

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญาานิพนธ์
ของ
จิรนนท์ เรืองสุภานิมิต

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กุมภาพันธ์ 2553

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญานิพนธ์
ของ
จิรนนท์ เรืองสุภานิมิต

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กุมภาพันธ์ 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

บทคัดย่อ
ของ
จิรนนท์ เรืองสุภานิมิต

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กุมภาพันธ์ 2553

จิรนนท์ เรืองศุภนิมิต. (2553). การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล. ปริญญาโท วิศวกรรมเครื่องกล.
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนวิธีการออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้อง
สะอาด โดยได้นำการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาประยุกต์ใช้ผ่านแบบจำลอง
การไหลของอากาศเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสม
ก่อนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างจริง และอยู่บนสมมติฐานที่สามารถใช้ปฏิบัติงานจริงได้
สำหรับกรณีศึกษาได้ทำการออกแบบระบบปรับอากาศที่ระดับความสะอาด Class 10,000 สำหรับ
โรงงาน ผลิตได้เครื่องกระดาศ โดยขั้นตอนการออกแบบเริ่มจากการคำนวณภาระการทำความเย็น
จากนั้นร่างแบบแสดงรายละเอียด ตำแหน่ง และขนาดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศไว้ ขั้น
ต่อไปเริ่มในส่วนของการโปรแกรม ได้มีการสร้างแบบจำลองและขอบเขตคล้ายกับแบบที่ร่างไว้ในรูปแบบ
3 มิติ กำหนดให้รูปแบบของการไหลเป็นแบบความปั่นป่วน $k-\epsilon$ และประมวลผลวิเคราะห์โดยอาศัย
โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลที่คำนวณบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตร
จำกัด (FVM) มาช่วยในการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการ
หมุนเวียนของอากาศ, ความเร็วอย่างสม่ำเสมอในแนวดิ่ง และความเข้มข้นของฝุ่นละออง ขั้นตอนต่อ
ไปนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ในเบื้องต้นมาปรับปรุงแก้ไขในส่วนของการออกแบบจากนั้นดำเนินการก่อสร้าง
จริงและทดสอบการใช้ปฏิบัติงานจริง จากผลการทดสอบระดับความสะอาดของห้องพบว่าใน
สภาวะที่ห้องไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน U.S. Federal
Standard 209E ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ จากผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบปรับอากาศของ
ห้องสะอาดของโครงการใหม่ในโอกาสต่อไป

คำสำคัญ: ห้องสะอาด / ระดับของความสะอาด / อัตราการหมุนเวียนของอากาศ / ความ
เข้มข้นของฝุ่นละออง / การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

THE DESIGN OF AIR CONDITIONING SYSTEM IN A CLEAN ROOM AND APPLICATION OF
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

AN ABSTRACT

BY

JIRANAN RUANGSUPANIMIT

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

February 2010

Jiranan Ruangsapanimit. (2010). *The design of Air Conditioning System in a Clean Room and Application of Computational Fluid Dynamics*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon, Assoc. Prof. Dr. Paisarn Naphon.

The objective of this research was to study the design methodology of air conditioning system in a clean room. Model simulation under Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to predict behavior of air flow leading to the optimum design before construction and practicality. In this case, design on cleanliness class 10,000 for a factory of filter production. The design process starts to calculate the cooling load and draft the detail drawing of air conditioning system. The next, in this computer programming, the computer model has been made, boundary in three dimensions. Used the turbulence flow model, $k-\varepsilon$ standard model is employed and analysis of air flow conducted by Computational Fluid Dynamics technique based on Finite Volume Method (FVM). For related variable such as Air change rate, Vertical uniform air velocity, Particle concentration. The next, applied the preliminary analysis result to adjust as for designing after that proceeding to construction work and operational test. From room cleanliness classification test in condition without operate both person and machine found the acceptance criteria U.S. Federal Standard 209E that agree with the analysis result of simulation. This research result is able to consider for further application of air conditioning system for clean room design.

Keywords: Clean room / Cleanliness classes / Air Change rate per Hour / Particle concentration / Computational Fluid Dynamics /

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้
การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ของ
จิรนนท์ เรืองศุภนิมิต

ได้รับการอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ 8 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธาน

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

(ผศ.พ.อ.ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล)

ประกาศคุณูปการ

ความสำเร็จลุล่วงของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นมิได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้โอกาส ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ตลอดจนการสนับสนุนช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจนผ่านไปได้อย่างดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความเมตตาของท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์จากกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าและคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และกรุณาให้ความรู้ ความเข้าใจในวิชาพื้นฐาน และวิชาสาขาเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร หัวหน้า และผู้ร่วมงานของบริษัท โตเอเนค (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการให้โอกาสในการปฏิบัติงานของโครงการ Yamashin New Factory Project

ขอขอบพระคุณ คุณอัครวิยะ พานิชประเสริฐ บริษัท เมสโปร (1989) จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเป็นที่ปรึกษาทางด้านการออกแบบและ ติดตั้งระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาด

ขอขอบพระคุณ บริษัท สกิล ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือวัด อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บริษัท ยามาฮิน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่ของห้องสะอาดที่ทำการออกแบบ ติดตั้ง ทดสอบและเก็บข้อมูลของงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ พี่เอกรงค์ สุขจิต และ พี่ชโลธร ธรรมแท้ อาจารย์และนักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้เอกสารงานวิจัยต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ พี่นิวัฒน์ ภูเจริญ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และหัวหน้าฝ่ายสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของการศึกษาอย่างดียิ่ง รวมทั้งครอบครัวที่เป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด และขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

จิรนนท์ เรืองศุภนิมิต

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎี.....	9
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางการออกแบบ.....	9
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล.....	40
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางการทดสอบ.....	43
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
ขั้นตอนการคำนวณออกแบบ.....	49
ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ.....	54
ขั้นตอนทดสอบปฏิบัติงานจริง.....	65
4 ผลและการวิเคราะห์.....	77
ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	77
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ภายหลังการปรับแก้.....	83
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	88
สรุปผลการวิจัย.....	88
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	89
บรรณานุกรม.....	90

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94
ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	102
ภาคผนวก ง.....	105
อภิธานศัพท์.....	117
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	122

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 การเปรียบเทียบมาตรฐานระดับความสะอาดของห้องสะอาดต่างๆ.....	12
2 มาตรฐาน Federal Standard 209E airborne particulate cleanliness classes in clean rooms and clean zones.....	13
3 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐาน Federal Standard 209Eและ มาตรฐาน ISO14644-1..	15
4 ปัจจัยอื่นๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน Federal Standard 209E.....	15
5 แสดงการคำนวณภาระการทำความเย็นของห้องสะอาด Weld C/R (Class 10,000)...	35
6 แสดงสูตรการคำนวณ Cooling load จากแหล่งกำเนิดความร้อนต่างๆ.....	36
7 U-Values (Heat Transmission Coefficients).....	37
8 TD-Value (Equivalent Temperature Difference of dark wall, °C).....	38
9 SHGF-Value (Solar Heat Gain through ordinary glass, kcal/h.m ²).....	38
10 อัตราการหมุนเวียนอากาศที่แนะนำตามระดับชั้นความสะอาดที่ต้องการของมาตรฐาน Federal Standard 209E.....	39
11 UCL factor สำหรับ 95% Upper Confidence Limit.....	46
12 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดห้องสะอาด.....	48
13 ความถี่ในการทดสอบห้องสะอาด.....	48
14 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาในบริเวณทำความเย็นโดยการนำความร้อน (Conduction) ผ่านกำแพง กระจก ผังกัน พื้นผ้าและหลังคาที่ถูกแดดส่อง.....	49
15 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้าสู่บริเวณทำความเย็นโดยตรง โดยการแผ่รังสี (Radiation) ผ่านกระจกหรือ ผ่านวัสดุอื่นที่โปร่งแสง.....	50
16 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนที่เกิดจากคน แสงสว่างจากดวงไฟ เครื่องจักรอุปกรณ์ไฟฟ้าและความร้อนที่มาจากอากาศอุ่นภายนอกในขณะเปิดประตูหรือขอบหน้าต่าง.....	50
17 แสดงผลรวม Cooling load ทั้งหมดของห้องสะอาด (จากตาราง 14 และตาราง 15 Cooling load สูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 16.00 น. คือ 3,016.9 และ 547.2).....	51
18 รายละเอียดของห้องสะอาด Weld C/R.....	53

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
19 แสดงค่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงตัวเลข (Numerical boundary condition).....	57
20 ค่าสภาวะขอบเขต.....	59
21 ค่าสภาวะเริ่มต้น.....	59
22 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลัพธ์บนระนาบ x-z และ y=1 m.....	62
23 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ และความชื้นของห้อง.....	77
24 แสดงผลการวัดความดันของห้อง.....	77
25 แสดงผลการนับจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองที่ผ่านแผ่นกรอง HEPA หัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่าย.....	78
26 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรในสภาวะ ที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร.....	79
27 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรในสภาวะ ที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ.....	81
28 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ และความชื้นของห้อง.....	84
29 แสดงผลการวัดความดันของห้อง.....	84
30 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรในสภาวะ ที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ.....	85
31 แสดงผลการวัดปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านหัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่าย.....	87

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ห้องสะอาดที่ Cheng et al. (1999) ใช้ในการศึกษา.....	4
2 ห้องสะอาดที่ Hu et al. (2002) ใช้ในการศึกษา.....	5
3 แสดงส่วนประกอบของห้องสะอาด.....	9
4 การไหลของอากาศแบบราบเรียบ.....	17
5 การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวระดับ.....	18
6 การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวตั้ง.....	19
7 การไหลของอากาศแบบปั่นป่วน.....	19
8 ตัวอย่างการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน.....	20
9 การไหลของอากาศแบบผสม.....	20
10 ระบบระบายอากาศและปรับอากาศของห้องสะอาด.....	21
11 ระบบการนำอากาศเข้าแบบเปิด.....	22
12 ระบบการนำอากาศเข้าแบบท่อแยก.....	22
13 ตัวอย่างลำดับขั้นตอนเมื่อเข้าห้องสะอาด.....	28
14 รูปร่างและขนาดของห้องสะอาดที่ทำการออกแบบ.....	53
15 รายละเอียดตำแหน่งหัวจ่ายลม HEPA (SA) และช่องลมกลับ (RA) (หน่วยเป็น m).....	54
16 แบบจำลองโดยโปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสถานะและสร้างกริด.....	55
17 เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้นในขอบเขตที่ศึกษา.....	60
18 เวกเตอร์ความเร็วส่วนหนึ่งที่ออกทางช่องลมกลับ.....	60
19 แสดงตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์บนระนาบ x-z และ y=1 (หน่วยเป็น m).....	61
20 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ x-z และ y=1 m.....	63
21 เส้นแสดงขนาดความเร็วบนระนาบ x-z และ y=1 m.....	63
22 ผลการคำนวณความเร็วที่ได้บนระนาบ x-z และ y=1 m ของจุดวิเคราะห์ทั้ง 16 จุด.....	64
23 เครื่องนับอนุภาค (Particle counter)	65
24 หัวตรวจวัด (Aerosol probe)	66
25 การวัดอุณหภูมิ.....	66
26 การวัดความเร็วลม.....	67
27 การวัดปริมาณการไหลของอากาศ.....	67

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ตำแหน่งทดสอบอนุภาคที่ผ่าน HEPA (Measuring point filter size 2'x2')	68
29 ตำแหน่งวัดปริมาณฝุ่นละออง 9 โซน.....	70
30 ห้องสะอาดที่ทำการทดสอบขณะไม่มีการปฏิบัติงาน.....	71
31 ห้องสะอาดที่ทำการทดสอบขณะกำลังปฏิบัติงาน.....	71
32 การตรวจหารอยรั่วของ HEPA filter.....	72
33 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 1.....	72
34 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 2.....	73
35 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 3.....	73
36 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 4.....	74
37 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 5.....	74
38 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 6.....	75
39 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 7.....	75
40 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 8.....	76
41 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 9.....	76
42 แผนผังการทำงานของระบบปรับอากาศของห้องสะอาด.....	96
43 แบบ PLAN ระบบท่อลม.....	97
44 ภาพขยายระบบท่อลมภายในห้องสะอาด.....	98
45 ภาพตัดขนาดและแนวท่อลม.....	99

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมในปัจจุบันแทบจะทุกประเภทได้มีการนำเทคโนโลยีห้องสะอาดมาใช้ในการกระบวนการผลิต จากสภาวะการแข่งขันทางการตลาดที่สูงขึ้นส่งผลให้ผู้บริโภคมีทางเลือกที่มากขึ้นในการที่จะเลือกซื้อ เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่า ในอุตสาหกรรมการผลิตได้รองกระดากก็เช่นกัน ระบบปรับอากาศของห้องสะอาดได้เข้ามามีส่วนช่วยรักษาความสะอาดของอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงาน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มคุณภาพทางการผลิตทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรกลที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งต้องการความแม่นยำ ความละเอียดในการทำงานสูง

การออกแบบระบบปรับอากาศของห้องสะอาด นับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะถ้าเป็นโครงการขนาดใหญ่ ซึ่งต้องมีการลงทุนในระบบปรับอากาศหลายร้อยหรือหลายพัน ล้านบาท ถ้าหากออกแบบได้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ก็สามารถช่วยลดต้นทุนการก่อสร้าง และลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นได้เป็นอย่างมาก สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญในการออกแบบควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง นอกเหนือจากอุณหภูมิ, ความดันอากาศ, ความชื้น, แสงสว่าง และอนุภาคสิ่งเจือปนแล้ว อัตราการหมุนเวียนของอากาศ (Air Change rate per Hour) หรือ ACH ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงและเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมในระดับความสะอาดของห้องที่ต้องการออกแบบนั้นๆ ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับวิศวกรที่ทำงานทางด้านการออกแบบ มักตั้งคำถามในใจเสมอถึงการเลือกค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสม หากแต่ทราบจากมาตรฐานว่าถ้าต้องการออกแบบในระดับความสะอาด Class 100,000 ควรใช้อัตราการหมุนเวียนอากาศที่ 20-50 ACH และสำหรับ Class 10,000 ควรใช้ที่ 50-100 ACH เป็นต้น จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงการเพิ่มปริมาณ ACH ซึ่งไม่แน่ว่าจะสามารถช่วยรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดได้มากขึ้น การเลือกปริมาณ ACH โดยปราศจากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมแล้ว อาจจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองในแง่ของต้นทุนการก่อสร้าง เช่นเลือกใช้เครื่องปรับอากาศที่ใหญ่เกินไป หรือในแง่ของต้นทุนการผลิต เช่นค่าไฟ ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเคลื่อนที่ของฝุ่นละออง และนำไปสู่การบอกถึงประสิทธิภาพการ

หมุนเวียนอากาศของห้องในที่สุด การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD จึงได้เข้ามามีบทบาทเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ทำนายพฤติกรรมดังกล่าวซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้อง ช่วยให้ทั้งวิศวกรและเจ้าของโครงการมั่นใจในผลการออกแบบยิ่งขึ้น สำหรับหัวข้องานวิจัยนี้ เป็นการแสดงขั้นตอนการออกแบบ การจำลองการไหลของอากาศ และการทดสอบปฏิบัติงานจริงของระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาด เพื่อพิสูจน์ว่าการออกแบบข้างต้นโดยนำ CFD มาประยุกต์ใช้นั้น สามารถนำมาสู่การปฏิบัติงานจริงของอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงการใหม่ต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาขั้นตอนการออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาด โดยนำ CFD เข้ามามีส่วนช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เลือกใช้นั้น เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตและสามารถนำมาใช้ปฏิบัติงานจริงได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการออกแบบระบบปรับอากาศของห้องสะอาดที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ของโรงงานผลิตได้กรองกระดาษ บริษัท ยามาฮิน ประเทศไทย จำกัด ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จ.พระนครศรีอยุธยา
2. ประเภทของห้องสะอาดที่ออกแบบเป็นห้องสะอาดที่มีการหมุนเวียนอากาศคล้ายกับระบบปรับอากาศของห้องทั่วไป (Conventional clean room)
3. การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศกำหนดให้อากาศที่ไหลในห้องสะอาดเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible flow) ที่สภาวะคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Unsteady flow) และเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ
4. สนใจศึกษาเฉพาะพฤติกรรมการไหลของอากาศ โดยเลือกใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลเชิงตัวเลขที่คำนวณบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) หรือ FVM
5. เป็นการศึกษาเฉพาะขั้นตอนการออกแบบ ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ และขั้นตอนการทดสอบใช้ปฏิบัติงานจริงเท่านั้น ซึ่งสำหรับขั้นตอนการเลือกวัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการติดตั้งอยู่นอกเหนืองานวิจัยนี้
6. มาตรฐานในการจำแนกระดับชั้นของห้องสะอาดที่ใช้อ้างอิงคือ มาตรฐาน U.S. Federal Standard 209E (The Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST). 1992: 5)

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ห้องสะอาด (Clean room) หมายถึง “ห้องหรือบริเวณปิดที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในห้องได้แก่ อนุภาค, สิ่งเจือปน, อุณหภูมิ, ความดันอากาศ ความชื้น, รูปแบบการไหลของอากาศ, การสิ้นสະเทือน, แสงสว่าง และสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์” (สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย. 2521: 5)
2. ระดับของความสะอาด (Cleanliness classes) หมายถึง การจำแนกระดับชั้นความสะอาดของห้องสะอาดซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานของห้องสะอาด U.S. Federal Standard 209E
3. อัตราการหมุนเวียนของอากาศ (Air Change rate per Hour) หมายถึง อัตราการไหลของอากาศเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง
4. การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) หมายถึง การคำนวณการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์
5. ความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particle concentration) หมายถึง จำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำมาเป็นประโยชน์ทั้งทางตรงคือสำหรับวิศวกรปรับอากาศเพื่อเป็นองค์ความรู้ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ ได้เข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศจากการประยุกต์ใช้ CFD และได้รู้ถึงขั้นตอนวิธีการทดสอบห้องสะอาดตามที่มาตรฐานกำหนด และประโยชน์ในทางอ้อมคือสำหรับผู้สนใจ รวมไปถึงเจ้าของโครงการเพื่อช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างต่อไปได้

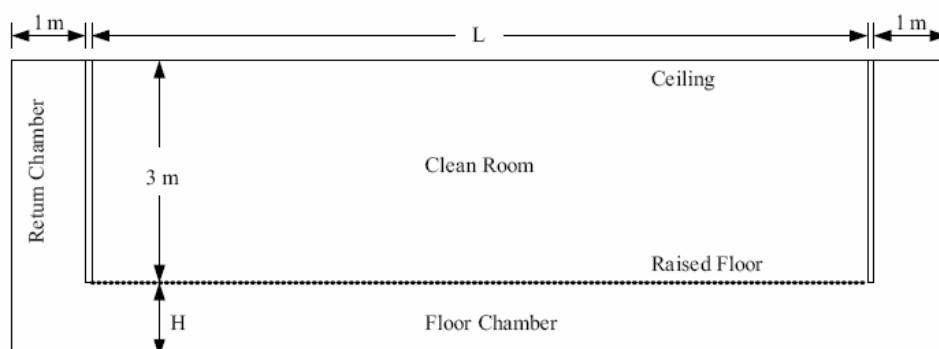
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการพัฒนาเทคโนโลยีห้องสะอาดโดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

George and David (1999) ได้ศึกษาโดยนำเอา CFD มาแสดงการเคลื่อนที่ของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องสะอาดที่ติดตั้งระบบปรับอากาศไว้เหนือเพดานห้อง ขนาดของห้องสะอาดเท่ากับ 25.5 m x 12.8 m ความสูงของห้องเท่ากับ 3 m โดยสมมติฐานว่าไม่มีความร้อนผ่านผนังห้อง ระบบปรับอากาศประกอบด้วยชุดพัดลมกรองอากาศ (Fan Filter Unit, FFU) จำนวน 20

ช่องลมกลับ 5 ช่อง อุณหภูมิเข้าเครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit, AHU) 16°C ความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักร 48.95 kW จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายลมออกจากแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Particulate Air Filters, HEPA) และทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศในสองมิติ ตลอดจนการกระจายอุณหภูมิภายในห้อง ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจได้ว่าจะปรับปรุงแก้ไขตรงส่วนใดเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต อย่างเช่นผลจากการจำลองครั้งแรกพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่ทั่วถึงส่งผลให้เย็นเฉพาะบางที่จึงทำให้ผู้ออกแบบแก้ไขโดยการเพิ่มพื้นที่ของช่องลมกลับไปตามความยาวของสายการผลิตเพื่อเพิ่มลมกลับไปยัง AHU ได้ง่ายขึ้นเป็นผลให้สามารถกระจายความเย็นได้มากขึ้น จึงทำให้สร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ออกแบบ

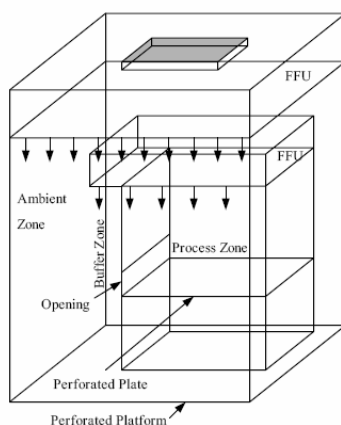
Cheng, Liu, Lam, Cai and Lee (1999) ได้ศึกษาผลกระทบของความพรุนของพื้นห้องสะอาดซึ่งใช้ในการดูดซับการไหลที่ปล่อยออกมาจากหัวจ่ายลม ความสูงของพื้น และขนาดความกว้างของห้องที่มีต่อความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วของอากาศภายในห้องสะอาดแบบ Unidirectional flow clean room โดยใช้ซอฟต์แวร์ STAR-CD ที่สร้างบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด การไหลภายในห้องสะอาดถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ standard ในการจำลองพฤติกรรมของความปั่นป่วน จากผลการศึกษาพบว่าความพรุนของพื้น ความสูงของพื้น และความกว้างของห้องสะอาดมีผลอย่างมากต่อความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็ว โดยความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วจะน้อยลงเมื่อความกว้างของห้องเพิ่มขึ้น และความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของพื้นห้องมีมากขึ้น



ภาพประกอบ 1 ห้องสะอาดที่ Cheng et al. (1999) ใช้ในการศึกษา

ศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2002) ได้ศึกษาการนำเอา CFD มาแสดงการเคลื่อนที่ของ กระแสอากาศและอุณหภูมิภายในห้องที่ติดเครื่องปรับอากาศไว้บนเพดาน โดยมีขนาดห้อง $4\text{ m} \times 5\text{ m}$ ความสูงของห้อง 3 m มีความร้อนผ่านผนังสองด้าน ด้านหนึ่ง 10 W/m^2 และอีกด้านหนึ่ง 40 W/m^2 โดยแยกทำการศึกษา 2 กรณี คือ กรณีแรกเป็นห้องว่างและกรณีที่สองเป็นห้องซึ่งมีตู้ตั้งอยู่กลางห้อง จากผลการศึกษาที่แสดงให้เราได้เห็นถึงลักษณะการกระจายลมออกจากเครื่องปรับอากาศทั้งความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศในสามมิติ ตลอดจนการกระจายอุณหภูมิภายในห้องซึ่งทำให้วิศวกรมั่นใจในผลของการออกแบบมากยิ่งขึ้น

Hu, Chuah, and Yen (2002) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของการติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Mini-environment เพื่อช่วยเพิ่มระดับของความสะอาดภายในห้องสะอาดของอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากปัจจุบันการลดลงอย่างรวดเร็วของขนาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ต้องมีการระมัดระวังมากขึ้นในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากผลกระทบของฝุ่นละอองในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ standard ในการจำลองผลกระทบของการปั่นป่วน ใช้วิธีอันดับสอง (Second order upwind) เพื่อประมาณค่าอิทธิพลของเทอมการพาและแก้ปัญหาตามขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง นอกจากนี้ Hu et al. ยังได้ศึกษาผลของการออกแบบ Buffer Zone เพื่อช่วยในการป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปในพื้นที่ปฏิบัติงาน ซึ่งผลจากการออกแบบ Buffer Zone พบว่าสามารถควบคุมฝุ่นละอองได้น้อยกว่า 1 Particle/m^3 ในส่วนของพื้นที่การปฏิบัติงาน



ภาพประกอบ 2 ห้องสะอาดที่ Hu et al. (2002) ใช้ในการศึกษา

Rouaud and Havet (2002) ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ESTET เพื่อตรวจสอบรูปแบบการไหลภายในห้องสะอาดของกระบวนการการผลิตอาหาร โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินความถูกต้องตามแบบของความจำลองการปั่นป่วน 2 แบบคือ Standard $k-\varepsilon$ และ Renormalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ มีความเหมาะสมในการจำลองการไหลบริเวณห้องสะอาดมากกว่าแบบจำลองการปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ เนื่องจากค่าความหนืดของความปั่นป่วนที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้การจำลองการไหลบริเวณที่เกิดการหมุนวนมีความผิดพลาดได้มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ที่ให้ค่าความหนืดของความปั่นป่วนที่ดูสมจริงกว่า

Rumsey Peter (2003) ได้ทบทวนผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการหมุนเวียนของอากาศซึ่งเป็นค่าแนะนำให้ใช้สำหรับออกแบบห้องสะอาดที่ระดับความสะอาด Class 100 จากสถาบันทั้ง 7 แห่งดังนี้ IEST (Considerations in clean room design), Raymond Schneider (Practical clean room design), Clean rooms equipment supplier, Faulkner Fisk and Walton (Energy management in semiconductor clean rooms), California-based designer and clean rooms instructor, Federal Standard 209B (Supersede by ISO/DIS 14644), National Environment Balancing Bureau (NEBB) (Procedural standards for certified testing of clean rooms) พบว่าขอบเขต ของค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดคือ 250-700 ACH นั้นค่อนข้างกว้าง ซึ่งผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกค่าที่สูงไว้ก่อนเพื่อป้องกันการผิดพลาดในภายหลังจากการเลือกค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่สูงเกินไปนั้นจึงส่งผลให้ต้องเลือกใช้ขนาดพัดลมที่ตัวใหญ่เกินไปอีกด้วย ทั้งนี้จึงได้ศึกษาข้อมูลของ Pacific gas and Electric company และ Lawrence Berkeley National Laboratory ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบห้องสะอาดในทางปฏิบัติจริงจากหลายแห่งพบว่าผลที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกันกับในทางทฤษฎีซึ่งผลจากการวัดนั้นขอบเขตค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดนั้นคือ 90-250 ACH เท่านั้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลจึงสรุปได้ว่าค่าแนะนำสำหรับใช้ออกแบบที่เหมาะสมคือ 200 ACH หากเป็นห้องสะอาดที่มีเกี่ยวข้องกับการผลิตยาหรือเทคโนโลยีขั้นสูงแนะนำให้ใช้ค่าที่เหมาะสมคือ 300 ACH และผลที่ได้จากการเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมนี้จะนำไปสู่การประหยัดพลังงาน และเป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้าง ต้นทุนการปฏิบัติงาน และต้นทุนในการบำรุงรักษาอีกด้วย

Marcel and Tony (2003) ได้ใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาการกระจายตัวของฝุ่นภายในห้องสะอาด โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ 3 วิธีมาประกอบการบรรยาย ดังนี้ Euler approach,

Lagrange approach, Passive scalar approach แต่ละวิธีจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน Lagrange approach เป็นวิธีเดียวที่จะนำมาใช้ถ้าหากต้องการหาความถูกต้อง แม่นยำของผลเฉลย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือการคำนวณเวลา (Simulation time) สำหรับ Euler approach เป็นวิธีหนึ่งที่เลือกใช้คำนวณหาการกระจายตัวของฝุ่นภายในห้องที่มี Gravity force มาเกี่ยวข้องด้วย สำหรับ Passive scalar approach เป็นวิธีที่ไม่ควรนำมาใช้คำนวณหาการกระจายตัวของฝุ่นเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งวิธีนี้ได้ใช้ความน่าจะเป็นของ Gaussian มาเป็นพื้นฐานในการคำนวณซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนฝุ่น ดังนั้นจึงน่าจะนำข้อดีในเรื่องของความแม่นยำของ Lagrange และการคำนวณเวลาของ Euler มาประกอบกันจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด

Tengfang Xu (2004) ได้ทบทวนและวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบการไหลของอากาศในห้องสะอาดที่ระดับความสะอาด Class 100 ได้สามประเด็นหลักดังต่อไปนี้ ปริมาณการไหลของอากาศในหนึ่งช่วงเวลา, รูปแบบการไหลของอากาศ (ความเร็ว, ทิศทาง), ความดันอากาศ สำหรับประเด็นแรกและประเด็นที่สอง ทางสถาบัน IEST ได้มีการพิจารณาแก้ไขใหม่โดยแนะนำให้ใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่ 200 ACH จาก 240 ACH สำหรับการไหลแบบ non-unidirectional และใช้ความเร็วลมที่ระหว่าง 0.20-0.50 m/s สำหรับการไหลแบบ unidirectional จากการศึกษาการเปรียบเทียบค่าแนะนำอัตราการหมุนเวียนอากาศและความเร็วลมจากสถาบัน IEST ค่าเดิมกับค่าแนะนำอัตราการหมุนเวียนอากาศและความเร็วลมจากสมาคม ASHRAE ค่าใหม่นั้นพบว่าการเพิ่มปริมาณการจ่ายลม 10-30% นั้นเป็นผลให้ต้องเพิ่มกำลังของพัดลม 30-120% ดังนั้นสำหรับประเด็นนี้จึงสรุปได้ว่าหากต้องการประหยัดพลังงานนั้นจึงไม่ควรใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่สูงเกินความจำเป็น และประเด็นสุดท้ายคือการควบคุมความดันอากาศที่เหมาะสมจะมีผลต่อกิจกรรมต่างๆในห้องสะอาด ยกตัวอย่างเช่น ความดันอากาศภายในห้องสะอาดเป็นบวกจะป้องกันไม่ให้ฝุ่น เชื้อโรครั่วไหลเข้ามาในห้อง แต่ในทางตรงกันข้ามหากความดันอากาศภายในห้องเป็นลบซึ่งจะป้องกันสิ่งปนเปื้อนภายในห้อง เช่นแบคทีเรีย หรือวัตถุมีพิษต่างๆไม่ให้ไหลออกไปได้ วิธีควบคุมความดันนี้ไม่ได้เกี่ยวข้องเพียงแต่การหมุนเวียนอากาศเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อ make-up อากาศใหม่ และการระบายอากาศออกนอกห้องอีกด้วย

