของไหลผ่านไปตามปริมาณของไหล และยังสามารถให้ความแม่นยำที่ดีแม้อัตราการไหลจะมีค่าต่ำๆ อุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกว่า โรตัมมิเตอร์ (rotameter) ตัวมิเตอร์เป็นท่อแก้วใสโดยที่ด้านในเป็นรูปกรวยเรียว (tapered tube) และมีลูกลอย (float) ที่ออกแบบขึ้นมาเป็นพิเศษบรรจุอยู่ภายในดังภาพประกอบ 93 ของไหลที่ต้องการวัดจะไหลผ่านเข้ามาทางด้านล่างของตัววัด ลูกลอยจะถูกความเร็วของของไหลยกตัวให้ลอยขึ้น (velocity head) ตำแหน่งของลูกลอยจะลอยนิ่งอยู่กับที่เมื่อเกิดความสมดุลระหว่างความเร็วของของไหลกับน้ำหนักของลูกลอย เมื่อลูกลอยสูงขึ้นพื้นที่สำหรับให้ของไหลไหลผ่านก็จะมีมากขึ้น เป็นการรักษาค่าความดันตกคร่อมตัววัดให้คงที่ เนื่องจากความเร็วซึ่งเกิดจากของไหลกับอัตราการไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามกันดังนั้นตำแหน่งของลูกลอยก็สามารถที่จะบอกค่าอัตราการไหลได้



ภาพประกอบ 93 แสดงหลักการและโครงสร้างของโรตัมมิเตอร์

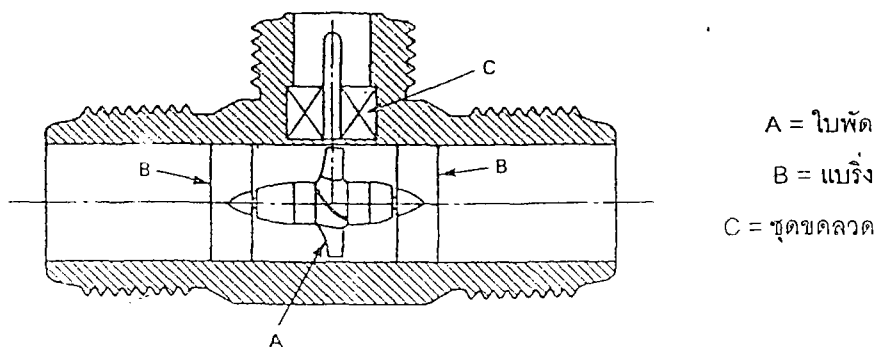
จากหลักการดังกล่าวในข้างต้นเราสามารถพิสูจน์ได้ด้วยสมการต่อไปนี้เมื่อกำหนดให้

|          |   |                                |
|----------|---|--------------------------------|
| $Q$      | = | อัตราการไหล                    |
| $C$      | = | ค่าคงที่                       |
| $A$      | = | พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลผ่าน |
| $a$      | = | พื้นที่หน้าตัดของลูกลอย        |
| $\rho$   | = | ค่าถ่วงจำเพาะของของไหล         |
| $\rho_f$ | = | ค่าถ่วงจำเพาะของลูกลอย         |

$$\begin{aligned}
 V_f &= \text{ปริมาตรของลูกลอย} \\
 g &= \text{ค่าแรงโน้มถ่วง} \\
 Q &= \frac{CA \sqrt{V_f(2g)(p_f - p_y)(a_p)}}{
 \end{aligned}$$

จากสมการเราจะพบว่าค่า Q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า A

4.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบใบพัดหมุน (Turbine Flow Meter) อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลชนิดนี้มีใบพัดซึ่งทำมุมเฉียงกับทิศทางการไหล ขณะที่ของไหลไหลจะทำให้ใบพัดหมุนไปตามอัตราและทิศทางการไหล ที่ตัวโครง (housing) มีชุดลวดที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำได้โดยจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนตำแหน่งของแกนที่อยู่ภายใน



A = ใบพัด  
 B = แบร์ริง  
 C = ชุดขดลวด

ภาพประกอบ 94 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบใบพัดหมุน

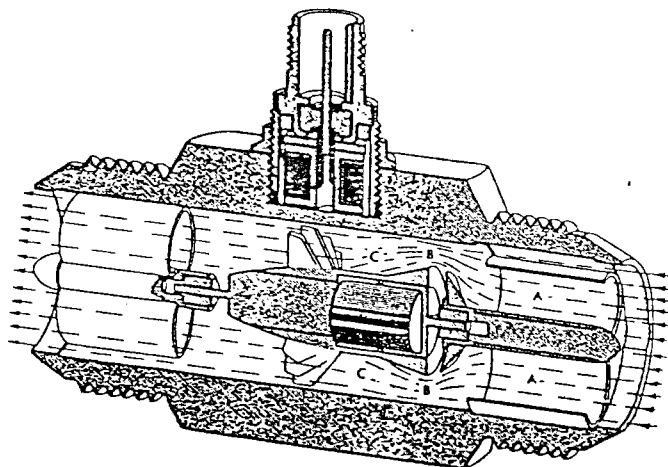
จากภาพประกอบ 94 เมื่อใบพัดหมุนผ่านแกนของชุดขดลวดจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแกนภายในชุดลวดซึ่งเป็นเหตุให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย หากเราต่อชุดขดลวดดังกล่าวนี้เข้ากับวงจรไฟฟ้าก็สามารถที่จะสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ขึ้นมาได้ โดยพัลส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามอัตราการไหลซึ่งเราสามารถกำหนดหน่วยวัดอัตราการไหลเป็น pulse/cc หรือ pulse/m<sup>3</sup> หรือหน่วยอื่นก็ได้ตามความต้องการและเหมาะสม

4.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบใช้หลักการไหลวน (Vortex Flow Meter) เมื่อของไหลไหลผ่านมิเตอร์ที่มีอุปกรณ์กีดขวางการไหลรูปตัว T (shedding element) จะทำให้ของไหลไหลวนด้านหลังของอุปกรณ์ดังกล่าว การเกิดกระแสไหลวนนี้ทำให้เราสามารถที่จะทราบความเร็วของการไหลของของไหลได้เนื่องจาก การเกิดกระแสไหลวนจะสร้างคลื่นความถี่ออกมา และคลื่นความถี่นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของการไหล ตัวเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์ ที่ใช้วัดคลื่นความถี่ดังกล่าวนี้มีอยู่หลายแบบด้วยกัน บางแบบใช้ผลึกเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ บางแบบใช้หลักการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกส์ (พรจิต ประทุมสุวรรณ. 2537 : 159 – 161)

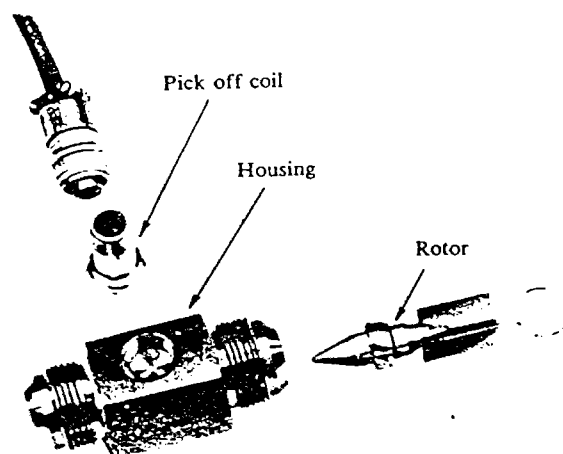
#### 4.3 เครื่องมือวัดการไหลแบบเทอร์ไบน์ แบบวอร์เทกซ์ และแบบ Swirlmeter

##### 4.3.1 เทอร์ไบน์มิเตอร์

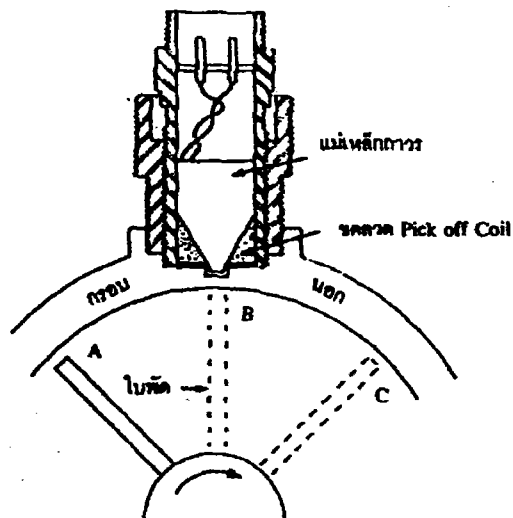
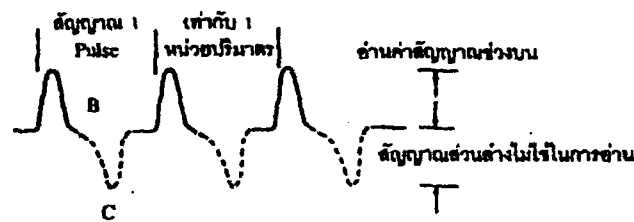
4.3.1.1 หลักการและโครงสร้างของเทอร์ไบน์มิเตอร์ มีโครงสร้างของตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์ มีใบพัดทำมุมเฉียงกับทิศทางการไหล ขณะที่ Fluid ไหลผ่านจะทำให้ใบพัดหมุนไปตามอัตราการไหลที่ตัว Housing มี Pick off Coil เป็นตัวรับรู้ความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ตามภาพประกอบ 95



ภาพประกอบ 95 (1) ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องมือวัด Flow แบบเทอร์ไบน์



ภาพประกอบ 95 (2) ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องมือวัด Flow แบบเทอร์ไบน์



ภาพประกอบ 96 การนับจำนวนรอบที่เทอร์ไบน์มิเตอร์หมุนไปใช้ Pick off Coil

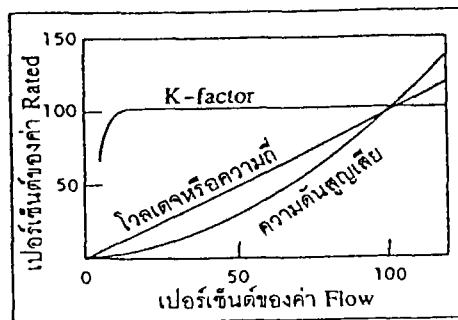
ภาพประกอบ 95 (2) แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเทอร์ไบน์มิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ Housing, Rotor และ Pick off Coil ตัวโรเตอร์จะถูกติดตั้งอยู่บนแกน (Shaft) โดยมีบอลเบริงทำหน้าที่ที่ช่วยลดแรงเสียดทานให้กับโรเตอร์ การนับจำนวนรอบที่เทอร์ไบน์มิเตอร์หมุนไปใช้ Pick off Coil ตามภาพประกอบ 96 เมื่อใบพัดของเทอร์ไบน์หมุนผ่าน Pick off Coil ที่พันอยู่บนแท่งแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ตามจังหวะ A, B และ C จะเกิดสัญญาณ Pulse ขึ้นตามรูปด้านบนซึ่งตามจังหวะ A และ C จะให้สัญญาณทิศทางกลับกัน จำนวนไซเคิลของ Pulse ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามอัตราการไหลสามารถกำหนดเป็น Pulse ต่อ CC หรือหน่วยอื่นได้ตามต้องการ ค่าของ Flow จากเทอร์ไบน์มิเตอร์ปกติจะได้เป็นค่าปริมาตร (Volumetric Flow) แต่ถ้าต้องการเป็นค่ามวล (Mass Flow) อาจทำได้โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{Pulse/มวล} = (\text{Pulse/ปริมาตร}) / (K * \text{ถพ.})$$

ข้อดีของเทอร์ไบน์มิเตอร์คือให้สัญญาณเอาต์พุตเป็น Pulse ซึ่งสามารถทำเป็นค่ารวม (Totalizing) ปริมาณของ Fluid ที่ไหลผ่านได้ และค่าสัญญาณนี้ก็เหมาะสำหรับระบบ Digital หรือ Digital Computer เพื่อใช้ในการควบคุมได้สะดวกด้วย ค่าต่ำสุดของเทอร์ไบน์มิเตอร์ถูกกำหนดขึ้นจากค่า Accuracy ที่ระบุโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 10 ของค่าสูงสุด ซึ่งหมายถึง มี Rangeability เท่ากับ 10 : 1 เทอร์ไบน์มิเตอร์แบบพิเศษที่ใช้ใน

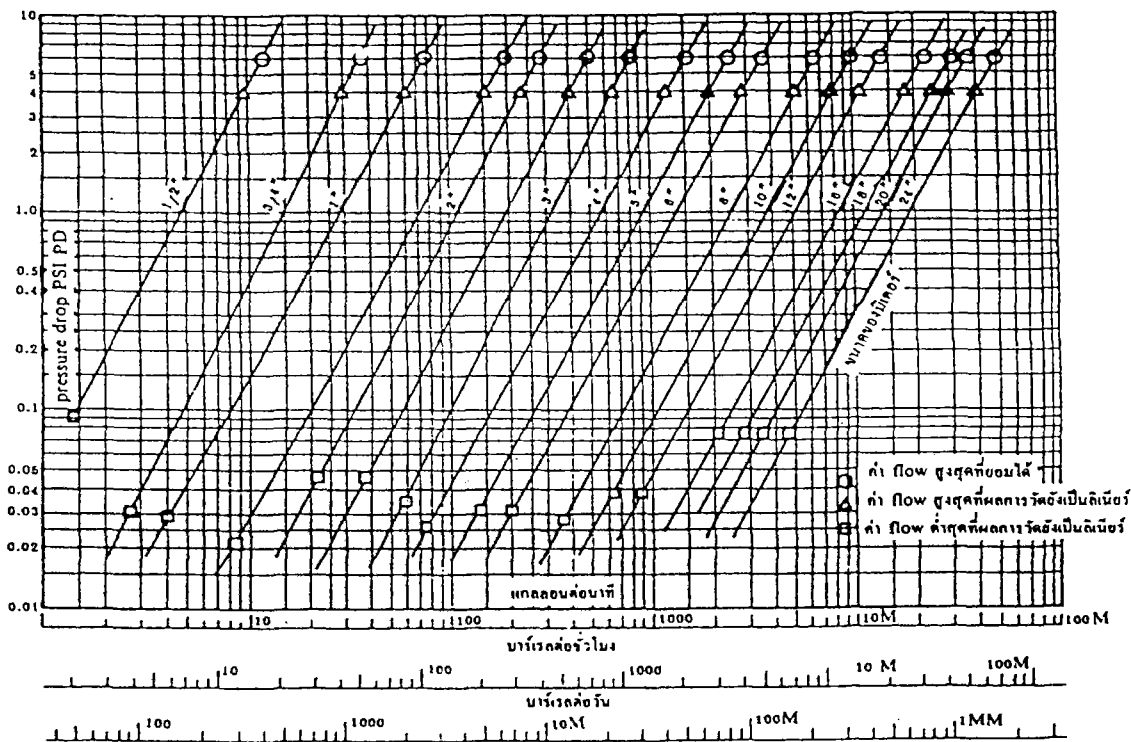
กิจการทหาร (Military Type) สามารถให้ Rangeability สูงถึง 100 : 1 ซึ่งหมายถึงความสามารถในการบอกค่าถูกต้องตั้งแต่ 1% ถึง 100% ของค่าสูงสุดที่เทอร์โมมิเตอร์ระบุ แต่ค่าโดยทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมประมาณ 10 : 1 ถึง 20 : 1 ขนาดของเทอร์โมมิเตอร์มีใช้งานตั้งแต่ ขนาด  $\frac{1}{8}$  นิ้ว ถึง 24 นิ้ว ซึ่งสามารถใช้วัด Flow ได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 50,000 แกลลอนต่อนาที ความดันที่ตกคร่อมตัวเทอร์โมมิเตอร์เป็นตัวประกอบในการเลือกใช้ด้วยประการหนึ่งตามภาพประกอบ 96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเทอร์โมมิเตอร์ อัตราการไหลและความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ที่ตัวเทอร์โมมิเตอร์

4.3.1.2 K-factor เป็นค่าสัมประสิทธิ์ประจำของเทอร์โมมิเตอร์มีหน่วยเป็น Pulse / หน่วยปริมาตร เช่น Pulse / แกลลอน ซึ่งบางบริษัทกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ตัวนี้ว่า Meter Factor มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร / Pulse โดยปกติ K-factor Curve เมื่อ Plot เทียบกับค่า Flow Rate จะเป็นดังภาพประกอบ 97



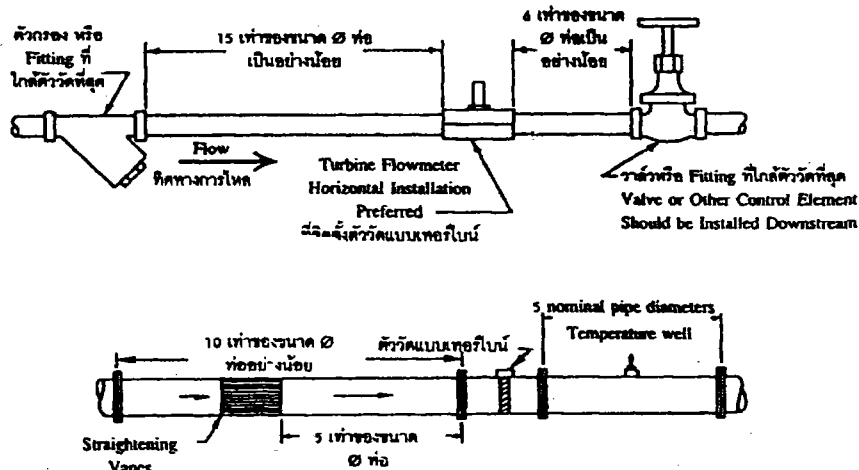
ภาพประกอบ 97 K-factor Curve เมื่อ Plot เทียบกับค่า Flow Rate

ในช่วง Flow Rate ต่างๆ ค่า K-factor จะต่ำและสูงเมื่อสูงถึง Flow Rate ค่าหนึ่ง ค่า K-factor นี้จะมีค่าคงที่โดยปกติประมาณร้อยละ 10 ขึ้นไป การใช้งานเทอร์โมมิเตอร์จะใช้งานในช่วงที่ค่า K-factor มีค่าคงที่หรืออยู่ในย่านที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในพิสัยเช่น  $\pm 0.5\%$  ค่า K-factor นี้เป็นค่าสำคัญ เพราะเมื่อมีค่าเปลี่ยนไปหมายถึงค่าที่วัดได้จะผิดไปด้วย ค่าเอาต์พุตโวลเตจและค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Flow Rate มีค่ามากขึ้นตามภาพประกอบ 97 การใช้งานที่ถูกต้องสามารถให้ Accuracy ได้ดีถึงร้อยละ 0.25 ของ Span และให้ค่า Repeatability ถึงร้อยละ 0.1 แต่การใช้งานของมันก็มีข้อจำกัด (Limitation) ถ้าค่าตัวแปรเหล่านี้จะถูกควบคุมให้อยู่ในย่านที่ระบุได้คือ ค่าความถี่จำเพาะ, ค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ และค่า Flow Rate ต้องสูงกว่าค่า Minimum ที่กำหนด



ภาพประกอบ 98 ค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ

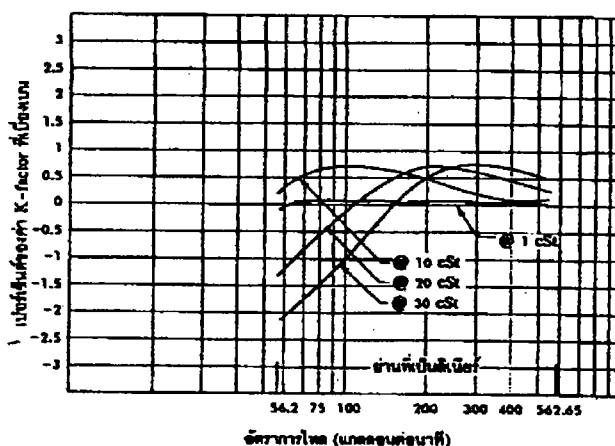
4.3.1.3 การติดตั้งและตรวจสอบเทอร์โบมิเตอร์ การติดตั้ง (Installation) ท่อก่อนเข้าตัวเทอร์โบมิเตอร์จะต้องตรงและมีขนาด  $\phi$  การติดตั้ง Valve, Fitting หรือ Reducer ในช่วงก่อนเข้าตัวเทอร์โบมิเตอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสน้ำวนของ Fluid ไหลวน (Turbulence) ซึ่งมีผลทำให้เทอร์โบมิเตอร์อ่านค่าได้มากกว่าความเป็นจริง แต่ถ้ามีความจำเป็นจะต้องลดขนาดความยาวตรงลง เนื่องจากมีพื้นที่จำกัดแล้วจะต้องใช้ Straightening Vanes เข้าช่วย ตัวกรอง (Strainer) ก็มีความสำคัญติดตั้งไว้สำหรับป้องกันสิ่งแปลกปลอมที่อาจปะปนมา เช่น Nut หรือลวดเชื่อมระหว่างการติดตั้งหรือซ่อมบำรุงอันจะทำให้ตัวโรเตอร์ของเทอร์โบมิเตอร์เสียหายได้ เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากเทอร์โบมิเตอร์มีลักษณะเป็น Pulse มีขนาดสัญญาณต่ำประมาณ 50 mV ถึง 10 V ดังนั้นสายต่อสัญญาณเข้าเครื่องคำนวณจะต้องได้รับการ Shield อย่างดีเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนภายนอก ในกรณีที่ต้องการวัดอุณหภูมิของ Fluid ที่ต้องการวัด Flow เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Flow ที่ถูกต้อง ควรติดตั้งไว้หลังความยาวตรงด้าน Down-stream เพราะอุณหภูมิของ Fluid จุดนี้เป็นจุดที่ถูกต้องมากที่สุด การติดตั้งบริเวณ Upstream จะทำให้เกิด Turbulence จึงไม่ควรมีท่อต่อแยกหรือตัววัดอย่างอื่นขวางอยู่เลย



ภาพประกอบ 99 การติดตั้งและตรวจสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์

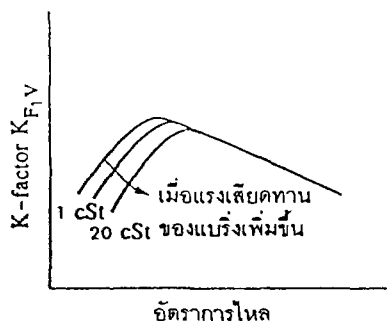
#### 4.3.1.4 ข้อควรระวัง เพื่อให้ผลการวัดที่ติควรรวังสิ่งต่อไปนี้

- ถ้ามีท่อ Bypass ตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์ Valve ของท่อ Bypass จะต้องปิดสนิทและไม่รั่ว มิฉะนั้นค่าที่วัดได้จะต่ำกว่าค่า Flow ที่แท้จริงและไม่สามารถทราบค่า Flow ที่แท้จริงได้
- ถ้าติดตั้งตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์ไว้ ในจุดที่สามารถเกิดการไหลย้อนกลับได้ (Backward Flow) เช่น ติดตั้งอยู่ในที่ต่ำ การไหลย้อนกลับจะทำให้ได้ค่า Flow มากขึ้น 2 ถึง 3 เท่า ทำให้ค่ารวมจาก Totalizer ที่ได้ผิดจากความเป็นจริงมาก
- เมื่อความหนืดของ Fluid เพิ่มขึ้น Friction ที่ใบพัดของเทอร์ไบน์มิเตอร์จะเพิ่มขึ้น จำนวนรอบในการหมุนของใบพัดลดลง นั่นคือค่า K-factor ในช่วง Flow Rate ต่ำๆ ลดลง ตามภาพประกอบ 100 เมื่อค่าความหนืด (Viscosity) เพิ่มขึ้นจาก 1 cSt ถึง 30 cSt ทำให้ K-factor เปลี่ยนไป (cSt คือ Centistroke) K-factor เปลี่ยนเนื่องจาก Viscosity เปลี่ยน



ภาพประกอบ 100 การเปลี่ยนของค่า K-factor เปลี่ยนเนื่องจาก Viscosity เปลี่ยน

- เมื่อ Bearing ของเทอร์ไบน์มีเตอร์หลวม ซึ่งอาจเกิดจากถูกใช้งานมานาน ความคล่องตัวในการหมุนของโรเตอร์ลดลง (Friction เพิ่มขึ้น) การหมุนของโรเตอร์ในช่วง Flow Rate ต่ำๆ ลดลง ทำให้ค่า K-factor ในช่วงนี้ลดลง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้น คือ ค่า Flow ที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ตามภาพประกอบ 101



ภาพประกอบ 101 ค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น

การตรวจสอบเทอร์ไบน์มีเตอร์ทางปฏิบัติ (Inspection) สามารถตรวจสอบค่า Friction ของแบริ่งได้ โดยการใช้อากาศพ่นผ่าน (Jet of Air) โดยจับเวลาตั้งแต่จุดที่หยุดส่งอากาศพ่นเข้าหาเทอร์ไบน์มีเตอร์จนถึงช่วงที่ใบพัดหยุดหมุน วิธีการนี้ถึงแม้ไม่สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงของค่า K-factor ได้ แต่ถ้าได้ทำไว้เป็นระยะๆ ตั้งแต่แรกก็สามารถใช้เปรียบเทียบกันได้ โดยระยะเวลาที่นับนี้จะน้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากมี Friction ของแบริ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถบอกระยะเวลาที่ควรเปลี่ยนแบริ่งได้ ข้อสำคัญคือ จะต้องไม่ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเกินขีดจำกัด (Overspeed) และสภาพของการทดลองทุกครั้งจะต้องเหมือนกันเพื่อให้เปรียบเทียบกันได้ (สมศักดิ์ กิตติวุฒิสรรค์, 2540 : 35-1 - 35-11)