Rouaud and Havet (2005) ได้พัฒนาความรู้เพื่อหาวิธีในการออกแบบห้องสะอาดด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดในสภาวะไม่คงตัว โดยนำเสนอดัชนีที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพของการระบายอากาศภายในห้องสะอาด 3 ดัชนีด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย Contamination removal effectiveness, Local mean age of air และ Room mean age of air อีก

ทั้งยังได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง ที่มีต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดนอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่า ACH ที่เหมาะสมต่อการรักษาระดับความสะอาดของห้องสะอาด ซึ่งการเพิ่มค่า ACH โดยปราศจากการหาค่าที่เหมาะสมจะนำไปสู่การสิ้นเปลืองต้นทุน

Precision air products company (2005) ได้นำเสนอผลงานวิจัยในหัวข้อเกี่ยวกับ Clean room diffusers สำหรับห้องปฏิบัติการผ่าตัดในโรงพยาบาล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายลมเย็นในห้องสะอาดมีดังต่อไปนี้ อัตราการหมุนเวียนของอากาศ, ลักษณะการไหลของอากาศผ่านหัวกระจายลม, กรองอากาศ, ขนาดพื้นที่หน้าตัด, จำนวน, การจัดวางตำแหน่ง ของหัวกระจายลม, ตำแหน่งการวางช่องลมกลับ และช่องระบายอากาศ

Abbas, Seymour, Booth and Rose (2006) ได้แสดงการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ของ CFD มาทำนายสภาวะการควบคุมอุณหภูมิ ($20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$) และความเร็วของการไหลของอากาศในห้องปิดมาเปรียบเทียบกับผลการวัดจากแบบจำลองทางสถาปัตย์โดยพิจารณาจากสองกรณีคือกรณีที่ไม่มีความร้อนจากแสงสว่าง และกรณีที่เพิ่มความร้อนจากแสงสว่าง 5.34 kW ผลที่ได้สรุปได้ว่า CFD สามารถทำนายผลออกมาได้อย่างใกล้เคียงจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนแรก

เอกรงค์ สุขจิต (2006) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ศึกษาเชิงตัวเลขผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศ, อุณหภูมิ, ความชื้น และฝุ่นละออง ภายในห้องสะอาด โดยทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นด้วยภาษา Visual C++ บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด ขั้นตอนวิธี SIMPLE และการประมาณในช่วงของ Rhie and Chow ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็ว และความดันในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ $k-\epsilon$ ของ Launder และ Sharma โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบ และตรวจสอบความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขของปัญหาการไหลพื้นฐานที่เป็นที่ยอมรับก่อนทำการวิเคราะห์ผลกระทบความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์, ผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลข ของปัญหาการไหลพื้นฐานเป็นอย่างดี

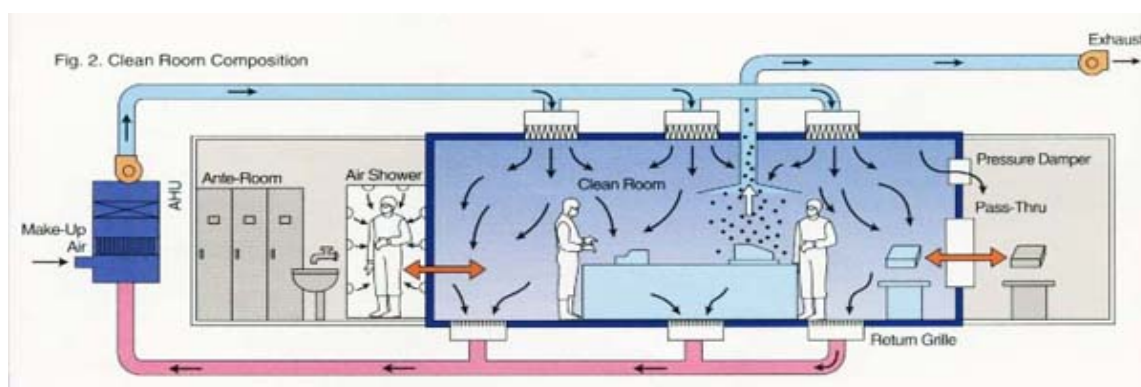
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางด้านการออกแบบ

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับห้องสะอาด

ห้องสะอาด (Clean room) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 โดย Willis Whitfield ห้องสะอาด คือห้องที่มีการออกแบบ (Design), ก่อสร้าง (Construction) และการใช้งาน (Operating) ที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ, ความดันอากาศ, ความชื้นตามที่ต้องการ และมีการควบคุมมลสารในอากาศให้น้อยที่สุดเพื่อให้มีความสะอาดเป็นไปตามระดับมาตรฐานความสะอาดนั้นๆ รวมทั้งต้องมีการเฝ้าระวังโดยการติดตามตรวจสอบความสะอาดของห้องให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตลอดระยะเวลาการใช้งาน โดยทั่วไปมลสารหรืออนุภาคในอากาศประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีชีวิต (เชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ) และอนุภาคที่ไม่มีชีวิต (ผงฝุ่น) ห้องสะอาดทางชีววิทยา, อุตสาหกรรมยา หรือโรงพยาบาล จะเน้นการควบคุม หรือป้องกันพวกเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความสะอาดมากจะเน้นการควบคุมทั้งอนุภาคที่มีชีวิต และอนุภาคที่ไม่มีชีวิต เครื่องมือสำคัญในการควบคุมปริมาณอนุภาคในห้องสะอาด คือแผ่นกรองอากาศชนิด HEPA ซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาด 0.3 ไมครอนได้มีประสิทธิภาพถึง 99.97%



ภาพประกอบ 3 แสดงส่วนประกอบห้องสะอาด (ทวี เวชพฤติ; และ กิตติพงศ์ เตมียะประดิษฐ์. 2531)

การกำหนดคุณสมบัติเฉพาะของห้องสะอาด

1. ความสะอาดจะพิจารณาจากปริมาณหรือจำนวนอนุภาคภายในห้องซึ่งเกิดจากอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศจากภายนอกห้องที่ถูกนำเข้ามาโดยปะปนเข้ามากับลมส่ง (Supply Air) การไหลเวียนของอากาศในระบบปรับอากาศ และอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยจากเครื่องจักรการผลิต และบุคคลที่ทำงานภายในห้องสะอาด

2. อุณหภูมิที่เหมาะสม กำหนดตามความต้องการของกระบวนการผลิต ข้อกำหนดของตัวผลิตภัณฑ์ และจะต้องคำนึงถึงพนักงานที่ปฏิบัติงานภายในห้องสะอาดด้วยเพราะชุดปฏิบัติงานมักเป็นชุดที่มีลักษณะปิดมิดชิดเนื้อผ้าที่บ่มมีรูระบายอากาศน้อยดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องปรับอากาศตามปกติ หากไม่มีกำหนดเฉพาะกระบวนการผลิตโดยทั่วไปมักกำหนดให้อยู่ในช่วง 72°F (22.2°C) $\pm$ 0.25°F (0.14°C)

3. ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม ขึ้นกับลักษณะงานกระบวนการผลิต หรือชนิดผลิตภัณฑ์ในบางกรณีหากความชื้นสูงไปอาจทำให้อุปกรณ์, เครื่องมือ หรือผลิตภัณฑ์เกิดสนิมได้ ในทางตรงข้ามหากความชื้นต่ำไปก็เกิดประจุไฟฟ้าหรือไฟฟ้าสถิตในวัสดุ หรือขึ้นส่วนทำให้เกิดปัญหามลพิษติดกันได้ ซึ่งหากไม่มีข้อกำหนดเฉพาะ โดยทั่วไปมักกำหนดให้ห้องมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ $50 \pm 10 \%$

4. ความดัน ควรรักษาความดันในห้องสะอาดให้เป็นบวกเสมอ (Positive pressure) โดยทั่วไปจะควบคุมความดันภายในห้องให้สูงกว่าความดันโดยรอบห้อง ทั้งนี้เพื่อผลักดันไม่ให้อากาศสกปรกจากภายนอกเข้ามาภายในห้องได้ สำหรับห้องที่มีระดับความสะอาดต่างกันให้มีความดันต่างกันประมาณ 0.05 in. W.G. หรือ 12.5 Pa โดยห้องที่มีระดับความสะอาดมากกว่าจะมีความดันมากกว่า

5. แสงสว่าง หากไม่มีการกำหนดพิเศษให้ใช้แสงสว่าง 1,080 – 1,620 lux

6. ระดับเสียง เป็นไปตามข้อกำหนดของการใช้งานห้องสะอาด อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาจมีเสียงรบกวนจากเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต เสียงรบกวนเหล่านี้อาจเป็นอันตรายต่อหู และสุขภาพจิตของพนักงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของกฎหมาย และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเช่นกฎหมายกระทรวงอุตสาหกรรมของไทยหรือมาตรฐาน OSHA (Occupational Safety and Health Act) ของอเมริกาเป็นต้น สำหรับกระทรวงอุตสาหกรรมของไทยห้ามไม่ให้เสียงภายในสถานประกอบการสูงเกิน 85 dB

มาตรฐานระดับความสะอาด (Cleanliness Classes) ของห้องสะอาด มีดังนี้

1. U.S. Federal Standard: FS 209E, 1992: Airborne particulate cleanliness classes

in clean rooms and clean zones ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา และได้กำหนดระดับความสะอาดสูงสุดไว้คือ Class 1 ซึ่งจะมีอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปจำนวน 1 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต

2. British Standard: BS 5292, 1989: Environmental cleanliness in enclosed spaces ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศอังกฤษ และได้กำหนดความสะอาดสูงสุดไว้ที่ Class C ซึ่งจะมีอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.3 ไมครอนขึ้นไปจำนวน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

3. German Standard: VDI 2083 part 1, 1990: Clean rooms engineering fundamentals, definitions and determination of cleanliness classes ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมัน และได้กำหนดระดับความสะอาดสูงสุดไว้คือ Class 0 ซึ่งจะมีอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.3 ไมครอนขึ้นไปจำนวน 14 อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

4. Japanese Standard: JIS B 9920, 1989: Measuring method for airborne particles in clean rooms and evaluating methods for air cleanliness of clean rooms ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น และได้กำหนดระดับความสะอาดสูงสุดไว้คือ Class 1 ซึ่งจะมีอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปจำนวน 0.35 อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

5. ISO Standard: ISO14644-1,1999: Clean rooms and associated controlled environments, Part 1: Classification of air cleanliness ซึ่งเป็นมาตรฐานสากล และได้กำหนดระดับความสะอาดสูงสุดไว้คือ ISO1 ซึ่งจะมีอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมครอนขึ้นไปจำนวน 10 อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

ตาราง 1 การเปรียบเทียบมาตรฐานระดับความสะอาดของห้องสะอาดต่างๆ

(อิงสนา ฉั่วสุวรรณ. 2549: 31)

Country	USA		British	Germany	Japan	
Guide-lines	FS 209E		BS	VDI Sheet 1	JIS B	ISO
(Issue)	SI ¹	Engl. ²	5295 ³	2083 ⁴	9920 ⁵	14644-1 ⁶
Cleanliness classes				0	1	1
				1	2	2
	M1.5	1	C	1	3	3
	M2.5	10	D	2	4	4
	M3.5	100	E	3	5	5
	M4.5	1000	G	4	6	6
	M5.5	10000	J	5	7	7
	M6.5	100000	K	6	8	8
			M	7		9

หมายเหตุ

¹ การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์เมตร

² การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์ฟุต

³ การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์ฟุต

⁴ การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์เมตร

⁵ การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์เมตร

⁶ การวัดจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปต่อลูกบาศก์เมตร

ตาราง 2 มาตรฐาน Federal Standard 209E airborne particulate cleanliness classes in clean rooms and clean zones (IEST. 1992: 5)

Class name		Class limits			
		0.5 μm		5.0 μm .	
Sl.	English	Volume units		Volume units	
		(m^3)	(ft^3)	(m^3)	(ft^3)
M 1		10.00	0.28		
M 1.5	1	35.30	1.00		
M 2		100.00	2.83		
M 2.5	10	353.00	10.00		
M 3		1,000.00	28.300		
M 3.5	100	3,530.00	100.00		
M 4		10,000.00	283.00		
M 4.5	1,000	35,300.00	1,000.00	247.00	7.00
M 5		100,000.00	2,830.00	618.00	17.50
M 5.5	10,000	353,000.00	10,000.00	2,470.00	70.00
M 6		1,000,000.00	28,300.00	6,180.00	175.00
M 6.5	100,000	3,530,000.00	100,000.00	24,700.00	700.00
M 7		10,000,000.00	283,000.00	61,800.00	1,750.00

การจัดแบ่ง Class ของห้องสะอาดดังนี้

1. Class 1 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่นับได้ต้องไม่เกิน 35.3 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตร หรือ 1 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต
2. Class 10 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่นับได้ต้องไม่เกิน 353 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตร หรือ 10 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต
3. Class 100 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่นับได้ต้องไม่เกิน 3,530 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตร หรือ 100 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต

4. Class 1,000 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่สามารถนับได้ต้องไม่เกิน 35,300 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตร หรือ 1,000 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต
5. Class 10,000 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่สามารถนับได้ต้องไม่เกิน 353,000 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตร หรือ 10,000 อนุภาคต่ออากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต
6. Class 100,000 หมายถึง ห้องที่มีจำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไปที่สามารถนับได้ต้องไม่เกิน 3,530,000 อนุภาคต่ออากาศลูกบาศก์เมตรหรือ 100,000 อนุภาคต่อหนึ่งลูกบาศก์ฟุต

ซึ่งไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานใดก็ล้วนแล้วแต่กำหนดไว้ว่าจะต้องตรวจวัดจำนวนขนาดของอนุภาคในอากาศต่อหน่วยปริมาตรอากาศภายในห้องสะอาดเป็นเกณฑ์สำคัญ สำหรับหน่วยสากลในการวัดขนาดอนุภาคของสิ่งเจือปนคือ ไมครอน (Micron or Micrometer, μm) ขนาด $1\mu\text{m}$ มีค่าเท่ากับ 10^{-6} มาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 2 มาตรฐานคือ Federal Standard 209E และ ISO Standard 14644-1

Federal Standard 209E เป็นมาตรฐานของห้องสะอาดที่จัดพิมพ์เผยแพร่เป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกาใน ค.ศ. 1963 ต่อมาได้มีการปรับปรุงมาตรฐานนี้ในปี ค.ศ. 1966 (209A), ค.ศ. 1973 (209B), ค.ศ. 1987 (209C), ค.ศ. 1988 (209D) และ ค.ศ. 1992 (209E) ตามลำดับ โดยได้มีการใช้หน่วยเมตริกเป็นต่อลูกบาศก์เมตรด้วย ดังตาราง 2 และตาราง 3 แสดงการจำแนกระดับชั้นความสะอาดที่ได้ปรับปรุงใหม่ใน ค.ศ.1992 เมื่อเทียบกับ ISO14644-1 เนื่องจากปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรจะเทียบเท่ากับ 35.3 ลูกบาศก์ฟุต ทั้งสองมาตรฐานจะใกล้เคียงกันมากที่สุดเมื่อวัดอนุภาคขนาด 0.5 ไมครอนอย่างไรก็ตาม Federal Standard 209E ได้ถูกยกเลิกอย่างเป็นทางการโดย The General services administrations of the US department of commerce ในค.ศ. 2001 แต่ในปัจจุบันยังคงมีการใช้กันอยู่อย่างกว้างขวางเนื่องจากห้องสะอาดที่ออกแบบและก่อสร้างในอดีตได้อ้างอิงไว้รวมถึงความเคยชินกับมาตรฐานดังกล่าวของผู้เกี่ยวข้องได้แก่ ผู้ออกแบบ ผู้ทดสอบ และผู้ขายอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับห้องสะอาด

ตาราง 3 ตารางเปรียบเทียบมาตรฐาน Federal Standard 209E และมาตรฐาน ISO14644-1
(อังกฤษ ฉบับสุวรรณ. 2549: 31)

Class Name	จำนวนอนุภาคสูงสุดต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์ฟุต (Maximum particle/ft ³)					เทียบกับ มาตรฐาน ISO (ISO Equivalent)
	0.1 µm.	0.2 µm.	0.3 µm.	0.5 µm.	5.0 µm.	
1	35	7.5	3	1	N/A	ISO 3
10	350	75	30	10	N/A	ISO 4
100	N/A	750	300	100	N/A	ISO 5
1,000	N/A	N/A	N/A	1,000	7	ISO 6
10,000	N/A	N/A	N/A	10,000	70	ISO 7
100,000	N/A	N/A	N/A	100,000	700	ISO 8

อย่างไรก็ตามการสร้างห้องสะอาดไม่ได้คำนึงถึงปริมาณอนุภาคในห้องสะอาดเพียงอย่างเดียวยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐานด้วย ดังตาราง 4

ตาราง 4 ปัจจัยอื่นๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน Federal Standard 209E (อังกฤษ ฉบับสุวรรณ. 2549: 32)

Class Name	อนุภาค		ความดัน (mm. W.G.)	อุณหภูมิ (°C)	% ความชื้น สัมพัทธ์	ปริมาตร หมุนเวียน อากาศ	ความเข้ม การส่อง สว่าง (lux)
	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (µm)	จำนวน อนุภาค (ft ³)					
100	≥ 0.5	≤ 100	> 1.25	19.4-25 ± 2.8	30-45 ± 10	Lamination 0.45 ± 0.1 m/s Convention ≥ 20 ACH	1080- 1620
1,000	≥ 0.5	≤ 1000					
	≥ 5.0	≤ 7					
10,000	≥ 0.5	≤ 10000					
	≥ 5.0	≤ 65					
100,000	≥ 0.5	≤ 100000					
	≥ 5.0	≤ 700					

ประเภทของห้องสะอาด

แบ่งตามลักษณะการหมุนเวียนของอากาศภายในห้อง

1. ห้องสะอาดที่มีการหมุนเวียนอากาศแบบทั่วไป (Conventional clean room) ห้องสะอาดแบบนี้มีลักษณะการหมุนเวียนอากาศคล้ายกับระบบปรับอากาศทั่วไป เพียงแต่เพิ่มการกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น เพิ่มตัวกรอง HEPA (HEPA filter) และเพิ่มจำนวนครั้งของการเปลี่ยนอากาศ เพื่อลดความสกปรกในห้อง โดยห้องสะอาดแบบนี้จะจัดอยู่ใน Class 1,000 ถึง 100,000 ค่าก่อสร้างไม่สูงมาก ค่าใช้จ่ายในใช้งานต่ำกว่าประเภทอื่น การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

2. ห้องสะอาดที่มีการหมุนเวียนอากาศตามแนวราบ (Horizontal laminar clean room) ห้องสะอาดแบบนี้มีหลายรูปแบบ เช่น U-Shape design, W-shape design, C-shape design, L-shape design ลักษณะการหมุนเวียนอากาศขึ้นกับการออกแบบว่าเป็นลักษณะใด โดยภาพรวมอากาศจะถูกส่งผ่านตัวกรอง HEPA ด้วยความเร็วคงที่เข้ามาในห้อง และถูกดูดกลับเข้าตัวกรองซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่ง โดยห้องสะอาดแบบนี้จะจัดอยู่ใน Class 100 ถึง 1,000 มักใช้ในทางชีววิทยา เช่น ห้องผ่าตัด อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และห้องทดลองทั่วไป ค่าก่อสร้างสูง ค่าใช้จ่ายในการใช้งานสูง การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

3. ห้องสะอาดที่มีการหมุนเวียนอากาศตามแนวตั้ง (Vertical laminar clean room) ห้องสะอาดแบบนี้จะติดตั้งตัวกรอง HEPA เต็มเพดานห้อง และจะมีการหมุนเวียนอากาศจากเพดานผ่านตัวกรอง HEPA ในแนวตั้งด้วยความเร็วคงที่ลงสู่พื้นห้องที่ยกสูงขึ้นมาอีกชั้นหนึ่ง และมีลักษณะเป็นตะแกรง ให้อากาศถูกดูดกลับเข้าตัวกรอง ซึ่งจะทำให้ห้องสะอาดแบบนี้มีการปนเปื้อนน้อยที่สุด เป็นลักษณะของห้องสะอาดที่ดีที่สุด เหมาะสำหรับห้องสะอาดที่ Class ต่ำกว่า 100 มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ และอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำขนาดเล็กมากจำพวก VLSI ค่าก่อสร้างสูง ค่าใช้จ่ายในการใช้งานสูง การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

1. ห้องสะอาดทางอุตสาหกรรม (Industrial clean room) เป็นห้องสะอาดที่ใช้ในอุตสาหกรรมไมโคร, นาโนอิเล็กทรอนิกส์, ออปติคอลไฟเบอร์, การพิมพ์, การผลิตฟิล์มถ่ายรูป คอมพิวเตอร์ ซึ่งหลักการจะเน้นที่ทำการกำจัดอนุภาคในอากาศ และการควบคุมสภาวะต่างๆภายในห้องให้เหมาะสมกับลักษณะงาน กระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ระดับชั้นความสะอาดของห้องจะต่างกันขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรม

2. ห้องสะอาดทางชีววิทยา (Biological clean room) เป็นห้องสะอาดที่ใช้ในอุตสาหกรรมชีววิทยาต่างๆ (เช่น การผลิตยา อาหาร), ห้องผ่าตัด, ห้องไอซียู, หอผู้ป่วยที่มีระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอ ในโรงพยาบาลห้อง ปฏิบัติการทางชีววิทยาซึ่งห้องสะอาดแบบนี้จะเน้นที่การควบคุมจำนวน

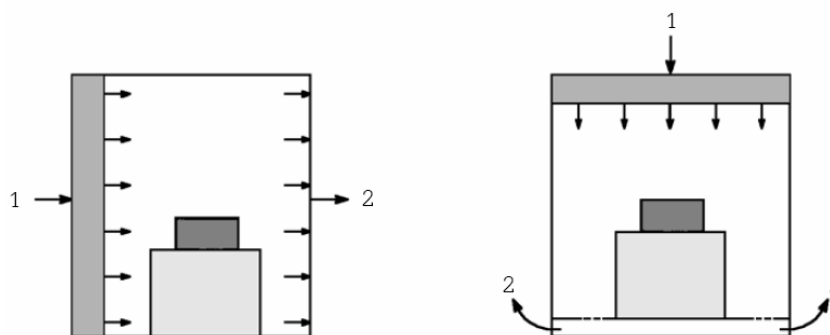
เชื้อจุลินทรีย์ ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับห้องสะอาดประเภทนี้โดยเฉพาะส่วนใหญ่อ้างอิงมาตรฐานขององค์การนาซา (NASA)

3. ห้องสะอาดที่เกี่ยวกับชีววัตถุอันตราย (Biohazard clean room) เป็นห้องสะอาดที่ใช้กับห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับเชื้อโรคไวรัส หรือสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยความดันอากาศในห้องจะต้องต่ำกว่าความดันอากาศห้องข้างเคียง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อ หรือสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพออกไปปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมภายนอก

รูปแบบการไหลของอากาศ (Airflow patterns)

เป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบห้องสะอาดให้ได้ตามระดับชั้นของความสะอาดที่ต้องการ ลักษณะ การไหลของอากาศภายในห้องสะอาดมี 3 รูปแบบคือ

1. การไหลของอากาศแบบราบเรียบ(Unidirectional airflow หรือ laminar airflow) มีลักษณะการไหลของอากาศแบบราบเรียบ (ภาพประกอบ 4) โดยอากาศที่ผ่านแผงกรองจะมีทิศทางเคลื่อนที่ขนานกันในแนวระดับหรือแนวตั้ง มุ่งไปยังผิวดังตรงข้ามกับห้องและผ่านช่องลมกลับเพื่อกลับไปยังระบบควบคุมอากาศหรือชุดส่งลม (Air handling system)



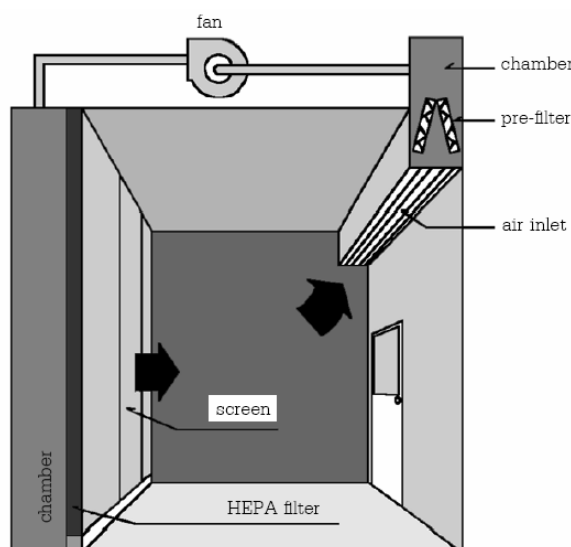
หมายเหตุ 1 = Supply air

2 = Return air

ภาพประกอบ 4 การไหลของอากาศแบบราบเรียบ

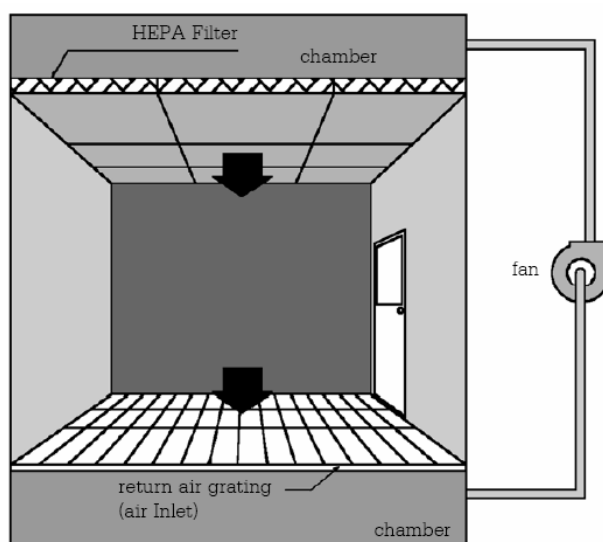
การไหลของอากาศแบบราบเรียบ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1) การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวระดับ (Horizontal laminar หรือ cross airflow) บริเวณที่อยู่ใกล้กับแผ่นกรองอากาศจะสามารถรักษาความสะอาดได้สูง ส่วนบริเวณใกล้กับทางลมกลับความสะอาดจะลดลง เนื่องจากอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน และอุปกรณ์การผลิตมักใช้กับห้องสะอาดทางชีววิทยาที่ไม่จำเป็นต้องรักษาความสะอาดให้สม่ำเสมอเท่ากันทั้งห้อง



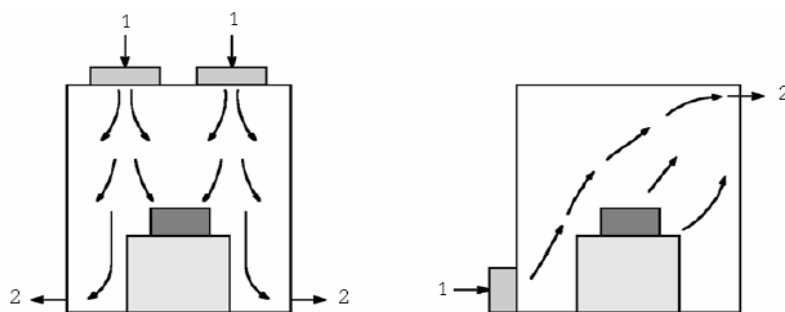
ภาพประกอบ 5 การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวระดับ

2) การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวตั้ง (Vertical laminar หรือ down airflow) ฝ้าเพดานประกอบด้วยตัวกรองอากาศทั้งหมด ส่วนบริเวณพื้นห้องจะยกสูงขึ้นมา และมีลักษณะเป็นตะแกรงให้อากาศไหลกลับ (Return air) การไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบจากฝ้าลงสู่พื้นในทิศทางเดียวกัน อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการทำงานจะถูกอากาศพาลงสู่ใต้พื้นห้อง จึงทำให้สามารถรักษาความสะอาดในห้องได้เท่ากันทุกแห่งมักใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

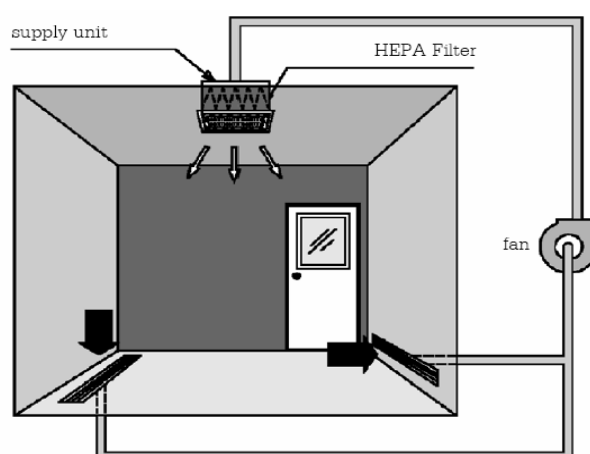


ภาพประกอบ 6 การไหลของอากาศแบบราบเรียบในแนวดิ่ง

2. การไหลของอากาศแบบปั่นป่วน (Non unidirectional airflow หรือ turbulent mixed airflow) เป็นแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปอนุภาคภายในห้องจะถูกทำให้เจือจางลงโดยอากาศสะอาดที่ออกมาจากแผ่นกรองอากาศทำให้ความสะอาดของห้องเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน ระดับชั้นของความสะอาดจึงสูงกว่าแบบราบเรียบ

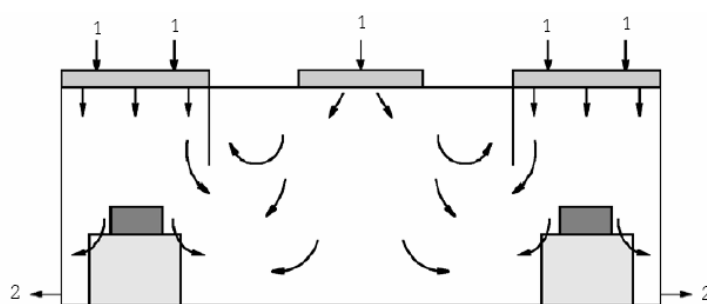


ภาพประกอบ 7 การไหลของอากาศแบบปั่นป่วน



ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน

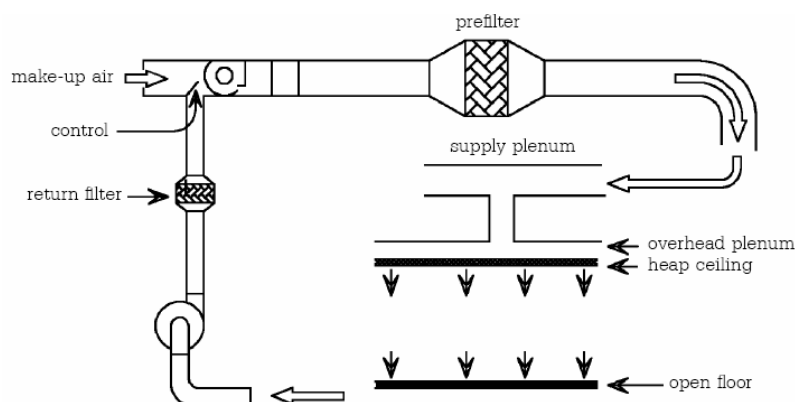
3. การไหลของอากาศแบบผสม (Mixed airflow) เป็นรูปแบบของอากาศภายในห้องสะอาด ที่มีทั้งแบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วนอยู่ในห้องเดียวกัน



ภาพประกอบ 9 การไหลของอากาศแบบผสม

ระบบระบายอากาศและปรับอากาศ (Ventilating and air conditioning) ของห้องสะอาด ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆเพื่อปรับสภาพของอากาศและเคลื่อนย้ายอากาศอย่างเหมาะสม โดยองค์ประกอบที่สำคัญนั้นประกอบด้วยพัดลมและระบบเป่าลมเย็น (Fans and blowers) เพื่อเคลื่อนย้ายอากาศไปยังห้องสะอาด, ท่อลมเย็นและ Control dampers ใช้บังคับทิศทางการไหลของอากาศเย็น, แผงลม (Grills) และช่องลม (Vents) สำหรับส่งอากาศเย็นเข้าหรือออกจากห้องสะอาด,

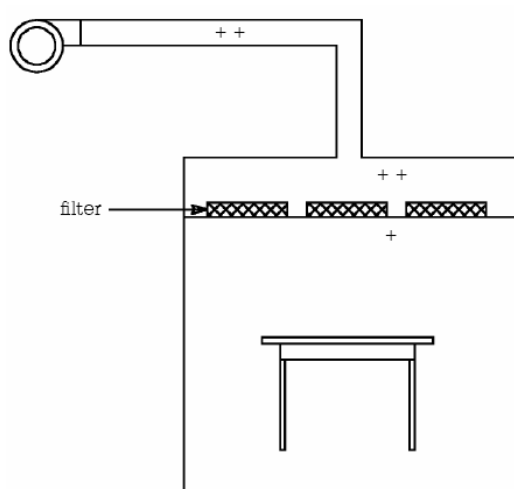
Humidifiers and cooling coils สำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ, ตัวกรองอากาศ สำหรับกำจัดอนุภาคสิ่งเจือปน ดังแสดงภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ระบบระบายอากาศและปรับอากาศของห้องสะอาด

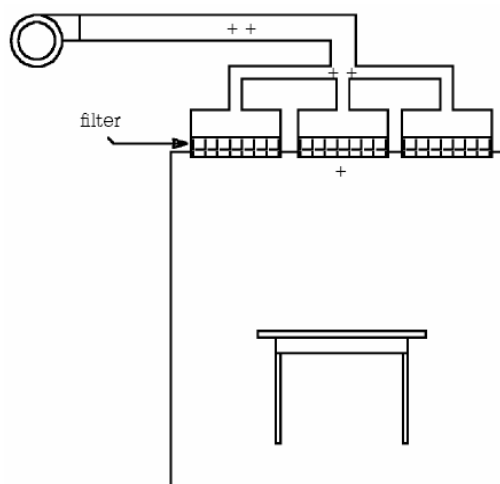
การออกแบบต้องให้ระบบระบายอากาศสามารถนำอากาศภายนอกมาเจือจางอนุภาคได้อย่างพอเพียงระบบขับเคลื่อนอากาศให้เกิดการเคลื่อนที่ได้แก่ Axial และ Centrifugal blower โดยเครื่องเป่าอากาศแบบ axial เหมาะสำหรับอัตราการไหลของอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำ แต่เครื่องเป่าอากาศแบบ Centrifugal ใช้สำหรับความดันสูง ก่อนนำอากาศสะอาดเข้ามาสู่ภายในห้องสะอาดจะต้องให้อากาศนั้นผ่านตัวกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกำจัดอนุภาคที่ปนเปื้อนในอากาศให้ได้ตามความต้องการของระดับชั้นความสะอาดที่ต้องการก่อน ซึ่งระบบการนำอากาศเข้าโดยทั่วไปมี 3 แบบ ดังนี้

1. ระบบการนำอากาศเข้าแบบเปิด (Open plenum) จะมีช่องอากาศอยู่ระหว่างเพดานของห้องกับเพดานกรองอากาศ อากาศจะถูกส่งมาตามท่อลมด้วยความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศก่อนไหลผ่านตัวกรองอากาศและเข้าสู่ห้องต่อไป ดังภาพประกอบ 11 การใช้ระบบนี้จะช่วยประหยัดค่าท่อลมแต่ต้องป้องกันการรั่วของอากาศบริเวณรอยต่อของตัวกรองอากาศ



ภาพประกอบ 11 ระบบการนำอากาศเข้าแบบเปิด

2. ระบบการนำอากาศเข้าแบบแยกท่อ (Individual duct) อากาศจะถูกดูดขึ้นมาในท่อลมหลักและแยกไปตามท่อลมย่อย ซึ่งมีตัวกรองอากาศติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อแต่ละท่อก่อนไหลเข้าสู่ห้องสะอาด ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 ระบบการนำอากาศเข้าแบบท่อแยก

3. ระบบการนำอากาศเข้าแบบตัวกรองอากาศภายในท่อ (In-line duct) ซึ่งโดยปกติจะต้องติดตั้งตัวกรองอากาศให้อยู่ใกล้กับห้องสะอาดให้มากที่สุดเพื่อป้องกันการสะสมของฝุ่นบริเวณผิวท่อลมส่งด้านหลังของตัวกรองอากาศ และอาจหลุดเข้าไปในห้องสะอาดได้ แต่ในบางครั้งอาจมีความจำเป็น ต้องติดตั้งตัวกรองอากาศให้อยู่ห่างจากห้องสะอาด อันมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของตัวอาคารหรือข้อ จำกัดอื่นๆจึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งแบบตัวกรองอากาศภายในท่อ

การออกแบบเพื่อควบคุมการปนเปื้อนในห้องสะอาด การเลือกเทคนิคในการป้องกันปัญหาการปนเปื้อนจะต้องได้รับพิจารณาตั้งแต่การออกแบบห้องสะอาด การเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อนไปสู่พื้นที่ป้องกันทั้งกระบวนการผลิตและผู้ปฏิบัติงาน มีวิธีการควบคุมอยู่ 2 รูปแบบ คือการใช้มาตรการทางด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic measures) เช่นการควบคุมทิศทางลมของอากาศ และมาตรการการปิดกั้นทางกายภาพ เช่นคัดแยกแบบ Active และ Passive ห้องสะอาดโดยทั่วไปจะประกอบด้วยห้องที่ต้องการควบคุมการปนเปื้อนแตกต่างกันไป วัตถุประสงค์ของการออกแบบเพื่อที่จะป้องกันสินค้าหรือกระบวนการผลิต หรือที่เก็บสินค้า หรือผลผลิต และเพื่อที่จะป้องกันห้องสะอาดที่อาจปนเปื้อนจากห้องที่มีความสะอาดน้อยกว่าที่อยู่ติดกันซึ่งจะต้องรักษาความดันให้สูงกว่าพื้นที่ข้างเคียง หรือโดยควบคุมความเร็วของอากาศที่จะรั่วไหลผ่านผนังของห้องสะอาดกว่าไปสู่พื้นที่ที่สะอาดน้อยกว่า แต่ในทางกลับกันจะใช้ในการควบคุมสารอันตราย

แนวคิดพื้นฐานในการควบคุมการปนเปื้อนจากพื้นที่ข้างเคียงมี 3 ประการ ดังนี้

1. หลักการแทนที่ (Displacement concept) ใช้อัตราการไหลของอากาศสูงๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกพื้นที่ที่สะอาดกับพื้นที่ที่สะอาดน้อยกว่า โดยการแทนที่ของอากาศที่มีความดันปนเปื้อนต่ำโดยใช้ความเร็วของอากาศมากกว่า 0.2 m/s

2. ความแตกต่างของความดัน ระหว่างผนังกันห้องที่สะอาดกว่าไปสู่พื้นที่ที่มีความสะอาดน้อยกว่า ความแตกต่างของความดันควรมีระดับเพียงพอ และคงที่ (Stable) เพื่อป้องกันอากาศไหลย้อนกลับซึ่งค่าที่แนะนำคือ 5-20 Pa

3. การป้องกันทางกายภาพ แนวคิดนี้เป็นการใช้ผนังทึบในการป้องกันการถ่ายเทสิ่งปนเปื้อนจากห้องที่สะอาดน้อยกว่าไปสู่ห้องที่สะอาดมากกว่า

อุปกรณ์สำหรับห้องสะอาด ภายในห้องสะอาดมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้อยู่ 2 กลุ่ม คือ อุปกรณ์ทำความสะอาดอากาศได้แก่ ตัวกรองอากาศ และอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในห้องสะอาด ได้แก่ ฝักบัวอากาศ (Air shower) แอร์ล็อก (Air lock) และกล่องส่งผ่าน (Pass through) เป็นต้น

1. อุปกรณ์ทำความสะอาดอากาศ ระบบการกรองอากาศ (Air filtration systems)เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของห้องสะอาด ระบบการกรองอากาศที่จำเป็นขั้นพื้นฐานจะต้องมี 3 ขั้นตอน คือ

1) การกรองขั้นต้น (Pre filtering) เพื่อให้มั่นใจว่าอากาศภายนอกมีคุณภาพดีพอที่จะนำเข้าระบบจ่ายอากาศสู่เครื่องปรับอากาศ

2) การกรองขั้นที่สอง (Secondary filtering) เป็นการกรองในเครื่องปรับอากาศเพื่อป้องกันตัวกรองตัวสุดท้าย

3) การกรองขั้นสุดท้าย (Final filtering) เป็นการกรองครั้งสุดท้ายก่อนจ่ายอากาศเข้าสู่ห้องสะอาดซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือตัวกรองแบบ HEPA (High Efficiency Particulate Air filter) และตัวกรองแบบ ULPA (Ultra Low Penetration Air filter) ตัวกรอง ULPA มีราคาแพงกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ HEPA โดยแผ่นกรองอากาศทำจากสาร Polytetrafluoroethylene (PTFE) มีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างกับตัวเส้นใยมากกว่าตัวกรองอากาศแบบ HEPA ดังนั้นจึงสามารถกรองอากาศโดยให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างแต่ยังคงดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากได้ ประสิทธิภาพของตัวกรองแบบ ULPA ในการดักจับอนุภาคขนาด $0.3\ \mu\text{m}$ โดยทั่วไปคือร้อยละ 99.99 ส่วน HEPA ร้อยละ 99.97

3.1) กลไกการดักจับอนุภาคของตัวกรองอากาศ เมื่ออากาศไหลผ่านตัวกรองอากาศกลไกที่สำคัญในการจับอนุภาคที่ปนเปื้อนมากับอากาศคือ การสกัดกั้น (Interception), การกระทบ (Impaction), การแพร่ (Diffusion) และการลอดผ่านหรือการกรองออกโดยตรง (Sieving หรือ straining)

3.2) ลักษณะเฉพาะของตัวกรองอากาศ ที่ใช้เป็นตัวประเมินค่าสมรรถนะตัวกรองมีดังนี้

3.2.1) ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค (Dust holding capacity หรือ Collective efficiency) แสดงถึงปริมาณของฝุ่นที่ตัวกรองสามารถกรองได้ตั้งแต่ต้นจนกระทั่งตัวกรองตันมีหน่วยเป็นน้ำหนักของฝุ่นกรัม

3.2.2) ความต้านทานอากาศไหล (Airflow resistance) คือค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) ของแผ่นกรองอากาศมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรน้ำ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานของตัวกรองเพราะว่าอนุภาคต่างๆที่ตัวกรองดักจับไว้จะสะสมอยู่บนผิวหน้าของตัวกรอง และเป็นตัวขัดขวางการไหลของอากาศจนในที่สุดตัวกรองจะมีค่าความดันตกคร่อมถึงค่าสูงสุดที่ระบบขับเคลื่อนอากาศไหลจะสามารถทำได้ดังนั้นเมื่อถึงตอนนั้นจะต้องมีการเปลี่ยนตัวกรองอากาศใหม่หรือทำความสะอาดตัวกรอง

3.2.3) อายุการใช้งาน คือระยะเวลาที่ความดันตกคร่อมตัวกรองอากาศเพิ่มขึ้นจากความดันตกเริ่มแรกจนถึงค่าความต้องการอากาศไหลซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคที่ตัวกรองดักจับไว้

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องสะอาด

1) ฝักบัวอากาศ (Air shower) ใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนเสื้อผ้าก่อนที่จะเข้าไปในห้องสะอาด ห้องสะอาดส่วนใหญ่มักจะติดฝักบัวอากาศ 2 แห่ง คือติดที่บริเวณทางเข้าห้อง เปลี่ยนเสื้อผ้า และติดที่ทางเข้าห้องสะอาด ฝักบัวอากาศจะส่งลำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วไปยังหัวฉีดอากาศแล้วพ่นออกมาจากผนังด้วยความเร็ว 10-30 m/s ส่งผลให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่ติดเสื้อผ้าหลุดออกมา และอากาศก็จะกลับ ไปผ่านตัวกรองอากาศเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ฝักบัวอากาศโดยปกติจะเป็นแอริลล็อกซึ่งจะมีระบบล็อกประตูภายใน โดยกำหนดระยะเวลาในการทำความสะดวกสะอาดเอาไว้ 15-20 วินาทีเมื่อครบกำหนดเวลาประตูจึงจะเปิดออกมาได้แต่ต้องมีระบบบังคับเองได้ในกรณีฉุกเฉิน ฝักบัวอากาศจะใช้ระบบล็อกสองทาง (Interlock) คือประตูทางเข้าจะเปิดอยู่เสมอ ส่วนประตูทางออกจะปิดอยู่เสมอเมื่อมีคนใช้ฝักบัวอากาศ และปิดประตูที่ทางเข้า สวิตช์ทำงานของฝักบัวอากาศจะถูกให้ทำงานโดยอัตโนมัติ และประตูทางเข้าจะล็อกตัวเองเมื่อฝักบัวอากาศทำงานครบรอบระบบล็อกที่ประตูทางออกจะเปิดโดยอัตโนมัติ

ประสิทธิภาพของการใช้ฝักบัวอากาศขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้

- อากาศที่ใช้กับฝักบัวอากาศต้องผ่านการทำความสะอาด หรือกรองมาอย่างดี
- ความเร็วของอากาศที่ปล่อยออกมาจะต้องเพียงพอที่จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน และสามารถจัดอนุภาคที่ติดตามเสื้อผ้าออกไปได้
- หัวฉีดอากาศจะต้องอยู่ในตำแหน่งและมีจำนวนที่เพียงพอที่จะเป่าให้ทั่วพื้นผิวของเสื้อผ้า
- ท่าทางการยืนขณะทำความสะอาดกับฝักบัวอากาศ ขณะเครื่องทำงานควรหมุนร่างกายให้เสื้อผ้าถูกอากาศอย่างทั่วถึงประมาณ 10-20 วินาที

2) แอริลล็อก (Air lock) เป็นห้องเล็กๆที่เปิดประตูที่ละด้านทำหน้าที่กักกันอากาศเพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาคฝุ่นจากภายนอก และป้องกันการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วของความดันภายในห้องสะอาดแอริลล็อกจะช่วยรักษาความดันเมื่อมีคนเข้าหรือออกจากห้องสะอาด หรือเมื่อมีการเปิดหรือปิดห้อง ขนาดของแอริลล็อกขึ้นอยู่กับการใช้งาน ถ้าใช้กับคนก็ต้องมีขนาดเพียงพอกับคนที่ต้องการผ่าน ถ้าใช้กับการส่งผ่านอุปกรณ์ก็สามารถออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมกับอุปกรณ์นั้นๆได้ ควรติดตั้งแอริลล็อกไว้ที่ทางเข้าห้องสะอาด หรือส่วนต่อเชื่อมห้องสะอาดที่ต่างความสะดวกกัน แอริลล็อกมีสองแบบ คือแบบความดันเป็นบวก (Positive) หรือความดันภายในแอริลล็อกมีค่ามากกว่าความดันภายนอก และแบบความดันเป็นลบ (Negative) หรือความดันในแอริลล็อกมีค่าน้อยกว่าความดันภายนอก

3) กล่องส่งผ่าน (Pass through) เป็นกล่องที่ใช้สำหรับส่งหรือเคลื่อนย้ายวัตถุจากภายนอกเข้าสู่ห้องสะอาด หรือใช้เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์จากห้องสะอาดออกสู่ภายนอกซึ่งจะช่วยรักษาระดับความดันภายในห้องสะอาดไว้ด้วย ขนาดของกล่องส่งผ่านขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุที่ต้องการเคลื่อนย้าย และควรมีช่องมองที่ทำจากวัสดุโปร่งใสเพื่อที่จะได้มองเห็นวัตถุข้างในได้ ทั้งนี้ประตูทั้งสองด้านของกล่องส่งผ่านจะไม่สามารถเปิดพร้อมกันได้ และในบางกรณีอาจจะมีฝักบัวอากาศอยู่ในกล่องส่งผ่าน

4) โต๊ะทำงาน (Clean bench) เป็นโต๊ะที่มีอากาศที่สะอาดไหลผ่าน โดยอาจมีทิศทางการไหลของอากาศตามแนวตั้ง (Vertical flow clean bench) หรือแนวนอน (Horizontal flow clean bench) มักมี HEPA ติดอยู่ในตัวโต๊ะด้วย

5) อุปกรณ์เสริม เช่นโต๊ะและเก้าอี้สำหรับผู้ปฏิบัติงาน, ชั้นวางของ, รถเข็นของ, ตู้เก็บของ เครื่องทำความสะอาดรองเท้า, อ่างล้างมือ, เครื่องทำความสะอาดมือ และถุงมือรวมทั้งเสื่อทาก (Tacky mat หรือ sticky mat) ซึ่งเป็นผ้ายางที่ถูกเคลือบด้วยสารเกาะติดที่จะดูดเอาสิ่งสกปรก และฝุ่นละอองออกจากใต้พื้นรองเท้า, ล้อรถเข็นหรือสิ่งที่ผ่านไปบนเสื่อทาก โดยตัวแผ่นทากจะเป็นชั้นๆ สามารถลอกได้หลายครั้ง มักวางไว้หน้าทางเข้าห้องสะอาด

การควบคุมปริมาณอนุภาคภายในห้องสะอาด การควบคุมห้องสะอาดให้มีระดับชั้นของสะอาดตามที่ออกแบบไว้ตลอดการดำเนินงานนั้น คือการควบคุมปริมาณอนุภาคอากาศภายในห้องสะอาดไม่ให้มีจำนวนเกินตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ซึ่งแหล่งของอนุภาคที่เขวนลอยมีที่มาจาก 2 แหล่งคือ

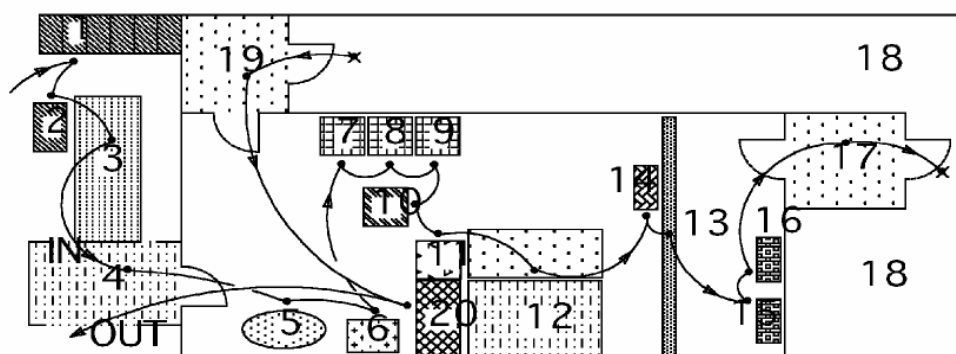
1. อนุภาคภายนอกที่นำเข้ามาโดยอากาศ (Air supply) ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการซ่อมบำรุงระบบกรองอากาศอากาศ เช่นการเป่าทำความสะอาดตัวกรองอากาศ การตรวจสอบการรั่วของตัวกรองอากาศและเปลี่ยนตัวกรองอากาศเมื่อถึงกำหนด

2. อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตและจากผู้ที่ปฏิบัติที่ทำงานภายในห้องสะอาดซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการติดตั้งระบบระบายอากาศเฉพาะที่ (Local ventilation) เพื่อป้องกันอนุภาคฝุ่นกระจายอยู่ในห้องสะอาดดังนั้นการที่จะรักษามาตรฐานของห้องสะอาดไว้ให้ได้นั้นต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นต้องมีครบ และได้รับการบำรุงรักษาอยู่เสมอมีขั้นตอนการปฏิบัติที่ดี และมีกฎระเบียบรวมถึงการฝึกอบรมให้บุคลากรที่ปฏิบัติงาน

วิธีการควบคุมเพื่อรักษามาตรฐานของห้องสะอาด ทำได้ดังนี้

1. ป้องกันอนุภาคและมลสารจากภายนอกเข้าไปในห้อง
 - กรองอากาศที่ผ่านเข้ามาในห้องด้วย Filter ที่เหมาะสม
 - รักษาความดันในห้องให้สูงกว่าภายนอก (Positive pressure)

- วัสดุและเครื่องมือที่จะนำเข้าห้องสะอาดต้องทำความสะอาดก่อน
 - ผู้ปฏิบัติงานควรผ่านฝักบัวอากาศ (Air shower หรือ Air washer) ก่อนเข้าห้องสะอาด
2. ป้องกันการก่อให้เกิดอนุภาคและมลสารภายในห้อง
- ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมชุดสำหรับห้องสะอาดเมื่อเข้าภายในห้อง
 - ผู้ปฏิบัติงานไม่ควรเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วถ้าไม่จำเป็นขณะปฏิบัติงาน
 - วัสดุของพื้น ผนังและฝ้าเพดาน ต้องไม่เป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดอนุภาคและมลสาร
 - จัดโปรแกรมการทำความสะอาดห้องเป็นประจำ และสม่ำเสมอ
 - บริเวณโดยรอบที่วางเครื่องมือ เครื่องจักรต้องสะอาดต่อการทำความสะอาดไม่เป็นแหล่งสะสมฝุ่น
 - พื้นผิวห้อง ผนังห้องและอุปกรณ์ต่างๆควรทำด้วยวัสดุที่มีรูปทรงที่ทำความสะอาดง่าย
 - ไม่นำสิ่งของที่จำเป็นหรือไม่ใช้เข้าไปในห้องสะอาด
3. หากมีอนุภาค และมลสารเกิดขึ้นภายในห้องต้องรีบกำจัดออกไปทันทีโดย
- อัตราการหมุนเวียนอากาศของห้องควรเหมาะสมกับระดับความสะอาดที่ต้องการ
 - ควรมีการหมุนเวียนอากาศบางส่วนออกสู่ภายนอก เพื่อลดสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้น
 - ควรติดตั้งระบบดูดอากาศทั้งเป็นจุดๆในบริเวณที่มีการกระจายของอนุภาคฝุ่นผงมาก
4. การทำความสะอาดและการเปลี่ยน Air filter ตามระยะเวลาที่กำหนด
- ควรทำความสะอาดห้องทุกวันเพื่อลดฝุ่นสะสมภายในห้อง
 - Synthetic filter ทำความสะอาดทุกอาทิตย์
 - Pre filter เปลี่ยนทุกๆ 1 เดือน
 - Medium filter เปลี่ยนทุกๆ 3 เดือน



ภาพประกอบ 13 ตัวอย่างลำดับขั้นตอนเมื่อเข้าห้องสะอาด

หมายเหตุ

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. ลีชเคอร์ | 11. ตู้เก็บชุดปฏิบัติการ |
| 2. เครื่องทำความสะอาดรองเท้า | 12. ห้องเปลี่ยนชุด |
| 3. เสื้อกาวน์ | 13. จุดใส่รองเท้าปฏิบัติการ |
| 4. ฝักบัวอากาศ 1 | 14. ที่เก็บรองเท้า |
| 5. อ่างล้างมือและหน้า | 15. อ่างล้างมือ 2 |
| 6. เครื่องเป่าอากาศแห้ง | 16. ที่เก็บถุงมือที่ใช้ปฏิบัติงาน |
| 7. จุดเบิกถุงมือ | 17. ฝักบัวอากาศ 2 |
| 8. จุดทำความสะอาดมือด้วยแอลกอฮอล์ | 18. บริเวณห้องสะอาด |
| 9. จุดจ่ายหมวก | 19. ทางออก |
| 10. จุดจ่ายหน้ากากป้องกัน | |

ลำดับขั้นตอนการปฏิบัติเมื่อเข้าห้องสะอาด แสดงดังภาพประกอบ 13

1. กฎข้อบังคับสำหรับห้องสะอาด
 - ต้องล้างมือบ่อยๆ
 - ต้องสวมถุงมือ
 - รักษาความสะอาดของมือ และเล็บ
 - ไม่หิวผมในห้องสะอาด
 - ไม่ทาเล็บ

- สวมชุดที่กำหนด
- กระเป๋าเงิน เครื่องประดับจะต้องเก็บไว้ชุดด้านใน และไม่นำออกมาขณะทำงาน
- ไม่สวมใส่เครื่องประดับ เช่น แหวน, สร้อยคอ, ตุ้มหู และนาฬิกา เป็นต้น
- ต้องรักษาเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำงานของตนให้สะอาดอยู่เสมอ
- ห้ามเดินไปมาโดยไม่จำเป็น
- ห้ามรับประทานอาหาร เครื่องดื่ม เคี้ยวหมากฝรั่ง หรือสูบบุหรี่
- ไม่เกาผิวหนังหรือเกาส่วนอื่นๆของร่างกาย
- ไม่ถอดหรือรูดซิปชุดปฏิบัติงานขณะอยู่ในห้องสะอาด

2. ชุดปฏิบัติงานสำหรับห้องสะอาด (Clean room garment) มีประโยชน์เพื่อช่วยลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกปลดปล่อยออกจากร่างกาย และเสื้อผ้าของผู้ปฏิบัติงาน ชุดปฏิบัติงานที่ดีต้องมีช่องว่างที่อนุญาตสามารถเล็ดลอดออกมาได้น้อยนั่นคือผ้าที่ใช้ตัดเย็บชุดปฏิบัติงานมักทำจากเส้นใยสังเคราะห์เช่น ไนลอน, ดาครอน, โพลีเอสเตอร์, ผ้าฝ้าย, เส้นใยไทเวค, เมมเบรน, ซิลเวอร์เทค

1) ชุดปฏิบัติงาน ควรประกอบด้วยเสื้อคลุม, หมวก, ถุงมือ, รองเท้า, สิ่งทอ หรือวัสดุที่ใช้ทำชุดควรมีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ไม่ก่อให้เกิดอนุภาค ไม่เกิดไฟฟ้าสถิต และเมื่อทำความสะอาดแล้วไม่เสียคุณสมบัติดังกล่าวไป