## 5. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ขึ้นมาใช้ในประเทศไทย ซึ่งมีผู้วิจัยและพัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยขั้นตอนการวิจัยและการพัฒนาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับผู้วิจัยดังนี้

นายวันชัย มณีฉาย และคณะ (2542 : 59-60) เครื่องกำจัดกระดาษแบบถุงผ้ากรอง มีขั้นตอนและการศึกษาในการออกแบบเครื่องกำจัดฝุ่นว่าต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของฝุ่นที่จะกำจัด เช่น ลักษณะของฝุ่น การฟุ้งกระจายของฝุ่น ขนาดของฝุ่น ลักษณะทางกายภาพของฝุ่น ปริมาณของฝุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่น แต่ละชนิดจากการศึกษาและทดลองเครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง และการทำความสะอาดถุงผ้ากรองด้วยระบบใช้ลมเป่าสวนทาง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นได้ดีก็ต่อเมื่อ เป็นฝุ่นที่เกิดจากจุดกำเนิดที่แน่นอนและเป็นฝุ่นชนิดแห้งปราศจากความชื้นและน้ำมัน ในส่วนของการพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า  $5 \mu_c$  ประมาณร้อยละ 96
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นขนาดใหญ่กว่า  $5 \mu_c$  ประมาณร้อยละ 99
3. ควรพิจารณาเสียงของระบบเครื่องดูดฝุ่นไม่ให้เกิน 85 dB ตามกฎหมายควบคุมเสียงกำหนดไว้
4. ถ้าเสียงเกิน 85 dB ควรติดตั้งระบบเก็บเสียง (silenser)
5. ควรออกแบบระบบชุด (HOOD) ให้เหมาะสมกับแหล่งกำเนิดของฝุ่น
6. ควรออกแบบที่เก็บฝุ่นให้เหมาะสม

7. ถ้าเป็นเครื่องดูดฝุ่นในระบบงานอุตสาหกรรมที่มีจำนวนอนุภาคฝุ่นมาก ควรใช้ระบบโรตารี วาล์ว (Rotary valve) เพื่อระบายฝุ่นต่อเนื่อง

8. การทำความสะอาดฝุ่นในระบบถุงผ้ากรอง ควรคำนึงถึงประสิทธิภาพของถุงผ้ากรองที่มาตรฐานกำหนดไว้

9. ควรติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ (sensor)

นายธีระยุทธ สุขเสริมและคณะ (2539 : 40) เครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง มีขั้นตอนและการศึกษาในการออกแบบเครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง ในส่วนของการใช้อุปกรณ์การกำจัดฝุ่นชนิดต่างๆ จะมีการเลือกใช้ตามลักษณะของงานและฝุ่นที่เกิดขึ้น จากการทดลองเครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้ดี แต่จะใช้ได้สำหรับฝุ่นที่มีลักษณะแห้งปราศจากความชื้นและน้ำมัน ในส่วนของการพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละเอียดประมาณร้อยละ 95.8
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นหยาบประมาณร้อยละ 97.4
3. ผ้ากรองมีจำหน่ายน้อยจึงควรดำเนินการจัดหาไว้ล่วงหน้า
4. ในการออกแบบท่อสวมถึงผ้ากรองควรมีระยะห่างพอประมาณ เพื่อให้สะดวกในการติดตั้งและถอดถุงผ้ากรอง

5. ควรออกแบบให้ผนังห้องกรองฝุ่นถอดประกอบได้ เพื่อสะดวกในการติดตั้งถุงผ้ากรองและอุปกรณ์ภายใน

6. ควรมีการติดตั้งเกจวัดความดันเพื่อแสดงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น

นายวิลาศ จักรเพชร และ นายสาธิต ชุ่มชื่น (2539 : 75) การปรับปรุงเตาเผาขยะโดยการติดตั้งเครื่องดักฝุ่น มีขั้นตอนและการศึกษาในการออกแบบและการปรับปรุงเตาเผาขยะโดยการติดตั้งเครื่องดักฝุ่น จากการทดลองเครื่องดักฝุ่นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีประสิทธิภาพร้อยละ 95-99.2 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากในการดักฝุ่น เพราะฝุ่นที่ใช้ในการทดลองมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าฝุ่นทั่วไป เมื่อสารอนุภาคของฝุ่นมีความเข้มข้นมาก จะทำให้เครื่องดักฝุ่นมีประสิทธิภาพสูง และอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพสูง คือ ความหนาแน่นของสารอนุภาคนั้นมีมาก ในส่วนของการพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. นำเครื่องดักฝุ่นนี้ไปติดตั้งกับเครื่องจักรอื่น เช่น เครื่องเลื่อยไม้, เครื่องไสไม้ เป็นต้น หรือนำไปติดตั้งกับเตาเผาต่างๆ เช่น เตาเผาขยะหรือเตาชนิดอื่นๆ
2. เครื่องดักฝุ่นที่สร้างนี้เป็นเครื่องดักฝุ่นชนิดหนึ่ง ซึ่งมีหลายชนิดจึงต้องเลือกไปใช้งานให้เหมาะสมตามคุณสมบัติ และข้อดีข้อเสียของเครื่องดักฝุ่น
3. โครงสร้างที่รองรับตัวถังไซโคลนดักฝุ่น และพัดลมดูดอากาศนั้นเมื่อนำไปติดตั้งควรทำที่ยึดให้แข็งแรงเพราะ อาจจะมีลมมาได้เมื่อถูกลมพัดหรือคนกระแทก
4. ตัวถังเก็บฝุ่นควรทำให้มีขนาดใหญ่กว่านี้ เพื่อรองรับฝุ่นและการติดตั้งวาล์ว เช่น วาล์วแบบหมุน (rotary valve)

5. ระบบควบคุมมอเตอร์ ควรจะทำงานพร้อมกับเครื่องจักรอื่นที่จะติดตั้ง โดยต่อระบบร่วมกัน

นายพิรยุทธ เลิศเจริญพบ และคณะ (2540 : 67-68) ระบบบำบัดฝุ่นละออง มีขั้นตอนและการศึกษาในการออกแบบโครงการวิศวกรรมเรื่อง การลดมลภาวะของมลสารจำพวกฝุ่นละอองในอากาศได้แนวทางหนึ่ง โดยใช้หลักการทางทฤษฎีและการทดลองปฏิบัติจริง จึงสามารถออกแบบและสร้างระบบบำบัดฝุ่นละอองนี้ขึ้นมาทดลองใช้ในส่วนของการอากาศที่มีมลสารจำพวกฝุ่นละอองปะปนอยู่ ผ่านเข้ามาในกระบวนการของระบบบำบัดฝุ่นละออง (Suspended Particulate Cure System) โดยมีน้ำเป็นกระบวนการหนึ่ง (Wet scrubber)

system) ตัวกรองไอกรด ตัววัดปริมาณ เขม่า ฝุ่นละออง เรียกว่า แผ่น Diaphragm และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator system) โดยใช้หลักการ Cottrell's smoke precipitator) เมื่ออากาศได้ผ่านกระบวนการเหล่านี้ออกไป จะเป็นอากาศที่ค่อนข้างปราศจากมลสารประเภทฝุ่นละอองเกือบร้อยละ 100 กว่าได้มาก ในส่วนของการพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. ในการทดลองเปิดใช้ตัว Springer ในชุด Wet scrubber เมื่อฝอยละอองน้ำกระเซ็นติดผนังบ่อ Wet scrubber ด้านในถ้าการ seal แนวขอบผนังบ่อไม่ดีพอ จะทำให้น้ำที่กระเซ็นไหลซึมออกมาด้านนอกบ่อได้
2. ตัวกระบอก Water Filter อยู่ด้านล่างของชุด Wet scrubber เมื่อการ seal ไม่ดีพอตรงช่วง in-out ของกระบอก water filter ก็จะเจอปัญหาน้ำรั่วซึมได้
3. ระดับความสูงของน้ำในบ่อ Wet scrubber ไม่ควรสูงเกินจากปากบ่อ input ของ Air flow เพราะจะทำให้ความดัน (pressure) ของชุดระบบ Wet scrubber สูญเสียไปได้โดยใช้เหตุ
4. ในการป้อนเขม่าควันไฟ ฝุ่นละออง เข้าระบบบำบัดจากจุดกำเนิด การป้อนไม่ควรที่จะให้เกิดเป็นลักษณะเปลวไฟมากเกินไป เพราะอาจจะทำให้เกิดการลุกไหม้ที่อันตรายซึ่งเป็น input ของระบบ
5. ในการใช้งานเครื่องระบบบำบัดฝุ่นละออง การทดสอบควรนำมลสารที่มีมลภาวะทางอากาศที่เห็นได้ชัดเจน เช่น เขม่า ควันไฟ ฝุ่นละออง ที่ปะปนมากับควันไฟจากการเผาไหม้ เป็นต้น เมื่อป้อนผ่านเข้าสู่ระบบแล้วผลลัพธ์ที่ออกมาทาง output ของระบบจะเห็นข้อแตกต่างได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับ Input ของระบบที่ป้อนเข้าไป

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ได้นำมาออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ทฤษฎีเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบดักกรองและวิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออก แบบการไหลย้อนของก๊าซและฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ (Pulse Jet) โดยฉีดเป่าลมแบบพัลส์ เป็นจังหวะๆ ในทิศทางจากด้านในออกสู่ด้านนอกของไส้กรอง ทำให้ฝุ่นที่เกาะติดอยู่ด้านนอกหลุดออกจากไส้กรอง ด้วยหลักการคุณสมบัติของของไหล ความสามารถอัดตัวของก๊าซ ของไหลเคลื่อนที่ แรงและโมเมนตัมในของไหล ฉีดเป่าลมกระทำต่อมวลสาร (อนุภาคฝุ่น) ให้เคลื่อนที่ โดยใช้ลมที่มีความดัน ในท่อปิดและถึงสำรองให้มีปริมาณเพียงพอ เปิดให้ไหลผ่านท่อ และหัวฉีดด้วยความเร็ว เกิดแรงกระทำต่อมวลสาร การฉีดเป่าลมควบคุมโดยใช้วาล์วไคอะแฟลมและวาล์วไฟฟ้า ควบคุมโดยรับสัญญาณพัลส์ (Pulse) จากวงจรไฟฟ้าโปรแกรมอะเบลลอจิกคอนโทรลควบคุมส่งสัญญาณให้วาล์วไคอะแฟลม เปิด-ปิด เพื่อปล่อยลมจากถึงสำรอง เป็นจังหวะๆ ตามสัญญาณพัลส์ผ่านท่อหัวฉีดเข้าไปในไส้กรอง ซึ่งจับยึดไส้กรองให้หมุนรอบตัวเอง การยึดจับใช้หลักการจับยึดโดยใช้แบบแป้นเกลียว เนื่องจากไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบมาโดยเฉพาะต้องจับยึดโดยใช้แป้นเกลียว 4 ตัวอยู่ด้านบน หัวจับไส้กรองนี้ได้ออกแบบให้สามารถถ่ายแรงให้แก่ชิ้นงาน (ไส้กรอง) ด้วยเส้นทางที่สั้นที่สุด และชิ้นส่วนโลหะที่มีความแข็งแรง สร้างง่าย เหมาะกับชนิดของงาน แกนหมุนหัวจับ รองรับด้วยตลับลูกปืนกลม เพื่อลดแรงเสียดทานในการหมุนรอบตัว การหมุนรอบตัวเองของไส้กรองนี้ เพื่อให้ไส้กรองได้เปลี่ยนตำแหน่งจุดรับการฉีดลมให้อนุภาคฝุ่นที่เกาะอยู่ภายนอกหลุดออกโดยทั่วๆกัน ในทุกพื้นที่และการหมุนของหัวจับไส้กรองยังเป็นการใช้ทฤษฎีแรงหนีศูนย์กลาง เหวี่ยง สลัดอนุภาคฝุ่นที่เกาะด้านนอกออกอีกแรงหนึ่งด้วย การหมุนหัวจับและไส้กรองซึ่งมีน้ำหนักเบา การขับเคลื่อนออกแบบโดยใช้ล้อขับเคลื่อนสายพานแบบร่องลิ่มและมอเตอร์แบบสปลิทเฟดมอเตอร์ (SPLIT-PHASE MOTER) ขนาด 1/4 แรงม้า ใช้ไฟฟ้า 220 โวลท์ ซึ่งมีความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที มีราคาไม่แพงและมีขายตามร้านอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานที่ต้องการกำลังมาต่ำๆ

เมื่ออนุภาคฝุ่นได้รับการวิธีเขย่าอนุภาคฝุ่นออก แบบการไหลย้อนของก๊าซและฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ ข้างต้นก็จะฟุ้งกระจายเกิดเป็นมลพิษในอากาศ ดังนั้นจึงต้องใช้แนวทางการควบคุมอนุภาคแผลมลสารลักษณะที่สองคือ การกำจัดมลสารที่เกิดขึ้น ก่อนที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกทั่วไป โดยเลือกระบบการบำบัดอนุภาคฝุ่น แบบแรงโน้มถ่วงและไซโคลอนชนิดเจ็ตโคลน (Jetclone) ผสมกัน ด้านหน้ามีประตูทำด้วยพลาสติกใสเปิด-ปิดได้ไว้ใส่ใส่กรอง ถึงไซโคลนอนแบบโดยพิจารณาจากความแข็งแรง สะดวกในการใช้งาน ประหยัด สวยงาม และปลอดภัย

ดังนั้นจึงนำหลักการทั้งหมดมาทำการออกแบบ และสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในครั้งนี้ แล้วทำการหาประสิทธิภาพเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ โดยการวัดความเร็วของลมที่ไหลผ่านไส้กรองหลังจากการทำความสะอาดไส้กรองด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น และนำไส้กรองมาทำการวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (DIGITAL ANEMOMETER รุ่น DA 400) แล้วนำมาคำนวณค่าหาปริมาณของลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ โดยใช้สูตร  $V = Q/A$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย
2. เกณฑ์ข้อกำหนดของการสร้างเครื่องในการวิจัย
3. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

#### 1. การออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย

ออกแบบส่วนต่างๆของการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1.1 ออกแบบชุดไซโคลนในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
- 1.2 ออกแบบหัวจับหมุนไส้กรองในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
- 1.3 ออกแบบชุดควบคุมพีแอลซีในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

#### 2. เกณฑ์ข้อกำหนดของการสร้างเครื่องในการวิจัย

2.1 โดยการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ซึ่งมีส่วนประกอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 2.1.1 ชุดโครงสร้างและกักเก็บฝุ่นแบบไซโคลน ตามภาพประกอบในภาคผนวก ก.
- 2.1.2 ชุดหัวจับหมุนไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ หมุนด้วยความเร็ว 1450 รอบต่อนาที ส่งกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า เฟสเดียว 220 โวลต์ โดยผ่านพูลเลย์และสายพานแบบร่องลิ้น ตามภาพประกอบในภาคผนวก ก.
- 2.1.3 ชุดนิวเมติกส์ ควบคุมแรงดันในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ประกอบด้วยระบบที่กรองฝุ่น วาล์วควบคุมแรงดัน ถึงสำรองแรงดัน วาล์วเร่งระบาย และวาล์วไฟฟ้าควบคุมจังหวะการเป่าลม

2.1.4 ชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล (Program Logic Control, PLC) ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ใน 1 รอบการทำงานใช้เวลา 5 นาที

##### 2.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

2.2.1 ประชากรคือ ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในประเทศไทยดังต่อไปนี้

- 2.2.1.1 บริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์ )
- 2.2.1.2 บริษัทเอ เอ็ม ดี ประเทศไทย
- 2.2.1.3 บริษัทเอ็น เอส อิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพฯ (1993)
- 2.2.1.4 บริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด
- 2.2.1.5 บริษัทอัลฟาเทค เซมิคอนดักเตอร์ แพคเกจจิ้ง จำกัด
- 2.2.1.6 บริษัทอเกียร์ซิสเต็ม ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ไทย)

2.2.2 กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงคือ ไล้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ของบริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) โดยทำการสุ่มตัวอย่างจากการใช้งานของไล้กรองจำนวน 10 ตัวอย่าง ตลอดช่วงระยะเวลาการใช้งานของไล้กรอง 24 สัปดาห์ ที่กำหนดระยะเวลาการทำความสะอาดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

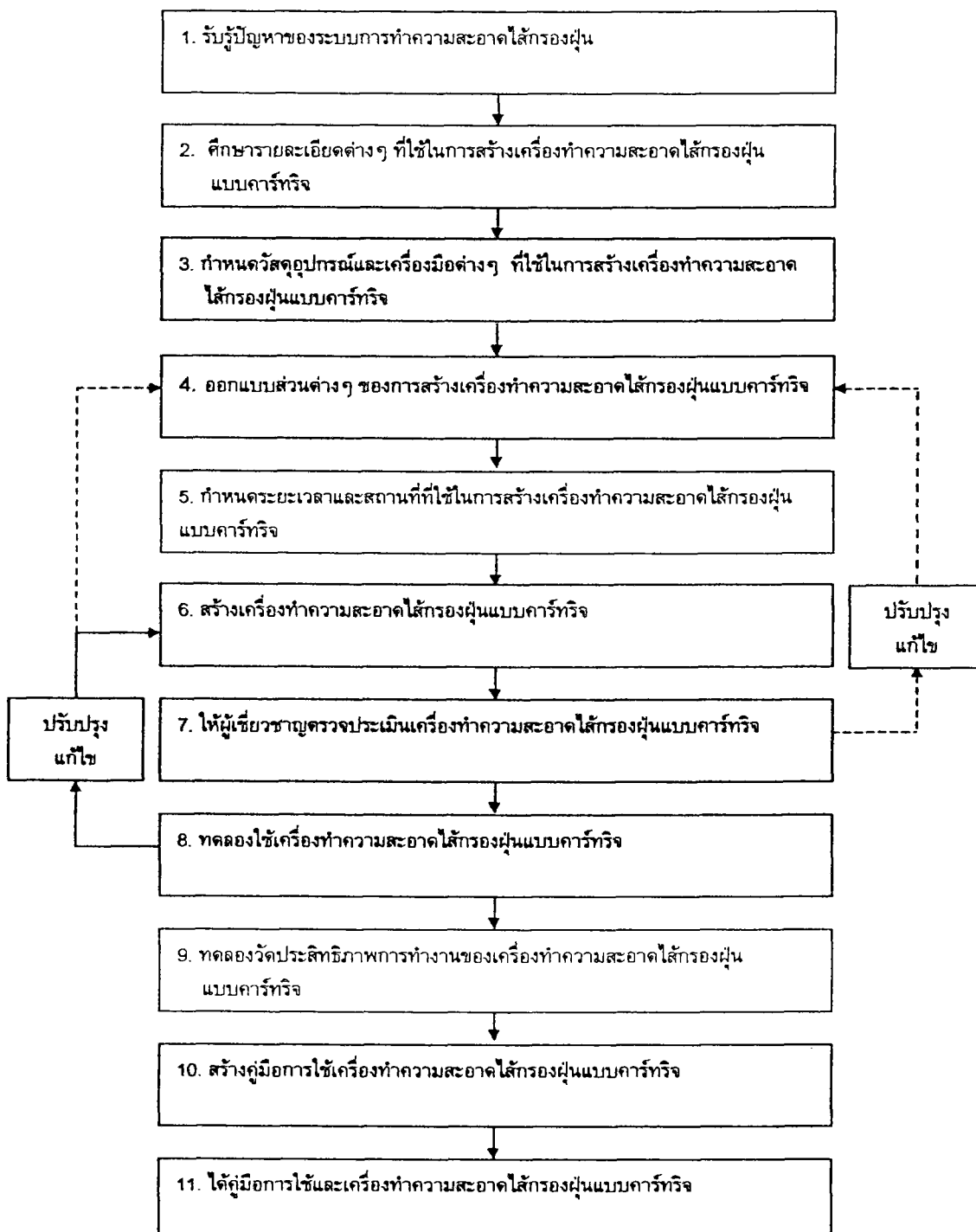
2.3 ตัวแปรที่ศึกษา ของการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไล้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ครั้งนี้คือ

2.3.1 ตัวแปรต้นคือ ไล้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้งานทุกๆ สัปดาห์ตลอดระยะเวลาการใช้งานของไล้กรองฝุ่น 24 สัปดาห์

2.3.2 ตัวแปรตามคือ ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไล้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้น ใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม ได้ค่าความเร็วลมที่ไหลผ่านไล้กรองต่อหน่วยเวลา แล้วนำมาคำนวณหาค่าปริมาตรของลมต่อหน่วยเวลา ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไล้กรองใหม่ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์

### 3. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้



3.1 พิจารณาปัญหาของระบบการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เนื่องจากผู้วิจัยทำหน้าที่รับผิดชอบในด้านการบริการและบำรุงรักษาเครื่องจักรในโรงงาน จากปัญหาที่เกิดขึ้นในการซ่อมบำรุงรักษา คือ การทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น โดยการใช้ลมเป่าที่ไส้กรองให้ฝุ่นผงที่เกาะติดอยู่ภายนอกให้หลุดออก การทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นในลักษณะนี้ ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและแตกตัวของฝุ่นละออง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและก่อให้เกิดมลพิษแก่สภาพแวดล้อมในการทำงานได้

3.2 ศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ค้นคว้าทฤษฎีและหลักการจากเอกสารตำราและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ และงานวิจัยเชิงทดลองทางด้านเครื่องกล, ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ และทางด้านมลภาวะต่างๆที่เกี่ยวข้อง

3.2.2 ศึกษาส่วนประกอบของชุดควบคุมในการทำงาน ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ใช้ชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม

3.2.3 คุณสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ ของชุดโซลินอยด์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทำงานที่เหมาะสมแล้วนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องที่สมบูรณ์

3.3 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ได้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีคุณภาพดี ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย

3.3.1 เครื่องมือ เป็นการกำหนดถึงเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและสร้าง และทำการตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ มีรายละเอียดดังรายการในตารางที่ 21 ภาคผนวก ข

3.3.2 วัสดุอุปกรณ์ เป็นการกำหนดวัสดุอุปกรณ์ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ มีรายละเอียดดังรายการในตารางที่ 22-24 ภาคผนวก ข.

3.4 ออกแบบส่วนต่างๆของการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

3.4.1 ออกแบบชุดโซลินอยด์ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

3.4.2 ออกแบบชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

3.5 กำหนดระยะเวลาและสถานที่ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

3.5.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบ และสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2544 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545

3.5.2 สถานที่ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์)

3.6 การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เพื่อการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่างๆ มีลำดับขั้นดังต่อไปนี้

3.6.1 สร้างชุดโครงสร้างและกักเก็บฝุ่นแบบโซลินอยด์ ตามภาพประกอบในภาคผนวก ก.

3.6.2 สร้างชุดหัวจับหมุนไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ หมุนด้วยความเร็ว 1450 รอบต่อนาที ส่งกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า เฟสเดียว 220 โวลต์ โดยผ่านพูลส์และสายพานแบบร่องลิ่ม ตามภาพประกอบในภาคผนวก ก.