2) รองเท้า สำหรับการปฏิบัติงานในห้องสะอาดเป็นส่วนหนึ่งที่มีการสัมผัส และสะสมของอนุภาคจำนวนมาก และยังเป็นตัวพาอนุภาคจากบริเวณที่สกปรกไปยังบริเวณที่สะอาดด้วย การลดปริมาณอนุภาคที่ติดมากับรองเท้าสามารถทำได้โดย

- ถอดรองเท้าเดิมออก และสวมรองเท้าสำหรับปฏิบัติงานในห้องสะอาดแทน
- ใช้ถุงคลุมรองเท้าเพื่อไม่ให้อนุภาคเล็ดลอดออกมา แต่ถุงคลุมรองเท้าต้องไม่สิ้น

ทนทาน และทำความสะอาดง่าย

- ทำความสะอาดรองเท้าที่ใส่มาจากภายนอก (street shoe) ก่อนเข้าห้องสะอาดแต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับห้องสะอาดที่มีความสะอาดสูง

3) ถุงมือ มีหลายแบบเช่นถุงมือพีวีซี ถุงมือลาเท็กซ์ ถุงมือเมมเบรน PTFE ถุงมือป้องกันไฟฟ้าสถิต (Finger cots) ซึ่งใช้ทำงานที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ไวต่อประจุไฟฟ้าสถิต

4) หน้ากาก (Face mask) ทำหน้าที่ป้องกันอนุภาคจากจมูก และช่องปาก

ลำดับขั้นตอนของการสวมชุดปฏิบัติงาน สำหรับห้องสะอาดที่ถูกต้อง มีดังนี้

1. ถุงคลุมรองเท้า (Shoe covers)
2. หมวกครอบผม (Cap)

3. หมวกคลุมศีรษะ (Hood)
4. หน้ากาก (Face mask)
5. ชุดหมี (Coveralls)
6. รองเท้าบูต (Boots)
7. แว่นตานิรภัย (Safety glasses)
8. ถุงมือ (Gloves)

นอกจากนี้ชุดปฏิบัติงานควรจัดเก็บไว้ในตู้หรือชั้นวางที่เหมาะสม ปราศจากฝุ่นละออง

การฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงานห้องสะอาด บุคคลที่เกี่ยวข้องกับห้องสะอาดต้องได้รับการฝึกอบรมก่อนที่จะเข้าไปในห้องสะอาด เพื่อให้แน่ใจว่าบุคคลเหล่านี้จะไม่ทำให้เกิดอนุภาคเพิ่มขึ้นภายในห้องสะอาด บุคคลที่เกี่ยวข้องได้แก่ ช่างเทคนิค, วิศวกร และนักวิทยาศาสตร์, เจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพ, หัวหน้างาน และผู้จัดการผู้รับเหมา และบุคคลภายนอก

หัวข้อที่ควรฝึกอบรมมีดังนี้ การทำงานของห้องสะอาด, มาตรฐานของห้องสะอาด, แหล่งกำเนิดการปนเปื้อน, อนามัยส่วนบุคคล, การทำความสะอาด, ชุดปฏิบัติงานในห้องสะอาด, ขั้นตอนการซ่อมบำรุง, การตรวจสอบห้องสะอาด, การปฏิบัติตนในห้องสะอาด, ความปลอดภัย และการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน

2.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ

2.1.2.1 Program phase ก่อนเริ่มต้นออกแบบ ผู้ออกแบบจะต้องได้รับข้อมูล ข้อกำหนด เงื่อนไขต่างๆ ของห้องสะอาดจากเจ้าของอาคาร หรือเจ้าของโครงการเสียก่อน สำหรับข้อมูลในเบื้องต้นมีดังนี้

1. ฟังก์ชันการใช้งาน ลักษณะการใช้พื้นที่ ประเภทกระบวนการผลิต
2. ภูมิศาสตร์ ตำแหน่งที่ตั้ง
3. งบประมาณในการดำเนินการก่อสร้าง
4. แบบร่างแนวคิดการออกแบบทางสถาปัตยกรรม เช่น รูปด้าน แบบผังพื้น พื้นที่ และ

ความสูงของห้อง

5. วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างผนัง หลังคา

2.1.2.2 Schematic design phase เป็นขั้นตอนในการพิจารณาเลือกชนิดของระบบปรับอากาศที่เหมาะสมโดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น

1. ความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น
2. ขนาดพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ปรับอากาศ
3. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง
4. ค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบ
5. เสี่ยงและความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น
6. ความเข้ากันได้กับพื้นที่ของอาคาร และระบบโครงสร้าง
7. การอนุรักษ์พลังงาน

ในขั้นตอนนี้วิศวกรออกแบบอาจถูกร้องขอให้วิเคราะห์ผลกระทบความร้อนจากกระจกที่ใช้, ไฟฟ้าแสงสว่างที่มากเป็นพิเศษในบางบริเวณ, อุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องจักรจำนวนมากที่มีผลต่อระบบปรับอากาศตลอดจนถึงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศซึ่งต้องคำนึงเรื่องเสียง และความสั่นสะเทือน หากมีข้อมูลเพียงพอวิศวกรออกแบบอาจต้องทำการคำนวณการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศแต่ละแบบเพื่อประกอบการตัดสินใจเปรียบเทียบกันว่าระบบปรับอากาศชนิดใดมีความเหมาะสมมากกว่ากัน เพื่อจะได้แนะนำระบบปรับอากาศที่เหมาะสมแก่เจ้าของอาคาร โดยทั่วไปมักได้รับการยอมรับหากมีเหตุผลสนับสนุนที่ดีเพียงพอ และสอดคล้องกับความต้องการของเจ้าของอาคาร

2.1.2.3 Preliminary design เป็นขั้นตอนการประสานงานกันระหว่างงานระบบปรับอากาศ งานสถาปัตยกรรม งานระบบโครงสร้าง การประสานงานที่ใกล้ชิดระหว่างงานระบบเครื่องกล และ

ไฟฟ้ากับงานโครงสร้าง และงานสถาปัตยกรรมต้องการความร่วมมือกันอย่างใกล้ชิดจากวิชาชีพต่างๆ เช่น สถาปนิก วิศวกรเครื่องกล วิศวกรไฟฟ้า วิศวกรโครงสร้าง ที่ปรึกษาทางด้านเสียง เป็นต้น

กฎหมายและข้อบังคับท้องถิ่นจะต้องนำมาพิจารณาในขั้นตอนนี้ เช่นกฎกระทรวงฉบับที่ 33 หรือ 39 ตามพ.ร.บ.ควบคุมอาคารซึ่งกำหนดอัตราการระบายอากาศ, พ.ร.บ.การส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานซึ่งกำหนด kW/ton ขึ้นต่ำของเครื่องปรับอากาศ กำหนดกำลังไฟฟ้าแสงสว่างต่อพื้นที่ใช้งาน W/m^2 เป็นต้น

แบบผังพื้น (Floor plan) และรูปด้าน (Elevation) ของงานสถาปัตยกรรมจะได้รับการพัฒนาให้มีรายละเอียดมากขึ้น งานระบบปรับอากาศสามารถที่จะเริ่มคำนวณภาระการทำความเย็นได้ละเอียดมากขึ้น และทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศโดยใช้ CFD เสริมความน่าเชื่อถือของงานออกแบบจากนั้นสามารถกำหนดขนาด และเลือกอุปกรณ์ต่างๆ วิศวกรสามารถออกแบบขนาดท่อลมและท่อน้ำยา โดยใช้มือหรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบรายละเอียดและงบประมาณสามารถจัดทำได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น เมื่อแบบขั้นต้น (Preliminary drawing) ข้อกำหนดประกอบแบบขั้นต้น (Outline Specification) และงบประมาณขั้นต้นได้รับการอนุมัติจากเจ้าของอาคาร งานส่วนที่เหลือหลังจากนี้ก็จะมีการแก้ไขไม่มากแล้ว

2.1.2.4 Final design, Preparation of construction document ในขั้นตอนนี้สุดท้ายของการออกแบบวิศวกรจะกำหนดสเปค รุ่น และขนาดของอุปกรณ์และระบบควบคุมโดยละเอียด ราคาของงบประมาณจะถูกถ่วงนกรงเป็นครั้งสุดท้าย เอกสารที่ถูกส่งมอบให้เจ้าของโครงการจะประกอบด้วยแบบ, ข้อกำหนดประกอบแบบ (Specification) และราคาของโครงการอนุมัติแล้วจะทำการเปิดการประมูล โดยส่งเอกสารไปยังบริษัทผู้รับเหมาเพื่อให้ทำเสนอราคาและคัดเลือกผู้รับเหมาที่เหมาะสมต่อไป

2.1.2.5 Post design phase ในระหว่างการออกแบบวิศวกรผู้ออกแบบมีหน้าที่

- ตรวจสอบแบบก่อสร้าง (Shop drawing) และข้อกำหนดสำหรับเครื่องจักรและอุปกรณ์, ระบบท่อ และอื่นๆที่เสนอขออนุมัติติดตั้งโดยผู้รับเหมา เพื่อให้แน่ใจว่าสอดคล้องกับการออกแบบ
- ตรวจสอบที่หน่วยงานก่อสร้างเป็นครั้งคราว
- ร่วมในการทดสอบระบบ (Performance test) เช่นอัตราการไหล, อุณหภูมิ, ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ระบบควบคุม

2.1.2.6 Commissioning phase เมื่อระบบติดตั้งเสร็จจะต้องมีการทดสอบปรับแต่งระบบเพื่อให้แน่ใจว่าระบบทำงานได้ตามที่วิศวกรออกแบบต้องการ วิศวกรออกแบบอาจต้องไปร่วมการทดสอบด้วย

2.1.2.7 Post occupancy phase ถ้าเป็นไปได้วิศวกรออกแบบควรติดตามตรวจสอบว่า ภายหลังการใช้งานไประยะหนึ่งแล้วระบบทำงานได้ตามความต้องการหรือไม่ หรือว่ามีการใช้พลังงาน ใกล้เคียงกับการประมาณการหรือไม่ซึ่งวิศวกรจะสามารถนำข้อมูลที่ได้รับในขั้นตอนนี้ไปปรับปรุงการ ออกแบบในอนาคตได้เป็นอย่างดี

สำหรับที่ผ่านมาเป็นกระบวนการออกแบบโดยรวมซึ่งต้องประสานงานร่วมกับวิชาชีพอื่น แต่ สำหรับในส่วนของการออกแบบระบบปรับอากาศแล้วจะสามารถแบ่งแยกเป็นขั้นๆได้ดังนี้

1. การคำนวณภาระการทำความเย็น (Cooling load) ในขั้นตอนนี้วิศวกรออกแบบควร จะต้องมีข้อมูลดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกของอากาศ ณ สถานที่ก่อสร้าง
- 2) อุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกของอากาศ, %ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ต้องการ ควบคุมในห้อง
- 3) ระดับความสะอาดของห้องที่ออกแบบ เพื่อเลือกค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศ
- 4) จำนวนคน ดวงโคม เครื่องใช้ไฟฟ้า และอื่นๆ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในอาคาร
- 5) หารช่วงเวลาที่จะทำการทำการคำนวณการเกิด Cooling load สูงสุด ดังนี้
 - อาคารที่มีจำนวนคนไม่คงที่ Cooling load มักจะเกิดในช่วงเวลาที่มีคนอยู่มากที่สุด
 - อาคารที่มีคนสม่ำเสมอทั้งวันและมีพื้นที่กำแพง กระจกมากแต่มีพื้นที่หลังคาน้อย Cooling load สูงสุดมักเกิดในช่วงเวลาที่แดดส่องถูกกำแพงด้านที่มีกระจกมากที่สุด
 - อาคารที่มีจำนวนคนคงที่และมีพื้นที่ของหลังคามาก เมื่อเทียบกับกำแพงและกระจก Cooling load สูงสุดมักเกิดในช่วงบ่าย ตั้งแต่ 14.00 น. ถึง 16.00 น.
 - อาคารที่มีพื้นที่ของ Skylight มาก Cooling load จะเกิดสูงสุดใกล้เคียงหรือเลยเที่ยง เล็กน้อย

ภาระการทำความเย็นจะเป็นผลรวมของความร้อนที่มาจากแหล่งต่างๆ เช่น

1. ความร้อนจากภายนอกที่ผ่านเข้ามาในบริเวณทำความเย็น โดยการนำความร้อนผ่าน ผังฉนวน
2. ความร้อนที่เข้าสู่บริเวณทำความเย็นโดยตรง โดยการแผ่รังสีผ่านกระจก หรือวัสดุโปร่งแสงอื่น
3. ความร้อนที่มากับอากาศอุ่นภายนอกในขณะเปิดประตู หรือผ่านตามรอยแตกของขอบ หน้าต่าง
4. ความร้อนจากตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำความเย็น

5. ความร้อนจากคนที่กำลังทำงานภายในบริเวณทำความเย็น

6. ความร้อนจากอุปกรณ์ต่างๆที่เป็นตัวเกิดความร้อนที่อยู่ในบริเวณทำความเย็น เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า, ดวงไฟ, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือเครื่องจักร

โดยทั่วไปการคำนวณภาระการทำความเย็นจะคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณซึ่งในปัจจุบันมีผู้ผลิตโปรแกรมจำหน่ายหลายราย สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้ออกแบบใช้โปรแกรม Microsoft office Excel ซึ่งเป็นตารางการคำนวณอย่างง่ายที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนสัมผัส (Sensible heat), ความร้อนแฝง (Latent heat) และผลรวมของภาระการทำความเย็นทั้งหมดที่ต้องการ โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณในตาราง 5

การคำนวณภาระการทำความเย็นทั้งหมด (Total cooling load) เกิดจากผลรวมของความร้อนที่มาจากแหล่งต่างๆ (Summation of heat load) โดยสรุปรวบรวมสูตรการคำนวณได้ดังตาราง 6 จากนั้นนำค่าภาระการทำความเย็นทั้งหมดที่คำนวณได้มาเลือกขนาดของเครื่องส่งลมเย็นที่ต้องการ (Required equipment capacity) ซึ่งจะทำให้ทราบปริมาณลมที่เครื่องส่งลมเย็นทำได้ ทั้งนี้ต้องสอดคล้องกับความต้องการปริมาณลมที่ใช้หมุนเวียนอากาศภายในห้องของระดับความสะอาดที่ออกแบบนั้นๆด้วย การเลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมกับระดับความสะอาดของห้องเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณลมที่ต้องจ่ายให้กับห้องสะอาดได้อย่างเพียงพอ นั้น มาตรฐาน Federal Standard 209E ได้แนะนำค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศตามระดับความสะอาดของห้องไว้ดังแสดงในตาราง 10 ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบปริมาณลมทั้งสองค่า และเลือกใช้ค่าที่มากกว่ามาทำการออกแบบ หากพบว่าปริมาณลมที่ได้จากการเลือกเครื่องส่งลมเย็นมีค่ามากกว่าก็สามารถใช้ทำการออกแบบในขั้นตอนต่อไปได้เลย แต่หากถ้าปริมาณลมที่ได้จากการคำนวณค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศมากกว่า โดยส่วนมากมักจะไม่ค่อยมีเครื่องส่งลมเย็นให้เลือกใช้ ดังนั้นต้องทำการปรับแต่ง (Modify) เครื่องให้สามารถทำความเย็นได้ตามที่คำนวณ และสามารถจ่ายปริมาณลมได้ตามความต้องการของห้องสะอาดซึ่งโดยทั่วไปมักมีราคาแพงกว่ามาก วิธีที่ผู้ออกแบบมักเลือกใช้แทนการ Modify เครื่องคือใช้พัดลมเติมอากาศ (Fresh air fan) เข้ามาช่วยเพิ่มปริมาณลมที่ขาดไปซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้างได้เป็นอันมาก จากนั้นนำข้อมูลปริมาณลมที่ใช้มาทำการคำนวณหาขนาดและจำนวนหัวจ่ายลมเย็น ขนาด และจำนวนช่องลมกลับ และวางตำแหน่งให้สอดคล้องตามแบบสถาปัตยกรรม

ตาราง 5 แสดงการคำนวณภาระการทำความเย็นของห้องสะอาด Weld C/R (Class 10,000)

PROJECT : YAMASHIN NEW FACTORY 2									
COOLING LOAD		CAC-1-1	1 FL		RM.NAME : WELD ROOM				
AREA		73.0 SQ.M	C.H.		2.7	M.	VOL.		197.0 QU.M
(1) CONDUCTION (SENSIBLE HEAT)									
EXP.	KIND	AREA (m´)	U	SUMMER					
				10:00		14:00		16:00	
				t (°C)	kcal/h	t (°C)	kcal/h	t (°C)	kcal/h
SW	WALL	8.8	3.38	2.4	71.7	3.2	95.6	6.1	182.2
	WALL	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SW	GLASS	6.6	5.50	2.4	86.5	3.2	115.4	6.1	219.9
	GLASS	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PARTITION	104.0	2.89	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3
	FLOOR	73.0	1.19	5.5	477.7	5.5	477.7	5.5	477.7
	CEILING	73.0	0.85	5.5	341.2	5.5	341.2	5.5	341.2
	ROOF	0.0	0.99	2.4	0.0	3.2	0.0	6.1	0.0
TOTAL (1)					2,760.8		2,816.2		3,016.9
(2) RADIATION (SENSIBLE HEAT)									
EXP.	KIND	AREA	CLF	kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h
SW	GLASS	6.6	0.50	63.0	206.5	89.0	291.7	159.0	521.1
		0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL (2)					216.8		306.3		547.2
(3) = (1) + (2)				2,977.6		3,122.4		3,564.0	
(4) (3) x SAFETY FACTOR 10 %				3,275.3		3,434.7		3,920.4	
(5) INTERIOR HEAT									
KIND						SENSIBLE		LATENT	
PEOPLE		15.0	PERSONS			59.0	884.8	40.0	600.0
LIGHT		25.0	W / SQ.M			1,961.5			
MACHINE		16,100.0	WATT			13,846.8			
MACHINE		0.0	WATT / SQ.M						
TOTAL OF (5) x SAFETY FACTOR 10 %						18,362.4		kcal/h	660.0
(6) TOTAL ROOM COOLING LOAD						22,282.8		kcal/h	660.0
(7) OUTDOOR AIR LOAD				1,200.0 CMH		3,496.7		kcal/h	10,205.5
TOTAL COOLING LOAD (SENS./ LAT.)						25,779.5		kcal/h	10,865.5
GRAND TOTAL COOLING LOAD						36,645.0		kcal/h	
ROOM CONDITION				24 deg.C, 50% R.H,			502.1 kcal / m ²		
OUTDOOR CONDITION				35 deg.C, 60% R.H,			Selection	36,645.0 kcal / h	
							Selection	146,580.1 Btu / h	
Required air(40 ACH)		7,881.84	CMH	Supply air		8,500.00	CMH		
Exhaust air		800.00	CMH	Exhaust air		800.00	CMH		
Fresh air		1,200.00	CMH	Fresh air		1,200.00	CMH		
Concept Design									
CAC-1-1 (New)		150,000.0	Btu / H	8,500.00	CMH	80 mm.Aq	1.0	Set	
COF-1-1 (New)				1,200.00	CMH	10 mm.Aq	1.0	Set	set 15 Pa.
CEF-1-1 (New)				800.00	CMH	25 mm.Aq	1.0	Set	
FFU-1-1				Not Require					
For Machine Operated									
General							420.00	CMH	
Gasket Assy Machine (Existing)			1 Set				380.00	CMH	

ตาราง 6 แสดงสูตรการคำนวณ Cooling Load จากแหล่งกำเนิดความร้อนต่างๆ (Procedure for calculating room design Cooling Load – Summary of load sources and equation)

Load Source	Equation	Reference, Table, Description
Partition, wall, glass, ceiling, floor, roof (conduction)	$Q = U \times A \times TD$	Design: Heat transmission coefficients (U)--Table 7 Area (A) calculated from architectural plan Temperature Difference (TD)--Table 8 (wall, glass, roof) and calculated $TD = \left(\frac{t_o - t_r}{2} \right)$ (floor, ceiling)
Glass (radiation)	$Q = CLF \times A \times SHGF$	Design: Cooling Load Factor (CLF) for glass = 0.5 Area (A) calculated from architectural plan Solar Heat Gain Factor (SHGF)--Table 9
Internal light	$Q = 3.4129 \times W \times BF \times CLF$	Input rating from lighting fixture data (W/m^2) and calculated $W = W/m^2 \times \text{room area}$ Design: Ballast heat Factor (BF) for fluorescent = 1.25 Cooling Load Factor (CLF) = 0.252
People Sensible: Latent:	$Q_s = No. \times SHG \times CLF$ $Q_l = No. \times LHG$	Number of people (No.) in room Sensible Heat Gain (SHG) from occupants = 61 kcal/h, Design: Cooling Load Factor (CLF) for people = 0.967 Latent Heat Gain (LHG) from occupants = 40 kcal/h
Power Sensible:	$Q = 3.4129 \times W \times CLF$	Manufacturer data (Machine equipment , W) Design Cooling Load Factor (CLF) = 0.252

ตาราง 6 (ต่อ)

Load Source	Equation	Reference, Table, Description
Ventilation & infiltration air		Calculated:
Sensible:	$Q_s = 0.2649 \times \text{CMH} \times \Delta t$	Outdoor air load (CMH)= Fresh air (room volume $\times 2 \text{ h}^{-1}$) + Exhaust air data
Latent:	$Q_l = 659.2715 \times \text{CMH} \times \Delta w$	Outdoor-indoor air temperature difference $\Delta t (^{\circ}\text{C}) = (t_o - t_r)$ Outdoor-indoor air humidity ratio difference $\Delta w (\text{lb } H_2O / \text{lb dry air}) = (w_o - w_r) = 0.0129$
Total cooling load	Summary of load $Q_{total} = Q_s + Q_l$	Calculated: Safety factor 10% of total cooling load

ตาราง 7 U-Values (Heat Transmission Coefficients)

Type	Material of Construction	Heat Transmission Coefficients (kcal/h. $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
Exterior Wall	Concrete block w / motar finish 2 sides	3.38
Interior Wall	Concrete block w / motar finish 2 sides	2.89
Glass	Ordinary glass	5.5
Ceiling	Concrete slab, Air space, Glass wool insulation 1", Gypsum board	0.85
Roof	Metal sheet, Glass wool insulation 1", Air space, Gypsum board	0.99

ตาราง 8 TD-Value (Equivalent Temperature Difference of dark wall, °C)

Exposure	Thickness of concrete wall (cm.)	Solar time				
		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
N	10	4.6	11.3	14.1	14.3	11.7
NE	10	8.3	18.1	15.3	6.9	3
E	10	7.9	15.8	9.1	3.6	2.6
SE	10	3.7	5.6	3.3	2.9	2.5
S	10	1.4	2.4	2.8	2.8	2.5
SW	10	1.4	2.4	2.8	3.2	6.1
W	10	1.4	2.4	2.8	9.8	16.1
NW	10	1.4	2.4	6.9	15.4	18.5
H (Roof)	10	5.8	20	30.4	30.6	20.3

ตาราง 9 SHGF-Value (Solar Heat Gain through ordinary glass, kcal/h.m²)

Exposure	Solar time				
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
N (Shaded)	204	307	332	307	204
NE	373	434	254	63	52
E	355	344	66	63	52
SE	159	89	66	63	52
S	52	63	66	63	52
SW	52	63	66	89	159
W	52	63	66	344	355
NW	52	63	254	434	374
H(Roof)	279	613	744	613	279

2. การเลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศ คืออัตราการไหลของอากาศโดยคำนวณจากจำนวนเท่าของปริมาตรห้องต่อชั่วโมง ซึ่งควรเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมเป็นไปตามระดับความสะอาดที่ต้องการสำหรับ Federal Standard 209E ได้กำหนดค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่แนะนำไว้ดังนี้

ตาราง 10 อัตราการหมุนเวียนอากาศที่แนะนำตามระดับชั้นความสะอาดที่ต้องการของมาตรฐาน Federal Standard 209E

Class Name	0.1 μm .	0.2 μm .	0.3 μm .	0.5 μm .	5.0 μm .	Air change/hour
1 (M 1.5)	35	7.5	3	1	N/A	N/A
10 (M 2.5)	350	75	30	10	N/A	600
100 (M 3.5)	N/A	750	300	100	N/A	250-600
1000 (M 4.5)	N/A	N/A	N/A	1,000	7	150-250
10000 (M 5.5)	N/A	N/A	N/A	10,000	70	50-100
100000 (M 6.5)	N/A	N/A	N/A	100,000	700	20-50

จะเห็นได้ว่าค่าที่แนะนำดังตาราง 10 มีช่วง Range ค่อนข้างกว้างไม่เจาะจงค่าใดค่าหนึ่งทำให้ผู้ออกแบบไม่แน่ใจว่าจะเลือกใช้ค่าใดจึงจะเหมาะสมกับกระบวนการผลิต ทั้งนี้อาจเลือกที่จะใช้ค่าสูงสุดเพื่อสร้างความมั่นใจในผลการออกแบบ ซึ่งผลกระทบโดยตรงจากการใช้ค่าที่สูงเกินความจำเป็นจะเป็นการเพิ่มต้นทุนการก่อสร้าง และเพิ่มค่าใช้จ่ายในระหว่างการผลิตส่งผลให้ต้นทุนของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นตามไปด้วย

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

2.2.1 บทนำ

ชุดโปรแกรมช่วยในการออกแบบวิเคราะห์รูปแบบกริด (Grid model) สำหรับการศึกษาด้านการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) สามารถรองรับประสานการทำงานได้กับหลายโปรแกรม เช่น Fluent, ANSYS, NASTRAN หรือชุดโปรแกรม CAD/CAE อื่นๆอีกหลายตัว สำหรับโปรแกรมสร้างขอบเขตสภาวะ และสร้างกริดจึงมีความนิยมใช้กันเป็นอย่างสูงในการออกแบบสร้างแบบจำลองทางด้านวิศวกรรม โดยโปรแกรมยังสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions), กำหนดค่าจำกัดความของของไหล, ดำเนินการแก้ไข, ทดสอบความถูกต้องของกริด และยังสามารถตรวจสอบขั้นตอนการดำเนินการให้เป็นไปตามลำดับอีกด้วย

โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ใช้สำหรับวิเคราะห์รูปแบบการไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อนของรูปทรงที่ซับซ้อน โดยโปรแกรมนี้ออกสร้างขึ้นเพื่อรองรับการแก้ปัญหการไหลกับรูปแบบกริดที่มีโครงสร้างไม่แน่นอน ชุดโปรแกรมยังสามารถรองรับการทำงานแบบ 2 มิติ และ 3 มิติของกริดรูปสามเหลี่ยม, รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และรูปแบบผสมผสานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดของรูปทรงลักษณะต่างๆ เช่นรูปกรวย, รูปลิ้ม, รูปปริมาตร Fluent ถูกเขียนขึ้นโดยคอมพิวเตอร์ภาษาซีซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐานที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการพัฒนาสร้างโปรแกรมอื่นๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์มากมาย เนื่องจากโปรแกรมมีเสถียรภาพสูง และรองรับการทำงานที่หลากหลาย

การหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุมพร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดิสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่งๆกับปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้นทำการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยต่อไป ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) เป็นการประยุกต์กระบวนการคำนวณทางทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics)

2.2.2 สมการควบคุม

ในการศึกษาการวิเคราะห์การไหลในที่นี้จะพิจารณาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และปั่นป่วนที่สภาวะคงตัว อากาศที่พิจารณาเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ไม่มีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ อากาศถูกสมมติให้เป็นก๊าซอุดมคติ และไม่มีอุปกรณ์ภายในห้องที่สามารถแผ่ และดูดซับไอน้ำได้ คุณสมบัติของอากาศเป็นไป

ตามกฎของก๊าซผสมทางอุณหพลศาสตร์ สมการควบคุมที่เกี่ยวข้องในการอธิบายพฤติกรรมของอากาศภายในห้องสะอาดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยกับเวลาแบบเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(t_{ji} - \overline{\rho u'_j u'_i}) - \rho g_j \beta(T - T_r) \delta_{ij} + S_i \quad (2)$$

สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,m}}) \frac{\partial m}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

สมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\rho D_{i,c} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,c}}) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] + S_c \quad (4)$$

สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - \rho D + S_k \quad (5)$$

สมการการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_k) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho E + S_\varepsilon \quad (6)$$

โดยที่

$$t_{ji} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (7)$$

$$-\overline{\rho u'_j u'_i} = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}) \right] \quad (8)$$

$$P_k = -\overline{\rho u'_j u'_i} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

$$G_k = -\frac{\mu_t}{\sigma_T} g \beta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

สำหรับค่าคงที่ ฟังก์ชันการหน่วง และเทอมพิเศษต่างๆมีค่าดังนี้

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, \\ C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 3} = 1.0, f_{\varepsilon 1} = 1.0, f_{\varepsilon 2} = 1 - 0.3 \exp(-\text{Re}_t^2)$$

$$f_\mu = \exp\left(\frac{-3.4}{(1 + \text{Re}_t/50)^2}\right), D = \frac{2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i}\right)^2,$$

$$E = \frac{2\mu}{\rho} \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m}\right)^2, \text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

คุณสมบัติของอากาศซึ่งเป็นของผสม (Mixture) ระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำสามารถหาได้จากกฎการผสมกันของก๊าซสมบูรณ์แบบดังนี้

$$\rho_{\text{mixture}} = \frac{p}{RT \sum_{\alpha=1}^N (m_\alpha / M_\alpha)} \quad (12)$$

$$C_{P,\text{mixture}} = \sum_{\alpha=1}^N (m_\alpha C_{P,\alpha}) \quad (13)$$

$$\mu_{\text{mixture}} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{x_\alpha \mu_\alpha}{\sum_{\beta=1}^N (x_\beta \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (14)$$

โดยที่

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_\beta} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_\alpha}{\mu_\beta} \right)^{1/2} \left(\frac{M_\beta}{M_\alpha} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (15)$$

และ

$$\bar{k}_{mixture} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{x_{\alpha} \bar{k}_{\alpha}}{\sum_{\beta=1}^N (x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (16)$$

โดยที่

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\bar{k}_{\alpha}}{\bar{k}_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (17)$$

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางด้านการทดสอบ

เมื่อทำการติดตั้งระบบและอุปกรณ์ต่างๆของห้องสะอาดเสร็จเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบสมรรถนะ (Performance) ของระบบเพื่อยืนยันว่าห้องสะอาดสามารถปฏิบัติงาน (Operate) ได้ตามเงื่อนไข (Condition) ที่ออกแบบไว้โดยแยกเป็น 3 Condition ดังนี้

1. At built condition เป็นการทดสอบตัวแปร (Parameter) ของห้องสะอาดที่วางแปลนโดยที่ยังไม่มีการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิตใดๆ

2. At rest condition เป็นการทดสอบห้องสะอาดหลังผ่านการทดสอบ At built condition และมีการติดตั้งเครื่องจักรตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆในการผลิตเรียบร้อยแล้ว

3. At operation condition เป็นการทดสอบห้องสะอาดในขณะที่มีการปฏิบัติงาน มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบห้องสะอาด คือ

1. IEST Recommended Practice, RP006.2 (1993), Testing of clean rooms, USA.
2. NEBB Procedural Standards for Certified Testing of clean rooms (1996), USA.