3.6.3 สร้างชุดนิวเมติกส์ ควบคุมแรงดันในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ประกอบด้วยระบบที่กรองฝุ่น วาล์วควบคุมแรงดัน ดังสำรองแรงดัน วาล์วเร่งระบาย และวาล์วไฟฟ้าควบคุมจังหวะการเป่าลม

3.6.4 สร้างชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล (Program Logic Control, PLC) ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ใน 1 รอบการทำงานใช้เวลา 5 นาที

3.7 ตรวจสอบประเมินสมรรถนะ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ โดยสอบถามความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบประเมินสมรรถนะ มีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 ศึกษาวิธีการ ข้อมูลและกำหนดหัวข้อตรวจสอบประเมินสมรรถนะ ลักษณะต่างๆ ดังนี้

3.7.1.1 ลักษณะด้านวิศวกรรม

3.7.1.2 ลักษณะด้านความปลอดภัย

3.7.1.3 ลักษณะทางกายภาพ

3.7.1.3 ลักษณะการใช้งาน

3.7.1.5 ลักษณะการบำรุงรักษา

3.7.2 สร้างแบบประเมินความคิดเห็นเรื่องสมรรถนะ โดยการมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) กำหนดค่าคะแนนเป็น 5 ระดับ ตามวิธีของลิเคอร์ท (พวงรัตน์ ทวีรัตน์. 2538 : 117) มีรายละเอียดดังนี้

3.7.2.1 ระดับ 5 หมายถึง ผลการประเมินในระดับดีมาก

3.7.2.2 ระดับ 4 หมายถึง ผลการประเมินในระดับดี

3.7.2.3 ระดับ 3 หมายถึง ผลการประเมินในระดับพอใช้

3.7.2.4 ระดับ 2 หมายถึง ผลการประเมินในระดับต้องปรับปรุง

3.7.2.5 ระดับ 1 หมายถึง ผลการประเมินในระดับที่ใช้ไม่ได้

3.7.3 กำหนดเกณฑ์การประเมินสมรรถนะทั้ง 5 ด้านของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.7.3.1 ระดับคะแนนเฉลี่ยระหว่าง 4.50 – 5.00 แปลความได้ระดับ ดีมาก

3.7.3.2 ระดับคะแนนเฉลี่ยระหว่าง 3.50 – 4.49 แปลความได้ระดับ ดี

3.7.3.3 ระดับคะแนนเฉลี่ยระหว่าง 2.50 – 3.49 แปลความได้ระดับ พอใช้

3.7.3.4 ระดับคะแนนเฉลี่ยระหว่าง 1.50 – 2.49 แปลความได้ระดับ ต้องปรับปรุง

3.7.3.5 ระดับคะแนนเฉลี่ยระหว่าง 1.00 – 1.49 แปลความได้ระดับ ใช้ไม่ได้

3.7.4 นำแบบประเมินเสนอต่ออาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

3.7.5 ขอหนังสือแต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบแบบประเมินสมรรถนะ จากบัณฑิตวิทยาลัย ลงวันที่ 28 พฤศจิกายน 2544 จำนวน 2 คน โดยใช้คุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญคุณวุฒิระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หรือสาขาอุตสาหกรรมศึกษา หรือสาขาอุตสาหกรรม หรือสาขาที่เกี่ยวข้อง และมีประสบการณ์ในการทำงานไม่น้อยกว่า 10 ปี ดังนี้

3.7.6 นำแบบประเมินสมรรถนะ และหนังสือแต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ 2 คน เพื่อขอคำแนะนำและตรวจสอบความถูกต้องของแบบประเมินสมรรถนะอีกครั้ง

3.7.7 ได้แบบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ที่สร้างขึ้น แสดงในภาคผนวก ง.

3.7.8. ขออนุญาตแต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญ ในการตรวจประเมินสมรรถนะ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ที่สร้างขึ้น จากบัณฑิตวิทยาลัย ลงวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2545 จำนวน 5 คน โดยใช้คุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญคุณวุฒิระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หรือสาขาอุตสาหกรรมศึกษา หรือสาขาอุตสาหกรรม หรือสาขาที่เกี่ยวข้อง และมีประสบการณ์ในการทำงานไม่น้อยกว่า 5 ปี ดังนี้

3.7.8. ตรวจประเมินสมรรถนะเครื่องที่สร้างขึ้น วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2545 ที่บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) รวมผลการประเมินในตาราง 25 ในภาคผนวก จ.

3.8 ทดลองใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่บริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) ตามรายละเอียดและเกณฑ์ข้อกำหนดของการสร้างเครื่อง

3.9 ทดลองหาประสิทธิภาพของไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.9.1 ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์ที่สร้างขึ้น โดยนำมาทำความสะอาดไส้กรองที่ผ่านการใช้งานมาตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 - 24 สัปดาห์ละ 10 อัน แล้ววัดความเร็วของลมที่ไหลผ่านไส้กรองต่อหน่วยเวลา (V) แสดงในภาพประกอบ 103 คำนวณหาปริมาตรของลมที่ไหลผ่านไส้กรองต่อหน่วยเวลา (Q) โดยใช้สูตร  $Q = AV$  และหาค่าเฉลี่ย ด้วยสูตร  $\bar{X} = \sum X / N$  นำค่าที่ได้มาบันทึกค่าลงในตาราง 26 - 49 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 1 - 24 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้นแสดงในภาคผนวก จ.

3.9.2 สถิติที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพภาพของไส้กรองที่ผ่านการทำความสะอาด จากเครื่องที่สร้างขึ้นดังนี้

#### 3.9.2.1 การวัดด้วยสถิติร้อยละ

$$P = F/N (100)$$

P = ร้อยละ

F = ความถี่ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงให้เป็นร้อยละ

N = จำนวนความถี่ทั้งหมดหรือจำนวนประชากร

#### 3.9.2.2 การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง

$$\bar{X} = \sum X / N$$

$\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ย

$\sum X$  = ผลรวมของค่าทั้งหมด

N = จำนวนของประชากรในกลุ่ม

### 3.9.2.3 หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ใช้สูตร

$$S.D. = \sqrt{\frac{N \sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}}$$

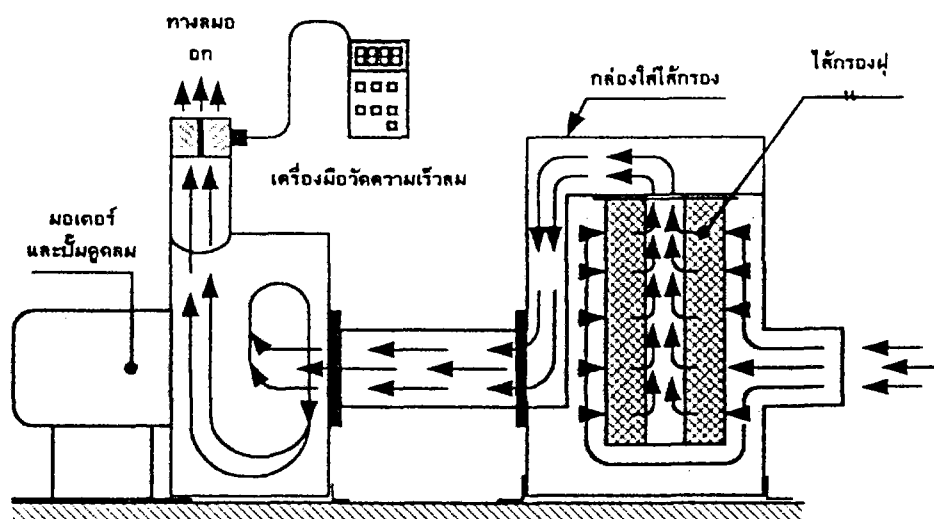
### 3.9.2.4 การคำนวณหาปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรอง

$$Q = VA$$

Q = อัตราไหล

V = ความเร็วเฉลี่ย

A = พื้นที่หน้าตัด



วิธีการวัดความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่น

ภาพประกอบ 103 การทดสอบหาค่ามาตรฐานของไส้กรองใหม่โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วของลม และการทดสอบหาประสิทธิภาพของไส้กรองที่ผ่านการทำความสะอาดจากเครื่องที่สร้างขึ้น

### 3.10 สร้างคู่มือการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ แสดงในภาคผนวก จ.

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ โดยการออกแบบกำหนดวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างตามรายละเอียดที่ได้ศึกษาค้นคว้าไว้ กำหนดระยะเวลาในการสร้าง ทดสอบปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของเครื่องซึ่งผลการออกแบบและการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ มีดังต่อไปนี้

1. ชุดโซลินอยด์ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ จากการทดลองใช้โดยการกักเก็บฝุ่นและทดสอบการฟุ้งกระจายของฝุ่นสามารถกักเก็บได้ตามแบบที่ได้กำหนดไว้ เป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

2. ชุดหัวจับหมุนไส้กรองของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ จากการทดลองโดยให้หัวจับ จับยึดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ซึ่งสามารถจับยึดและหมุนได้ตามแบบที่ได้กำหนดไว้ เป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

3. ชุดนิวเมติกส์ ควบคุมแรงดันในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ซึ่งสามารถเป่าลมทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ได้ตามแบบที่ได้กำหนดไว้ เป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

4. ชุดโปรแกรมลอจิกคอนโทรล (Program Logic Control, PLC) ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องได้ตามแบบที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

#### ผลการทดลองใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

การทดสอบการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ทดสอบหาค่ามาตรฐานของไส้กรองแบบคาร์ทริดจ์ใหม่ โดยนำไส้กรองไปใส่เครื่องวัดความเร็วลมและวัดค่าความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรองต่อหน่วยเวลา (V) จำนวน 31 อัน ดังแสดงในภาพประกอบ 110 แล้วบันทึกผลการทดสอบที่ได้ลงในตาราง และคำนวณหาค่าปริมาตรของลมต่อหน่วยเวลา (Q) โดยใช้สูตร  $Q = AV$  แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สูตร  $\bar{X} = \sum X / N$  บันทึกผลการทดสอบที่ได้ลงในตาราง

ตาราง 18 การทดสอบหาค่าปริมาตรของลมมาตรฐานที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 75.8                         | 12.172                          |
| 2                      | 75.6                         | 12.140                          |
| 3                      | 75.7                         | 12.156                          |
| 4                      | 75.9                         | 12.188                          |
| 5                      | 75.7                         | 12.156                          |
| 6                      | 75.8                         | 12.172                          |

ตาราง (ต่อ)

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 7                      | 75.9                         | 12.188                          |
| 8                      | 75.4                         | 12.108                          |
| 9                      | 75.5                         | 12.124                          |
| 10                     | 75.8                         | 12.172                          |
| 11                     | 75.6                         | 12.140                          |
| 12                     | 75.4                         | 12.108                          |
| 13                     | 75.5                         | 12.124                          |
| 14                     | 75.4                         | 12.108                          |
| 15                     | 75.7                         | 12.156                          |
| 16                     | 75.8                         | 12.172                          |
| 17                     | 75.9                         | 12.188                          |
| 18                     | 75.6                         | 12.140                          |
| 19                     | 75.7                         | 12.156                          |
| 20                     | 75.6                         | 12.140                          |
| 21                     | 75.9                         | 12.188                          |
| 22                     | 75.8                         | 12.172                          |
| 23                     | 75.4                         | 12.108                          |
| 24                     | 75.6                         | 12.140                          |
| 25                     | 75.9                         | 12.188                          |
| 26                     | 75.7                         | 12.156                          |
| 27                     | 75.6                         | 12.140                          |
| 28                     | 75.8                         | 12.172                          |
| 29                     | 75.8                         | 12.172                          |
| 30                     | 75.9                         | 12.188                          |
| 31                     | 75.5                         | 12.124                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 75.68                        | 12.154                          |
| S.D.                   |                              | 0.0268                          |

จากตาราง 18 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบ หาค่าปริมาตรของลมมาตรฐานที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ได้ค่าเฉลี่ยความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรอง (V) เท่ากับ 75.68 ม./ วินาที และได้ค่า  $\bar{X}$  ปริมาตรลม (Q) ที่ไหลผ่านไส้กรองใหม่เท่ากับ 12.154 ลบ.ม./ นาที และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.0268 ใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบหาประสิทธิภาพเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่สร้างขึ้น

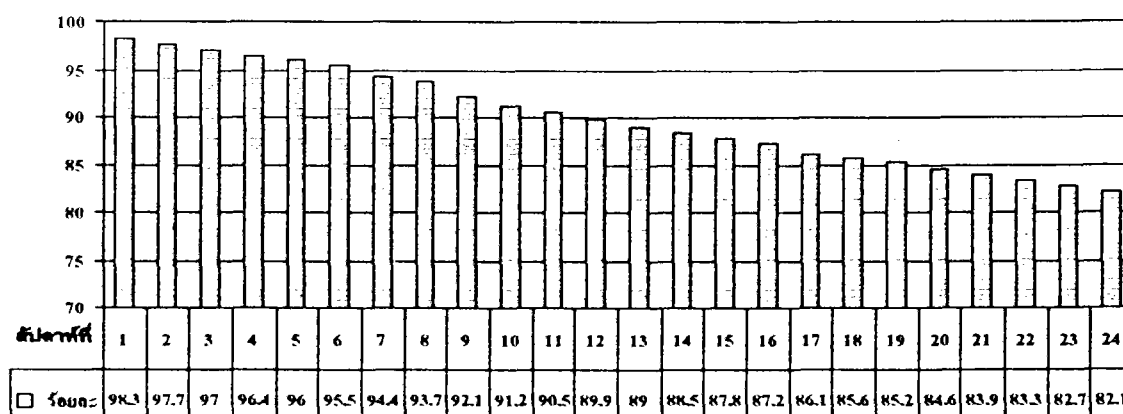
2. ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองแบบคาร์ทริกที่สร้างขึ้น โดยนำค่าเฉลี่ยปริมาณของลมที่ไหลผ่านไส้กรอง (Q) ที่ได้จากการทำความสะอาดไส้กรองผ่านการใช้งานมาตั้งแต่ สัปดาห์ที่ 1 - 24 จากตาราง 25 – 48 ในภาคผนวก จ. มาคำนวณหาตัวร้อยละโดยเทียบกับค่าปริมาณลมที่ ไหลผ่านไส้กรองใหม่ ด้วยสูตร  $P = F/N (100)$  บันทึกค่าลงในตาราง

ตาราง 19 การทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก

| การทำความสะอาดไส้กรอง<br>สัปดาห์ที่ | ปริมาณของลม (Q)<br>ลบ.ม / นาที | ร้อยละ |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------|
| 1                                   | 11.943                         | 98.263 |
| 2                                   | 11.869                         | 97.655 |
| 3                                   | 11.792                         | 97.021 |
| 4                                   | 11.711                         | 96.355 |
| 5                                   | 11.662                         | 95.951 |
| 6                                   | 11.612                         | 95.540 |
| 7                                   | 11.474                         | 94.405 |
| 8                                   | 11.393                         | 93.738 |
| 9                                   | 11.192                         | 92.085 |
| 10                                  | 11.082                         | 91.180 |
| 11                                  | 11.004                         | 90.530 |
| 12                                  | 10.937                         | 89.870 |
| 13                                  | 10.857                         | 89.330 |
| 14                                  | 10.751                         | 88.460 |
| 15                                  | 10.674                         | 87.820 |
| 16                                  | 10.600                         | 87.220 |
| 17                                  | 10.462                         | 86.078 |
| 18                                  | 10.406                         | 85.617 |
| 19                                  | 10.356                         | 85.206 |
| 20                                  | 10.284                         | 84.614 |
| 21                                  | 10.200                         | 83.922 |
| 22                                  | 10.123                         | 83.289 |
| 23                                  | 10.051                         | 82.697 |
| 24                                  | 9.983                          | 82.137 |

สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบหาประสิทธิภาพเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกที่สร้างขึ้น จากตาราง 19 ได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกที่ผ่านการใช้งาน 1 - 24 สัปดาห์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ คือ สัปดาห์ที่ 1 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.943 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 98.263 สัปดาห์ที่ 2 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.869 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 97.655 สัปดาห์ที่ 3 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.792 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 97.021 สัปดาห์ที่ 4 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.711 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 96.355 สัปดาห์ที่ 5 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.662 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 95.951 สัปดาห์ที่ 6 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.612 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 95.540 สัปดาห์ที่ 7 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.474 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 94.405 สัปดาห์ที่ 8 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.393 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 93.738 สัปดาห์ที่ 9 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.192 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 92.085 สัปดาห์ที่ 10 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.082 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 91.180 สัปดาห์ที่ 11 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 11.004 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 90.53 สัปดาห์ที่ 12 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.937 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 89.87 สัปดาห์ที่ 13 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.857 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 88.33 สัปดาห์ที่ 14 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.751 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 88.46 สัปดาห์ที่ 15 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.674 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 87.82 สัปดาห์ที่ 16 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.600 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 87.22 สัปดาห์ที่ 17 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.462 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 86.078 สัปดาห์ที่ 18 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.406 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 85.617 สัปดาห์ที่ 19 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.356 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 85.206 สัปดาห์ที่ 20 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.824 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 84.614 สัปดาห์ที่ 21 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.20 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 83.922 สัปดาห์ที่ 22 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.123 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 83.289 สัปดาห์ที่ 23 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 10.051 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 82.697 สัปดาห์ที่ 24 ปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองได้ 9.983 ลบ.ม / นาที คิดเป็นร้อยละ 82.137

ข้อมูลของการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก โดยทำความสะอาดไส้กรองที่ผ่านการใช้งาน 1 - 24 สัปดาห์ สามารถนำค่าร้อยละของปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองมาแสดงเป็นกราฟแท่งดังภาพประกอบที่ 104



ภาพประกอบ 104 กราฟแสดงค่าร้อยละของปริมาณลมที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นสัปดาห์ที่ 1 - 24

3. ผลการประเมินสมรรถนะและข้อเสนอแนะ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ โดยผู้เชี่ยวชาญที่แต่งตั้งขึ้น 5 คน ตรวจสอบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สร้างขึ้นมีรายละเอียดในภาคผนวก ค. และผลสรุปการประเมินสมรรถนะทั้ง 5 ด้าน มีในตารางดังนี้

ตาราง 20 การประเมินสมรรถนะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

| รายละเอียดสมรรถนะ          | ค่าเฉลี่ย | แปลความ |
|----------------------------|-----------|---------|
| 1. ลักษณะด้านวิศวกรรม      | 3.9       | ดี      |
| 2. ลักษณะด้านความปลอดภัย   | 4.5       | ดีมาก   |
| 3. ลักษณะด้านกายภาพ        | 4.1       | ดี      |
| 4. ลักษณะด้านการใช้งาน     | 4.0       | ดี      |
| 5. ลักษณะด้านการบำรุงรักษา | 4.5       | ดีมาก   |
| รวม                        | 4.2       | ดี      |

สามารถวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางของการประเมินสมรรถนะ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สร้างขึ้น โดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 คน เป็นผู้ประเมินทั้ง 5 ด้านที่ใช้ในการประเมินตามแบบประเมินดังนี้คือ ลักษณะทางด้านวิศวกรรมอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดี  $\bar{X} = 3.9$  ลักษณะทางด้านความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดีมาก  $\bar{X} = 4.5$  ลักษณะทางด้านกายภาพอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดี  $\bar{X} = 4.1$  ลักษณะทางด้านการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดี  $\bar{X} = 4.0$  ลักษณะทางด้านการบำรุงรักษาอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดีมาก  $\bar{X} = 4.5$  จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 คน ที่ทำการประเมินในภาพรวมของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์ระดับ ดี  $\bar{X} = 4.2$

4. ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะจากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์มีรายละเอียดดังนี้

- 4.1 ชุดถังไซโคลนอนควรเป็นทรงกระบอกกลมและมีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสม
- 4.2 ควรติดตั้งท่อเป่าลมที่ด้านบนของไส้กรองฝุ่น และเป่าลมในชั้นสุดท้าย เพื่อไม่ให้ฝุ่นย้อนกลับไปติดไส้กรองอีก
- 4.3 ภายในไซโคลนอนควรออกแบบไม่ให้มีส่วนที่เป็นชอกซึ่งเป็นแหล่งตกค้างของฝุ่น
- 4.4 ควรมีการทดสอบหาค่าความเร็วที่เหมาะสมในการหมุนไส้กรอง ถ้าหากใช้รอบต่ำกว่านี้ ก็จะสามารถลดขนาดของมอเตอร์ลงได้
- 4.5 ยังขาดการคำนวณหาขนาดถึงเก็บสำรองแรงดันที่เหมาะสมและติดตั้งเกจวัดลม เพื่อให้มั่นใจว่าการเป่าลมแต่ละจังหวะมีแรงดันและปริมาณลมเพียงพอ
- 4.6 ควรมีการทดสอบหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไส้กรอง โดยใช้แรงดันลมที่แตกต่างกัน
- 4.7 ควรมีรายละเอียดข้อมูลจำเพาะของเครื่องว่าใช้ไฟฟ้าและลมเท่าไร
- 4.8 ควรปรับปรุงระบบป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่บ้านประตูให้ดีกว่านี้

4.9 ควรทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไส้กรอง ที่เวลาแตกต่างกันเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

4.10 ควรปรับปรุงงานด้านความละเอียดของการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เรียบร้อย

4.11 ควรพัฒนาหัวจับยึดให้สามารถใช้กับไส้กรองชนิดอื่นๆ ได้

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

#### ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

#### ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่สามารถนำไปใช้ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นในเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ได้เครื่องจักรมาช่วยลดอันตรายทดแทนการทำงานของพนักงาน
2. ช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์
3. เป็นการพัฒนาคุณภาพชีวิตของพนักงาน
4. ได้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ที่สามารถทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นได้

#### คุณภาพสม่ำเสมอ

ได้คู่มือการใช้งานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

#### สมมติฐานในการวิจัย

เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพในการทำสะอาดได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์

#### การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ครั้งนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการดังต่อไปนี้

1. พิจารณาปัญหาของระบบการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เนื่องจากผู้วิจัยทำหน้าที่รับผิดชอบในด้านการบริการและบำรุงรักษาเครื่องจักรในโรงงาน จากปัญหาที่เกิดขึ้นของการบำรุงรักษาคือวิธีการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น โดยการใช้ลมเป่าที่ไส้กรองให้ฝุ่นผงที่เกาะติดอยู่ภายนอกหลุดออก การทำความสะอาดไส้กรองในลักษณะนี้ ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและแตกตัวของฝุ่นละอองและมลสาร เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและก่อให้เกิดมลภาวะแก่สภาพแวดล้อมได้

2. ศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ และงานวิจัยเชิงทดลองทางด้านเครื่องกล, ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์และทางด้านมลภาวะต่างๆที่เกี่ยวข้อง

3. กำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนประกอบต่างๆ ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีคุณภาพดีและราคาถูกหาซื้อได้ง่าย
4. ทำการออกแบบส่วนต่างๆของการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด
  - 3.1 ออกแบบชุดไซโคลนในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด
  - 3.2 ออกแบบหัวจับไส้กรองในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด
  - 3.3 ออกแบบชุดควบคุมพีแอลซีในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด
5. กำหนดระยะเวลาและสถานที่ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
  - 5.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2544 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545
  - 5.2 สถานที่ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง ที่บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์(ไทยแลนด์) 303 ถนนแจ้งวัฒนะ ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร
6. การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด เพื่อการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ตามแบบที่กำหนด
7. ตรวจสอบประเมินสมรรถนะ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ตรวจสอบประเมินสมรรถนะตามแบบประเมินที่กำหนด
8. ทดลองใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่บริษัทฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ไทยแลนด์) 303 ถนนแจ้งวัฒนะ ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร ตามเกณฑ์ข้อกำหนดของการสร้าง
9. ทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดที่สร้างขึ้น

#### การวิเคราะห์ข้อมูล

นำเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด มาทำการทดสอบหาประสิทธิภาพ โดยทำความสะอาดไส้กรองที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไส้กรองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. นำไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดที่ผ่านการใช้งาน 1-24 สัปดาห์ๆละ 10 อัน มาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดที่สร้างขึ้น แล้ววัดความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรองฝุ่น นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาตรลมเฉลี่ยที่ไหลผ่านไส้กรองก่อนหน้า และหาค่าร้อยละโดยเปรียบเทียบกับไส้กรองใหม่
2. การประเมินสมรรถนะเครื่องและข้อเสนอแนะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด โดยใช้คุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญ 5 คน ประเมินสมรรถนะทั้ง 5 ด้าน คือ ลักษณะทางด้านวิศวกรรม ลักษณะทางด้านความปลอดภัย ลักษณะทางด้านกายภาพ ลักษณะทางด้านการใช้งาน ลักษณะทางด้านการบำรุงรักษา และในภาพรวมของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด

## สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูล การทดสอบหาประสิทธิภาพของไส้กรอง โดยการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นไปตามขอบเขตของการวิจัยซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ออกแบบและสร้างส่วนต่างๆ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ประกอบด้วยชุดถังกักเก็บฝุ่นแบบไซโคลน หัวจับไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกและชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง โดยใช้พีแอลซี ตามที่ได้ศึกษาและกำหนดไว้ในการทำวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก

2. ทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นที่ผ่านการใช้งาน 1 – 24 สัปดาห์ วัดความเร็วลมที่ไหลผ่านไส้กรอง (V) คำนวณหาปริมาตรของลมที่ไหลผ่านไส้กรอง (Q) เท่ากับ 11.943 – 9.983 ลบ.ม. / นาที คิดเป็นร้อยละ 98.26 – 82.14 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาดไส้กรองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์ได้ตามสมมติฐานการวิจัย

3. การประเมินสมรรถนะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก โดยผู้เชี่ยวชาญ 5 คน ประเมินสมรรถนะทั้ง 5 ด้าน คือ ลักษณะทางด้านวิศวกรรม อยู่ในเกณฑ์ระดับดี ( $\bar{X} = 3.9$ ) ลักษณะทางด้านความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก ( $\bar{X} = 4.5$ ) ลักษณะทางด้านกายภาพอยู่ในเกณฑ์ระดับดี ( $\bar{X} = 4.1$ ) ลักษณะด้านการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ระดับดี ( $\bar{X} = 4.0$ ) ลักษณะทางด้านบำรุงรักษาอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก ( $\bar{X} = 4.5$ ) โดยภาพรวมของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกอยู่ในเกณฑ์ระดับดี ( $\bar{X} = 4.2$ )

## อภิปรายผล

จากการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นำมาอภิปรายผลมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบและสร้างชุดถังกักเก็บฝุ่นแบบไซโคลนของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ตามแบบที่ได้กำหนดไว้โดยทดสอบการฟุ้งกระจายของฝุ่นสามารถกักเก็บได้ สอดคล้องกับทฤษฎีการกักเก็บอนุภาคฝุ่น แบบมัลติ-ไซโคลน และแบบเจ็คโคลน ซึ่งเป็นชุดไซโคลนที่สามารถกักเก็บอนุภาคฝุ่นที่ละเอียดของศิริกัลยา สุวจิตานนท์และคณะ (2542) หัวจับยึดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกซึ่งสามารถจับยึดได้ ตามหลักทฤษฎีการจับยึดชิ้นงานแบบใช้แม่เหล็กของ ดำรง ไชยธีรานุวัตร (2537 : 186 – 187) กล่าวว่าแรงที่ใช้จับชิ้นงานจะเฉลี่ยไว้บนตำแหน่งจับงานต่างๆ แม่แบบจับงานควรออกแบบสร้างง่ายใช้เวลาจับงานน้อย รูปแบบการจับงานสามารถจำแนกได้สองลักษณะได้สองลักษณะคือ การจับแบบตายตัวด้วยแรงกล้ามเนื้อมนุษย์ และการจับแบบหุ่นตัวชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก เป็นไปตามแบบแผนภูมิเวลา (Timing Diagram) ที่ได้ออกแบบไว้ ใช้ชุด พีแอลซี ควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง ตามแบบแผนภูมิเวลาที่ได้กำหนดไว้สามารถทำงานได้ เพราะผู้วิจัยได้เลือกใช้คุณสมบัติการทำงานของพีแอลซี สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐพงศ์ พุตระกูล, วีรพล ถาวรานันต์ และ เอกลักษณ์ เจตต์เกษภูวธรรม (2539) ห้องอัตโนมัติควบคุมด้วย พีแอลซี. ซึ่งเป็นระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรง

การทดสอบหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ใช้กับเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ได้สร้างขึ้น มาทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ โดยวัดความเร็วเฉลี่ยของลมที่ไหลผ่านไส้กรองมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที และคำนวณหาปริมาตรของลมเฉลี่ยที่ไหลผ่านไส้กรองมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อนาที ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของไส้กรองใหม่ตลอดทั้ง 24 สัปดาห์ตามข้อกำหนดการบำรุงรักษาเครื่องจักร ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ เพราะผู้วิจัยได้นำทฤษฎีเรื่อง มลภาวะทางอากาศของ คิริกัลยา สุวจิตานนท์และคณะ (2542). ทฤษฎีและวิธีการเขย่าอนุภาคฝุ่นออกโดยการไหลย้อนกลับของก๊าซ กล่าวว่า วิธีการทำงานทั้งแบบดูดอากาศผ่านและแบบเป่าลมผ่าน ถ้าทำซ้ำซากจะได้ผลมาก แบบที่เพียงแต่หยุดการไหลของก๊าซสกรปรกเพื่ออัดความดันก๊าซให้ชั้นฝุ่นหลุดก็มี การไหลย้อนกลับของก๊าซเฉพาะแห่งและการฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ กล่าวว่า วิธีการทำงานมีทั้งแบบพ่นก๊าซเฉพาะแห่ง จากด้านนอกเข้าด้านในถุง โดยการเคลื่อนขึ้นลงของหัวฉีดรูปวงแหวน และแบบไส้กรองแอสอากาศที่สั่น (vibrating Flow) ให้ ครึ่งละ 1 ถึงหลายถุงในระหว่างที่กรอง ฉีดพ่นอากาศแบบพัลส์เป็นห้วง ๆ จากด้านบนภายในเครื่อง ในทิศทางจากด้านในออกเข้าด้านนอกของถุง แสดงในตารางที่ 8 วิธีการเขย่าอนุภาคฝุ่นออกแบบต่างๆ และสอดคล้องกับงานวิจัยของนายธีระยุทธ สุขเสริมและคณะ (2539 : 40) เครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง มีขั้นตอนและการศึกษาในการออกแบบเครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง ในส่วนของการใช้อุปกรณ์การกำจัดฝุ่นชนิดต่างๆ จะมีการเลือกใช้ตามลักษณะของงานและฝุ่นที่เกิดขึ้น จากการทดลองเครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้ดี แต่จะใช้ได้สำหรับฝุ่นที่มีลักษณะแห้งปราศจากความชื้นและน้ำมัน ผสมเข้าการหมุนรอบตัวเองของหัวจับไส้กรองฝุ่น เพื่อให้ไส้กรองได้เลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งจุดที่ถูกเป่าลมให้อนุภาคฝุ่นที่เกาะอยู่ภายนอกหลุดออกโดยทั่วกันในทุกพื้นที่ การหมุนด้วยความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาทีของหัวจับไส้กรองยังเป็นการใช้ทฤษฎีแรงหนีศูนย์กลาง เหวี่ยงสลัดอนุภาคฝุ่นที่เกาะด้านนอกออกอีกแรงหนึ่งด้วย โดยใช้ทฤษฎีแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) กฎข้อที่สามของนิวตัน การที่มีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางกระทำกับวัตถุ วัตถุจะออกแรงโต้ตอบมีขนาดเท่ากัน ในทิศทางตรงกันข้าม แรงนี้มีทิศทางออกไปตรงกันข้ามกับศูนย์กลางเราเรียกว่า “แรงหนีศูนย์กลาง” (อดุลย์ คนยัง. ม.ป.ป.101-103) และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิลาศ จักรเพชร และ สาธิต ชุ่มชื่น (2539 : 75) การปรับปรุงเตาเผาขยะโดยการติดตั้งเครื่องดักฝุ่น มีขั้นตอนการศึกษาในการออกแบบและการปรับปรุงเตาเผาขยะโดยการติดตั้งเครื่องดักฝุ่นจาก การทดลองเครื่องดักฝุ่นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีประสิทธิภาพที่สูงมากในการดักฝุ่น เพราะฝุ่นที่ใช้ในการทดลองมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าฝุ่นทั่วไป เมื่อสารอนุภาคของฝุ่นมีความเข้มข้นมาก ทำให้เครื่องดักฝุ่นให้ประสิทธิภาพสูง

การประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ได้สร้างขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญใช้หลักการประเมิน โดยการมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) กำหนดค่าคะแนนเป็น 5 ระดับ ตามวิธีการประเมินของลิเคอร์ท์ โดยพวงรัตน์ ทวีรัตน์.(2538 : 117) นำมาประเมินสมรรถนะเครื่อง ในลักษณะด้านวิศวกรรม สอดคล้องกับเอกสารของวรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน.(2534) การออกแบบเครื่องจักรกล คือ การออกแบบเครื่องจักรกลเป็นศิลปะของการพัฒนาทางด้านความคิดใหม่ๆ ทางด้านจักรกลแล้วแสดงความคิดเห็นลงบนกระดาษ เครื่องจักรกลใหม่ๆ เกิดขึ้นได้ก็เพราะความต้องการใช้งานและเกิดจากมโนภาพที่ได้จากบุคคล ผู้ออกแบบจะเริ่มต้นด้วยการขีดเขียนและสร้างสรรค์แบบใหม่ๆ ขึ้นมา แม้ว่าการสร้างเครื่องจักรกลชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อน จะต้องใช้ความคิดโดยอาศัยพื้นความรู้ต่างๆ อาศัยประสบการณ์ มีความรู้ทางด้านกรรมวิธีการผลิตต่างๆ บางครั้งการออกแบบชิ้นส่วนชิ้นหนึ่งอาจเหมาะกับโรงงานผลิตแห่งหนึ่ง แต่ไม่เหมาะกับโรงงานอีกแห่งหนึ่งก็ได้ ในลักษณะด้านความปลอดภัยสอดคล้องกับเอกสารของ วิฑูรย์ ลิ้มโชคดี.(2536) วิศวกรรมความปลอดภัย คือเรื่องการป้องกันอันตรายจากเครื่องจักรกลที่ใช้อุปกรณ์ป้องกัน (GUARD)

เพื่อป้องกันไม่ให้ง่ายแก่ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับส่วนที่เคลื่อนไหวและมีลักษณะที่เป็นอันตรายของเครื่องจักร ในลักษณะทางกายภาพสอดคล้องกับเอกสารของ บรรเลง ศรีนิล และกิตติ นิงสานนท์.(2530) การคำนวณ และออกแบบเครื่องกล คือการออกแบบเครื่องกลนอกจากความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรม ความสะดวกในการใช้งานและยังต้องคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานด้วย ในลักษณะการใช้งาน สอดคล้องกับเอกสารของ มานพ ดันตระบัณฑิต.(2540) เทคนิคการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลในโรงงาน คือการออกแบบชิ้นส่วนหรือเครื่องจักรกลให้ใช้ได้ดีนั้น ประการแรกจะต้องมีการรวบรวมวิธีแก้ปัญหาในการออกแบบได้หลายรูปแบบและมีขั้นตอน การปฏิบัติที่น้อย ลักษณะการบำรุงรักษาโดยรวมสอดคล้องกับเอกสารของ บรรเลง ศรีนิล และกิตติ นิงสานนท์ มีความแข็งแรงของเครื่องวัสดุอุปกรณ์ส่วนมากเป็นโลหะใช้งานได้ทนทาน มีความเหมาะสมของการจัดวาง ประกอบอุปกรณ์ต่างๆ และลักษณะการบำรุงรักษาได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สกล นันทศรีวิวัฒน์.(2543) การพัฒนาเครื่องหยอดขนมทองหยอด คือวัสดุที่นำมาสร้างเครื่องหาได้ง่าย ราคาไม่แพง และการบำรุงรักษา ก่อนการปฏิบัติงานทำได้สะดวก อยู่ในเกณฑ์

### ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การศึกษาค้นคว้านี้สมบูรณ์ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนะเพื่อให้เกิดแนวคิดใหม่ๆ ในการศึกษาค้นคว้า ในอนาคตดังนี้

1. การออกแบบชุดถังไซโคลนควรให้มีขนาดและสัดส่วนของถังกับกรวยที่ตกตะกอนฝุ่นให้ถูกต้อง และโครงสร้างภายในให้เป็นพื้นที่เรียบที่สุดจะทำให้ไม่มีฝุ่นตกค้างอยู่
2. การใช้วัสดุ โลหะในการสร้างชุดถังไซโคลนนี้ควรใช้เหล็กไร้สนิมขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร เพื่อลดการใช้โครงสร้างในส่วนของเสา คาน แล้วเป็นการประหยัดลดขั้นตอนการกลึงอีกด้วย
3. การเชื่อมประกอบสร้างถังไซโคลนควรใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิดผสมกับก๊าซอาร์กอน (เครื่องเชื่อม ดีก) เพื่อลดการขยายตัวของโลหะที่เกิดจากความร้อนขณะเชื่อมด้วยแก๊สทำให้เกิดการบิดงอ ไม่ได้รูปทรง ขาดความเรียบร้อยสวยงาม
4. ควรมีการคำนวณหาขนาดของถังสำรองแรงดันลมที่ถูกต้อง ออกแบบรูปทรงให้ถูกต้อง และเพิ่ม เกจวัดลมแสดงค่าแรงดันลมที่ใช้ในการเป่าทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น

### ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

1. ควรศึกษาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง เวลา รวม จังหวะเวลาในการเป่าลมทำความสะอาด อัตราความเร็วรอบในการหมุน แรงดันลมที่ใช้เป่า รูปแบบและขนาดรูของหัวฉีดลมของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นที่สร้างขึ้น
2. ควรศึกษาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น โดยเพิ่มหัวฉีดลมเป่าที่ด้านนอกของ ไส้กรองฝุ่น
3. ควรศึกษาและออกแบบหัวจับให้สามารถใช้กับไส้กรองชนิดและขนาดอื่นๆได้

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). *วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์
- จักรพงษ์ ศิริทรัพย์. รัชพันธุ์ วัลยา เมฆไกรสร และศรัณย์ช สุธสุวรรณ. (2540). *การออกแบบและสร้างเครื่องกรองแบบอัดความดันแบบเพทสียี่เหลี่ยม*. ปรินุณยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี).
- นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร
- ชาญ อดุลงาน. (2533). *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ : 23 บัณฑิตเซอร์
- ธีระยุทธ สุขเสริม, ประกิจ อีสริยานนท์ และประพันธ์ ธีพล. (2539). *เครื่องกำจัดฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง*. ปรินุณยานิพนธ์ อส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล). นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร
- ณรงค์ ตันชีวงศ์. (2542). *ระบบ PLC*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: บริษัท ประชาชน จำกัด
- ณัฐพงษ์ พุตระกูล, วีรพล ถาวรานนท์ และ เอกลักษณ์ เจตต์เจษฎาธรรม. (2539). *ห้องอัดโน้ตควบคุมด้วย พีแอลซี*. ปรินุณยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า). นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร
- ดำรง ไชยธีรานุวัตร. (2537). *การขึ้นรูปโลหะ*. กรุงเทพฯ : บริษัท เอช เอ็น กรุ๊ป จำกัด
- พรจิต ประทุมสุวรรณ. (2537). *เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์
- พวงรัตน์ ทวีรัตน์. *วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- พิชิต สุขเจริญพงษ์. (2538). *การจัดการวิศวกรรมการผลิต*. กรุงเทพฯ : บริษัท เอช เอ็น กรุ๊ป จำกัด
- พริยัท เลิศเจริญพบ, สุริยา จันทร์มหา, ฤทัย เหล็กเรืองฤทธิ์ และ ณรงค์ โธ่บุตตา. (2540). *ระบบบำบัดฝุ่นละออง*. ปรินุณยานิพนธ์ อส.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า). นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร
- ฝ่ายวิศวกรรมบริษัทโปรเซล จำกัด. (2535). *74 เรื่องน่ารู้เทคนิคเครื่องกล*. กรุงเทพฯ : หจก. นำอักษรการพิมพ์
- มานพ ตันตระกูล. (2539). *ความรู้พื้นฐานช่างอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ : บริษัท ประชาชน จำกัด
- วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และ ธีระ เกรอต. (2536). *มลภาวะทางอากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วริทธิ์ อังภากรณ์และชาญ อดุลงาน. (2534). *การออกแบบเครื่องจักรกล*. เล่ม 1 พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : หจก. เอช-เอน การพิมพ์
- วิลาศ จักรเพชร และ สาธิต ชุ่มชื่น. (2539). *การปรับปรุงเตาขยะโดยการติดตั้งเครื่องดักฝุ่น*. ปรินุณยานิพนธ์ อส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล). นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร
- วันชัย มณีฉาย, สมบูรณ์ มณีฉาย และสมมิตร สังข์สินเลิศ. (2542). *เครื่องกำจัดฝุ่นกระดาษแบบผ้ากรอง*. ปรินุณยานิพนธ์ อส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล).นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. ถ่ายเอกสาร

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคนอื่นๆ. (2542). *มลภาวะทางอากาศ*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สกล นันทศรีวัฒน์. (2543) *การพัฒนาเครื่องหยอดทองหยอด*. ปริญญาโท กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา).

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ : กรุงเทพฯ ถ่ายเอกสาร

สมศักดิ์ กิรติวุฒิสเรษฐ์. (2540). *หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ : บริษัท

ส.เอเซียเพรส จำกัด

Intel. 2000 Packaging Databook. (2000)

Philips Semiconductors Thailand. (2000) 900-0051. Manufacturing Bunny Suite Control. Thailand : Document Control Center.

Philips Semiconductors Thailand. (1999) 900-0047. Manufacturing Bunny Suite Control. Thailand : Document Control Center.

Philips Semiconductors Thailand (2000) SNW-FQ-612B-01. Visual and Mechanical Inspection Standard For Integrated Circuit Devices, Plastic Surface Mount Devices. Thailand : Document Control Center.

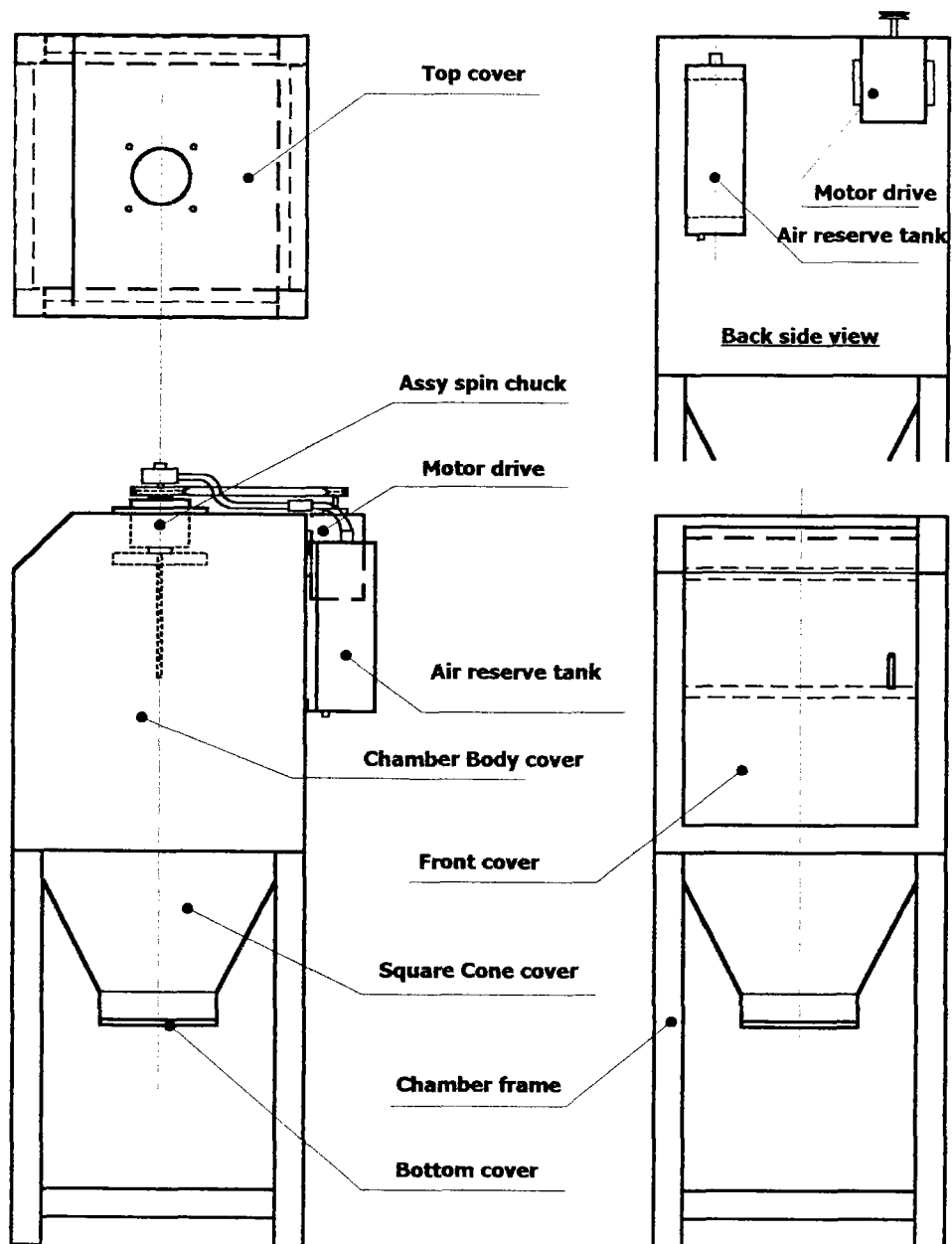
Philips Semiconductors Thailand (1999) JZV-FZ/856-9004. CPT GENL ENVT Overall environment Aspects. Thailand : Document Control Center.

[www.moste.go.th/news\\_event/npr/feb43/01feb43.html](http://www.moste.go.th/news_event/npr/feb43/01feb43.html)

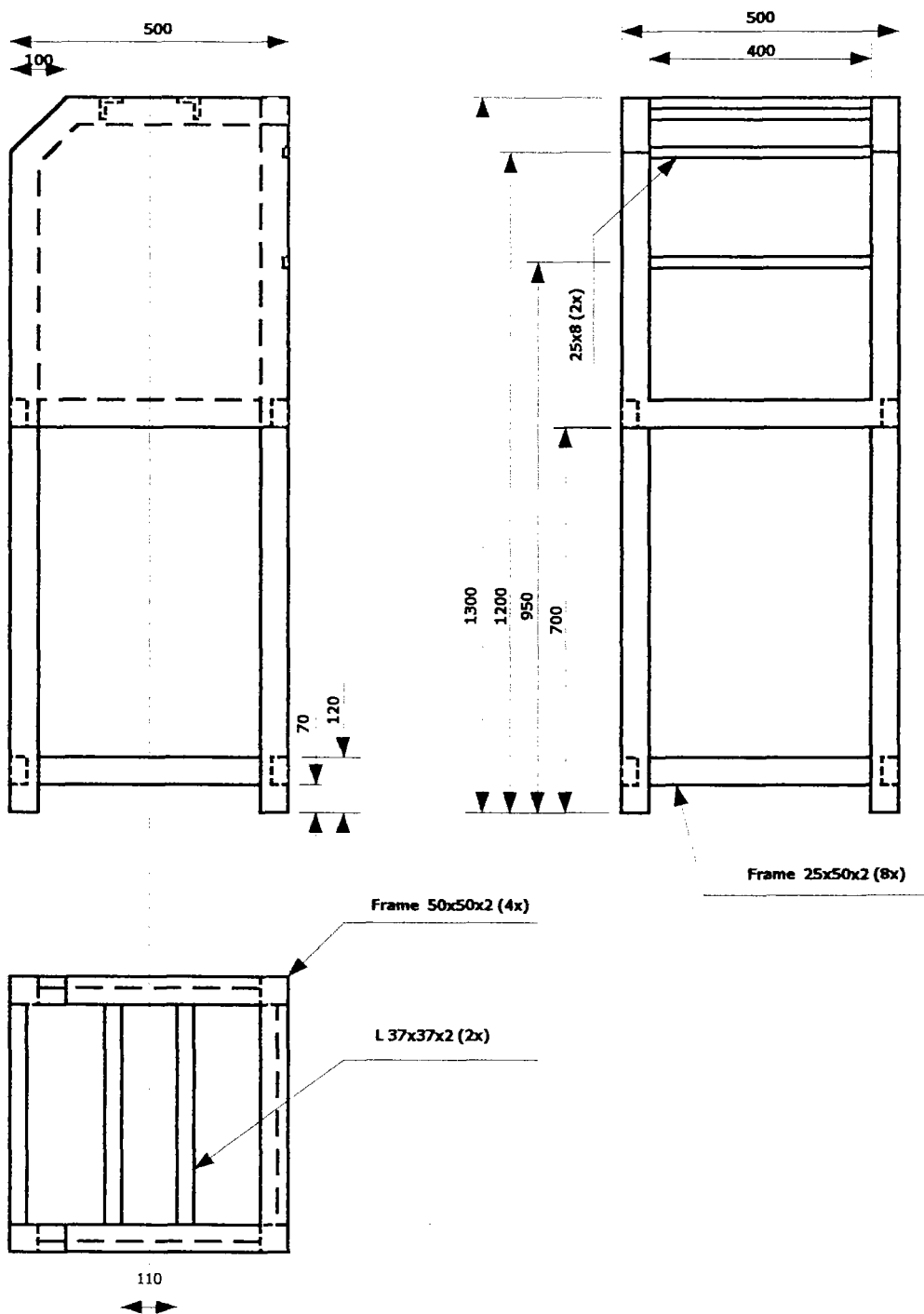
ภาพผนวก

ภาพผนวก ก

ภาพเขียนแบบเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

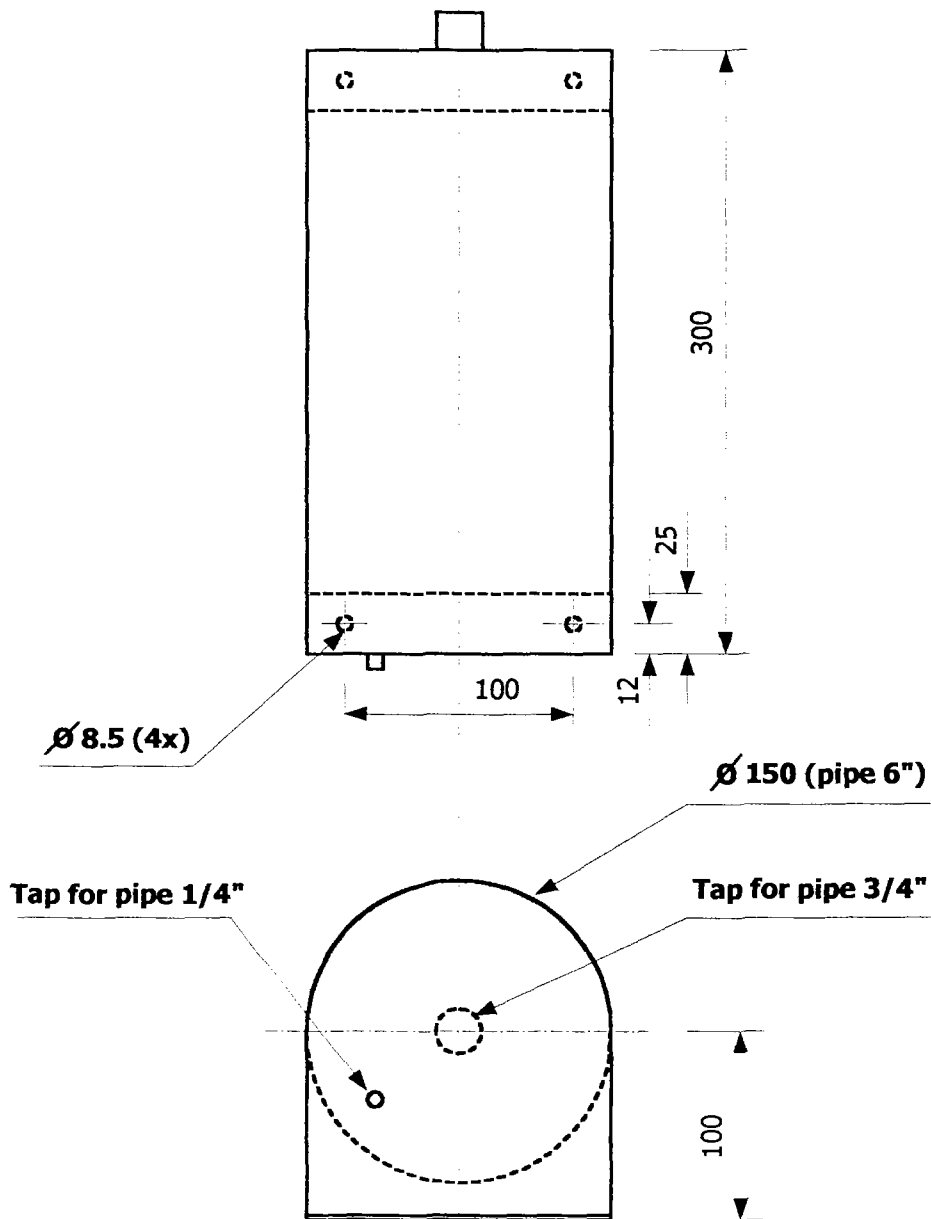


|                                   |                  |                    |            |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Assembly drawing | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | N/A              | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Chamchai B.      | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |                  |                    |            |