2.3.1 หลักการตรวจสอบความถูกต้องของห้องสะอาดประกอบการตรวจสอบ 5 ข้อ

1. ตรวจสอบการไหลเวียนของลมสะอาดที่ออกจากหัวจ่าย (Airflow tests)

ห้องสะอาดเป็นห้องที่สร้างขึ้นเพื่อให้อากาศที่จ่ายออกจากหัวจ่ายเป็นไปอย่างสมดุล และสามารถจ่ายอากาศที่ความเร็วลมอย่างน้อย 90 fpm โดยเป็นการหา Airflow velocity และ Air Change rate per Hour ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความเร็วของอากาศหรือลมที่ผ่านแผ่นกรอง คือ Anemometer การทดสอบนี้ทำการทดสอบในทุกห้องที่มี HEPA filter ติดตั้งอยู่ ต้องจำกัดจำนวนของพนักงานที่อยู่ในห้องในขณะไม่ได้ทำงานให้มีจำนวนน้อยที่สุด ผลการวัดความเร็วลมควรจะสูงกว่า 90 fpm และไม่มากกว่า 150 fpm ในจุดที่ห่างจาก HEPA filter ระยะ 6" ซึ่งความเร็วลมของ Laminar air flow แนวราบ (Horizontal flow) คือ 0.45 ± 0.1 m/s และความเร็วลมของ Laminar air flow แนวตั้ง (Vertical flow) คือ 0.30 ± 0.05 m/s ขั้นตอนการตรวจสอบมีดังนี้

1) กรณีเป็น Laminar flow วัดความเร็วลมไม่เกิน 4 ft^2 ต่อหนึ่งจุดหรือยิ่งดียิ่งดีโดยวัดให้ห่าง จาก HEPA filter ประมาณ 3"-6" วัดความเร็วลมต่อเนื่องอย่างน้อย 5 วินาทีแล้วจึงหาค่าเฉลี่ยออกมา

2) กรณีเป็น Non laminar flow รายละเอียดการวัดเหมือน Laminar flow แต่เปลี่ยนจากการวัดความเร็วลมเป็นการวัดปริมาณลมของแต่ละหัวจ่ายโดย Flow hood เท่านั้นหากจำเป็นต้องหาปริมาณลมโดยการคูณความเร็วลมเฉลี่ยกับพื้นที่ของ HEPA filter โดย HEPA filter นั้นต้องเป็น Net media area

2. ตรวจสอบหารอยรั่วของ HEPA filter (HEPA filter installation leak tests)

การตรวจแผ่นกรอง HEPA โดยวิธี DOP (DOP test for HEPA filter) ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคซึ่งมีขนาดเล็ก $0.3 \mu\text{m}$ ได้อย่างน้อย 99.97% เพื่อให้แน่ใจได้ว่า HEPA filter ยังทำงานได้ดีไม่มีความเสียหาย (การรั่ว) เกิดขึ้นในระหว่างการติดตั้งหรือการปฏิบัติงาน การทดสอบ filter ควรจะกระทำหลังจากมีการวัดความเร็วลมและมีการปรับความเร็วลมตามความจำเป็นจนเป็นผลที่ได้รับเป็นที่ยอมรับแล้วการทดสอบควรกระทำโดยผู้ที่มีชำนาญ และทดสอบโดยการพ่นไอของ DOP (Di-Octyl Phthalate หรือ Dispersed Oil Particulate) ผ่าน port ของแผ่นกรองเข้าไปด้านบนแล้วตรวจ หารอยรั่วทางด้านล่างของแผ่นกรองซึ่งปัจจุบัน DOP test ค่อยๆหายไปจากวงการห้องสะอาดเนื่อง จาก DOP ไม่ใช่สารที่เหมาะสมอีกต่อไปอีกทั้งห้องสะอาดบางประเภทเช่น Semiconductor clean room และ Microelectronic clean room จะไม่ใช่สารประเภท Oil based เนื่องจากไม่ปลอดภัยกับผลิตภัณฑ์ สำหรับวิธีการทดสอบจะใช้หัวตรวจรั่ว (Aerosol probe หรือ photometer probe) ถือให้ห่างผิวหน้าแผ่นกรองประมาณ 1" โดยผ่านผิวหน้าแผ่นกรองทั้งหมดไปมาอย่างช้าๆให้มีอัตราความเร็วไม่มากกว่า 10 fpm และผ่านไปรอบด้านข้างของแผ่นกรองให้ทั่วผ่านไปตามรอยเชื่อมต่อระหว่างแผ่นกรองและกรอบ และผ่านไปตามจุดรอยเชื่อมอื่นๆซึ่งเกือบ 100%ของ HEPA filter จะมีการรั่วที่ประเด็นดังนั้นถึงแม้ HEPA filter จะมีประสิทธิภาพสูงมากเช่น 99.99%DOP หรือเข้าชั้น Ultra filter ไปแล้ว แต่ประสิทธิภาพอันสูงส่งจะไม่มีประโยชน์เลยหาก HEPA filter มีการรวมหาศาลที่ปะเก็นขอบหรือรอยรั่วอื่นๆที่มองไม่เห็น สำหรับในการติดตั้งซึ่งอาจทำให้เกิดรอยรั่วโดยลมผ่านออกมาได้โดยไม่ผ่านแผ่นกรองเปอร์เซ็นต์การรั่ว (Percent penetration) ที่สามารถยอมรับได้คือไม่เกิน 0.01 % ของระดับมาตรฐาน เมื่อมีรอยรั่วเกิดขึ้นแก้ไขได้ โดยใช้การซิลิโคนอุดรอยรั่วด้านแคบที่กว้างไม่เกิน 1-2" ของจุดที่รั่ว และทำการตรวจสอบรอยรั่วซ้ำเหมือนเดิม การอุดรอยรั่วต้องไม่มากกว่า 5% ของพื้นที่กรองหรือลมที่ออกมายังบริเวณที่ทำงานไม่เปลี่ยนแปลง ถ้ามีการอุดรอยรั่วเกิน 5% ต้องทิ้งแผ่นกรองไปโดยไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก แล้วทำการติดตั้งแผ่นกรองชุดใหม่มาแทน

HEPA filter installation leak tests จึงสำคัญมากสำหรับห้องสะอาดโดยเฉพาะใน Class ต่ำๆเช่น Class 100 เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะถูกจ่อติดกับอากาศที่ออกมาจาก HEPA filter เลยซึ่งโดยทั่วไปหากมีการวัด Particle เป็นการวัดในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่จุดใดจุดหนึ่งเพียงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ไม่ได้ประกันว่า HEPA filter จะไม่มี Particle หลุดลอดออกมาเสมอไปและหากมี Particle เพียง 1-2 ตัวหลุดผ่านรอยรั่วออกมาก็เพียงพอในการทำความเสียหายอย่างใหญ่หลวงกับผลิตภัณฑ์

3. ตรวจสอบอนุภาคฝุ่นและมลสารภายในห้องสะอาด(Cleanliness classification tests)

การตรวจอนุภาคในอากาศ (Airborne particle count test) ตามอากาศที่จะผ่านเข้าไปในบริเวณห้องสะอาดหรือปราศจากเชื้อนั้นจะต้องผ่านการกรองเสียก่อน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่จะมากับอากาศระดับความสะอาดขึ้นกับจำนวนของอนุภาค 0.5 μm หรือใหญ่กว่าต่อลูกบาศก์ฟุตของอากาศ จำนวนอนุภาคในอากาศหาได้โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างอากาศตามพื้นที่ เพื่อให้มั่นใจว่าในสถานที่ที่ต้องการความสะอาดสูงๆ (Critical work location) จะมีอนุภาคไม่เกินจำนวนที่กำหนดไว้เช่น ที่ระดับความสะอาด Class 100 ควรนับอนุภาคสิ่งปนเปื้อนไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตของอนุภาคขนาด 0.5 μm หรือใหญ่กว่า อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคือ Light scattering particle counter วิธีทดสอบต้องทำโดยผู้ที่มีความชำนาญและทำหลังจากผ่านการทดสอบรอยรั่วและความเร็วลมของ HEPA filter เรียบร้อยแล้ว เริ่มต้นทำการทดสอบห้องในสภาวะที่ไม่มีการทำงานทั้งของบุคลากรและเครื่องจักร โดยใช้เครื่องนับอนุภาค นับจำนวนของอนุภาคที่มีขนาด 0.5 μm หรือใหญ่กว่า ในจุดที่สูง 40" หรือ 1 m จากระดับพื้นที่จุดศูนย์กลางของแต่ละกริดซึ่งเป็นระดับการทำงานโดยปกติทั่วไป ถ้าการนับอนุภาคได้น้อยกว่า 50 ต่อลูกบาศก์ฟุตของอากาศให้นับซ้ำในตำแหน่งเดิมอีก 4 ครั้ง หลังจากทำการทดสอบจุดแรกแล้ว ถ้า HEPA air filtration module ทำงานอยู่ในช่วงที่กำหนดให้ทดสอบซ้ำโดยให้มีบุคลากรและเครื่องจักรทำงานตามปกติ ถ้าช่วงใดมีการเบี่ยงเบนไปจากค่ายอมรับได้ต้องทดสอบส่วนต่างๆของระบบ ทำการซ่อมหรือปรับจนกระทั่งได้สภาวะที่ต้องการของระดับความสะอาดของห้อง ถือว่าผ่านการตรวจสอบความถูกต้องได้ ต่อเมื่อผลของการทดสอบ 3 ครั้งติดต่อกันอยู่ในช่วงที่กำหนด

การกำหนดจำนวนจุดเก็บตัวอย่างในการวัดตามสูตรของ Federal standard 209E ดังนี้

1) สำหรับ Laminar flow

$$\text{จำนวนจุด} = A / 25$$

$$\text{หรือ} = A / \sqrt{N} \quad \text{อันใดอันหนึ่งที่น้อยกว่า}$$

โดยที่

$$A = \text{พื้นที่ของห้องสะอาด (ft}^2\text{)}$$

$$N = \text{Class ระดับความสะอาด}$$

2) สำหรับ Non laminar flow

$$\text{จำนวนจุด} = A/\sqrt{N}$$

ถ้าจำนวนจุดน้อยกว่า 10 จุด ตัวแทน Particle count ต้องหาจาก 95%Upper Confidential Limit หรือ 95%UCL ถ้าจำนวนจุดตั้งแต่ 10 จุดขึ้นไป สามารถหาค่าเฉลี่ยของ Particle count ได้เลย แต่จำนวนที่น้อยที่สุดของจุดและครั้งที่วัดคือไม่ต่ำกว่า 2 จุด 5 ครั้ง

สูตร 95%UCL = AVERAGE (Test data) + [STDEV (Test data) / Point^{0.5} x UCL factor]

$$= \bar{X} + \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{(N-1)}}}{N^{0.5}} \times UCL \text{ factor} \right]$$

โดยที่

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N}$$

N = จำนวนจุดที่ทำการทดสอบ (Point)

UCL factor เปิดจากตาราง 11

ตาราง 11 UCL factor สำหรับ 95% Upper Confidence Limit (IEST. 1992: 15)

No. of Location	2	3	4	5	6	7	8	9	>9
95%UCL factor	6.31	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.90	1.86	NA

4. ตรวจสอบแรงดันอากาศภายในห้องสะอาด (Room pressurization tests)

เป็นการทดสอบหลังจากที่ได้ปรับแต่งห้องสะอาดให้ผ่าน Airflow velocity and uniformity test ตามต้องการอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคือ Manometer ซึ่งมีขีดอ่านขนาด 0.01 in. W.G. เพื่อใช้ดูความสามารถของระบบควบคุมความดันว่าสามารถทำให้ระดับความดันอากาศได้ตามที่กำหนด หรือไม่ ความแตกต่างของความดันอากาศในบริเวณผลิต และ Air lock ควรมีอย่างเพียงพอเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของอนุภาค และเชื้อโรคต่างๆ ความแตกต่างของความดันอากาศในแต่ละห้องที่มีระดับความ

สะอาดต่างกันควรจะต่างกันประมาณ 0.05 in. W.G เมื่อประตูทุกบานปิดหมด และต้องเปิด HVAC (Heating Ventilation and Air-Conditioning system) และเป็น laminar airflow อย่างต่อเนื่องกัน

5. ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นในห้องสะอาด (Temperature and humidity tests)

เพื่อให้สภาพการทำงานสะดวกสบาย จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปกติจะปรับให้อุณหภูมิอยู่ที่ $72^{\circ}\text{F} \pm 10\%$ ($22^{\circ}\text{C} \pm 10\%$) อาจจะต้องลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่านี้ ถ้าใช้เครื่องแต่งตัวพิเศษ การควบคุมอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการจะต้องเกี่ยวข้องกับ HVAC ในห้องทำงานซึ่งมีตู้ฆ่าเชื้อหรือตู้อบไฟฟ้าติดตั้งอยู่ซึ่งจะทำให้เพิ่มความร้อนในห้องมากขึ้น ถ้าออกแบบระบบปรับอากาศไม่พอเหมาะนอกจากจะทำให้บุคลากรที่ทำงานในห้องอึดอัดไม่สบายแล้ว ยังทำให้เกิดการปนเปื้อนสูงอันเนื่องมาจากเหงื่อของผู้ปฏิบัติงานได้ ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิได้แก่ Dry bulb thermometer, Thermo anemometer หรือ thermocouple และ recorder การตรวจสอบนั้นควรเปิด HVAC ไว้ก่อนอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และแสงสว่างต่างๆจะต้องเปิดไว้ขณะที่ทำการตรวจสอบ วัดและบันทึกอุณหภูมิแต่ละโซนที่สนใจ การตรวจสอบนั้นควรกระทำทั้งในขณะที่ปฏิบัติงานอยู่และไม่มีการปฏิบัติงาน ค่าที่ยอมรับควรจะเป็นที่ $72^{\circ}\text{F} \pm (22^{\circ}\text{C} \pm)$ ตลอดเวลา สำหรับระดับความชื้นของห้องจะต้องถูกควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้โดยทั่วไปในการผลิตยาปราศจากเชื้อความชื้นสัมพัทธ์จะอยู่ระหว่าง 45%-55% แต่มีบางผลิตภัณฑ์ที่ต้องควบคุมให้ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 15%-30% สำหรับผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมโดยทั่วกำหนดให้มีความชื้นประมาณ $50 \pm 10\%$ อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบได้แก่ Dry bulb และ Wet bulb thermometer และ automatic humidity recorder ก่อนที่จะทำการตรวจวัดจะต้องเดินเครื่องก่อนอย่างน้อย 6 ชั่วโมง ทำการตรวจวัด และบันทึกผลทั้งในขณะที่ไม่มีการปฏิบัติงาน และขณะที่มีการปฏิบัติงานทุกห้อง แสดงว่าระบบการทำงานของอากาศที่ควบคุมความชื้นที่เป็นที่ยอมรับได้

การตรวจสอบอื่นๆ เช่น Airflow visualization, recovery tests

1. Airflow visualization เป็นการทำให้การไหลเวียนของอากาศสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยใช้ควันชนิดต่างๆหรือเส้นใยเบาๆปล่อยไปตามกระแสอากาศ ถ้าทำภายใต้ Laminar flow จะเป็นการดู Airflow pattern ว่ามีความเป็น Laminarity ที่ดีหรือไม่และ Airflow pattern ไหลปกคลุม Critical area อย่างไรนอกจากนี้ Airflow visualization ยังเป็นประโยชน์ในการพิสูจน์ Directional airflow ของอากาศที่ไหลระหว่างห้องด้วย เช่น ห้องที่เป็น Contaminant ต้องการ Inward directional airflow เป็นต้น

2. Recovery tests เป็นการทดสอบความสามารถในการ Clean up ของห้องสะอาดจากสภาวะ At operation condition ไปเป็นสภาวะ At rest condition ว่าอยู่ในกำหนดเวลาอันควรหรือไม่

2.3.2 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด และความถี่ในการทดสอบห้องสะอาด

ตาราง 12 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดห้องสะอาด (ทศพล สันติเทวกุล. 2545: 31)

Instrument	Range	Minimum Accuracy	Calibration
Particle Counter (Minimum Sampling Volume 1CFM.	0-999,999,999 particle size 0.3,0.5,1.0,5.0 μm or larger		12 month
Photometer for HEPA filter leak tests	0-99.999%Eff.	$\pm 0.001\%$ Penetration	12 month
Hot wire anemometer or Electronic micromanometer	0-2,000 FPM.	± 10 FPM At 0-200 FPM.	12 month
Flow Hood	0-2,000 CFM.	± 10 CFM.	12 month
Thermometer	0-100 $^{\circ}\text{C}$	± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ At 0-50 $^{\circ}\text{C}$	12 month
Hygrometer for Humidity Measuring	0-100%RH	$\pm 2\%$	12 month
Manometer for Air Pressure Measuring	0-3 in. W.G.	± 0.01 in. W.G.	12 month

ตาราง 13 ความถี่ในการทดสอบห้องสะอาด (ทศพล สันติเทวกุล. 2545: 32)

Description	Frequency (Per year)	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Airflow volume tests	2	/						/					
HEPA filter installation leak test	1	/											
Cleanliness classification tests	4	/			/			/			/		
Room pressurization tests	4	/			/			/			/		
Temperature & Humidity tests	4	/			/			/			/		

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ห้องสะอาดที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คือห้องสะอาด Weld C/R ของโรงงานผลิตไส้กรองกระดาษบริษัท ยามาฮิน ประเทศไทย จำกัด ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จ.อยุธยา เป็นหนึ่งกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรทำการเชื่อมประคบหัวท้ายของตัวกรอง เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นไส้กรองกระดาษภายหลังจากผ่านกระบวนการอัดจีบ การดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ขั้นตอนการคำนวณออกแบบ, ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ และขั้นตอนทดสอบปฏิบัติงานจริง

3.1 ขั้นตอนการคำนวณออกแบบ

กำหนดให้ห้องสะอาดนี้เป็นห้องสะอาดประเภท Conventional C/R ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 (ขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง $0.5\ \mu\text{m}$ ไม่เกิน 353,000 อนุภาคต่อ $1\ \text{m}^3$) ขนาดของห้องสะอาดที่มากที่สุดในทิศทาง x, y และ z เท่ากับ 4.45, 2.7 และ 16.4 m ตามลำดับ ออกแบบอุณหภูมิห้องที่ $24 \pm 2\ ^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50%, ความดันภายในห้อง 15 Pa และแสงสว่าง $25\ \text{W/m}^2$ จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 15 คน เครื่องจักรขนาด 16.1 kW และพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักรขนาด 800 CMH ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณภาระทำความเย็น (Cooling load calculation)

1. ภาระการทำความเย็นจะเป็นผลรวมจากความร้อนจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

ตาราง 14 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนภายนอกที่เข้ามาในบริเวณทำความเย็น

โดยการนำความร้อน (Conduction) ผ่านกำแพง กระจก ผนังกัน พื้น ฝ้า และหลังคาที่ถูกแดดส่อง

Dir.	Kind	A (m^2)	U	ช่วงเวลาที่เกิด Cooling load สูงสุด (Sensible heat)					
				10.00 น.		14.00 น.		16.00 น.	
				t ($^\circ\text{C}$)	kcal/h	t ($^\circ\text{C}$)	kcal/h	t ($^\circ\text{C}$)	kcal/h
SW	Wall	8.8	3.38	2.4	71.7	3.2	95.6	6.1	182.2
	Glass	6.6	5.50	2.4	86.5	3.2	115.4	6.1	219.9
	Partition	104.0	2.89	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3
	Floor	73.0	1.19	5.5	477.7	5.5	477.7	5.5	477.7
	Ceiling	73.0	0.85	5.5	341.2	5.5	341.2	5.5	341.2
	Roof	0.0	0.99	2.4	0.0	3.2	0.0	6.1	0.0
Total (1) x Safety factor 5%					2,760.8		2,816.2		3,016.9

ตาราง 15 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้าสู่บริเวณทำความเย็น โดยตรง โดยการแผ่รังสี (Radiation) ผ่านกระจกหรือผ่านวัสดุอื่นที่โปร่งแสง

Dir.	Kind	A	CLF	ช่วงเวลาที่เกิด Cooling load สูงสุด (Sensible heat)					
				10.00 น.		14.00 น.		16.00 น.	
				kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h
SW	Glass	6.6	0.5	63.0	206.5	89.0	291.7	159.0	521.1
Total (2) x Safety factor 5%					216.8		306.3		547.2

ตาราง 16 แสดงผลการคำนวณ Cooling load จากความร้อนที่เกิดจากคน แสงสว่างจากดวงไฟเครื่องจักรอุปกรณ์ไฟฟ้า และความร้อนที่มาจากอากาศอุ่นภายนอกในขณะเปิดประตู หรือขอบหน้าต่าง

Kind			Sensible heat		Latent heat	
			SHG x CLF	kcal/h	LHG	kcal/h
People	15	Persons	59.0	884.8	40.0	600.0
Light	25.0	W/ m ²		1,961.5		
Machine	16.1	kW		13,846.6		
Total (3) x Safety factor 10%				18,362.4		660.0
Ventilation air	1,200	CMH		3,496.7		10,205.5

ตาราง 17 แสดงผลรวม Cooling load ทั้งหมดของห้องสะอาด (จากตาราง 14 และตาราง 15 Cooling load สูงสุด เกิดขึ้นในช่วงเวลา 16.00 น. คือ 3,016.9 และ 547.2)

	Sensible heat	Latent heat
Total (4) = Total (1)+Total (2)	3,016.9 + 547.2 = 3,564.0	
Total (4) x Safety factor 10%	3,920.4	
Total (5) = Total (3)+Total (4)	18,362.1+ 3,920.4 = 22,282.8	660.0
Total (6) = Total (5)+ventilation	22,282.8 + 3,496.7 =25,779.5	660.0+10,205.5=10,865.5
ผลรวม Cooling load ทั้งหมด	25,779.5 + 10,865.5 = 36,645.0 kcal/h	
	36,645.0 x 4 = 146,580.1 Btu/h	

2. ทำการเลือกขนาดเครื่องปรับอากาศหรือเครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit, AHU) จากผลรวมของ Cooling load ในที่นี้เลือกที่ 150,000 Btu/h (8,500 CMH) จากนั้นทำการตรวจสอบขนาดเครื่องปรับอากาศที่เลือกใช้มีปริมาณลมส่ง (Supply Air, SA) เพียงพอต่อความต้องการอากาศ (Require air) ที่ระดับความสะอาดของห้องที่จะออกแบบหรือไม่

$$\text{พื้นที่ห้อง: } 4.45 \times 16.4 = 73 \text{ m}^2$$

$$\text{ปริมาตรห้อง: } 73 \times 2.7 = 197 \text{ m}^3$$

(ระดับความสะอาด Class 10,000 เลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศ 40 ACH)

ความต้องการอากาศสำหรับห้องสะอาด:

$$197 \times 40 = 7,881.84 \text{ CMH} \quad (\text{ซึ่ง} < 8,500 \text{ CMH})$$

แต่จากข้อมูลก่อนการออกแบบเราทราบว่าพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักรขนาด 800 CMH ซึ่งเมื่อรวมกับความต้องการอากาศของห้องจะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่า 8,500 CMH อยู่เล็กน้อย และโดยปกติของการออกแบบระบบปรับอากาศนั้นจำเป็นต้องมีอากาศใหม่ (Fresh air) จากภายนอกเข้ามาหมุนเวียนในระบบ 2 เท่าของปริมาตรห้อง ฉะนั้นเราจึงทำการหาปริมาณอากาศใหม่บวกกับปริมาณอากาศที่เสียไปกับพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักร ซึ่งคือพัดลมเติมอากาศ (Fresh air fan) ขนาด

$$(197 \times 2) + 800 = 1,200 \text{ CMH}$$

เนื่องจากขนาดความเย็นเพียงพอต่อความต้องการของห้องอยู่แล้วมีหนึ่งวิธีหากไม่ต้องเพิ่ม

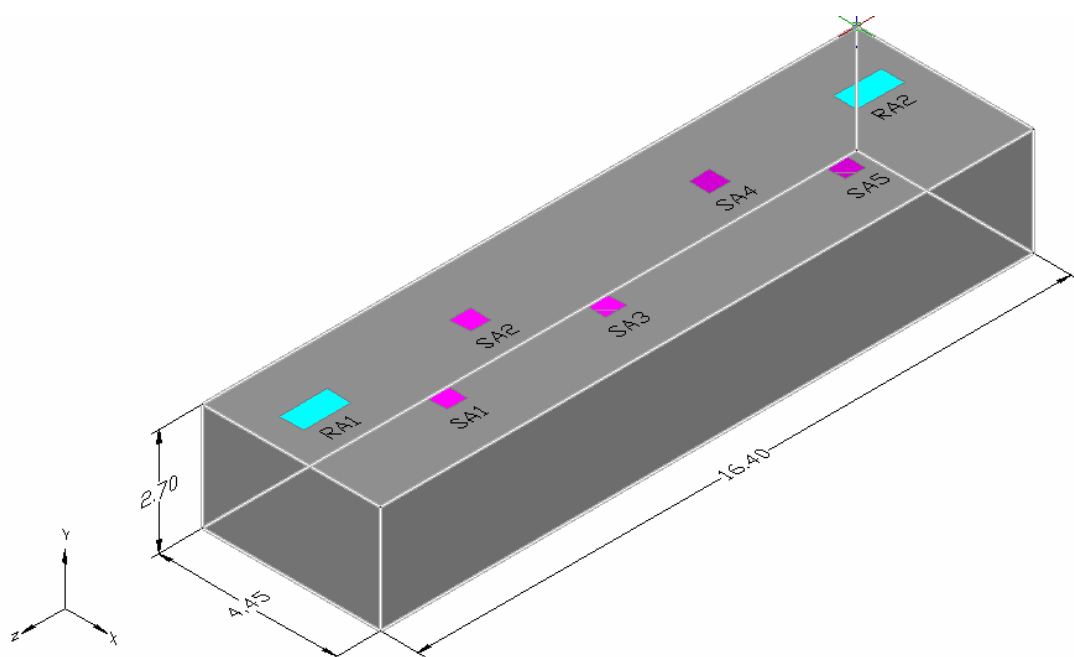
ขนาดเครื่องปรับอากาศคือการเพิ่ม FFU แต่มีข้อจำกัดที่ราคาค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มพัดลมเติมอากาศสำหรับในกรณีนี้ ดังนั้นการเพิ่มพัดลมนับเป็นวิธีที่ช่วยลดต้นทุนได้ดีกว่าและเป็นการตัดรายจ่ายที่ไม่จำเป็น

3. จากขั้นตอนคำนวณ Cooling load ทำให้เราทราบขนาดเครื่องปรับอากาศและปริมาณลมส่งซึ่งนำไปสู่การออกแบบระบบท่อส่งลมต่อไป การออกแบบระบบท่อส่งลมเลือกใช้วิธีการคำนวณ Equal friction method ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องทำการศึกษแบบแปลน, การจัดวางหัวจ่ายลมโดยกำหนดปริมาณลมแต่ละหัวจ่ายลม กำหนดขนาดหัวจ่ายลม (ใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต), กำหนดแนวท่อลม เชื่อมโยงเครื่องส่งลมเย็นและหัวจ่ายลม ซึ่งในที่นี้จะไม่แสดงการคำนวณขนาดท่อลม ผู้ออกแบบสามารถศึกษาได้จากพื้นฐานการออกแบบต่อไป

4. ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณหาขนาดหัวจ่ายลม ดูจาก Spec. ของผู้ผลิตที่ความเร็วของอากาศไหลผ่านหัวจ่าย (Face velocity) โดยทั่วไปใช้ 500 fpm ขนาดหัวจ่ายลม 24" (W) x 24" (H) x 12" (D) มีปริมาณการไหลของอากาศ เท่ากับ 2,000 SCFM (หรือ 3,400 CMH) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่สภาวะระดับน้ำทะเลมากกว่า 125%ของสภาวะปกติ ดังนั้นปริมาณการไหลของอากาศที่ไหลผ่านหัวจ่ายลมจริงๆอยู่ที่ประมาณ 1,000 CFM (หรือ 1,700 CMH) เมื่อความต้องการจ่ายลมทั้งหมด 8,500 CMH ดังนั้นจำนวนหัวจ่ายที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 5 หัวจ่าย หัวจ่ายลมทั้งหมดมีการติดตั้งแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงชนิด HEPA ประสิทธิภาพอยู่ที่ 99.99% และ 12" Deep filter