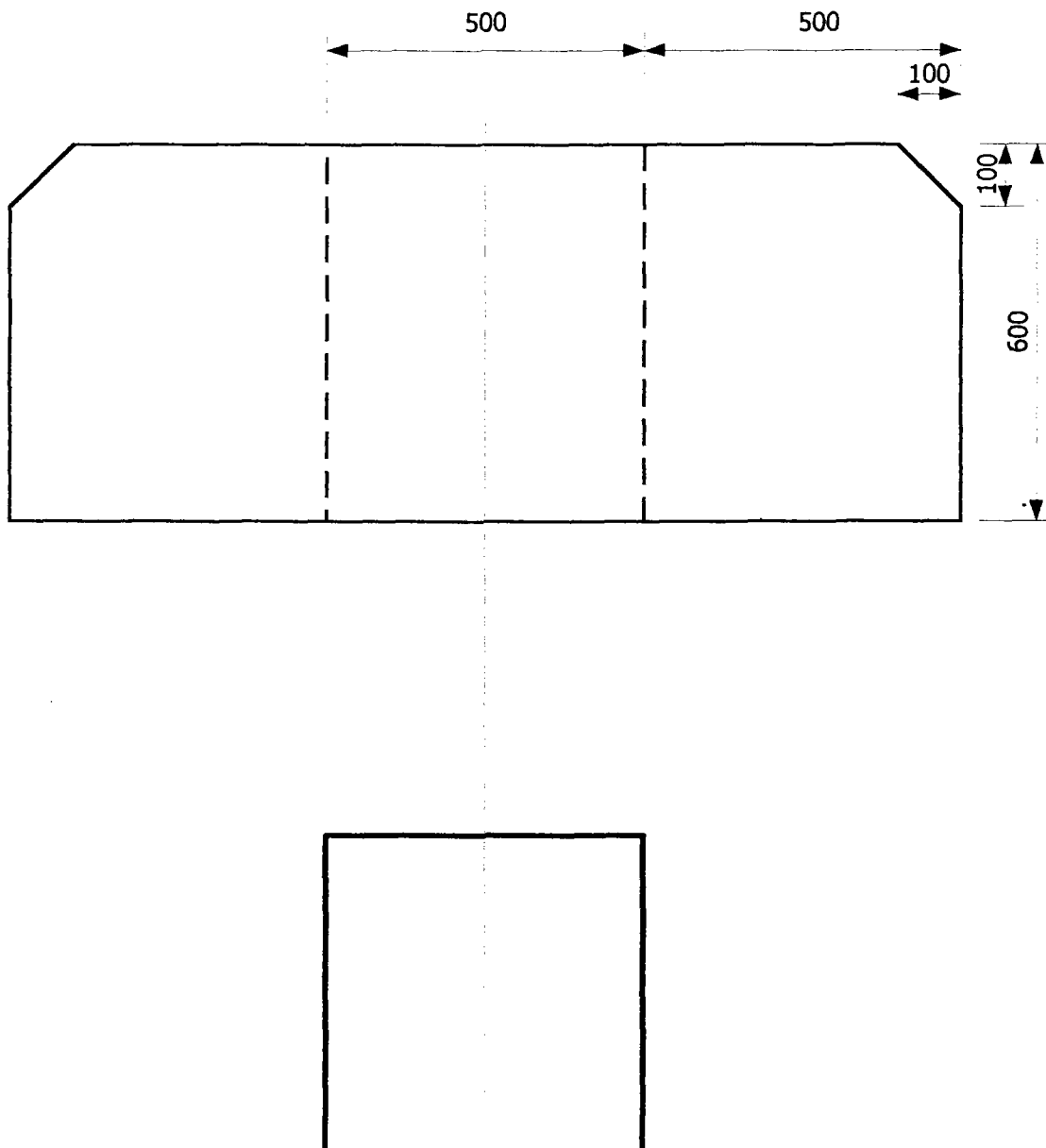


unit : mm.

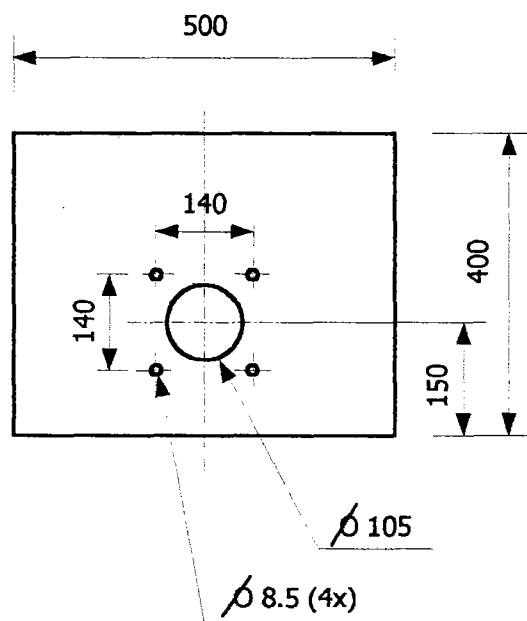
|                                   |               |                    |            |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Chamber frame | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | Steel boxes   | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B.  | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |               |                    |            |



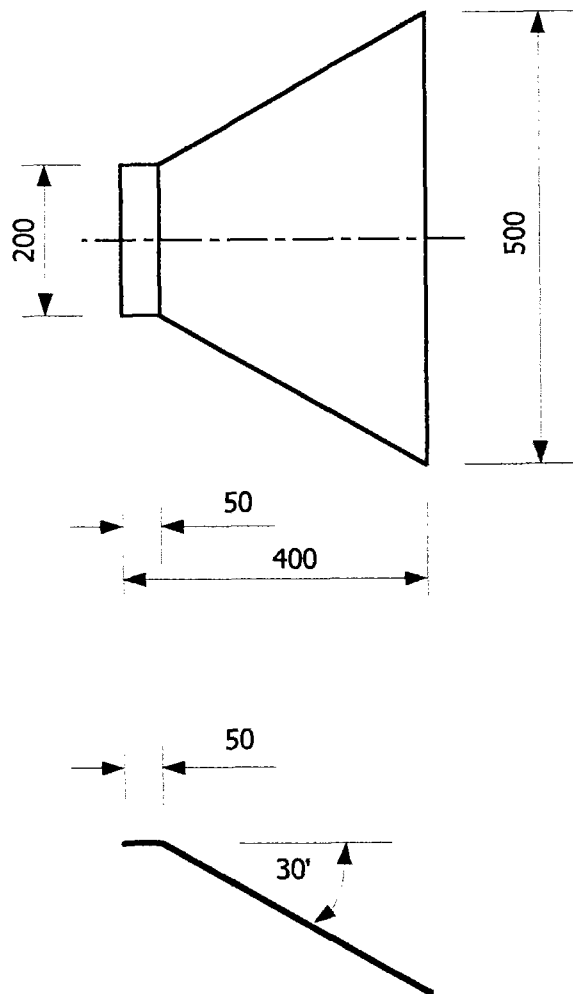
|                                   |                  |                    |            |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Air reserve tank | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                   | Steel pipe       | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B.     | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |                  |                    |            |



|                                    |                     |                    |            |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Chamber body cover  | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Steel sheet 1.0 mm. | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.        | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                     |                    |            |

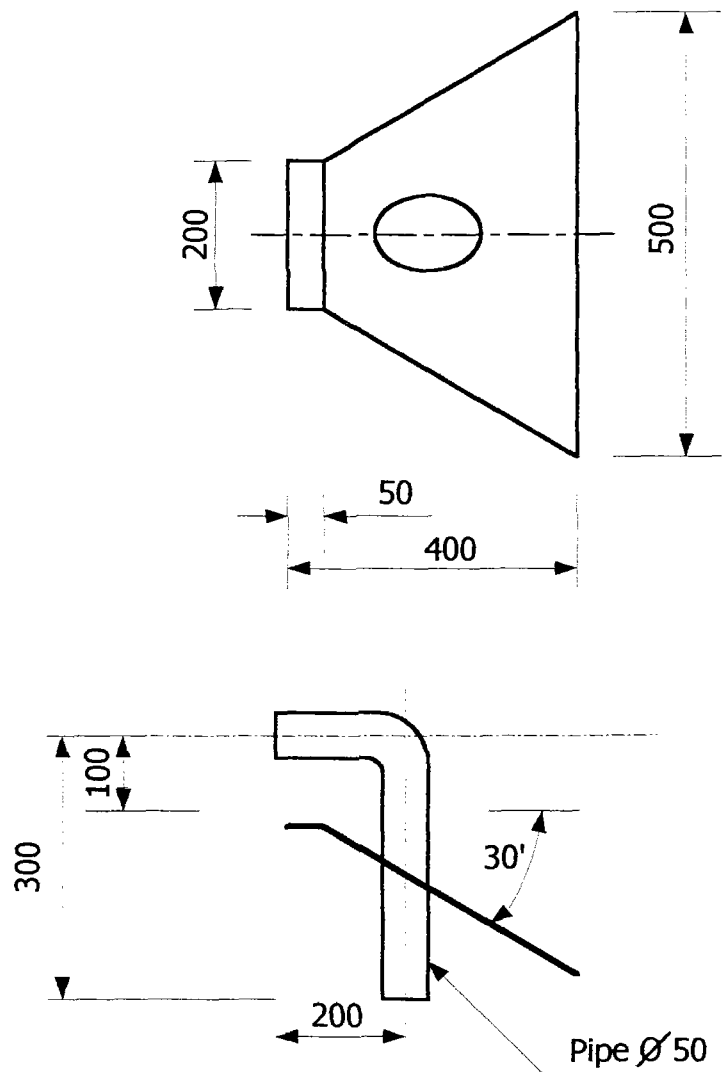


|                                    |                     |                    |            |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Top cover           | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Steel sheet 1.0 mm. | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.        | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                     |                    |            |



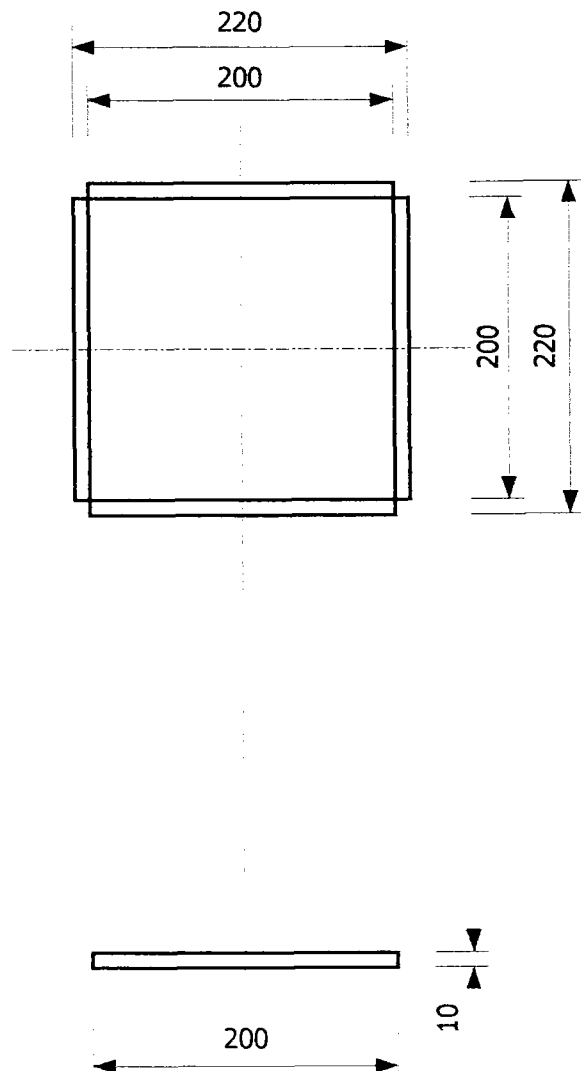
4 ea./set

|                                    |                    |                    |            |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Square cone cover  | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Steel sheet 1.0 mm | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.       | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                    |                    |            |

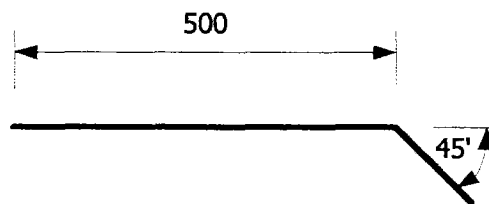
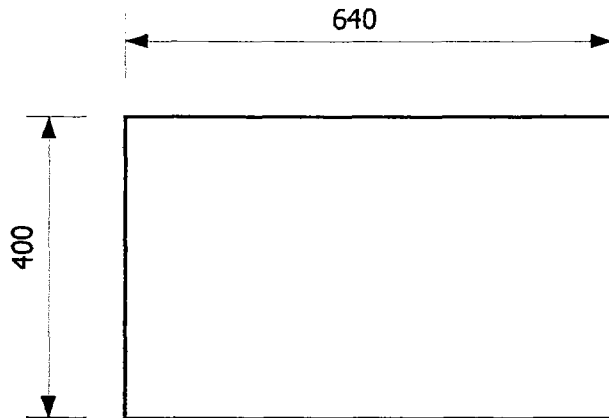


1 ea./set

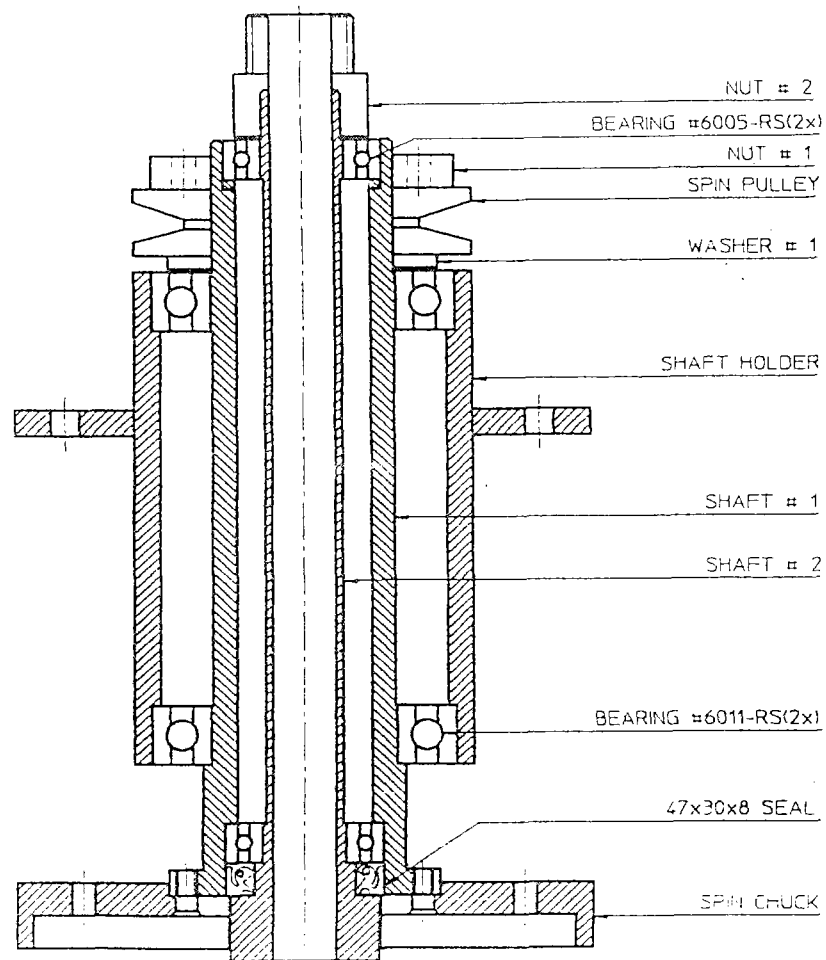
|                                    |                          |                    |            |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Square cone (back) cover | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Steel sheet 1.0 mm       | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.             | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                          |                    |            |



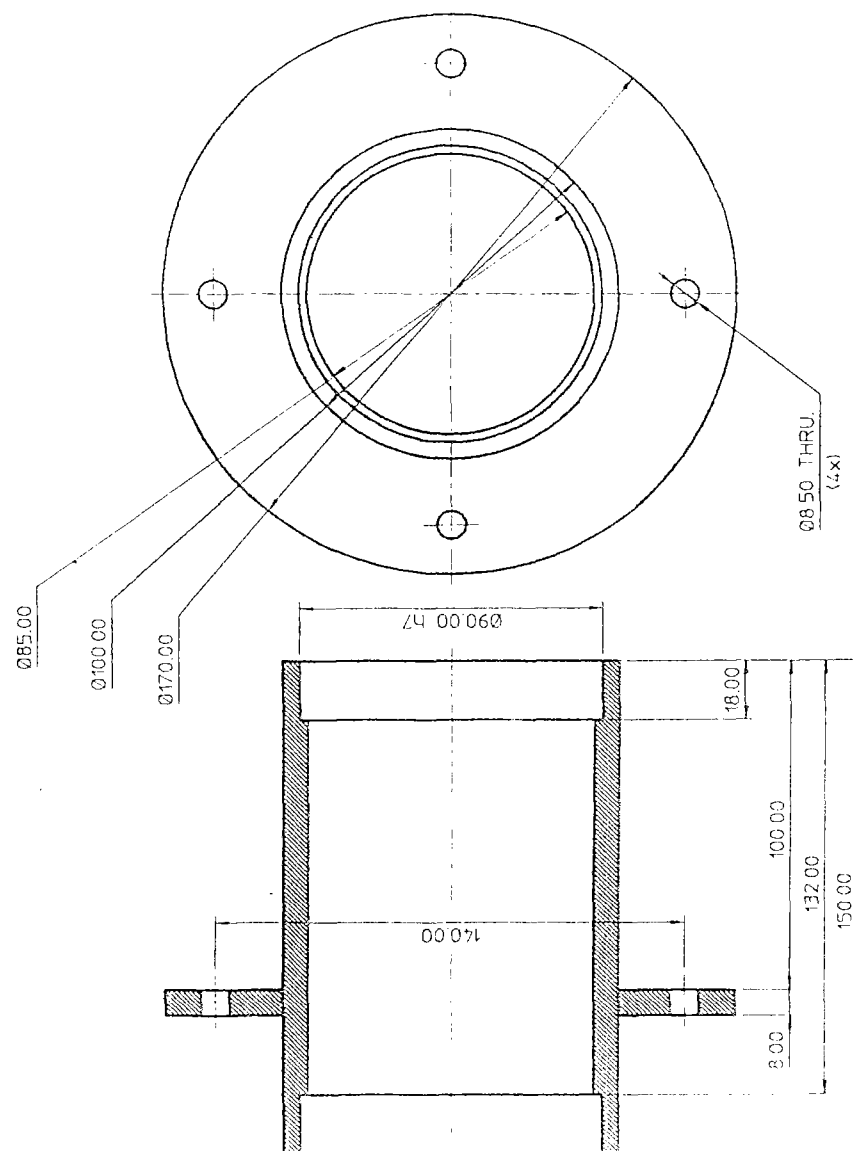
|                                    |                     |                    |            |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Bottom cover        | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Steel sheet 1.0 mm. | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.        | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                     |                    |            |



|                                    |                        |                    |            |
|------------------------------------|------------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                       | Front door cover       | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                    | Plastic (clear) 6.0 mm | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                     | Charnchai B.           | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakharinwirot University</b> |                        |                    |            |

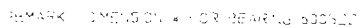


|                                   |                     |                    |            |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Spin shaft assembly | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37             | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B.        | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |                     |                    |            |



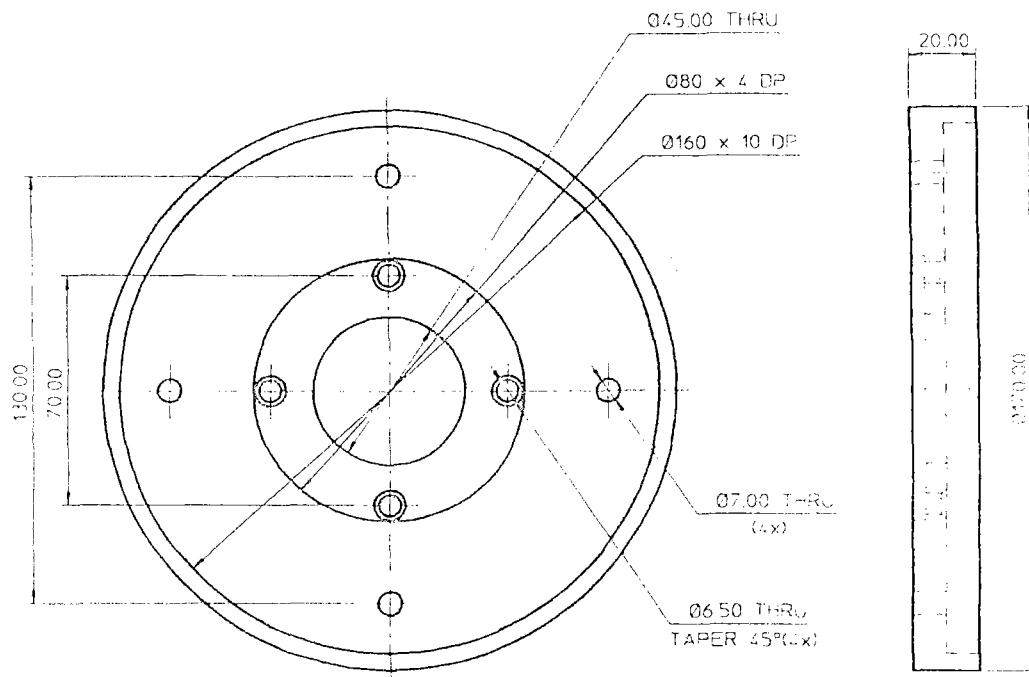
Unit = mm.

|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Shaft holder | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



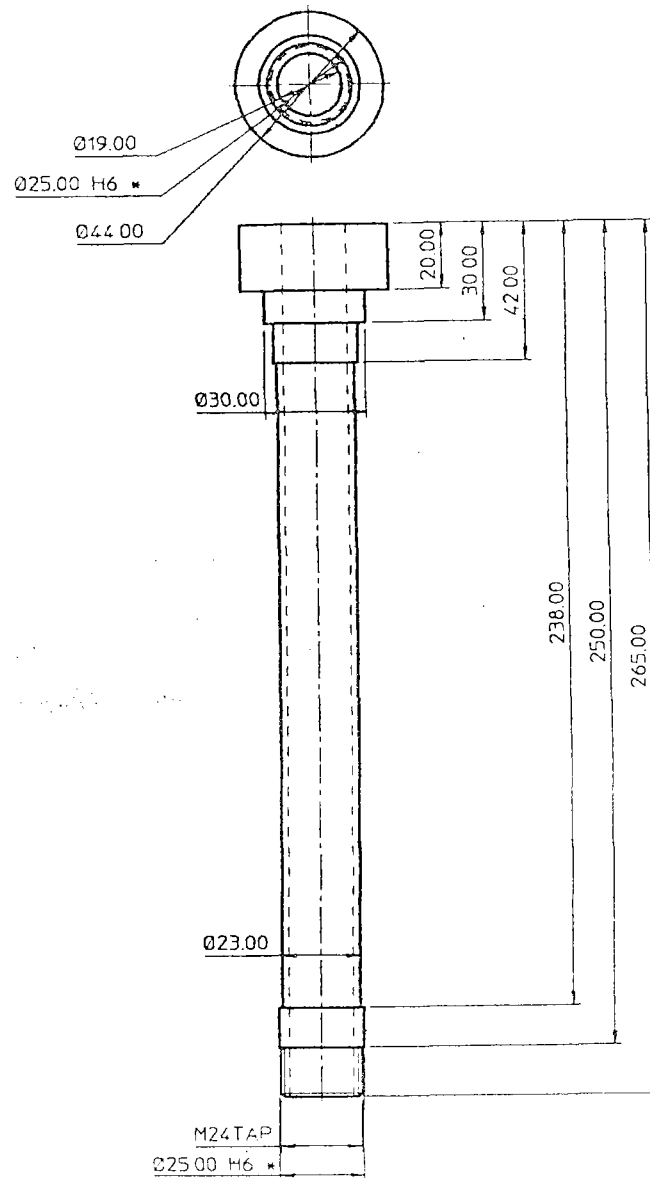
Unit = mm.

|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Shaft # 1    | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



Unit = mm.