5. ระบบปรับอากาศโดยทั่วไปจะต้องมีลมกลับ (Return Air, RA) จำนวนหนึ่งเป็นการหมุนเวียนอากาศเก่าไปผสมกับอากาศใหม่จากภายนอกในส่วนของ Chamber แล้วผ่าน Coil ทำความเย็นกลับเข้าสู่บริเวณปรับอากาศวนเวียนเป็นวัฏจักรอย่างนี้เรื่อยไป โดยทั่วไปปริมาณลมที่หมุนเวียนกลับเข้า Chamber อยู่ที่ประมาณ 80%ของปริมาณลมจ่ายให้กับห้องเป็นอย่างน้อย นั่นคือ 8,500 x 0.8 เท่ากับ 6,800 CMH โดยปกติความเร็วที่ช่องลมกลับ คือ 250 fpm ขนาดช่องลมกลับ 24"(W) x 48"(H) ซึ่งมีปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านช่องลมกลับ เท่ากับ 2,000 CFM (หรือ 3,400 CMH) ดังนั้นจำนวนช่องลมกลับที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 2 ช่อง สำหรับท่อลมกลับเข้า Chamber ในที่นี้จะไม่แสดงการคำนวณขนาดท่อลมเช่นกัน

6. เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมด ต่อไปทำการร่างแบบแสดงรายละเอียด ตำแหน่ง ขนาดของแต่ละอุปกรณ์ และแผนผังการทำงานของระบบปรับอากาศ ดังภาพประกอบ 14, 15 และตาราง 18



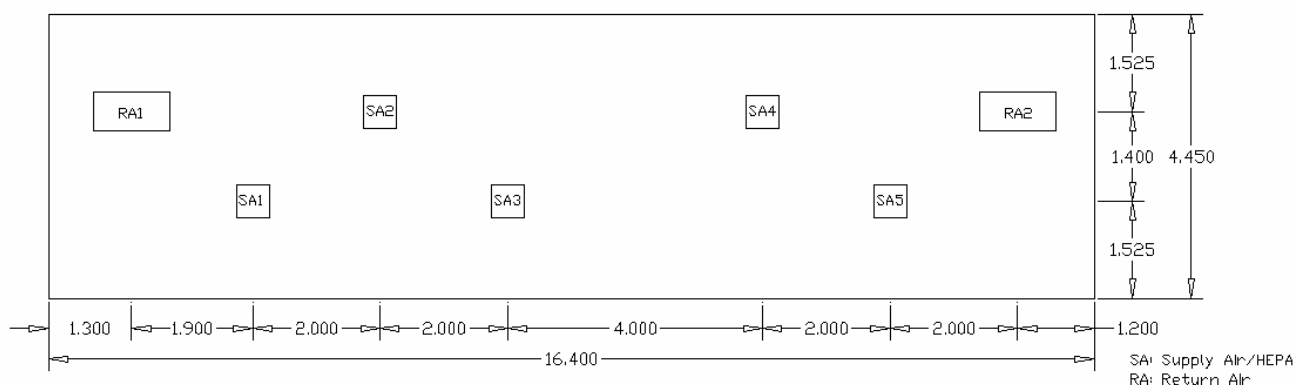
หมายเหตุ SA = Supply Air

RA = Return Air

ภาพประกอบ 14 รูปร่างและขนาดของห้องสะอาดที่ทำการออกแบบ

ตาราง 18 รายละเอียดของห้องสะอาด Weld C/R

ความกว้างที่สุด (x)	4.45 m
ความสูง (y)	2.70 m
ความยาวที่สุด (z)	16.40 m
หัวจ่ายลม HEPA (SA), Inlet	จำนวน 5 หัวจ่าย (ขนาด 0.6 m x 0.6 m)
ช่องลมกลับ (RA), Outlet	จำนวน 2 ช่อง (ขนาด 0.6 m x 1.2 m)



ภาพประกอบ 15 รายละเอียดตำแหน่งหัวจ่ายลม HEPA (SA) และช่องลมกลับ (RA) (หน่วยเป็น m)

3.2 ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ

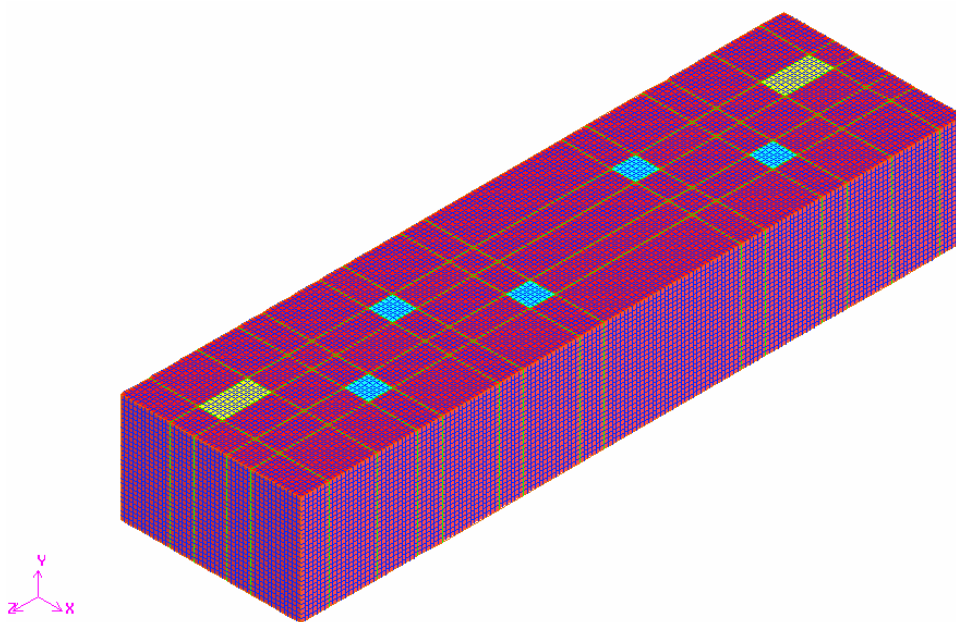
สำหรับการจำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดจะทำภายหลังจากขั้นตอนการออกแบบซึ่งได้รูปร่างขนาดของห้อง, รายละเอียด, ตำแหน่งและขนาดของอุปกรณ์ต่างๆของระบบปรับอากาศดังขั้นตอนที่ 3.1 โดยสมมติฐานสำหรับการศึกษาในขั้นตอนนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าและนำผลการคำนวณที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อพิสูจน์ว่าค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เลือกใช้เหมาะสมกับห้องสะอาดประเภทนี้

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1.66 GHz Intel core 2 CPU, 1 GB RAM
2. โปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสถานะและสร้างกริด (Grid)
3. โปรแกรมสำหรับช่วยวิเคราะห์การไหลของอากาศโดยระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (FVM)

3.2.2 การสร้างแบบจำลองและการสร้างกริด

ในการเขียนแบบเพื่อจำลองการไหลนั้นจะต้องเขียนในลักษณะของปริมาตรห้องที่มีอากาศไหลเข้าหัวจ่ายลมและอากาศบางส่วนที่ไหลออกผ่านช่องลมกลับเนื่องจากสนใจเฉพาะการไหลเท่านั้น จึงไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้อง ดังนั้นขนาดของห้องสะอาดที่ทำ การออกแบบไว้ ดังภาพประกอบ 14 จึงถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองในรูปทรง 3 มิติโดยใช้โปรแกรม สำหรับสร้างขอบเขตสถานะและสร้างกริด ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แบบจำลองโดยโปรแกรมสำหรับสร้างขอบเขตสภาวะและสร้างกริด

การสร้างกริดจะพิจารณาโดยแบ่งความละเอียดของกริดในแต่ละช่วงตามแนวระนาบที่ตัดกันของขนาดหัวจ่ายลม, ช่องลมกลับและผนังห้องในพิกัดฉาก x-z การแบ่งกริดแต่ละช่วงเป็นระบบกริดแบบสม่ำเสมอ (Uniform grid system) ซึ่งขนาดกริดมีขนาดเท่ากันทั้งโดเมนพื้นผิว (Face) เป็นแบบ Quadrilaterals cells แล้ว Sweep กริดทั้งหมดเป็นโดเมนปริมาตร (Volume) ตามขนาดความสูงของห้องในพิกัด y รูปแบบกริดที่ใช้เป็นแบบ Hexahedral cells เนื่องจากรูปทรงทั้งหมดเป็นสี่เหลี่ยมไม่สลับซับซ้อนและเนื่องจากเป็นการศึกษาการไหลของอากาศในห้องว่างเปล่าซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันค่อนข้างน้อย จำนวนกริดจึงไม่ต้องการความละเอียดมากนักทั้งนี้เพื่อเป็นการลดพื้นที่หน่วยความจำและเวลาในการคำนวณ ซึ่งจำนวนกริดรวมเท่ากับ 194,832

3.2.3 ขั้นตอนการคำนวณ

ในการจำลองการไหลได้เลือกใช้โปรแกรมสำหรับช่วยวิเคราะห์การไหลของอากาศซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) ที่คำนวณบนพื้นฐานของวิธีการคำนวณแบบปริมาตรจำกัด (Finite volume method) มาทำนายพฤติกรรมของการไหลของอากาศภายในห้องซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าเริ่มต้นในการคำนวณโดยให้มีค่าเท่ากับค่าการออกแบบ
2. กำหนดเงื่อนไขอื่น ๆ ในการจำลองการไหลของอากาศดังนี้
 - เป็นการไหลของอากาศในสภาวะคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Unsteady flow)

- เป็นการไหลของอากาศแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
 - อากาศที่พิจารณาเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ
 - อากาศถูกสมมติให้เป็นก๊าซอุดมคติและไม่มีอุปกรณ์ใดๆภายในห้องที่สามารถแผ่หรือดูดซับไอน้ำได้ คุณสมบัติของอากาศเป็นไปตามกฎของก๊าซผสมทางอุดมคติ
 - อากาศมีค่าคงที่ของความหนาแน่น (Density constant) เท่ากับ 1.225 kg/m^3
 - อากาศมีค่าคงที่ของความหนืด (Viscosity constant) เท่ากับ $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
 - เป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ โดยกำหนดให้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k- ϵ แบบมาตรฐาน (Standard k- ϵ model) แบบ 2 สมการ
 - ในการจำลองการไหลคิดผลกระทบจากแรงโน้มถ่วงของโลกโดยมีค่า 9.81 m/s^2
3. คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนตามเงื่อนไขของ Versteeg and Malalasekera (1995)
4. เริ่มขั้นตอนการ Solve
- ในช่องของ Pressure-Velocity Coupling เลือกแบบ SIMPLE สำหรับในช่องของ Momentum, turbulent kinetic energy, turbulent dissipation rate เลือก second order upwind
 - กำหนดเงื่อนไขให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณจากค่าความเร็วเริ่มต้นเลือก all-zones
 - ทำการตั้งค่าผลต่างๆสำหรับการคำนวณซ้ำในช่อง Options ให้เลือก Print และ Plot (หากต้องการให้จอแสดงผลการคำนวณซ้ำ) ในช่อง Convergence Criterion ให้กำหนดทุกค่าเป็น 0.001 ยกเว้น k- ϵ เป็น $1e-06$
 - ให้โปรแกรมเริ่มการคำนวณซ้ำโดยกำหนดค่า Time step size และ Number of time step ตามภาคผนวก ข. จากนั้นหน้าจอจะแสดงค่าการคำนวณซ้ำ
5. ในกรณีค่าความถูกต้องของคำตอบไม่เป็นที่ยอมรับให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3 ใหม่ผลการคำนวณที่ผู้เข้าหาคำตอบกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณถูกต้องยอมรับได้ตามค่าที่กำหนดจึงทำการหยุดการคำนวณและแสดงผล (Convergence)
6. เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณซ้ำเสร็จสิ้นแล้ว เราสามารถดูรูปร่างของสิ่งที่สนใจในช่อง Vectors of แต่ในที่นี้เราสนใจความเร็วของอากาศหลังจากออกจาก HEPA ดังนั้นเลือก Vectors of Velocity.../Velocity Magnitude ส่วนในช่อง Surface ให้เลือก default-interior, inlet, outlet และ wall เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 17 และ 18
7. ทำการสร้าง plane แสดงให้เห็นขนาดความเร็วลัพธ์และเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ x-z

ที่ระดับความสูงจากพื้น y เท่ากับ 1 เมตร โดยเลือก Surface--->plane

8. เสร็จแล้วทำการเลือก Display--->Vector... แสดงเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบดังภาพประกอบ 20 และเลือก Display--->Contours... แสดงขนาดความเร็วบนระนาบดังภาพประกอบ 21

9. ทำการสร้าง point-1 ถึง point-16 โดยเลือก Surface--->Point... ระบุ Coordinates เพื่อคำนวณขนาดความเร็วลัพธ์ของแต่ละจุดวิเคราะห์บนระนาบ x-z และ y=1 m

10. รายงานข้อมูลผลการคำนวณความเร็วลัพธ์ของจุดวิเคราะห์ทั้ง 16 จุดดังภาพประกอบ 22

11. คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการคำนวณ

ตาราง 19 แสดงค่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงตัวเลข (Numerical boundary condition)

1. Solver	Pressure Base	
2. Formulation	Implicit	
3. Space	3D	
4. Time	Unsteady	
5. Velocity formula	Absolute	
6. k- ε Model	Standard	
7. Model constants	$C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$	
8. Air density (ρ)	1.225 kg/m ³	
9. Dynamic viscosity (μ)	1.7894x10 ⁻⁵ kg/m.s	
10. Under relaxation factors	Pressure	0.3
	Density, Body force	1
	Momentum	0.7
	TKE, TDR	0.8
	Turbulent viscosity	1
11. Discretization	Pressure	Standard
	Pressure-Velocity coupling	SIMPLE
	Momentum, TKE, TDR	2 nd Order Upwind
12. Convergence Criteria (Residual)	Continuity, x, y, z-velocity	0.001
	k, ε	1e-06

3.2.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

1. กำหนดประเภทเงื่อนไขขอบเขตที่ทางเข้า (Inlet boundary condition) เป็นแบบ Velocity inlet ความเร็วของอากาศสม่ำเสมอในแนวตั้ง (Vertical uniform air velocity) ทั้งหน้าตัดทางเข้าของหัวจ่ายลม HEPA ทั้ง 5 หัวจ่ายซึ่งความเร็วเกิดขึ้นเฉพาะในแนวแกน y เท่านั้น โดยให้มีทิศทางตั้งฉากกับหัวจ่ายลม HEPA มีค่าความเร็วเท่ากับ 1.312 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นค่าที่ได้จากขั้นตอนการออกแบบ สำหรับค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเป็นไปตามเงื่อนไขของ Versteeg and Malalasekera (1995) ดังนี้

$$\begin{aligned} k_{inlet} &= \frac{3}{2}(U_0 T_i)^2 && ; \text{โดยที่ } U_0 = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}, T_i = 0.01 \\ &= \frac{3}{2}(1.312 \times 0.01)^2 \\ &= 2.58 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{inlet} &= C_\mu^{3/4} \frac{k_{inlet}^{3/2}}{l} && ; \text{โดยที่ } l = 0.07L, L = \frac{4A}{P} \\ &= 0.09^{3/4} \frac{0.000258^{3/2}}{(0.07 \times 0.6)} \\ &= 1.62 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

2. กำหนดประเภทเงื่อนไขขอบเขตที่ทางออก (Outlet boundary condition) เป็นแบบ Pressure outlet ที่ช่องลมกลับทั้ง 2 ช่อง เนื่องจากโดยปกติค่าของตัวแปรทั่วไปบริเวณขอบเขตของทางออกจะไม่ทราบค่าดังนั้นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการกำหนดให้ขอบเขตดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบเขตนั้น (Zero normal gradient) และเพื่อให้สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการปรับแก้ ฟลักซ์การไหลที่ทางออกให้สมดุลกับฟลักซ์การไหลที่ทางเข้า สำหรับค่าของความดันที่ขอบเขตทางออกสามารถหาได้จากการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) หรือหากขอบเขตทางออกนั้นเปิดสู่บรรยากาศอาจกำหนดให้ความดันที่ขอบเขตดังกล่าวเป็นความดันบรรยากาศ

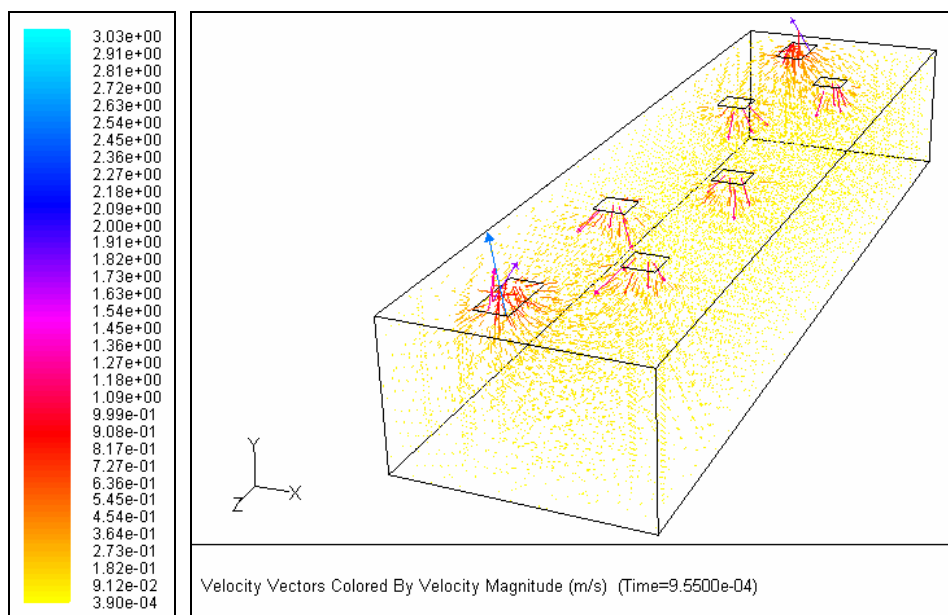
3. กำหนดประเภทเงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง (Wall boundary condition) นั้นค่าตัวแปรโดยทั่วไปถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ หากเป็นผนังที่ไม่มีเคลื่อนที่ (Stationary wall) ค่าของความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขการไม่ลื่นไถล (No slip condition) สำหรับค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขของแบบจำลองที่เลือกใช้

ตาราง 20 ค่าสภาวะขอบเขต

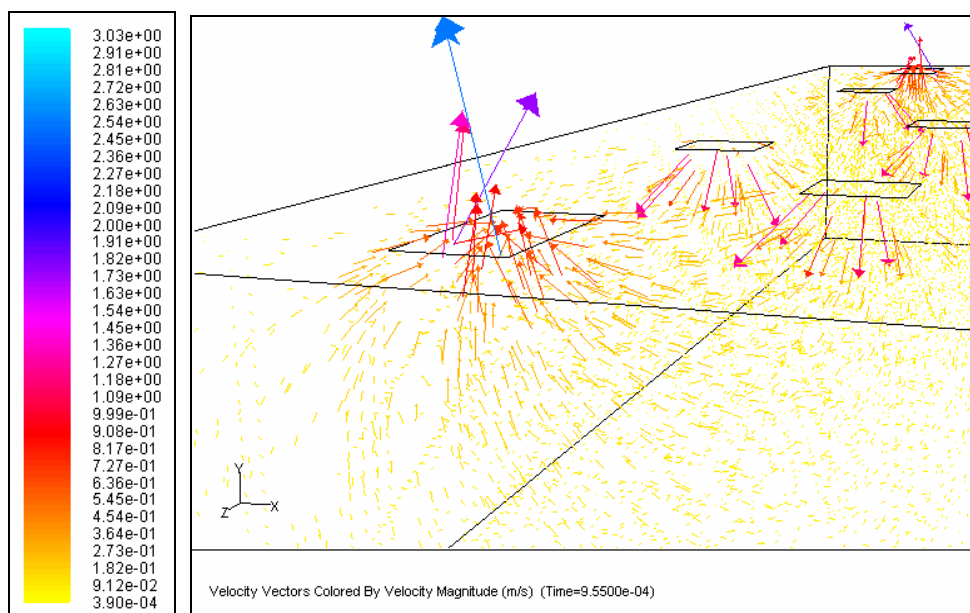
สภาวะขอบเขต					
หัวจ่ายลม HEPA (Inlet)					
No.	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)	k (m ² /s ²)	ε (m ² /s ³)
1	0.00	-1.312	0.00	2.58e-04	1.62e-05
2	0.00	-1.312	0.00	2.58e-04	1.62e-05
3	0.00	-1.312	0.00	2.58e-04	1.62e-05
4	0.00	-1.312	0.00	2.58e-04	1.62e-05
5	0.00	-1.312	0.00	2.58e-04	1.62e-05
ช่องลมกลับ (Outlet)	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0.0$				
ผนัง	U, V, W, k และ $\varepsilon = 0.0$				

ตาราง 21 ค่าสภาวะเริ่มต้น

สภาวะเริ่มต้น
U = 0.00
V = 0.00
W = 0.00
k = 0.00
$\varepsilon = 0.00$

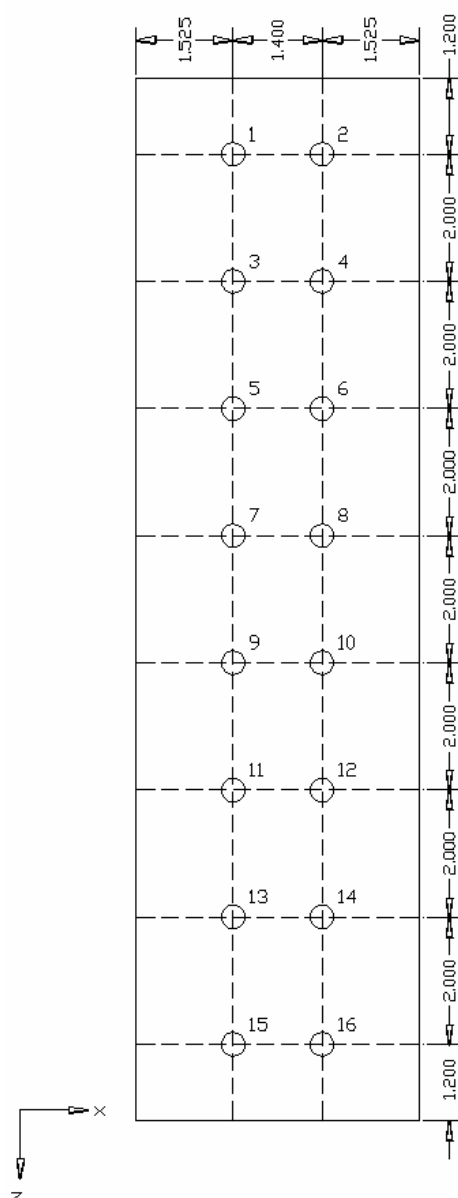


ภาพประกอบ 17 เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้นในขอบเขตที่ศึกษา



ภาพประกอบ 18 เวกเตอร์ความเร็วส่วนหนึ่งที่ออกทางช่องลมกลับ

นำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดแสดงดังตาราง 22 โดยตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลมทั้งหมด 16 ตำแหน่งตั้งอยู่บนระนาบ $x-z$ ที่ระดับความสูงจากพื้น y เท่ากับ 1 m ซึ่งเป็นระดับที่อยู่บริเวณใบหน้าของผู้นั่งทำงานภายในห้องสะอาดที่จะสามารถรับรู้ถึงความแรงของการไหลของอากาศภายในห้องได้ โดยตำแหน่งที่ทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณบนระนาบดังกล่าวแสดงไว้ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์บนระนาบ $x-z$ และ $y=1$ (หน่วยเป็น m)

ตาราง 22 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลัพธ์บนระนาบ x-z และ y=1 m

ตำแหน่งในการวัด	ความเร็วลัพธ์ (m/s)		%ความคลาดเคลื่อน (% Relative error)
	ผลการวัด (Measured)	ผลการคำนวณ (Compute)	
1	0.055	0.074	35
2	0.040	0.050	25
3	0.074	0.081	10
4	0.057	0.067	18
5	0.058	0.047	19
6	0.030	0.038	27
7	0.014	0.016	14
8	0.019	0.021	11
9	0.012	0.014	17
10	0.022	0.025	14
11	0.058	0.050	14
12	0.035	0.043	23
13	0.070	0.084	20
14	0.060	0.071	18
15	0.061	0.071	16
16	0.050	0.058	16

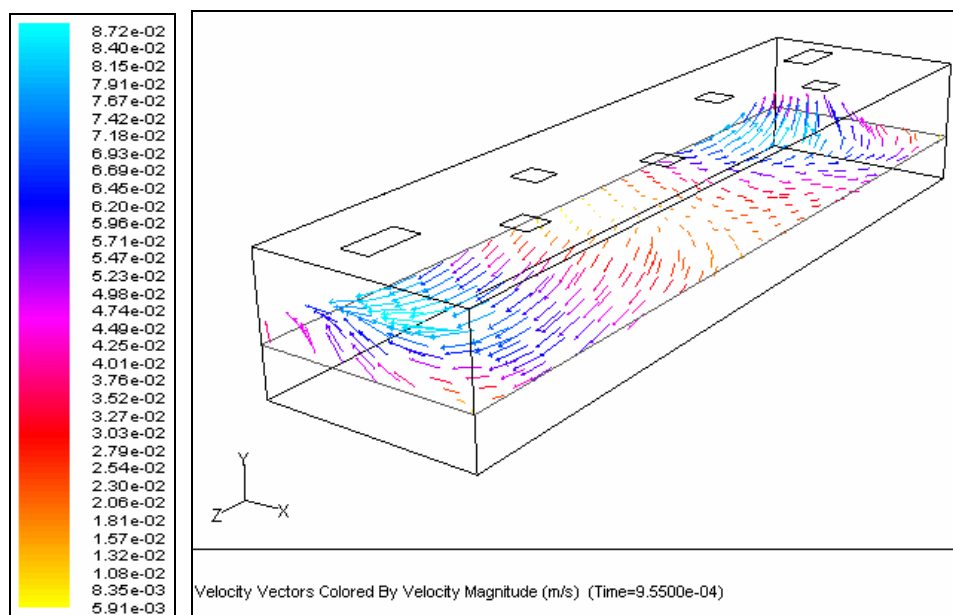
ตัวแปรในการวิเคราะห์

ตัวแปรในการวิเคราะห์จะเป็นค่าความเร็วลัพธ์ที่จุด P ในทุกระนาบที่สูงจากพื้นห้องสะอาดเป็นระยะทาง 1 m

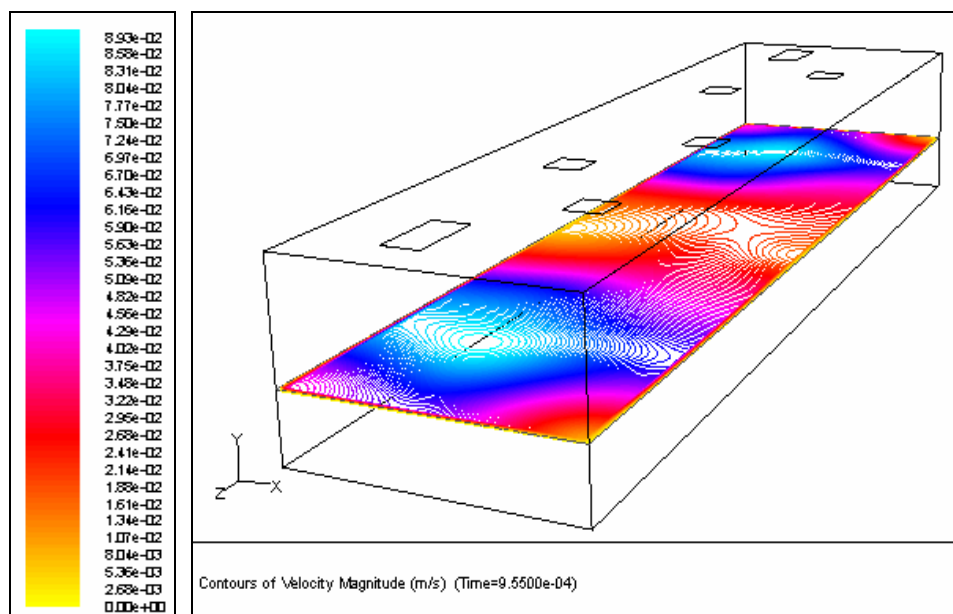
$$V_{P,R} = \sqrt{U_P^2 + V_P^2 + W_P^2}$$

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสามารถหาได้จาก

$$\% \text{ Relative error} = \frac{|V_{\text{measured}} - V_{\text{computed}}|}{V_{\text{measured}}} \times 100 \%$$