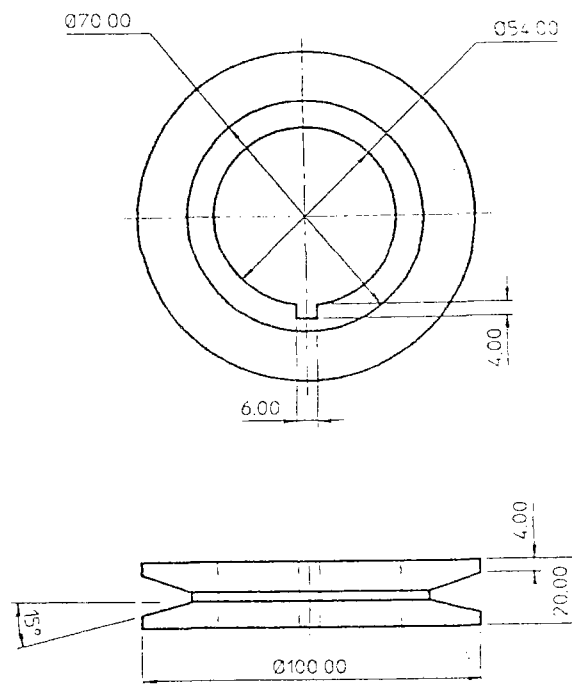
|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Spin chuck   | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



REMARK: DIMENSION \* FOR BEARING 6005-ZZ

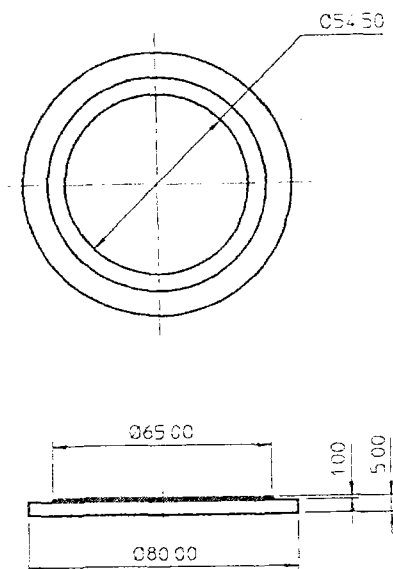
Unit = mm.

|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Shaft # 2    | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



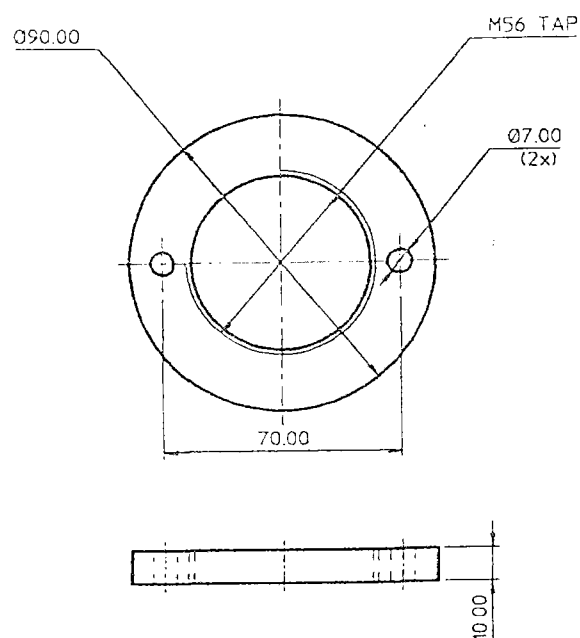
Unit = mm.

|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Spin pulley  | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



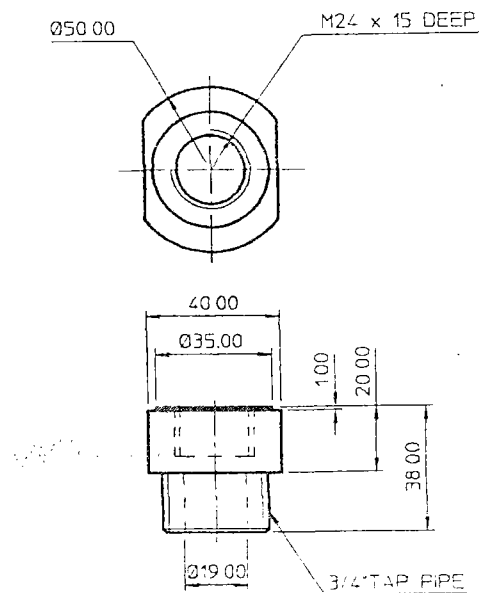
Unit = mm.

|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Washer # 1   | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



Unit = mm.

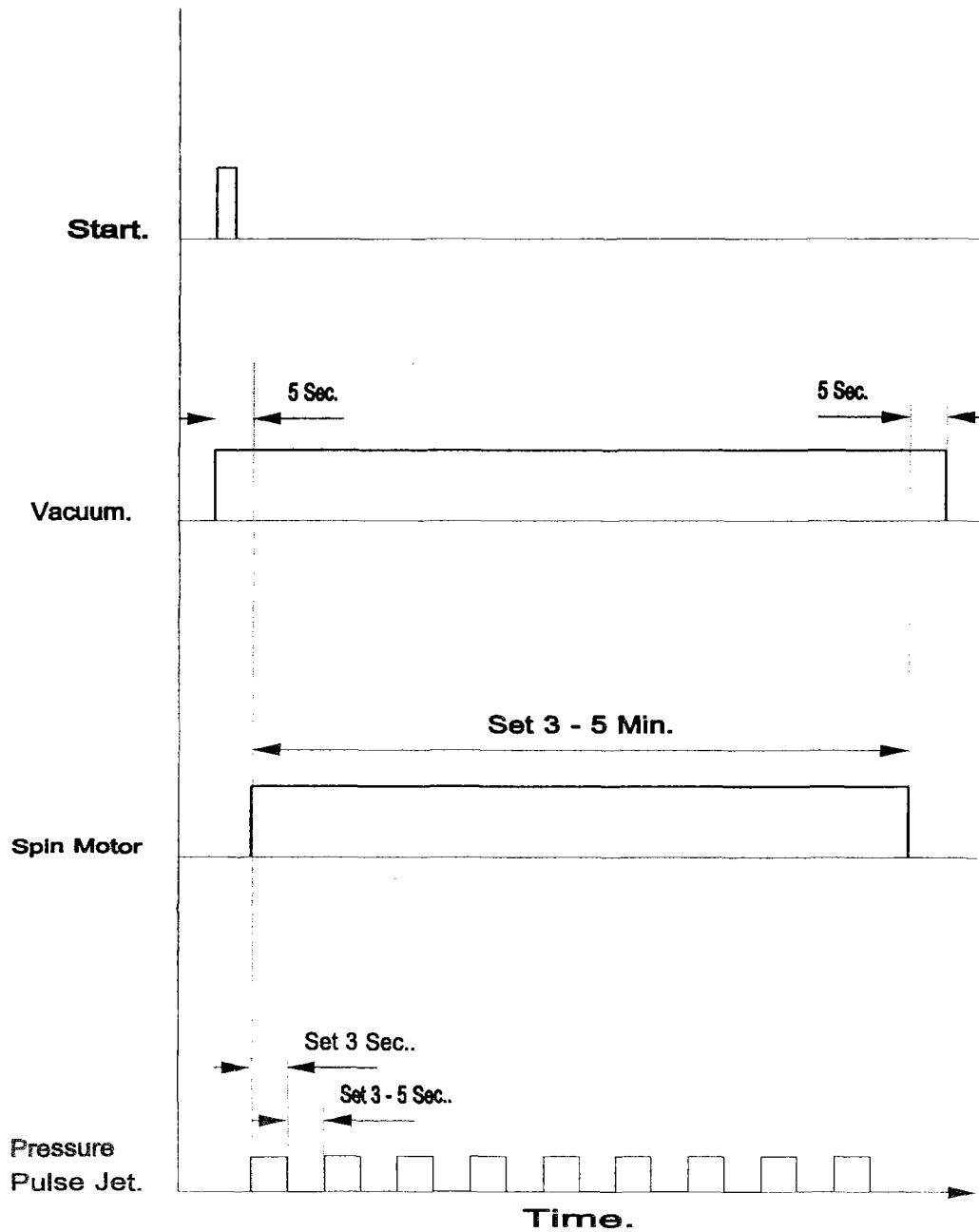
|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Nut # 1      | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |



Unit = mm.

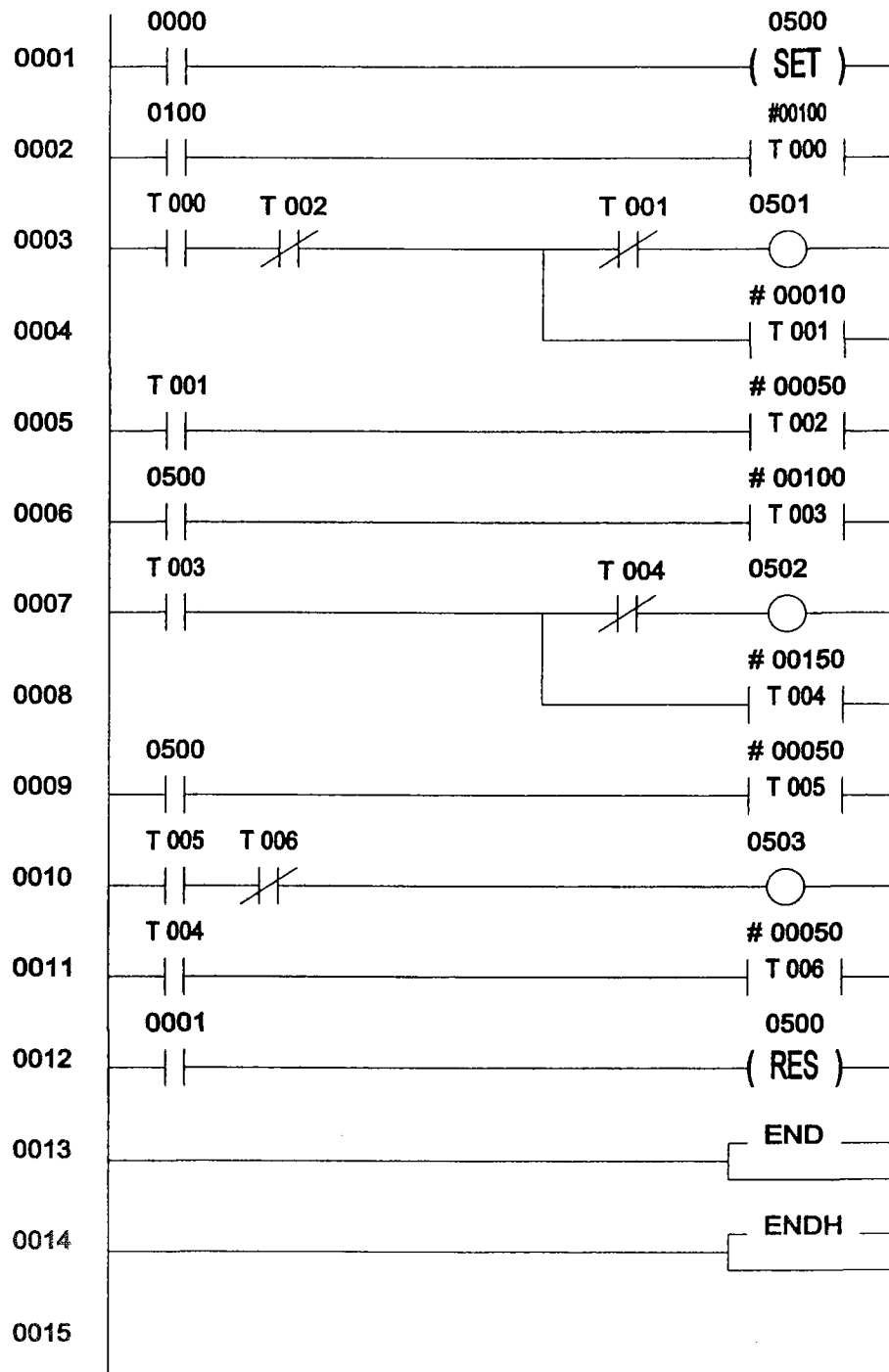
|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Nut # 2      | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   | ST - 37      | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |

## TIMING DIAGRAM

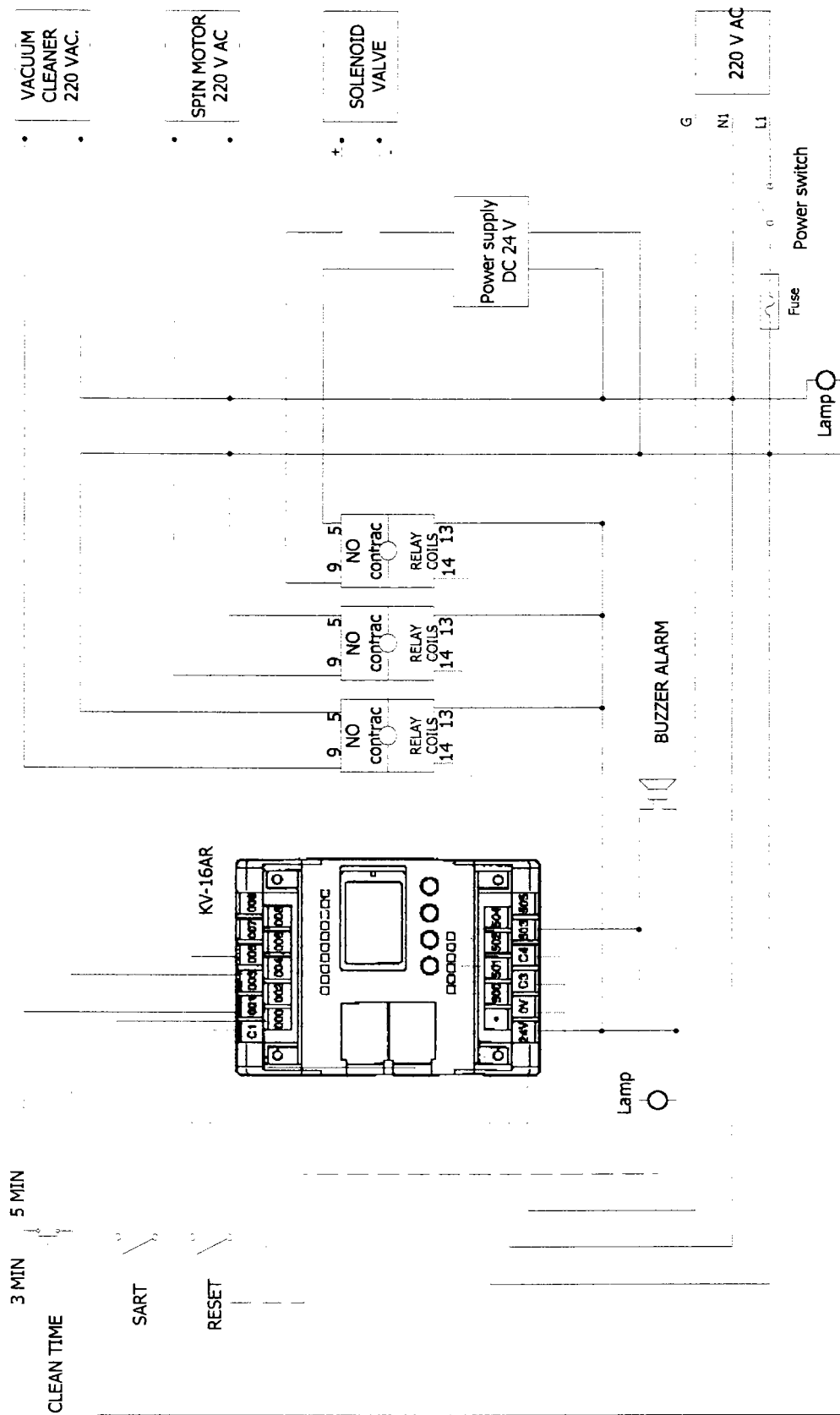


|                                   |                |                    |            |
|-----------------------------------|----------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Timing Diagram | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   |                | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B.   | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |                |                    |            |

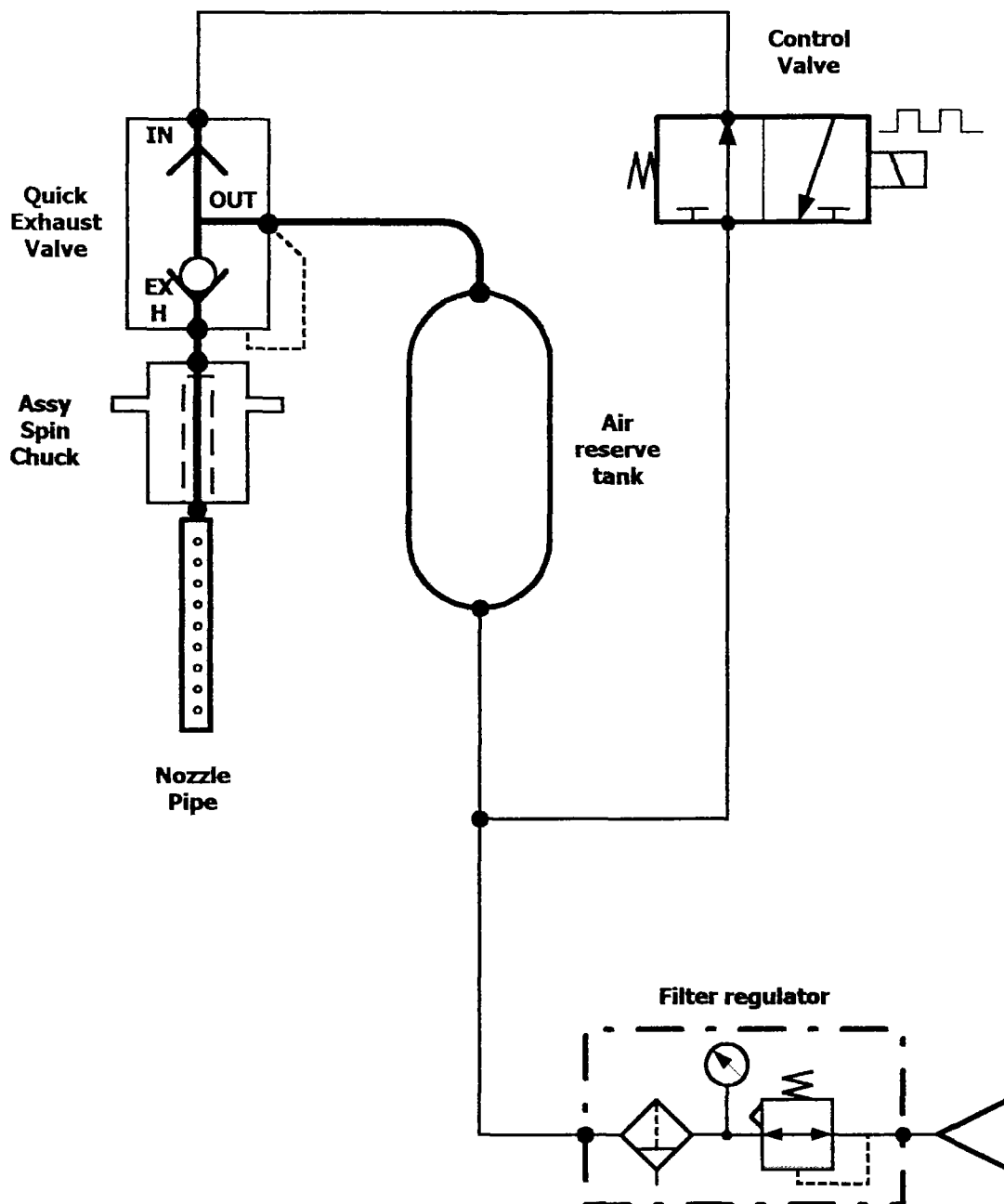
## Ladder Diagram



|                                   |               |                    |            |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Lader Diagram | <b>Drawing No.</b> | -          |
| <b>Material</b>                   |               | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B.  | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |               |                    |            |



|                            |                    |             |            |
|----------------------------|--------------------|-------------|------------|
| Title                      | Electrical circuit | Drawing No. |            |
| Material                   | N/A                | Scale       | N/A        |
| Draw by                    | Chamchai B.        | Date        | Jun 1'2001 |
| Srinakarinwirot University |                    |             |            |



|                                   |              |                    |            |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------|
| <b>Title</b>                      | Air circuit  | <b>Drawing No.</b> |            |
| <b>Material</b>                   |              | <b>Scale</b>       | N/A        |
| <b>Draw by</b>                    | Charnchai B. | <b>Date</b>        | Jun 1'2001 |
| <b>Srinakarinwirot University</b> |              |                    |            |

ภาพผนวก ข

รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสร้าง

ตาราง 20 รายการเครื่องมือที่ใช้สร้างเครื่อง

| ลำดับที่ | รายการเครื่องมือ                                    | หน้าที่เครื่องมือ                             |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1        | เครื่องเชื่อมไฟฟ้า                                  | ใช้ในการเชื่อมและประกอบชิ้นรูปชุดไซโคลน       |
| 2        | เครื่องเจียร์                                       | ใช้ในการตกแต่งชุดไซโคลน                       |
| 3        | เครื่องกลึง                                         | ใช้ในกลุ่มขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลม                |
| 4        | เครื่องเจียร์ตัดโลหะแบบแท่น                         | ใช้ทำการตัดชิ้นงานโครงสร้าง                   |
| 5        | เครื่องพับโลหะแผ่น                                  | ใช้ทำการพับขึ้นรูปชิ้นงาน                     |
| 6        | เหล็กฉากวัดมุม                                      | ใช้ทำการวัดมุม                                |
| 7        | คีมลีด                                              | ใช้บีบจับงานขนาดเล็ก                          |
| 8        | สว่านไฟฟ้า                                          | ใช้เจาะชิ้นงาน                                |
| 9        | ปากกาจับงานแบบแท่นตั้งโต๊ะ                          | ใช้ทำการจับชิ้นงาน                            |
| 10       | ปากกาจับงาน (C-Clamp)                               | ใช้บีบจับชิ้นงาน                              |
| 11       | ตะไบโลหะ                                            | ใช้ทำการตกแต่งผิวงานหลังจากการเจาะ            |
| 12       | เลื่อยมือตัดเหล็ก                                   | ใช้ทำการตัดชิ้นงานเล็ก                        |
| 13       | แถบวัดแบบโลหะ (ตลับเมตร)                            | ใช้ทำการวัดขนาดต่างๆ                          |
| 14       | ประแจ                                               | ใช้ขันสกรูในการประกอบเครื่อง                  |
| 15       | ประแจล็อก 1 ชุด                                     | ใช้ขันสกรูในการประกอบเครื่อง                  |
| 16       | ประแจเลื่อน                                         | ใช้ขันสกรูในการประกอบเครื่อง                  |
| 17       | ไขควง ปากแบนและปากสี่แฉก                            | ใช้ขันสกรูในการประกอบเครื่อง                  |
| 18       | คีมย้ำสายไฟฟ้า                                      | ใช้ทำการย้ำหุ้มต่อสายไฟ                       |
| 19       | หัวแร้งไฟฟ้า และตะกั่วบัดกรี                        | ใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟและวงจรต่างๆ            |
| 20       | เครื่องวัดความเร็วลม DIGITAL ANEMOMETER รุ่น DA 400 | ใช้ในการทดสอบวัดความเร็วลม เพื่อหาประสิทธิภาพ |
| 21       | มัลติมิเตอร์                                        | ใช้ทำการวัดและตรวจสอบวงจร                     |
| 22       | คีมจับ                                              | ใช้บีบและจับอุปกรณ์                           |
| 23       | คีมตัดสายไฟ                                         | ใช้ตัดสายไฟ                                   |

ตาราง 21 รายการอุปกรณ์ชุดหัวจับหมุนใส่กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

| ลำดับที่ | รายละเอียด                                                    | จำนวน  |
|----------|---------------------------------------------------------------|--------|
| 1        | ลูกปืน เบอร์ 6005-อาร์ เอส                                    | 2 ตลับ |
| 2        | ลูกปืน เบอร์ 6011-อาร์ เอส                                    | 2 ตลับ |
| 3        | ซีลกันลม ขนาด 47x30x8 มิลลิเมตร                               | 1 ตัว  |
| 4        | มอเตอร์ ขนาด $\frac{1}{4}$ แรงม้า 220 โวลท์                   | 1 ตัว  |
| 5        | ล้อสายพานใส่มอเตอร์ ขนาดร่อง 9.5 เส้นผ่าศูนย์กลาง(นอก) 4 นิ้ว | 1 อัน  |
| 6        | สายพาน ขนาด 9.5 x 775 แอล เอ                                  | 1 เส้น |
| 7        | สกรู ขนาด 8 x 25 มิลลิเมตร พร้อมแหวนรองและแหวนกันคลาย         | 8 ชุด  |
| 8        | สกรู ขนาด 8 x 50 มิลลิเมตร พร้อมแหวนรองและแหวนกันคลาย         | 4 ชุด  |
| 9        | ท่อเหล็ก ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ยาว 8 นิ้ว ทำเกลียว 1 ด้าน   | 1 อัน  |
| 10       | ท่อเหล็ก ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ยาว 4 นิ้ว ทำเกลียว 1 ด้าน   | 1 อัน  |
| 11       | ข้อต่อตรงเกลียวใน $\frac{3}{4}$ นิ้ว                          | 1 อัน  |
| 12       | ข้อต่อ 90 องศา เกลียว นอก-ใน $\frac{3}{4}$ นิ้ว               | 1 อัน  |
| 13       | เทปพันเกลียว                                                  | 1 ม้วน |
| 14       | ท่อยาง ขนาด (ภายใน) $\frac{3}{4}$ นิ้ว ยาว 6 นิ้ว             | 1 อัน  |
| 15       | เข็มขัดรัดท่อ ขนาด 1 นิ้ว                                     | 2 อัน  |