ภาพประกอบ 20 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ x-z และ y=1 m



ภาพประกอบ 21 เส้นแสดงขนาดความเร็วบนระนาบ x-z และ y=1 m

จากภาพประกอบ 20 และ 21 พบว่าการไหลของอากาศหลังจากออกจากหัวจ่ายลม HEPA เกิดการไหลหมุนวนของอากาศบริเวณเพดานห้องใกล้หัวจ่ายลม HEPA และเริ่มมีกระจายตัวของอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอในบริเวณโดยรอบของหัวจ่ายบนระนาบความสูง 1 m ซึ่งแสดงว่าอากาศใหม่ที่ไหลออกจากหัวจ่ายลม HEPA สามารถไหลเข้าแทนที่อากาศบริเวณดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองน้อยลงซึ่งเป็นความปรารถนาของผู้ออกแบบห้องสะอาด แต่สำหรับบริเวณที่มีการไหลวนของอากาศ ดังภาพประกอบ 17 และ 18 ได้ทำการปรับแก้การออกแบบโดยติดตั้งช่องลมกลับใกล้ผนังที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อทำการลดการไหลวนของอากาศที่เกิดจากการที่อากาศไหลออกจากหัวจ่าย HEPA ปะทะลงพื้นห้องและไหลไปกระทบที่บริเวณผนังโดยรอบซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละออง จากผลการวิเคราะห์การไหลของอากาศนี้สามารถนำข้อมูลการออกแบบที่ทำการปรับแก้ไว้ในเบื้องต้นไปใช้ก่อสร้างจริงและปฏิบัติงานจริงได้

Average of Surface Vertex Values Velocity Magnitude		(m/s)
point-1		0.070292488
point-10		0.025431648
point-11		0.05009551
point-12		0.042817459
point-13		0.084046073
point-14		0.070850372
point-15		0.069596492
point-16		0.057498433
point-2		0.057219375
point-3		0.080585763
point-4		0.067418382
point-5		0.048082516
point-6		0.037608624
point-7		0.01605369
point-8		0.0214245
point-9		0.013476326
Net		0.050781105

ภาพประกอบ 22 ผลการคำนวณความเร็วที่ได้บนระนาบ x-z และ y=1 m ของจุดวิเคราะห์ทั้ง 16 จุด

3.3 ขั้นตอนทดสอบปฏิบัติงานจริง

หลังจากผ่านขั้นตอนการจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศแล้ว พบว่าการไหลของอากาศภายในห้องสามารถระบายออกสู่ช่องลมกลับได้เป็นอย่างดีแสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศเพียงพอสำหรับกระบวนการผลิตประเภทนี้ ขั้นตอนต่อไปดำเนินการก่อสร้างจริงและติดตั้งระบบปรับอากาศตาม Concept design ดังกล่าว

ในขั้นตอนการทดสอบปฏิบัติงานจริงนี้ จะเป็นการพิสูจน์ผลจากการออกแบบข้างต้นว่าสามารถใช้ปฏิบัติงานจริงได้ และเป็นการตอบโจทย์ของคำถามถึงการเลือกใช้อัตราการหมุนเวียนอากาศนี้เหมาะสมหรือไม่สำหรับขั้นตอนในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. เครื่องนับอนุภาค (Particle counter) (ภาพประกอบ 23)
2. หัวตรวจจั่ว (Aerosol probe) (ภาพประกอบ 24)
3. มาตรวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
4. มาตรวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer)
5. มาตรวัดความเร็วลม (Anemometer)
6. เครื่องวัดอัตราการไหล (Airflow and Uniformity)

การวัดอุณหภูมิ ความเร็วลมและปริมาณการไหลของอากาศแสดงดังภาพประกอบ 25-27



ภาพประกอบ 23 เครื่องนับอนุภาค (Particle counter)



ภาพประกอบ 24 หัวตรวจจั่ว (Aerosol probe)



ภาพประกอบ 25 การวัดอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 26 การวัดความเร็วลม

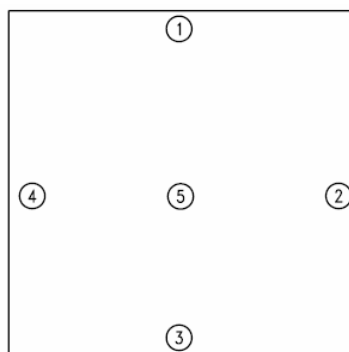


ภาพประกอบ 27 การวัดปริมาณการไหลของอากาศ

3.3.2 วิธีการทดสอบ

วิธีดำเนินการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มทำการเดินระบบปรับอากาศจนได้สภาวะของอุณหภูมิและ ความชื้นคงที่ ทำการวัดอุณหภูมิ และความชื้น (Temperature and humidity tests) ของห้องสะอาดในแต่ละโซนที่สนใจใน ที่นี้ทำการวัด 9 โซน บันทึกผลและหาค่าเฉลี่ย
2. ตรวจสอบรอยรั่วของแผ่นกรอง HEPA ที่ติดตั้งในหัวจ่ายลม (HEPA filter installation leak test) ทั้ง 5 หัวจ่ายโดยใช้หัวตรวจจรั่ว (Aerosol probe) ทำการตรวจไปตามขอบโดยรอบและ บริเวณพื้นผิวตรงกลางของแผ่นกรอง HEPA ตามตำแหน่ง 5 ตำแหน่ง ดังภาพประกอบ 28 โดยให้ ระยะห่างระหว่างหัวตรวจจรั่วกับแผ่นกรอง HEPA ห่างกันประมาณ 1" ทำการตรวจเป็นไปอย่างช้าๆ โดยใช้ความเร็วไม่เกิน 10 fpm เครื่องนับอนุภาคจะทำการนับจำนวนฝุ่นละอองที่ผ่านแผ่นกรอง HEPA ออกมาเป็นจำนวนอนุภาคต่อปริมาตรอากาศ 1 m³ ในแต่ละตำแหน่งเครื่องจะทำการพิมพ์ผลการวัด ออกมาเก็บผลการวัด และหาเปอร์เซ็นต์รั่วของแผ่นกรอง HEPA จากนั้นดำเนินการตรวจสอบซ้ำจนครบทั้ง 5 หัวจ่าย



ภาพประกอบ 28 ตำแหน่งทดสอบอนุภาคที่ผ่าน HEPA (Measuring point filter size 2'x2')

3. ตรวจวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นและมลสารภายในห้องสะอาดหรือการตรวจสอบระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Room cleanliness classification test) เพื่อเป็นการทดสอบว่าห้องสะอาดที่ทำการออกแบบนี้มีจำนวนอนุภาคฝุ่นไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน จากการสุ่มตัวอย่างอากาศ (Sample) โดยหาจำนวนจุดในการวัดตามสูตรของ Federal Standard 209E สำหรับ Non laminar flow คือ

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนจุด} &= A/\sqrt{N} \quad (\text{โดยที่ } A=\text{พื้นที่ห้อง; ft}^2 \text{ และ } N=\text{Class}) \\
 &= (73\text{m}^2 \times 10.76)/\sqrt{10000} \\
 &\cong 9 \text{ จุด}
 \end{aligned}$$

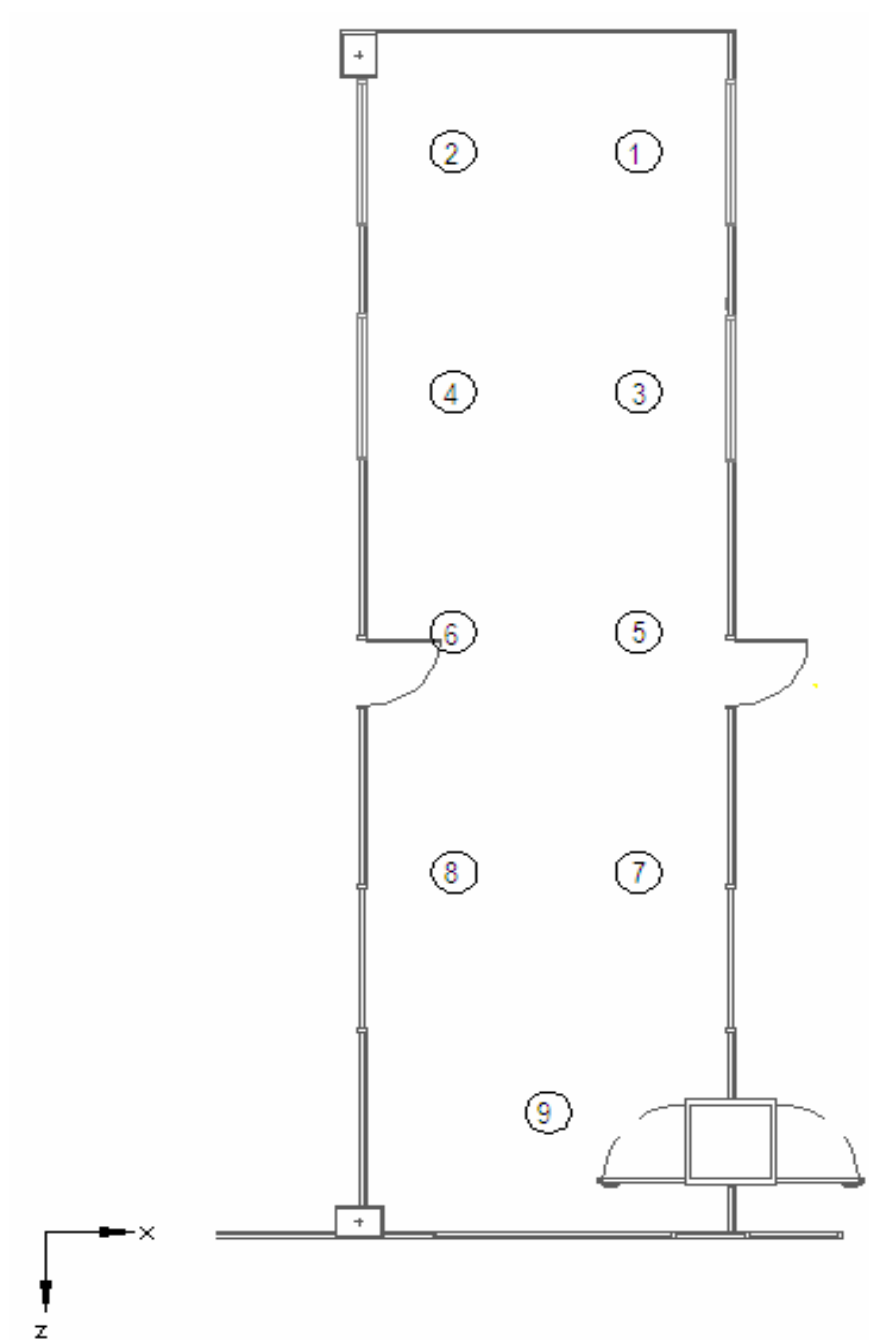
ขั้นตอนต่อไปแบ่งกริดพื้นที่ห้องออกเป็น 9 โซนตามจำนวนจุดที่คำนวณได้ กำหนดหมายเลขโซนและทำการตั้งหัวตรวจวัดที่จุดศูนย์กลางของแต่ละโซน ดังภาพประกอบ 29 โดยให้ระดับความสูงของหัวตรวจวัดอยู่สูงจากพื้น 1 m ดังภาพประกอบ 33 ตั้งเวลาการวัดที่ 1 min/sample หรืออัตราการวัด 1 ft³/min ใช้เครื่องนับอนุภาคนับจำนวนของอนุภาคที่มีขนาด 0.5 μm หรือใหญ่กว่า ถ้าการนับอนุภาคได้น้อยกว่า 50 อนุภาคต่อปริมาตร 1 ft³ ของอากาศ ให้นับซ้ำในตำแหน่งเดิมอีก 4 ครั้งจนกว่าจะได้ค่ามากกว่า จากนั้นทำเปลี่ยนหน่วยการวัดเป็นจำนวนอนุภาคต่อปริมาตร 1 m³ เครื่องจะทำการพิมพ์ผลการวัดออกมา เก็บผลการวัด และทำการวัดต่อไปจนครบทั้ง 9 โซน

สำหรับการตรวจสอบระดับความสะอาดของห้องสะอาดดังกล่าวข้างต้นนั้น จะดำเนินการตรวจสอบเหมือนกันใน 2 สถานะคือ

- 1) ในสถานะที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร (At rest)
- 2) ในสถานะที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ (At operation)

4. ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบที่ได้โดยอ้างอิงจากมาตรฐานของห้องสะอาด U.S.

Federal Standard 209E airborne particulate cleanliness classes in clean rooms and clean zones (IEST. 1992: 5)



ภาพประกอบ 29 ตำแหน่งวัดปริมาณฝุ่นละออง 9 โซน



ภาพประกอบ 30 ห้องสะอาดที่ทำการทดสอบขณะไม่มีการปฏิบัติงาน



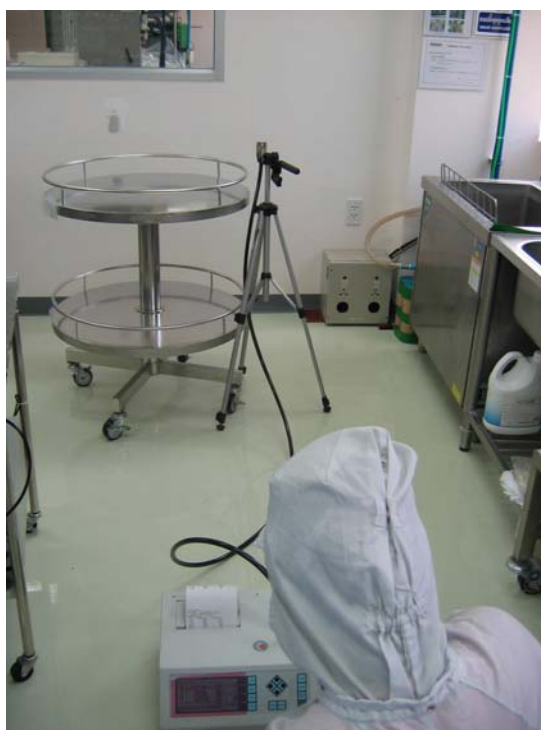
ภาพประกอบ 31 ห้องสะอาดที่ทำการทดสอบขณะกำลังปฏิบัติงาน



ภาพประกอบ 32 การตรวจหารอยรั่วของ HEPA FILTER



ภาพประกอบ 33 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 1



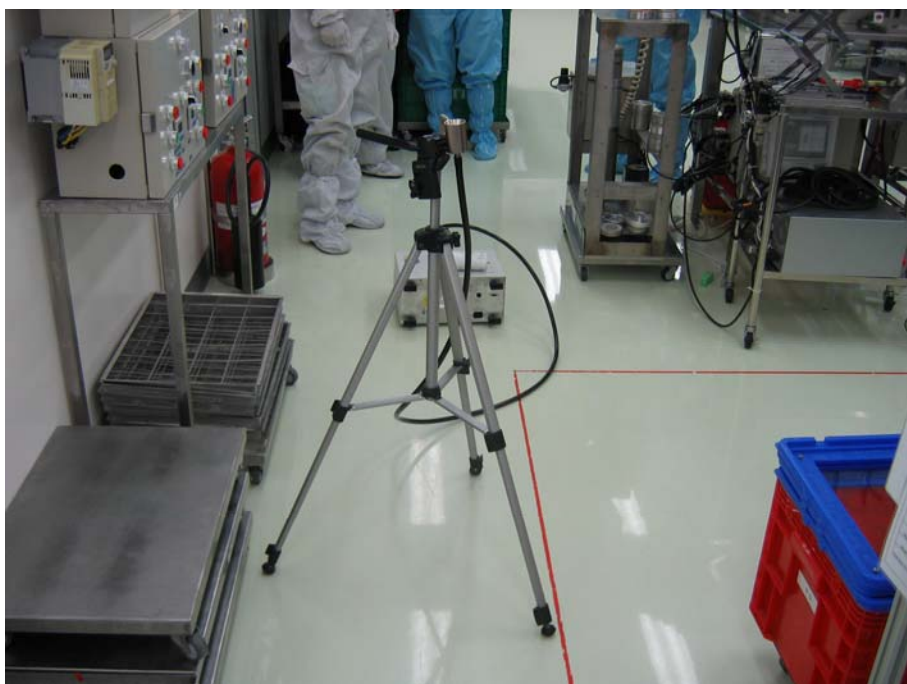
ภาพประกอบ 34 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 2



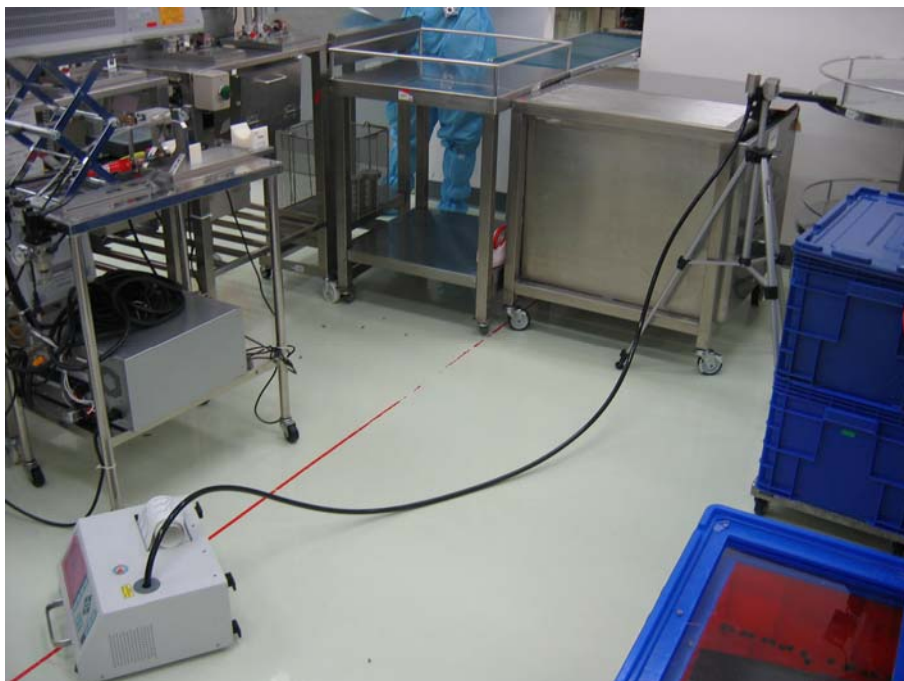
ภาพประกอบ 35 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 3



ภาพประกอบ 36 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 4



ภาพประกอบ 37 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 5



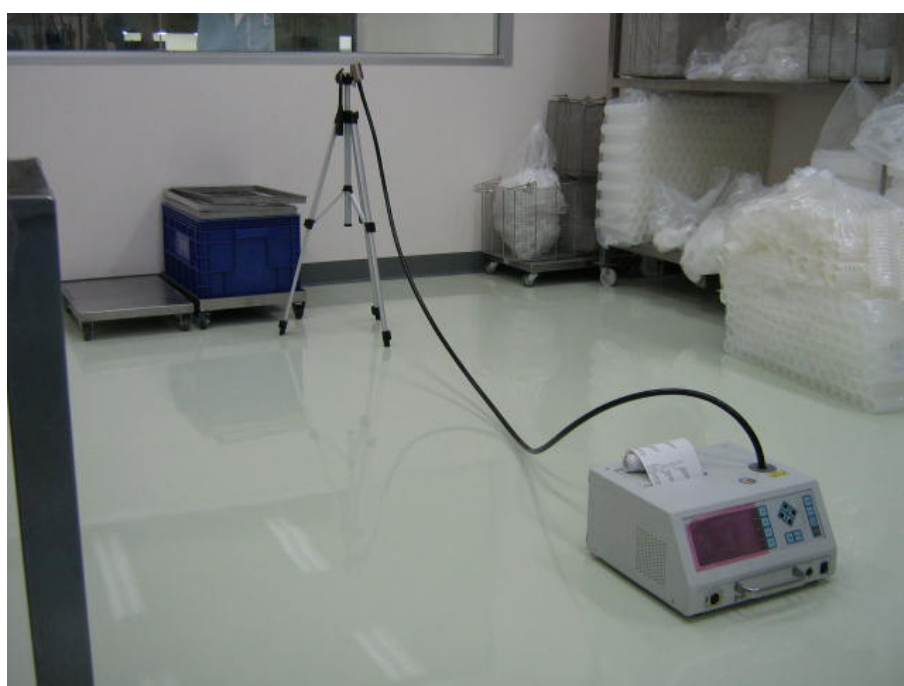
ภาพประกอบ 38 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 6



ภาพประกอบ 39 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 7



ภาพประกอบ 40 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 8



ภาพประกอบ 41 การนับจำนวนอนุภาคสำหรับ zone 9

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1.1 ผลการวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity tests)

ตาราง 23 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ และความชื้นของห้อง

Room name	Measuring Point	Temperature (°C)	Humidity (%RH)	Time	Date
Weld C/R (Class 10,000)	1	22.5	51.7		09/01/2008
	2	22.4	52.0		09/01/2008
	3	22.2	52.0		09/01/2008
	4	22.1	51.9		09/01/2008
	5	22.1	51.9		09/01/2008
	6	22.2	51.8		09/01/2008
	7	22.3	51.9		09/01/2008
	8	22.3	51.8		09/01/2008
	9	22.4	51.9		09/01/2008
	Mean	22.3	51.9		
	Max.	22.5	52.0		
	Min.	22.1	51.7		

4.1.2 ผลการวัดความดันอากาศของห้อง (Room pressurization tests)

ตาราง 24 แสดงผลการวัดความดันของห้อง

Room name	Room pressure		
	in. W.G.	Pa.	mm. W.G.
Weld C/R (Class 10,000)	0.06	15.0	1.5

4.1.3 ผลการตรวจวัดรอยรั่วของแผ่นกรอง HEPA (HEPA filter installation leak test)

ตาราง 25 แสดงผลการนับจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองที่ผ่านแผ่นกรอง HEPA หัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่าย

Filter no.	Filter size	Test points	MP.	Class limit			Meat spec.	
				0.5	1.0	5.0	Yes.	No.
1	2' x 2'	Gasket, Filter surface	1	70	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	2	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	3	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	4	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	5	35	0	0	X	
2	2' x 2'	Gasket, Filter surface	1	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	2	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	3	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	4	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	5	0	0	0	X	
3	2' x 2'	Gasket, Filter surface	1	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	2	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	3	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	4	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	5	0	0	0	X	
4	2' x 2'	Gasket, Filter surface	1	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	2	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	3	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	4	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	5	35	0	0	X	
5	2' x 2'	Gasket, Filter surface	1	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	2	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	3	35	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	4	0	0	0	X	
	2' x 2'	Gasket, Filter surface	5	0	0	0	X	

จากผลการตรวจวัดพบว่าจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองขนาด $0.5\ \mu\text{m}$ ที่ไหลผ่านหัวจ่ายลม SA1 สำหรับตำแหน่งที่ 1 นับได้ 70 อนุภาคต่อปริมาตรอากาศ $1\ \text{m}^3$ จาก Federal Standard 209E ที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ซึ่งระบุความเข้มข้นของขนาดอนุภาคฝุ่นละออง $0.5\ \mu\text{m}$ ไม่ควรเกิน 353,000 อนุภาค/ m^3 สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การรั่วของแผ่นกรอง HEPA ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\% \text{การรั่วของแผ่นกรอง HEPA} &= (70 / 353,000) \times 100 \\ &= 0.019\% \quad (\text{ซึ่ง} > 0.01\%) \end{aligned}$$

เนื่องจากประสิทธิภาพของแผ่นกรอง HEPA ที่ใช้มีค่า 99.99% ฉะนั้นเปอร์เซ็นต์การรั่วของค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ไม่ควรเกิน 0.01% แต่จากผลการคำนวณที่ได้เท่ากับ 0.019% ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกรองฝุ่นละอองลดลงอาจส่งผลกระทบต่อระดับความสะอาดของห้องสะอาดที่ออกแบบ สำหรับที่หัวจ่าย SA2, SA3, SA4 และ SA5 ที่วัดได้ 35 อนุภาคต่อปริมาตรอากาศ $1\ \text{m}^3$ พบว่าเปอร์เซ็นต์การรั่วของแผ่นกรอง HEPA เท่ากับ 0.009% ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้

4.1.4 ผลการทดสอบระดับความสะอาดของห้อง (Room cleanliness classification test) จะดำเนินการตรวจสอบใน 2 สภาวะคือ

4.1.4.1 ในสภาวะที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร

ตาราง 26 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร ในสภาวะที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร

Room name	Measuring point	Particle count	
		$0.5\ \mu\text{m}$ or larger	$5.0\ \mu\text{m}$ or larger
Weld C/R (Class 10,000)	1	4,615	210
	2	9,370	489
	3	10,733	979
	4	7,936	734
	5	12,621	909
	6	7,097	454
	7	8,810	664
	8	9,649	804
	9	12,027	524
	95% UCL	10,748	793

ในกรณีนี้จำนวนจุดทดสอบน้อยกว่า 10 จุด ตัวแทน Particle count จึงต้องหาจาก 95% Upper Confidential Limit หรือ 95%UCL (ค่า Factor เปิดจากตาราง 11)

จากสูตร $95\%UCL = \text{AVERAGE (Test data)} + [\text{STDEV (Test data)} / \text{Point}^{0.5} \times \text{UCL factor}]$

$$= \bar{X} + \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{(N-1)}}}{N^{0.5}} \right] \times 1.86$$

$$\begin{aligned} \text{สำหรับ } 0.5 \mu\text{m: } 95\%UCL &= 9,206.44 + \left[\frac{2,486.72}{9^{0.5}} \right] \times 1.86 \\ &= 9,206.44 + 1,541.76 \\ &= 10,748 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สำหรับ } 5.0 \mu\text{m: } 95\%UCL &= 640.78 + \left[\frac{244.78}{9^{0.5}} \right] \times 1.86 \\ &= 640.78 + 151.76 \\ &= 793 \end{aligned}$$

4.1.4.2 ในสภาวะที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและ เครื่องจักรเป็นปกติ
 ตาราง 27 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร ในสภาวะที่
 ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ

Room name	Measuring point	Particle count	
		0.5 µm or larger	5.0 µm or larger
Weld C/R (Class 10,000)	1	3,129,265	12,516
	2	11,790,045	12,201
	3	8,707,522	10,069
	4	1,622,126	7,027
	5	793,513	7,901
	6	705,655	9,614
	7	455,019	5,419
	8	1,023,172	2,902
	9	684,399	4,964
	95% UCL	5,780,158	10,121

จากสูตร $95\%UCL = AVERAGE (Test\ data) + [STDEV (Test\ data) / Point^{0.5} \times UCL\ factor]$

$$= \bar{X} + \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{(N-1)}}}{N^{0.5}} \right] \times 1.86$$

สำหรับ 0.5 µm: $95\%UCL = 3,212,301.78 + \left[\frac{4,141,703.84}{9^{0.5}} \right] \times 1.86$

$$= 3,212,301.78 + 2,567,856.38$$

$$= 5,780,158$$

สำหรับ 5.0 µm: $95\%UCL = 8,068.11 + \left[\frac{3,311.19}{9^{0.5}} \right] \times 1.86$

$$= 8,068.11 + 2,052.94$$

$$= 10,121$$

จากตาราง 26 พบว่าผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร ก็คือค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนในอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกรอง HEPA เข้าสู่บริเวณห้องสะอาดนั่นเอง ค่าที่วัดได้สำหรับสภาวะที่ห้องไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร มีค่าเท่ากับ 10,748 อนุภาค/ m^3 ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน Federal Standard 209E ที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ระบุไว้ว่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละอองขนาด $0.5 \mu m$ ไม่ควรมีค่าเกิน 353,000 อนุภาคต่ออากาศ $1 m^3$ จึงสามารถสรุปได้ว่าห้องสะอาดในสภาวะนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบ แต่จากตาราง 27 สำหรับสภาวะที่ห้องมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกตินี้ พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับ 5,780,158 อนุภาค/ m^3 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานค่อนข้างมาก อาจเป็นเพราะเนื่องจากค่า Particle count ในแต่ละจุดมีการกระจายตัวของข้อมูลไม่สม่ำเสมอทำให้ค่า STDEV (Standard Error of the mean of the averages) มีค่าสูง เมื่อนำมาคำนวณหา 95%UCL ค่าที่ได้จึงมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ก็ยังไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะนำมาคัดค้านการไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เพราะจะเห็นได้ว่าค่าที่วัดเกือบทุกจุดเกิน 353,000 ทั้งนี้ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าห้องสะอาดในสภาวะนี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากการตรวจสอบในภายหลังพบสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ห้องสะอาดในขณะที่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานนั้น อาจเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- 1) การละเลยการป้องกันการก่อให้เกิดสิ่งสกปรกของผู้ปฏิบัติงานเช่น พนักงานสวมใส่รองเท้าที่ใช้ทำงานในห้องสะอาดออกไปเดินภายนอกห้องโดยไม่มีการเปลี่ยนรองเท้าที่จัดเตรียมไว้ให้
- 2) ความผิดพลาดจากการรับข้อมูลในเบื้องต้นก่อนทำการออกแบนั้นมีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากซึ่งภายหลังจากการใช้งานห้องสะอาดพบว่ามีแหล่งที่ก่อให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองเยอะมากเช่น จำนวนชั้นวางผลิตภัณฑ์สำหรับตั้งโชว์ (ตำแหน่งที่ 8 ของตาราง 27) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแต่อย่างใดและเครื่องจักรที่ไม่ได้ใช้งานแล้วก็นำมาตั้งไว้ในห้องอีก
- 3) เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ปฏิบัติงานนี้ถูกย้ายมาจากโรงงานเก่า อาจไม่ได้ทำความสะอาดก่อนทำการขนย้ายเข้ามาที่ห้องสะอาดโรงงานใหม่ซึ่งก็อาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผลการวัดความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่าสูงก็เป็นได้
- 4) ความถี่ของการทำความสะอาดหลังการปฏิบัติงานน้อยมาก หากเทียบกับกระบวนการผลิตประเภทอื่นซึ่งกระบวนการผลิตประเภทนี้เกี่ยวข้องกับเยื่อกระดาษที่ใช้ทำไส้กรองซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการฟุ้งของฝุ่นละอองได้มากกว่า
- 5) พฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงาน การทำงานในห้องสะอาดต้องมีการเคลื่อนไหวเป็นไปอย่างเชื่องช้าเพื่อไม่ให้เกิดการก่อตัวของสิ่งสกปรกซึ่งจากสังเกตการณ์พนักงานยังละเลยกับข้อปฏิบัตินี้