ตาราง 22 รายการอุปกรณ์ชุดควบคุมการทำงานระบบนิวแมติกส์

| ลำดับที่ | รายละเอียด                                                          | จำนวน  |
|----------|---------------------------------------------------------------------|--------|
| 1        | ชุดกรองฝุ่นและควบคุมแรงดัน เอส เอ็ม ซี รุ่น เอ คับบลิว 3001-03      | 1 ชุด  |
| 2        | เกจวัดแรงดันลม ขนาด 0-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หน้าปัด 2 นิ้ว          | 1 อัน  |
| 3        | วาล์วเร่งระบายลม เอส เอ็ม ซี รุ่น เอ คิว 5000-04                    | 1 อัน  |
| 4        | วาล์วไฟฟ้าควบคุม เอส เอ็ม ซี รุ่น วี เอ็กซ์ 2120-01-5 ดี แชดส์      | 1 ตัว  |
| 5        | ท่อลมพลาสติก(ระบบควบคุม)เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร            | 2 เมตร |
| 6        | หัวต่อลม SMC. 50 ne-touch Fitting Model. KQ2H08-02S                 | 4 อัน  |
| 7        | หัวต่อ SMC. Speed controller with One-touch Fitting Model. AS400 1F | 1 อัน  |
| 8        | ข้อต่อแยกสาย SMC. Union " Y " Model KQ2U 08-00                      | 2 อัน  |
| 9        | ท่อลมเข้า (พลาสติก)เส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 8 มิลลิเมตร            | 5 เมตร |
| 10       | เข็มขัดรัดท่อ ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว                               | 2 อัน  |

ตาราง 23 รายการอุปกรณ์ชุดวงจรไฟฟ้าควบคุมระบบการทำงาน

| ลำดับที่ | รายละเอียด                                         | จำนวน  |
|----------|----------------------------------------------------|--------|
| 1        | กล่องใส่ชุดวงจรไฟฟ้าควบคุมระบบการทำงาน             | 1 อัน  |
| 2        | โปรแกรมเอเบิลลอจิกคอนโทรล KEYENCE. Model KV-16AR   | 1 อัน  |
| 3        | รีเลย์ 24 โวลต์                                    | 3 อัน  |
| 4        | สายไฟชนิดอ่อนฉนวน 2 ชั้น ขนาด 1-1.5 ตารางมิลลิเมตร | 5 เมตร |
| 5        | ปลั๊กไฟฟ้า ชนิด 220 โวลต์                          | 1 อัน  |
| 6        | สายไฟเดินวงจรควบคุม ขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร          | 5 เมตร |
| 7        | สวิตช์ฉุกเฉินติดหน้าปัด ชนิดกดดับ - หมุนปล่อยติด   | 1 อัน  |
| 8        | สวิตช์ติดหน้าปัด ชนิดกดเปิด - ปล่อยดับ             | 2 อัน  |
| 9        | ฟิวส์ชนิดหลอด 5 แอมป์                              | 1 อัน  |
| 10       | สวิตช์แม่เหล็กติดประตู                             | 1 อัน  |
| 11       | กลอนไฟฟ้า 24 โวลต์                                 | 1 อัน  |
| 12       | ออกสัญญาณ 24 โวลต์                                 | 1 อัน  |
| 13       | แผงจุดต่อสายไฟ                                     | 1 อัน  |
| 14       | แคลมป์รัดสายไฟพลาสติกชนิดยาว 4 นิ้ว                | 1 ห่อ  |

ภาพผนวก ค

หนังสือขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ      สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา โทร. ๕๔๔๓

ที่ ทม. ๑๐๑๐(๑๘)/๑๒๓

วันที่ ๑๗ กันยายน ๒๕๔๔

เรื่อง ขออนุญาตเชิญอาจารย์ไธมาส สุขหวาน คุมปริญญาานิพนธ์

เรียน คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ด้วยกระผม นาย ชานชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา จะทำปริญญา  
เพียรเรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริกซ์ของเครื่องจักรใน  
โรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยมี อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร เป็นประธานกรรมการ และ  
อาจารย์ไธมาส สุขหวาน เป็นกรรมการ แต่ อาจารย์ไธมาส สุขหวาน ยังไม่ได้เป็นอาจารย์บัณฑิตวิทยาลัย  
เบการศึกษาปริญญาโท วศ.ม. สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน ปริญญาตรี วศ.บ. เครื่องกล ปัจจุบันเป็น  
อาจารย์ในสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ ซึ่งมีความรู้และเชี่ยวชาญในเรื่องที่กระผมจะทำ  
ปริญญาานิพนธ์

ดังนั้นกระผมจึงขออนุญาตบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเชิญ อาจารย์ไธมาส สุขหวาน เป็นกรรมการ และขอ  
ความกรุณาออกหนังสือเชิญ อาจารย์ไธมาส สุขหวาน ให้กระผมด้วย โดยกระผมจะขอมารับจดหมายเชิญ  
และนำไปส่งด้วยตัวกระผมเอง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

(นาย ชานชัย บุญชู)

นิสิตปริญญาโท สาขาอุตสาหกรรมศึกษา

(อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)

หัวหน้าสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

ประธานหลักสูตรสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ   บัณฑิตวิทยาลัย มศว โทร. 5726, 5644

ที่ ทม 1012/ 4508

วันที่ ๙๖ พฤศจิกายน 2544

เรื่อง   ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน   คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิติระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปฏิญานิพนธ์เรื่อง “การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์” โดยมี อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปฏิญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้ข้าราชการในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศาลาภรณ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ    บัณฑิตวิทยาลัย มศว    โทร. 5726, 5644

ที่    ทม 1012/ 4503

วันที่    ๒๖ พฤศจิกายน 2544

เรื่อง    ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน    คณบดีคณะศึกษาศาสตร์

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์เรื่อง “การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ตริกของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์” โดยมี อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เบาใจ เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ตริกของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้ข้าราชการในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศาลาภรณ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ บัณฑิตวิทยาลัย มศว โทร. 5726, 5644

ที่ ทม 1012/ 1204

วันที่ - 14 กุมภาพันธ์ 2545

เรื่อง ขอเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ

เรียน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มศว องครักษ์

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนรัตน์ แต้ววัฒนา เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้ข้าราชการในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(รองศาสตราจารย์ธนรัตน์ หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ที่ ทม 1012/ 1103



บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

14 กุมภาพันธ์ 2545

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

เรียน อธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิติระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์เรื่อง “การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ อาจารย์มณฑล แสงประไพพิทย เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้ข้าราชการในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภาพร หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ ทม 1012/ 1206



บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

14 กุมภาพันธ์ 2545

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

เรียน กรรมการผู้จัดการ บริษัท ทีดีเอส.แอฟพลิเคชัน

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในกรณีนี้บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภกรณ์ หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ ทม 1012/ 1204



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

14 กุมภาพันธ์ 2545

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายผลิต เอสเอ็มดี 2 บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ไทยแลนด์ จำกัด

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ตริกซ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ นายวิชัย รวิพันธุ์ ผู้จัดการแผนกผลิต เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ตริกซ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้บุคลากรในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภกร ะหวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ที่ ทม 1012/ 1205



บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

| 4 กุมภาพันธ์ 2545

เรื่อง ขอความร่วมมือเพื่อการวิจัย

เรียน ผู้อำนวยการฝ่ายผลิต เอสเอ็มดี 1 บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ไทยแลนด์ จำกัด

สิ่งที่ส่งมาด้วย แบบประเมิน

เนื่องด้วย นายชาญชัย บุญชู นิสิตระดับปริญญาโท วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับอนุมัติให้ดำเนินการทำปริญญานิพนธ์ เรื่อง “การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยมี อาจารย์ไพรัช วงศ์ยุทธไกร และ อาจารย์โอภาส สุขหวาน เป็นคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ในการนี้ บัณฑิตวิทยาลัยขอเรียนเชิญ นายบุญเลิศ ประสิทธิ์สุภโรจน์ วิศวกรอาวุโส เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินการสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม

จึงเรียนมาเพื่อขอความอนุเคราะห์ ได้โปรดพิจารณาให้บุคลากรในสังกัดเป็นผู้เชี่ยวชาญให้ นายชาญชัย บุญชู ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพการศึกษา และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์นภกรณ์ หะวานนท์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 664-1000 ต่อ 5726, 5644

โทรสาร. 258-4119

ภาพผนวก ง

แบบประเมินสมรรถนะเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด

## แบบประเมิน

### เรื่อง

### การสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

แบบประเมินชุดนี้ เป็นแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เกี่ยวกับเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมา เรื่องความเหมาะสมด้านการใช้งาน

คำชี้แจง แบบประเมินชุดนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอนคือ

ตอนที่ 1 วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะภาพของผู้เชี่ยวชาญ

ตอนที่ 3 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 5 ด้านดังนี้

1. ลักษณะทางด้านวิศวกรรม
2. ลักษณะความปลอดภัย
3. ลักษณะทางกายภาพ
4. ลักษณะการใช้งาน
5. ลักษณะการบำรุงรักษา

ตอนที่ 4 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

#### 1 วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

แบบประเมินชุดนี้สร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือประกอบในการวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เกี่ยวกับเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีความเหมาะสมในด้านต่างๆ เพียงใด

#### 2 ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะภาพของผู้เชี่ยวชาญ

กรุณาเขียนเครื่องหมาย / ลงในกรอบ ( ) หน้าข้อความที่ตรงกับความจริง และ/หรือเติมคำหรือข้อความลงในช่องว่าง

1. เพศ

( ) ชาย

( ) หญิง

2. อายุ ..... ปี

3. ระดับการศึกษา

( ) ปริญญาโท

( ) ปริญญาเอก

## 4. สาขาทางการศึกษา

- ( ) วิศวกรรมเครื่องกล      ( ) อุตสาหกรรมศึกษา  
( ) อุตสาหการ                      ( ) อื่นๆ.....

## 5. ประสบการณ์ในการทำงาน.....ปี

## 6. ตำแหน่งหน้าที่ในหน่วยงานปัจจุบัน.....

3. ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ 4 คำน กรุณาเขียนเครื่องหมาย / ลงในช่องมาตราส่วนประเมินค่า 5 ระดับ ตามความคิดเห็นของท่าน หลังจากทดสอบใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ และมีค่าระดับคะแนนกำหนดไว้ดังนี้

1. ระดับ 5 หมายถึง ผลการประเมินในระดับดีมาก
2. ระดับ 4 หมายถึง ผลการประเมินในระดับดี
3. ระดับ 3 หมายถึง ผลการประเมินในระดับพอใช้
4. ระดับ 2 หมายถึง ผลการประเมินในระดับต้องปรับปรุง
5. ระดับ 1 หมายถึง ผลการประเมินในระดับที่ใช้อย่างไม่ได้

แบบตรวจประเมินตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดไส้กรอง  
ฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ของเครื่องจักร ในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

| ข้อ<br>ที่ | รายละเอียดในการตรวจประเมิน                            | น้อย<br>มาก | น้อย | ปาน<br>กลาง | ดี | ดี<br>มาก |
|------------|-------------------------------------------------------|-------------|------|-------------|----|-----------|
|            | <b>ลักษณะด้านวิศวกรรม</b>                             |             |      |             |    |           |
| 1          | มีคุณค่าทางด้านวิศวกรรมและเป็นนวัตกรรมใหม่            |             |      |             |    |           |
| 2          | ใช้หลักวิศวกรรมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เหมาะสม   |             |      |             |    |           |
| 3          | ใช้หลักการและทฤษฎีในการสร้างเครื่องอย่างถูกต้อง       |             |      |             |    |           |
| 4          | ใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่องอย่างเหมาะสม   |             |      |             |    |           |
| 5          | ใช้พลังงานไฟฟ้าและแรงดันลมอย่างเหมาะสม                |             |      |             |    |           |
|            | <b>ลักษณะด้านความปลอดภัย</b>                          |             |      |             |    |           |
| 6          | ระบบป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นเหมาะสม                |             |      |             |    |           |
| 7          | การป้องกันอันตรายจากกลไกการทำงานของเครื่องเหมาะสม     |             |      |             |    |           |
| 8          | สามารถหยุดการทำงานของเครื่องทันทีเมื่อมีเหตุฉุกเฉิน   |             |      |             |    |           |
| 9          | มีระบบตรวจสอบที่ระบุเพื่อไปควบคุมการทำงานของเครื่อง   |             |      |             |    |           |
| 10         | มีระบบป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า                          |             |      |             |    |           |
|            | <b>ลักษณะทางกายภาพ</b>                                |             |      |             |    |           |
| 11         | สามารถถอดและแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้                   |             |      |             |    |           |
| 12         | ความแข็งแรงของโครงสร้าง                               |             |      |             |    |           |
| 13         | การจัดวางประกอบอุปกรณ์ต่างๆได้เหมาะสม                 |             |      |             |    |           |
| 14         | เครื่องมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสมเมื่อเทียบกับไส้กรองฝุ่น |             |      |             |    |           |
| 15         | เครื่องมีรูปทรงสวยงาม ใช้โทนสีเหมาะสม                 |             |      |             |    |           |
|            | <b>ลักษณะการใช้งาน</b>                                |             |      |             |    |           |
| 16         | ขั้นตอนการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นเหมาะสม     |             |      |             |    |           |
| 17         | ใช้เวลาในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นเหมาะสม             |             |      |             |    |           |
| 18         | ความสะดวกในการนำฝุ่นออกจากเครื่องไปทิ้ง               |             |      |             |    |           |
| 19         | ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่อง                      |             |      |             |    |           |
| 20         | สามารถนำมาใช้และพัฒนาในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นได้        |             |      |             |    |           |
|            | <b>ลักษณะการบำรุงรักษา</b>                            |             |      |             |    |           |
| 21         | อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก       |             |      |             |    |           |
| 22         | การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย               |             |      |             |    |           |
| 23         | สามารถตรวจสอบการทำงานของเครื่องขณะทำงานได้            |             |      |             |    |           |
| 24         | ความสะดวกในการถอด/แยก ประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์           |             |      |             |    |           |
| 25         | มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆน้อย                 |             |      |             |    |           |

#### 4 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

[illegible]

**ภาพผนวก จ**

**ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพและประเมิณสมรรถนะ  
เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์tridge**

ตาราง 24 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

| รายละเอียด                                               | ผู้<br>เชี่ยวชาญ<br>คนที่<br>1 | ผู้<br>เชี่ยวชาญ<br>คนที่<br>2 | ผู้<br>เชี่ยวชาญ<br>คนที่<br>3 | ผู้<br>เชี่ยวชาญ<br>คนที่<br>4 | ผู้<br>เชี่ยวชาญ<br>คนที่<br>5 | $\bar{X}$ | แปล<br>ความ |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------|
| <b>ทางลักษณะด้านวิศวกรรม</b>                             |                                |                                |                                |                                |                                |           |             |
| 1. มีคุณค่าทางด้านวิศวกรรมและเป็นนวัตกรรมใหม่            | 4                              | 4                              | 5                              | 4                              | 5                              | 4.4       | ดี          |
| 2. ใช้หลักวิศวกรรมในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เหมาะสม   | 4                              | 4                              | 5                              | 3                              | 4                              | 4         | ดี          |
| 3. ใช้หลักการและทฤษฎีในการสร้างเครื่องอย่างถูกต้อง       | 4                              | 4                              | 4                              | 3                              | 4                              | 3.8       | ดี          |
| 4. ใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสร้างเครื่องอย่างเหมาะสม   | 3                              | 4                              | 4                              | 4                              | 3                              | 3.6       | ดี          |
| 5. ใช้พลังงานไฟฟ้าและแรงดันลมอย่างเหมาะสม                | 4                              | 4                              | 4                              | 4                              | 3                              | 3.8       | ดี          |
| ภาพรวมลักษณะด้านวิศวกรรม                                 | 19                             | 20                             | 22                             | 18                             | 19                             | 3.92      | ดี          |
| <b>ลักษณะด้านความปลอดภัย</b>                             |                                |                                |                                |                                |                                |           |             |
| 6. ระบบป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นเหมาะสม                | 4                              | 4                              | 4                              | 4                              | 5                              | 4.2       | ดี          |
| 7. การป้องกันอันตรายจากกลไกการทำงานของเครื่องเหมาะสม     | 4                              | 4                              | 5                              | 5                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| 8. สามารถหยุดการทำงานของเครื่องทันทีเมื่อมีเหตุฉุกเฉิน   | 4                              | 4                              | 5                              | 5                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| 9. มีระบบตรวจสอบที่ระบุเพื่อไปควบคุมการทำงานของเครื่อง   | 4                              | 5                              | 4                              | 5                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| 10. มีระบบป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า                         | 4                              | 5                              | 5                              | 4                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| ภาพรวมลักษณะด้านความปลอดภัย                              | 20                             | 22                             | 23                             | 23                             | 25                             | 4.52      | ดีมาก       |
| <b>ลักษณะด้านกายภาพ</b>                                  |                                |                                |                                |                                |                                |           |             |
| 11. สามารถถอดและแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้                  | 5                              | 4                              | 3                              | 4                              | 4                              | 4         | ดี          |
| 12. ความแข็งแรงของโครงสร้าง                              | 5                              | 4                              | 4                              | 3                              | 4                              | 4         | ดี          |
| 13. การจัดวางประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เหมาะสม              | 5                              | 5                              | 4                              | 3                              | 4                              | 4.2       | ดี          |
| 14. เครื่องมีขนาดกะทัดรัดเหมาะสมเมื่อเทียบกับไส้กรองฝุ่น | 5                              | 5                              | 4                              | 4                              | 4                              | 4.4       | ดี          |
| 15. เครื่องมีรูปทรงสวยงามใช้โทนสีเหมาะสม                 | 5                              | 4                              | 4                              | 3                              | 4                              | 4         | ดี          |
| ภาพรวมลักษณะด้านกายภาพ                                   | 25                             | 22                             | 19                             | 17                             | 20                             | 4.12      | ดี          |
| <b>ลักษณะด้านการใช้งาน</b>                               |                                |                                |                                |                                |                                |           |             |
| 16. ขั้นตอนการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นเหมาะสม    | 4                              | 4                              | 4                              | 5                              | 4                              | 4.2       | ดี          |
| 17. ใช้เวลาในการทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นเหมาะสม            | 4                              | 4                              | 4                              | 3                              | 3                              | 3.6       | ดี          |
| 18. ความสะดวกในการนำฝุ่นออกจากเครื่องไปทิ้ง              | 4                              | 4                              | 4                              | 3                              | 3                              | 3.6       | ดี          |
| 19. ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่อง                     | 5                              | 4                              | 5                              | 4                              | 3                              | 4.2       | ดี          |
| 20. สามารถนำมาใช้และพัฒนาในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นได้       | 5                              | 4                              | 5                              | 4                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| ภาพรวมลักษณะด้านการใช้งาน                                | 22                             | 20                             | 22                             | 19                             | 18                             | 4.04      | ดี          |
| <b>ลักษณะด้านการบำรุงรักษา</b>                           |                                |                                |                                |                                |                                |           |             |
| 21. อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก      | 5                              | 5                              | 5                              | 5                              | 5                              | 5         | ดีมาก       |
| 22. การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย              | 4                              | 4                              | 5                              | 5                              | 5                              | 4.6       | ดีมาก       |
| 23. สามารถตรวจสอบการทำงานของเครื่องขณะทำงานได้           | 4                              | 4                              | 4                              | 5                              | 5                              | 4.4       | ดี          |
| 24. ความสะดวกในการถอด/แยก ประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์          | 4                              | 4                              | 3                              | 5                              | 5                              | 4.2       | ดี          |
| 25. มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่าง ๆ น้อย              | 4                              | 4                              | 5                              | 4                              | 5                              | 4.4       | ดี          |
| ภาพรวมลักษณะด้านการบำรุงรักษา                            | 21                             | 21                             | 22                             | 24                             | 25                             | 4.5       | ดีมาก       |

ตาราง 25 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 1 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 74.5                         | 11.964                          |
| 2                      | 74.3                         | 11.932                          |
| 3                      | 74.4                         | 11.947                          |
| 4                      | 74.3                         | 11.932                          |
| 5                      | 74.4                         | 11.947                          |
| 6                      | 74.5                         | 11.964                          |
| 7                      | 74.3                         | 11.932                          |
| 8                      | 74.3                         | 11.932                          |
| 9                      | 74.4                         | 11.947                          |
| 10                     | 74.3                         | 11.932                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 74.37                        | 11.943                          |

ตาราง 26 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 2 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 74.1                         | 11.899                          |
| 2                      | 74.0                         | 11.884                          |
| 3                      | 73.9                         | 11.868                          |
| 4                      | 73.9                         | 11.868                          |
| 5                      | 74.0                         | 11.884                          |
| 6                      | 74.0                         | 11.884                          |
| 7                      | 73.8                         | 11.852                          |
| 8                      | 73.9                         | 11.868                          |
| 9                      | 73.8                         | 11.852                          |
| 10                     | 73.7                         | 11.835                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 73.91                        | 11.869                          |

ตาราง 27 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 3 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 73.3                         | 11.771                          |
| 2                      | 73.5                         | 11.803                          |
| 3                      | 73.6                         | 11.819                          |
| 4                      | 73.4                         | 11.787                          |
| 5                      | 73.6                         | 11.819                          |
| 6                      | 73.2                         | 11.755                          |
| 7                      | 73.4                         | 11.787                          |
| 8                      | 73.5                         | 11.803                          |
| 9                      | 73.3                         | 11.771                          |
| 10                     | 73.5                         | 11.803                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 73.43                        | 11.792                          |

ตาราง 28 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 4 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 73.0                         | 11.732                          |
| 2                      | 72.9                         | 11.707                          |
| 3                      | 72.8                         | 11.691                          |
| 4                      | 73.0                         | 11.723                          |
| 5                      | 72.7                         | 11.675                          |
| 6                      | 72.9                         | 11.707                          |
| 7                      | 72.8                         | 11.691                          |
| 8                      | 73.1                         | 11.739                          |
| 9                      | 73.0                         | 11.723                          |
| 10                     | 73.1                         | 11.739                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 72.93                        | 11.711                          |

ตาราง 29 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 5 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 73.0                         | 11.723                          |
| 2                      | 72.8                         | 11.691                          |
| 3                      | 72.4                         | 11.627                          |
| 4                      | 72.6                         | 11.659                          |
| 5                      | 72.5                         | 11.643                          |
| 6                      | 72.4                         | 11.627                          |
| 7                      | 72.7                         | 11.675                          |
| 8                      | 72.6                         | 11.659                          |
| 9                      | 72.7                         | 11.675                          |
| 10                     | 72.5                         | 11.643                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 72.6                         | 11.662                          |

ตาราง 30 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริจ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 6 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 72.6                         | 11.659                          |
| 2                      | 72.4                         | 11.627                          |
| 3                      | 72.3                         | 11.611                          |
| 4                      | 72.1                         | 11.579                          |
| 5                      | 72.2                         | 11.595                          |
| 6                      | 72.1                         | 11.579                          |
| 7                      | 72.0                         | 11.562                          |
| 8                      | 72.4                         | 11.627                          |
| 9                      | 72.5                         | 11.643                          |
| 10                     | 72.5                         | 11.643                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 72.3                         | 11.612                          |

ตาราง 31 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 7 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 71.4                         | 11.466                          |
| 2                      | 71.7                         | 11.514                          |
| 3                      | 71.5                         | 11.482                          |
| 4                      | 71.6                         | 11.498                          |
| 5                      | 71.4                         | 11.466                          |
| 6                      | 71.6                         | 11.498                          |
| 7                      | 71.3                         | 11.450                          |
| 8                      | 71.3                         | 11.450                          |
| 9                      | 71.5                         | 11.482                          |
| 10                     | 71.2                         | 11.434                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 71.5                         | 11.474                          |

ตาราง 32 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 8 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 70.7                         | 11.354                          |
| 2                      | 70.9                         | 11.386                          |
| 3                      | 71.2                         | 11.434                          |
| 4                      | 71.1                         | 11.418                          |
| 5                      | 71.0                         | 11.402                          |
| 6                      | 70.8                         | 11.370                          |
| 7                      | 70.9                         | 11.386                          |
| 8                      | 71.1                         | 11.418                          |
| 9                      | 71.2                         | 11.434                          |
| 10                     | 70.6                         | 11.338                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 71.0                         | 11.394                          |

ตาราง 33 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 9 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 69.8                         | 11.211                          |
| 2                      | 69.7                         | 11.187                          |
| 3                      | 69.7                         | 11.195                          |
| 4                      | 69.7                         | 11.187                          |
| 5                      | 69.6                         | 11.171                          |
| 6                      | 69.8                         | 11.203                          |
| 7                      | 69.7                         | 11.195                          |
| 8                      | 69.8                         | 11.203                          |
| 9                      | 69.7                         | 11.195                          |
| 10                     | 69.6                         | 11.171                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 69.7                         | 11.192                          |

ตาราง 34 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 10 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 69.0                         | 11.083                          |
| 2                      | 69.0                         | 11.083                          |
| 3                      | 69.0                         | 11.083                          |
| 4                      | 69.1                         | 11.091                          |
| 5                      | 69.0                         | 11.083                          |
| 6                      | 68.9                         | 11.067                          |
| 7                      | 69.1                         | 11.099                          |
| 8                      | 69.1                         | 11.091                          |
| 9                      | 68.9                         | 11.067                          |
| 10                     | 69.0                         | 11.075                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 69.0                         | 11.082                          |

ตาราง 35 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 11 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 68.4                         | 10.984                          |
| 2                      | 68.7                         | 11.027                          |
| 3                      | 68.5                         | 10.994                          |
| 4                      | 68.5                         | 10.994                          |
| 5                      | 68.6                         | 11.019                          |
| 6                      | 68.6                         | 11.011                          |
| 7                      | 68.5                         | 11.002                          |
| 8                      | 68.7                         | 11.027                          |
| 9                      | 68.4                         | 10.986                          |
| 10                     | 68.5                         | 10.994                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 68.5                         | 11.004                          |

ตาราง 36 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 12 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 68.3                         | 10.962                          |
| 2                      | 68.1                         | 10.930                          |
| 3                      | 68.0                         | 10.922                          |
| 4                      | 68.1                         | 10.930                          |
| 5                      | 68.2                         | 10.938                          |
| 6                      | 68.1                         | 10.930                          |
| 7                      | 68.2                         | 10.938                          |
| 8                      | 68.0                         | 10.922                          |
| 9                      | 68.1                         | 10.930                          |
| 10                     | 68.3                         | 10.962                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 68.1                         | 10.937                          |

ตาราง 37 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 13 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 67.7                         | 10.866                          |
| 2                      | 67.7                         | 10.874                          |
| 3                      | 67.7                         | 10.866                          |
| 4                      | 67.7                         | 10.866                          |
| 5                      | 67.6                         | 10.850                          |
| 6                      | 67.5                         | 10.834                          |
| 7                      | 67.7                         | 10.866                          |
| 8                      | 67.6                         | 10.850                          |
| 9                      | 67.5                         | 10.834                          |
| 10                     | 67.7                         | 10.866                          |
| ค่าเฉลี่ย              | 67.7                         | 10.857                          |

ตาราง 38 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 14 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 67.1                         | 10.770                          |
| 2                      | 66.9                         | 10.745                          |
| 3                      | 66.9                         | 10.745                          |
| 4                      | 66.9                         | 10.745                          |
| 5                      | 67.1                         | 10.770                          |
| 6                      | 67.1                         | 10.770                          |
| 7                      | 66.9                         | 10.745                          |
| 8                      | 66.8                         | 10.729                          |
| 9                      | 67.0                         | 10.762                          |
| 10                     | 66.8                         | 10.721                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 66.9                         | 10.751                          |

ตาราง 39 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 15 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 66.6                         | 10.689                          |
| 2                      | 66.6                         | 10.689                          |
| 3                      | 66.5                         | 10.673                          |
| 4                      | 66.3                         | 10.649                          |
| 5                      | 66.6                         | 10.689                          |
| 6                      | 66.5                         | 10.673                          |
| 7                      | 66.3                         | 10.641                          |
| 8                      | 66.4                         | 10.657                          |
| 9                      | 66.6                         | 10.697                          |
| 10                     | 66.5                         | 10.681                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 66.5                         | 10.674                          |

ตาราง 40 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 16 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 66.2                         | 10.617                          |
| 2                      | 66.0                         | 10.593                          |
| 3                      | 66.0                         | 10.601                          |
| 4                      | 66.0                         | 10.593                          |
| 5                      | 65.9                         | 10.585                          |
| 6                      | 66.0                         | 10.601                          |
| 7                      | 66.0                         | 10.593                          |
| 8                      | 66.0                         | 10.601                          |
| 9                      | 66.1                         | 10.609                          |
| 10                     | 66.1                         | 10.609                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 66.0                         | 10.600                          |

ตาราง 41 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 17 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 65.2                         | 10.470                          |
| 2                      | 65.1                         | 10.454                          |
| 3                      | 65.2                         | 10.470                          |
| 4                      | 65                           | 10.438                          |
| 5                      | 65.2                         | 10.470                          |
| 6                      | 65.3                         | 10.486                          |
| 7                      | 65                           | 10.438                          |
| 8                      | 65.2                         | 10.470                          |
| 9                      | 65.1                         | 10.454                          |
| 10                     | 65.2                         | 10.470                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 65.2                         | 10.462                          |

ตาราง 42 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริด ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 18 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 64.8                         | 10.406                          |
| 2                      | 64.7                         | 10.390                          |
| 3                      | 64.9                         | 10.422                          |
| 4                      | 64.8                         | 10.406                          |
| 5                      | 64.9                         | 10.422                          |
| 6                      | 64.7                         | 10.390                          |
| 7                      | 64.8                         | 10.406                          |
| 8                      | 64.7                         | 10.390                          |
| 9                      | 64.9                         | 10.422                          |
| 10                     | 64.8                         | 10.406                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 64.8                         | 10.406                          |

ตาราง 43 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 19 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 64.5                         | 10.358                          |
| 2                      | 64.6                         | 10.374                          |
| 3                      | 64.4                         | 10.342                          |
| 4                      | 64.5                         | 10.358                          |
| 5                      | 64.4                         | 10.342                          |
| 6                      | 64.6                         | 10.374                          |
| 7                      | 64.3                         | 10.325                          |
| 8                      | 64.5                         | 10.358                          |
| 9                      | 64.6                         | 10.374                          |
| 10                     | 64.5                         | 10.358                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 64.5                         | 10.356                          |

ตาราง 44 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 20 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 64.2                         | 10.309                          |
| 2                      | 64                           | 10.277                          |
| 3                      | 64.1                         | 10.293                          |
| 4                      | 64.2                         | 10.309                          |
| 5                      | 63.9                         | 10.261                          |
| 6                      | 63.8                         | 10.245                          |
| 7                      | 64.2                         | 10.309                          |
| 8                      | 64.1                         | 10.293                          |
| 9                      | 64                           | 10.277                          |
| 10                     | 63.9                         | 10.261                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 64.0                         | 10.284                          |

ตาราง 45 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 21 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 63.5                         | 10.197                          |
| 2                      | 63.4                         | 10.181                          |
| 3                      | 63.6                         | 10.213                          |
| 4                      | 63.7                         | 10.229                          |
| 5                      | 63.5                         | 10.197                          |
| 6                      | 63.4                         | 10.181                          |
| 7                      | 63.7                         | 10.229                          |
| 8                      | 63.5                         | 10.197                          |
| 9                      | 63.6                         | 10.213                          |
| 10                     | 63.3                         | 10.165                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 63.5                         | 10.200                          |

ตาราง 46 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริก ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 22 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 63                           | 10.117                          |
| 2                      | 63.3                         | 10.165                          |
| 3                      | 63.2                         | 10.149                          |
| 4                      | 63.1                         | 10.133                          |
| 5                      | 63.1                         | 10.133                          |
| 6                      | 62.8                         | 10.085                          |
| 7                      | 62.9                         | 10.101                          |
| 8                      | 63                           | 10.117                          |
| 9                      | 62.8                         | 10.085                          |
| 10                     | 63.2                         | 10.149                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 63.0                         | 10.123                          |

ตาราง 47 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 23 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 62.5                         | 10.036                          |
| 2                      | 62.6                         | 10.052                          |
| 3                      | 62.8                         | 10.085                          |
| 4                      | 62.5                         | 10.036                          |
| 5                      | 62.4                         | 10.020                          |
| 6                      | 62.7                         | 10.068                          |
| 7                      | 62.5                         | 10.036                          |
| 8                      | 62.6                         | 10.052                          |
| 9                      | 62.7                         | 10.068                          |
| 10                     | 62.6                         | 10.052                          |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 62.6                         | 10.051                          |

ตาราง 48 ค่าความเร็วลม และปริมาตรลม ไหลผ่านไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ที่ผ่านการใช้งานสัปดาห์ที่ 24 ที่ทำความสะอาดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

| ลำดับที่ของ<br>ไส้กรอง | ความเร็วลม (V)<br>ม./ วินาที | ปริมาตรของลม (Q)<br>ลบ.ม./ นาที |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1                      | 62.1                         | 9.972                           |
| 2                      | 62.0                         | 9.956                           |
| 3                      | 62.2                         | 9.988                           |
| 4                      | 62.3                         | 10.004                          |
| 5                      | 62.3                         | 10.004                          |
| 6                      | 62.0                         | 9.956                           |
| 7                      | 62.2                         | 9.988                           |
| 8                      | 62.1                         | 9.972                           |
| 9                      | 62.3                         | 10.004                          |
| 10                     | 62.2                         | 9.998                           |
| ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$    | 62.2                         | 9.983                           |

ภาพผนวก ฉ

คู่มือการใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์tridge

## คำนำ

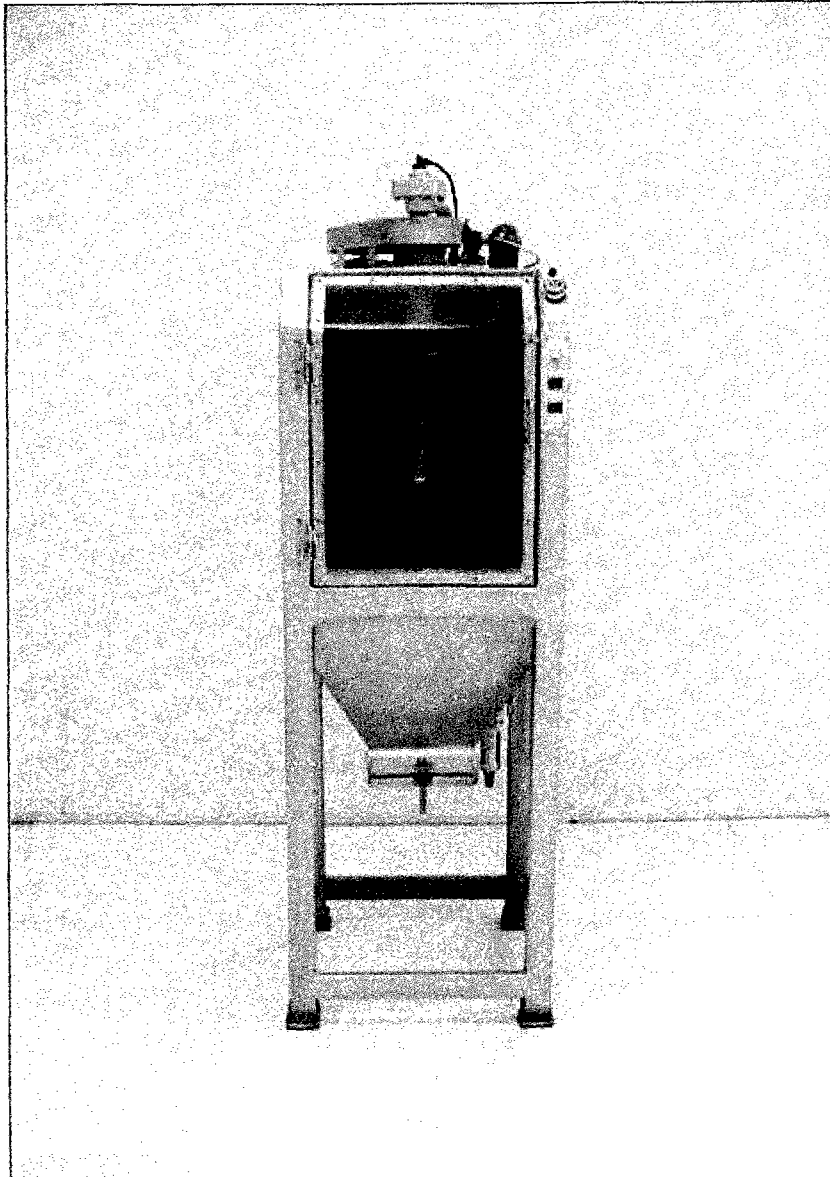
คู่มือการใช้ เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อแนะนำให้ผู้ใช้ได้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น รวมทั้งการใช้งานและการบำรุงรักษา เพื่อให้การใช้งานของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ เป็นไปอย่างถูกต้อง มีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมั่นใจว่าคู่มือฉบับนี้จะทำให้ท่านผู้ใช้งาน เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์ ใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ชาญชัย บุญชู

## สารบัญ

| เรื่อง                                                               | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                   | 1    |
| ข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่อง .....                               | 2    |
| ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์..... | 2    |
| ส่วนประกอบด้านหน้าของเครื่อง.....                                    | 2    |
| ส่วนประกอบด้านหลังของเครื่อง.....                                    | 2    |
| ส่วนประกอบด้านบนของเครื่อง.....                                      | 2    |
| ส่วนประกอบด้านล่างของเครื่อง.....                                    | 2    |
| การใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....                | 3    |
| การเปิด – ปิด เครื่อง.....                                           | 3    |
| การใส่ไส้กรองฝุ่น.....                                               | 4    |
| การนำไส้กรองฝุ่นออกจากเครื่อง.....                                   | 5    |
| การนำฝุ่นออกทิ้ง.....                                                | 5    |
| การบำรุงรักษาเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์.....         | 5    |

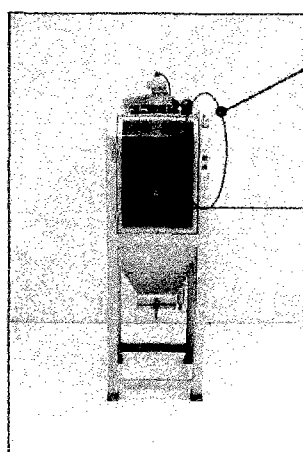


ภาพเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

1. ข้อกำหนดคุณลักษณะต้องการเฉพาะของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

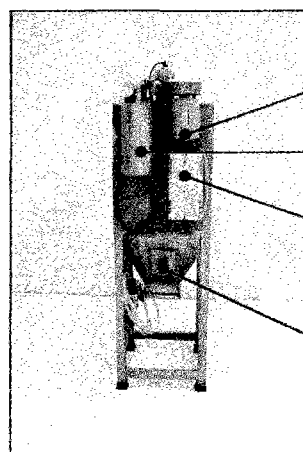
- 1.1 ใช้ไฟฟ้า 220 โวลท์ 50 เฮิร์ต
- 1.2 ใช้แรงดันลม ระหว่าง 30 – 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 1.3 ใช้เครื่องดูดฝุ่นขนาด 1500 วัตต์ ขึ้นไป
- 1.4 น้ำหนักเครื่อง 80 กิโลกรัม
- 1.5 ขนาดของเครื่อง
  - ความกว้าง 50 เซนติเมตร
  - ความยาว 70 เซนติเมตร
  - ความสูง 165 เซนติเมตร

2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์



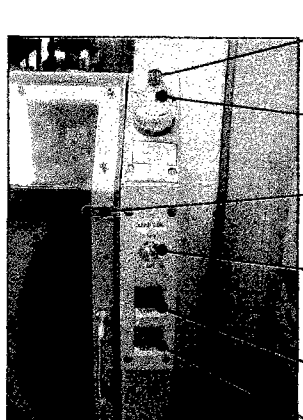
ด้านหน้าเครื่อง

สวิทช์ควบคุม  
ประตูเปิด - ปิด



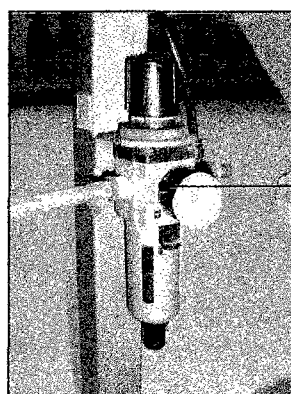
ด้านหลังเครื่อง

มอเตอร์  
ถังลมสำรอง  
กล่องควบคุม  
(PLC)  
ที่ต่อเครื่อง  
ดูดฝุ่น



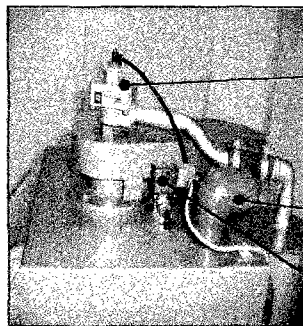
สวิทช์ควบคุม

ไฟสัญญาณ  
สวิทช์เปิด - ปิด  
กลอนล็อกประตู  
สวิทช์เลือกเวลา  
การทำความสะอาด  
สวิทช์ "Start"  
สวิทช์ "Reset"



ด้านหลังเครื่อง

วาล์วควบคุม  
แรงดันและ  
ชุดกรองฝุ่น

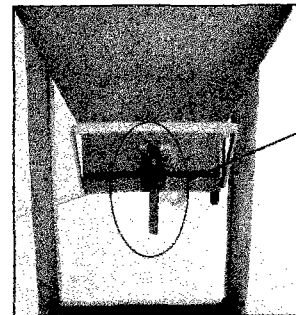


ด้านบนเครื่อง

วาล์วเร่ง  
ระบายลม

ท่อระบาย  
แรงดัน

วาล์วควบคุม



ด้านล่างเครื่อง

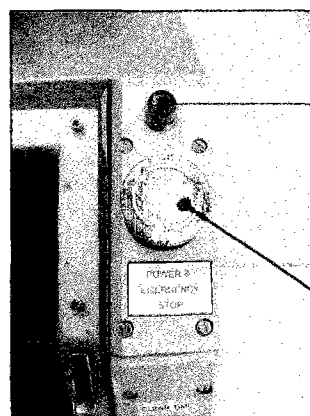
สกรูล็อคฝา  
ที่ทั้งฝืน

### 3. การใช้เครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่น

#### 3.1 การเปิด - ปิดเครื่อง

3.1.1 การเปิดเครื่อง หมุนปุ่ม "Power & Emergency stop" ตามเข็มนาฬิกา ประมาณ 60 องศา ปุ่มจะเคลื่อนที่ออกมา สังเกตได้จากสัญญาณไฟสีแดงด้านบนจะติด

3.1.2 การปิดเครื่อง กดปุ่ม "Power & Emergency stop" ลงตรง ๆ ปุ่มจะเคลื่อนที่ยุบลงและค้างอยู่ สังเกตได้จากสัญญาณไฟสีแดงด้านบนจะดับ



ไฟสัญญาณ

สวิตช์เปิด - ปิด เครื่อง

### 3.2 การใส่ไส้กรองฝุ่น

3.2.1 นำไส้กรองฝุ่นที่ต้องการทำความสะอาดใส่เข้าเครื่อง โดยสวมไส้กรองเข้ากับชุดแกนหัวจับ ให้สกรูยึดไส้กรองทั้ง 4 ตัว ตรงกับรูยึดของชุดแกนหัวจับ

3.2.2 ขันนอตทางปลายยึดไส้กรองฝุ่นให้แน่นทั้ง 4 ตัว

3.2.3 ปิดประตูให้สนิทพร้อมทั้งหมุนล้อกลอนที่บานประตู ถ้าปิดประตูไม่สนิทเครื่องจะไม่ทำงาน

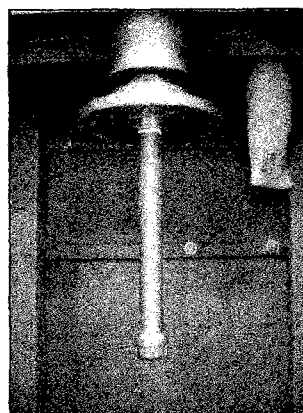
3.2.4 กดสวิช " Start " ปุ่มสีเขียว เครื่องจะเริ่มทำงาน ประมาณ 5 นาที เมื่อเครื่องทำงานเสร็จ จะมีเสียงอดดั่งเป็นจังหวะๆ และมีสัญญาณไฟสีแดงที่สวิชด้านหน้าติดกระพริบ



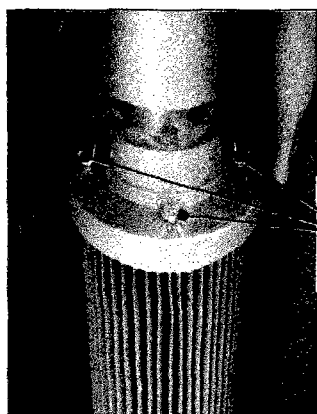
สกรูยึดล๊อค  
ไส้กรองฝุ่น



ไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

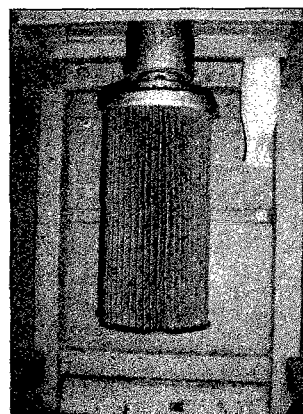


หัวจับไส้กรองฝุ่น



นัททางปลาที่  
ล๊อคไส้กรองฝุ่น

ขันนัททางปลาล๊อค  
ไส้กรองฝุ่นให้แน่น



ไส้กรองฝุ่นที่ยึดเข้ากับ  
หัวจับไส้กรองฝุ่น

### 3.3 การนำไส้กรองฝุ่นออกจากเครื่อง

3.3.1 กดปุ่ม "Reset " สังเกตสัญญาณไฟสีแดงกระพริบจะดับและ เสียงออกจะหยุดดัง

3.3.2 ปลดล็อกกลอนเปิดประตู คลายนัททางปลาที่ยึดไส้กรองออกทั้งหมด เก็บนัททางปลา

3.3.3 นำไส้กรองฝุ่นออกจากเครื่อง

### 3.4 การนำฝุ่นออกทิ้ง ( เมื่อมีปริมาณฝุ่นพอสมควรในถังด้านล่าง )

3.4.1 นำถุงพลาสติกชนิดใช้บรรจุสารเคมี หรือถังโลหะชนิดทิ้งสารเคมี มารองไว้ที่ใต้ถัง

ไซโคลน

3.4.2 คลายสกรูที่ล็อกฝาปิดและปลดออก

3.4.3 เปิดฝาทิ้งฝุ่นออก นำฝุ่นไปกำจัดทิ้ง

3.4.4 ปิดฝาทิ้งฝุ่น ชันสกรูล็อกให้แน่น

## 4. การบำรุงรักษาเครื่องทำความสะอาดไส้กรองฝุ่นแบบคาร์ทริดจ์

### 4.1 บำรุงรักษารายวัน

4.1.1 ตรวจสอบยางขอบประตู ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ไม่มีฝุ่นรั่ว ฟุ้งออกมาขณะทำงาน

4.1.2 ตรวจสอบบานพับและกลอนประตู ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์เสมอ

4.1.3 ตรวจสอบประตูที่ทิ้งฝุ่น ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ไม่มีฝุ่นรั่ว ฟุ้งออกมาขณะทำงาน

### 4.2 บำรุงรักษารายเดือน

4.2.1 ตรวจสอบหัวจับหมุนไส้กรอง ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์

4.2.2 ตรวจสอบหัวฉีดลม และจุดต่อสายลมให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ไม่มีรั่ว

4.2.3 ตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุม PLC. ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ : นายชาญชัย บุญชู อายุ 42 ปี  
 สถานที่เกิด : จ.พระนครศรีอยุธยา  
 ที่อยู่ปัจจุบัน : บ้านเลขที่ 49/907 ม.สวัสดิการข้าราชการ กทม. ช.ต้นแทน  
 ต.บางตลาด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี  
 โทรศัพท์ : บ้าน 02-5844717, 01-4004716, ทำงาน 02-5511053-64 ต่อ 651.

### ประวัติการศึกษา

| ปีการศึกษา | สถานศึกษา                                              | ระดับ                | สาขาวิชา            |
|------------|--------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|
| 2521       | วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา                          | ประโยควิชาชีพ        | ช่างวิทยุ-โทรคมนาคม |
| 2524       | วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตพระนครศรีอยุธยา | ประโยควิชาชีพชั้นสูง | ช่างอิเล็กทรอนิกส์  |
| 2535       | วิทยาลัยครูพระนคร                                      | ปริญญาตรี(วท.บ)      | ช่างอิเล็กทรอนิกส์  |

### ประวัติการทำงาน

| ปีที่ทำงาน    | สถานที่ทำงาน                                                             | ตำแหน่ง                               |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 2522-2525     | ราชกรีฑาสโมสร ถ.อรัญญูรัศมิ์ ดุสิต กรุงเทพมหานคร                         | ช่างอิเล็กทรอนิกส์                    |
| 2525-ปัจจุบัน | บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ ไทยแลนด์ ถ.แจ้งวัฒนะ บางเขน กรุงเทพมหานคร | ผู้ช่วยผู้จัดการ ฝ่ายซ่อมบำรุง (SMD1) |