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ภายหลังการปรับแก้

จากผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของห้องสะอาดได้ทำการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นว่าห้องสะอาดที่ทำการออกแบบ ก่อสร้างและติดตั้งระบบปรับอากาศนั้นสามารถปฏิบัติงานได้จริงซึ่งการทดสอบค่าเหล่านั้นได้ดำเนินการตรวจวัดตั้งแต่เมื่อการก่อสร้างแล้วเสร็จ แต่จากผลการทดสอบระดับความสะอาดของห้องในสภาวะที่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรพบว่ายังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งอาจเป็นผลจากสาเหตุต่างๆที่ได้ชี้แจงในเบื้องต้น และเพื่อเป็นการพิสูจน์ภายใต้ข้อสมมติฐานดังกล่าวนั้น จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขพฤติกรรมต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) แจ้งให้ผู้บริหารและผู้จัดการโรงงานรับทราบและจัดทำ QC reminder ของขั้นตอนการแต่งกายก่อนเข้าปฏิบัติงาน (Dress method for clean room suit of operator before start work)
- 2) ทำการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ไม่จำเป็นสำหรับกระบวนการผลิตออกนอกห้องปฏิบัติงาน รวมทั้งวัสดุและเครื่องมือที่จะนำเข้ามาในบริเวณห้องต้องทำความสะอาดเสียก่อน
- 3) จัดโปรแกรมการทำความสะอาดโดยการเพิ่มความถี่ในการทำความสะอาดภายหลังการปฏิบัติงานจากเดิมอาทิตย์ละ 2 ครั้งเป็นทุกวัน
- 4) แจ้งให้ผู้ปฏิบัติงานปรับเปลี่ยนพฤติกรรมในขณะที่ปฏิบัติงาน ไม่ควรหยอกล้อ หัวเราะ หรือกินขนมในบริเวณห้องสะอาด

ภายหลังการปรับแก้ได้เริ่มดำเนินการทดสอบความถูกต้องของห้องสะอาดอีกครั้งได้ผลดังนี้

4.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity tests)

ตาราง 28 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ และความชื้นของห้อง

Room name	Measuring Point	Temperature (°C)	Humidity (%RH)	Time	Date
Weld C/R (Class 10,000)	1	22.9	58.6		12/07/2009
	2	22.8	58.5		12/07/2009
	3	22.5	58.6		12/07/2009
	4	22.4	58.7		12/07/2009
	5	22.5	58.9		12/07/2009
	6	22.5	58.3		12/07/2009
	7	22.6	58.6		12/07/2009
	8	22.7	59.1		12/07/2009
	Mean	22.6	58.7		
	Max.	22.9	59.1		
	Min.	22.4	58.3		

4.2.2 ผลการวัดความดันอากาศของห้อง (Room pressurization tests)

ตาราง 29 แสดงผลการวัดความดันของห้อง

Room name	Room pressure		
	in. W.G.	Pa.	mm. W.G.
Weld C/R (Class 10,000)	0.06	15.0	1.5

เปรียบเทียบผลการวัดจากตาราง 23 และตาราง 28 พบว่าผลการวัดอุณหภูมิที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากเพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าที่วัดได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในข้อมูลการออกแบบ แต่จากผลการวัดความชื้นที่ได้มีค่าแตกต่างกันพอสมควรอาจเป็นผลมาจากการวัดครั้งหลังนี้ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะอากาศภายนอกมีความชื้นสูงทำให้ความชื้นภายในห้องมีค่าสูงกว่าซึ่งค่าที่วัดได้มีค่าระหว่าง $50 \pm 10\%$ ซึ่งยังอยู่ในข้อกำหนดเริ่มต้นของการออกแบบห้องสะอาด

สำหรับค่าความดันของห้องออกแบบไว้ที่ 15 Pa ซึ่งเท่ากับผลการวัดที่ได้ตั้งตาราง 24 และ ตาราง 29 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ปรับความดันห้อง (Pressure damper) ที่ติดตั้งไว้ยังสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ

มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดการวัดให้เหลือแค่ 8 จุดอันเนื่องมาจากได้ทำการเคลียร์เครื่องมือที่ไม่ได้ใช้ซึ่งแต่เดิมอยู่ในบริเวณโซนที่ 9 นี้ออกไปจากห้องสะอาด

4.2.3 ผลทดสอบระดับความสะอาดของห้อง (Room Cleanliness Classification Test)

ตาราง 30 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร ในสภาวะที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ

Room name	Measuring point	Particle count	
		0.5 µm or larger	5.0 µm or larger
Weld C/R (Class 10,000)	1	61,935	8,545
	2	52,013	6,321
	3	35,240	4,273
	4	26,483	3,637
	5	57,415	8,298
	6	63,277	8,616
	7	26,342	3,037
	8	17,055	1,977
	95% UCL	54,752	7,399

จากสูตร $95\%UCL = AVERAGE (Test\ data) + [STDEV (Test\ data) / Point^{0.5} \times UCL\ factor]$

$$= \bar{X} + \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{(N-1)}}}{N^{0.5}} \right] \times 1.9$$

$$\begin{aligned}
 \text{สำหรับ } 0.5 \mu\text{m: } 95\% \text{UCL} &= 42,470 + \left[\frac{18,283.99}{8^{0.5}} \right] \times 1.9 \\
 &= 42,470 + 12,282 \\
 &= 54,752
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{สำหรับ } 5.0 \mu\text{m: } 95\% \text{UCL} &= 5,588 + \left[\frac{2,695.94}{8^{0.5}} \right] \times 1.9 \\
 &= 5,588 + 1,811 \\
 &= 7,399
 \end{aligned}$$

จากผลการวัดที่ได้จากตาราง 30 Particle count ที่ 95%UCL ที่ขนาดอนุภาค 0.5 μm มีความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนในอากาศเท่ากับ 54,752 อนุภาค/ m^3 มีค่าไม่เกิน 353,000 อนุภาค/ m^3 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน Federal Standard 209E ที่กำหนดไว้ในระดับความสะอาด Class 10,000 แต่สำหรับที่ขนาดอนุภาค 5.0 μm ความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 7,399 อนุภาค/ m^3 ซึ่งเกินค่ามาตรฐาน 2,470 อนุภาค/ m^3 แสดงให้เห็นว่าหลังจากทำการปรับปรุงดังกล่าวห้องสะอาดมีความสะอาดมากขึ้นโดยดูจากผลการวัดที่ได้ทั้งที่ขนาด 0.5 และ 5.0 μm ของตาราง 30 เปรียบเทียบกับ ตาราง 27 มีค่าลดลงมาก แต่ห้องสะอาดจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับได้หรือไม่ที่วัดได้ทั้งขนาด 0.5 และ 5.0 μm จะต้องไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ และเนื่องด้วยระบบปรับอากาศของห้องสะอาดได้ถูกใช้งานต่อเนื่องมาเป็นเวลาปีกว่าก่อนที่จะทำการทดสอบอีกครั้ง จากการสอบถามถึงการบำรุงรักษา (Maintenance) การทำความสะอาดหรือการเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศ (Air filter) ภายในตู้ส่งลมเย็น (AHU) ซึ่งกำหนดไว้ให้มีการเปลี่ยนตามระยะเวลาการใช้งาน พบว่ายังไม่ได้ปฏิบัติตามคำแนะนำที่ได้เคยให้ไว้ใดๆเลย ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าระบบการกรองฝุ่นที่ AHU เกิดการอุดตันจึงเป็นผลทำให้ปริมาณลมที่จ่ายให้กับห้องลดลงไม่เพียงพอต่อความต้องการและเป็นผลต่อเนื่องทำให้การหมุนเวียนอากาศภายในห้องไม่ค่อยดี ฝุ่นละอองที่เกิดจากการปฏิบัติงานจึงตกค้างสะสมมากขึ้น แต่ที่ขนาด 0.5 μm ไม่เกินค่ามาตรฐานนั้นอาจเป็นเพราะว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสามารถถูกถ่ายเทออกจากช่องลมกลับได้ดีกว่าฝุ่นละอองขนาดใหญ่ การทดสอบที่จะนำมาสนับสนุนเหตุผลดังกล่าวข้างต้นนั้นแสดงดังตาราง 31

4.2.4 ผลทดสอบปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านหัวจ่ายลม (Airflow visualization)

ตาราง 31 แสดงผลการวัดปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านหัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่าย

Room name	SAG. no.	Face area (ft ²)	Supply airflow volume (CFM)
Weld C/R (Class 10,000)	1	4	453
	2	4	490
	3	4	495
	4	4	495
	5	4	481
	Total		2,414

จาก ปริมาตรห้อง $73 \times 2.7 =$ 197 m^3
 ปริมาณลมทั้งหมดที่วัดได้ $=$ 2,414 CFM (หรือ 4,101 CMH)
 อัตราการหมุนเวียนอากาศ $\cong$ 21 ACH

แต่เดิมห้องสะอาดนี้ถูกออกแบบให้มีอัตราการหมุนเวียนอากาศ 40 ACH แต่จากผลที่ได้หลังจากระบบทำงานต่อเนื่องเป็นเวลาปีกว่าพบว่าค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศลดลงเกือบ 50% เหลือ 21 ACH ดังนั้นจากผลการวัดปริมาณการไหลอากาศที่ได้นี้เป็นเหตุผลสนับสนุนการวิเคราะห์ที่ว่าแผ่นกรอง HEPA อาจเกิดการอุดตันทำให้ผลการวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ได้ของตาราง 30 ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของห้องสะอาด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาทั้งขั้นตอนการคำนวณออกแบบ ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CFD ในจำลองการไหลของอากาศ และขั้นตอนการทดสอบการปฏิบัติงานจริง พบว่าการเลือกใช้อัตราการหมุนเวียนอากาศที่ 40 ACH เป็นค่าที่เหมาะสมกับห้องสะอาดที่ระดับความสะอาด Class 10,000 (ค่าแนะนำให้ใช้ของหนังสือบางเล่มนั้นอยู่ในช่วง 50-100 ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินความจำเป็นสำหรับกระบวนการผลิตประเภทนี้) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการปฏิบัติงานจริงที่สภาวะห้องที่ไม่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักร แต่สำหรับผลการทดสอบในสภาวะห้องที่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกตินั้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาจเกิดจากสาเหตุสำคัญที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 แต่จะเห็นได้ว่าภายหลังการปรับแก้พฤติกรรม ผลการทดสอบที่ได้ของการวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาด $0.5\ \mu\text{m}$ นั้นผ่านเกณฑ์แต่สำหรับขนาด $5.0\ \mu\text{m}$ ไม่ผ่านเกณฑ์ซึ่งผลการทดสอบปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านหัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่ายดังตาราง 31 จะเป็นข้อพิสูจน์ได้ชัดเจนว่าเกิดอะไรขึ้นกับแผ่นกรอง HEPA ซึ่งเป็นผลให้การทดสอบนั้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่เนื่องด้วยมีปัญหาข้อขัดข้องบางประการในที่นี่จึงยังไม่สามารถทำการทดสอบเพื่อหาข้อสรุปให้กับประเด็นนี้ได้ จึงเป็นหน้าที่ของผู้วิจัยที่จะดำเนินการต่อเพื่อทำให้เกิดความกระจ่างแก่ผู้ที่จะนำไปใช้ในโอกาสต่อไป สำหรับในขั้นตอนการจำลองโดยการนำ CFD มาใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศนั้นพบว่าอนุภาคของฝุ่นละอองไม่ส่งผลกระทบต่อการไหลของอากาศซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) ดังนั้นจากการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดจึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมฝุ่นละอองที่ถูกกระทำโดยการไหลของอากาศ พฤติกรรมของฝุ่นละอองถูกศึกษาผ่านสมการการขนถ่ายของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่แสดงถึงจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถที่จะนำ CFD มาใช้วิเคราะห์การไหลได้ในเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปใช้ก่อสร้างจริงได้ ประโยชน์ที่ได้จากผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐานให้แก่ผู้ออกแบบเป็นสำคัญ แต่ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก เพราะห้องสะอาดนั้นมีได้ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 เพียงอย่างเดียว อีกทั้งต้องนำไปปรับปรุง ประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมประเภทอื่นต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะโดยทั่วไปสำหรับขั้นตอนการออกแบบ

1) ควรทำ Check list เครื่องจักร อุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้งานภายในห้อง หากไม่มีการตรวจสอบอย่างละเอียดนอกจากจะส่งผลต่อการคำนวณ Cooling load คลาดเคลื่อนแล้วยังมีผลกระทบโดยตรงต่อการทดสอบระดับความสะอาดของห้องในขณะปฏิบัติงานอีกด้วย

2) มีวิธีการออกแบบอีกมากที่ช่วยลดต้นทุนการก่อสร้าง นอกเหนือจากการใช้พัดลมเติมอากาศแทน FFU ในกรณีที่ความต้องการการหมุนเวียนอากาศหลังเลือกเครื่องส่งลมเย็นไม่ต่างกันมาก นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือทำการ modify coil หรือเพิ่มขนาดพัดลมของเครื่องส่งลมเย็นใช้ในกรณีที่ค่าภาระทำความเย็นไม่สูงมากแต่ต้องการค่าการหมุนเวียนของอากาศสูง

3) ทำการวิเคราะห์กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทนั้นเสียก่อนว่ามีความจำเป็นในการใช้ระดับความสะอาดที่เท่าไร หากไม่ต้องการความสะอาดสูงมากก็ไม่ต้องเลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศสูงเกินความจำเป็น ทั้งนี้เป็นการช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของค่าไฟของระบบปรับอากาศนั้นๆ

ข้อเสนอแนะโดยทั่วไปสำหรับขั้นตอนการจำลองการไหล

1) หากห้องสะอาดที่ทำกรวิเคราะห์นั้นไม่มีรูปร่างที่สลับซับซ้อน จำนวนกริดจึงไม่ต้องการความละเอียดมากนัก เพื่อเป็นการลดพื้นที่หน่วยความจำและช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณอีกด้วย

2) ระบบปรับอากาศของห้องสะอาดส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเพื่อดูพฤติกรรมการไหลของอากาศหลังจากผ่านหัวจ่ายลม ดังนั้นสำหรับตัวแปรที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ ความชื้น และความดันจะไม่นำถึงและไม่นำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหา

ข้อเสนอแนะโดยทั่วไปสำหรับขั้นตอนการทดสอบปฏิบัติงานจริง

1) ควรทำการทดสอบภายหลังจากเดินระบบปรับอากาศไว้แล้วไม่ต่ำกว่า 1 อาทิตย์เพื่อทำให้มั่นใจว่าไม่มีปัจจัยภายนอกมาเป็นตัวแปรให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนเช่น เศษผงฝุ่นละอองอาจจะเล็ดลอดผ่านเข้ามาจากการก่อสร้างที่ยังไม่เสร็จในบริเวณโดยรอบห้องสะอาด

2) ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกครั้ง ก่อนดำเนินการตรวจวัดเพื่อช่วยสร้างความมั่นใจในผลการวัด พร้อมทั้งแนบใบรับรองผลการสอบเทียบนั้นมาด้วยซึ่งผลการวัดที่เกิดขึ้นเป็นที่เชื่อถือได้คือการใช้เครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องและแม่นยำ

3) เพื่อเช็คความถูกต้องของผลการทดสอบ ควรทำการทดสอบซ้ำหลายๆครั้ง ก่อนเริ่มดำเนินการทดสอบจริง ทั้งนี้เพื่อเป็นการเช็คประสิทธิภาพของผู้ทำการตรวจวัดไปในตัวอีกด้วย

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ทวี เวชพุทธิ และกิตติพงษ์ เตมียะประดิษฐ์. (2531). *การออกแบบห้องสะอาด (Design of clean room)*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- บริษัท โกลบอลเทค จำกัด. (2545). *การออกแบบและการตรวจสอบคลื่นรบกวนในสถานที่ผลิตยา*. สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย. (2521). *ห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมและพาณิชย์กรรม*. กรุงเทพฯ: ออปเท็คริเอชั่น. หน้า 5-18.
- สุวัชร บัวแย้ม. (2550). *แผนการสอนประจำหน่วยวิชาสุขศาสตร์อุตสาหกรรม: การควบคุมห้องสะอาด*.
- อังสนา ชั่วสุวรรณ. (2549). *หลักการในการจัดทำห้องสะอาด (Clean room) สำหรับอุตสาหกรรม*. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 54(172): 30-34
- เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2546). *การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก*. ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.
- เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2547). *การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ อุณหภูมิและความชื้นภายในห้องสะอาด*. บทความวิชาการสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย 9: 45-52.
- ดลพร กุลศานต์. (2550). *การศึกษาปัญหาการยศาสตร์ของพนักงานที่ปฏิบัติงานภายในห้องสะอาดสำหรับโรงงานอิเล็กทรอนิกส์*. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- Cheng, M., Liu, G.R., Lam, K. Y., Cai. W.J., and Lee, E. L. (1999). *Approaches for improving airflow uniformity in unidirectional flow clean room*. Building and environment, V.34. p. 275-284.
- Fluent Inc. (2001). *Fluent user's guide: version 6*. United States of America: Fluent Inc.
- Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamic*. The finite volume method. Longman scientific & technical. Longman Group limited.
- Hu, S. C., Chauah, Y. K., and Yen, M.C. (2002). *Design and evaluation of a Mini environment for semiconductor manufacture processes*. Building and environment

V.37, p. 201-208.

Kozicki, M.N., Hoenig, S.A., and Robinson, P.J. (1990). *Clean rooms facilities and practices*. New York: Van Nostrand Reinhold, p. 1-71.

Matts Ramstorp. (2000). *Introduction to contamination control and clean room technology*. Weinhiem: Wiley, p. 61-76.

Rouaud, O., and Havet, M. (2002). *Computation of the air flow in a pilot scale clean room using k- ϵ turbulence models*. In International Journal of Refrigeration, V.25, p. 351-361.

Rouaud, O., and Havet, M. (2005). *Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts*. In International Journal of food Engineering, V.68, p.163-174.

Takasago Thermal Engineering. (1996). *Clean room*. Chiyoda-ku. Tokyo, p.1-6, 12.

Tian, Z.F., Tu, J.Y., Yeoh, G.H., Yuen, R.K.K. (2005). *On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor airflow*. The Australian research council project IDLP0347399.

The institute of environmental service and technology. (1992). *Federal standard 209E Airborne particulate cleanliness classes in clean rooms and clean zones*. Illinois, p-5, 15

Whyte, W. *Clean rooms design*. (1999). Chichester: Wiley, p.27-35, 46.

บริษัทโกลบอลเทค จำกัด (2545). *Clean room validation*, from <http://www.globaltech.co.th>

Alain Brochet. (2002). *Enhancing clean room design with airflow modeling*, from <http://www.cr.pennet.com>

National Partition and Interior, Inc. (1998). *National Partition Engineering Manual*, from <http://www.n-p.com>

Peter Rumsey PE. (2003). *An examination of ACRs: An opportunity to reduce energy and construction costs*. Magazine & E-newsletter, from <http://cr.pennnet.com/articles>

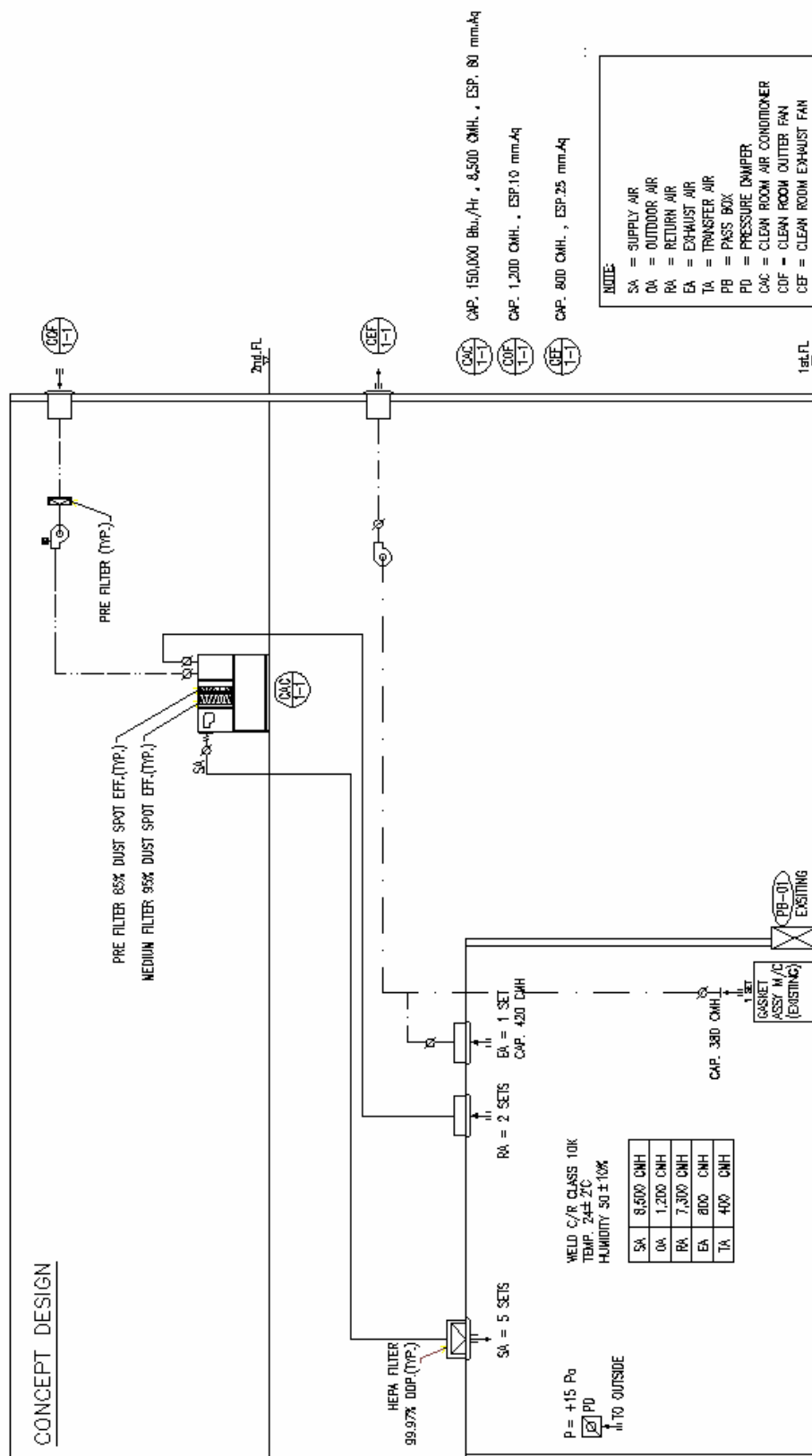
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลสำหรับขั้นตอนการออกแบบ

แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณภาระการทำความเย็นของห้องสะอาด Weld C/R

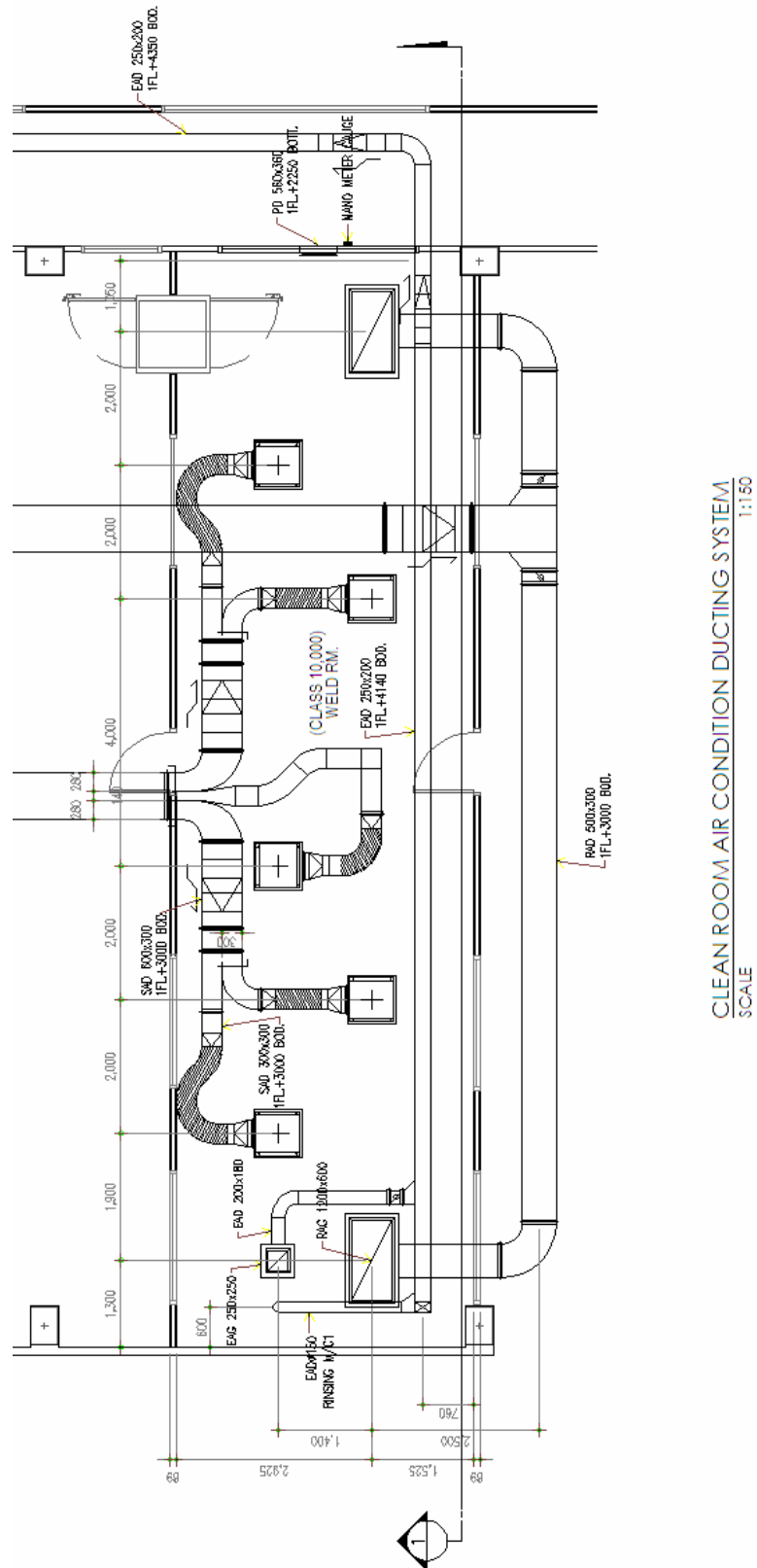
PROJECT : YAMASHIN NEW FACTORY 2

COOLING LOAD		CAC-1-1	1 FL		RM.NAME : WELD ROOM								
AREA			73.0 SQ.M		C.H.		2.7 M.		VOL.		197.0 QU.M		
(1) CONDUCTION (SENSIBLE HEAT)													
EXP.	KIND	AREA (m ²)	U	SUMMER									
				10:00		14:00		16:00					
				t (°C)	kcal/h	t (°C)	kcal/h	t (°C)	kcal/h				
SW	WALL	8.8	3.38	2.4	71.7	3.2	95.6	6.1	182.2				
	WALL	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
SW	GLASS	6.6	5.50	2.4	86.5	3.2	115.4	6.1	219.9				
	GLASS	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	PARTITION	104.0	2.89	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3	5.5	1,652.3				
	FLOOR	73.0	1.19	5.5	477.7	5.5	477.7	5.5	477.7				
	CEILING	73.0	0.85	5.5	341.2	5.5	341.2	5.5	341.2				
	ROOF	0.0	0.99	2.4	0.0	3.2	0.0	6.1	0.0				
TOTAL (1)					2,760.8		2,816.2		3,016.9				
(2) RADIATION (SENSIBLE HEAT)													
EXP.	KIND	AREA	CLF	kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h	kcal/h.m ²	kcal/h				
SW	GLASS	6.6	0.50	63.0	206.5	89.0	291.7	159.0	521.1				
		0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
TOTAL (2)					216.8		306.3		547.2				
(3) = (1) + (2)				2,977.6		3,122.4		3,564.0					
(4) (3) x SAFETY FACTOR 10 %				3,275.3		3,434.7		3,920.4					
(5) INTERIOR HEAT													
KIND						SENSIBLE		LATENT					
PEOPLE		15.0	PERSONS			59.0	884.8	40.0	600.0				
LIGHT		25.0	W / SQ.M			1,961.5							
MACHINE		16,100.0	WATT			13,846.8							
MACHINE		0.0	WATT / SQ.M										
TOTAL OF (5) x SAFETY FACTOR 10 %						18,362.4		kcal/h	660.0				
(6) TOTAL ROOM COOLING LOAD							22,282.8		kcal/h	660.0			
(7) OUTDOOR AIR LOAD				1,200.0 CMH		3,496.7		kcal/h	10,205.5				
TOTAL COOLING LOAD (SENS./ LAT.)							25,779.5		kcal/h	10,865.5			
GRAND TOTAL COOLING LOAD							36,645.0		kcal/h				
ROOM CONDITION				24 deg.C, 50% R.H,				502.1 kcal / m ²					
OUTDOOR CONDITION				35 deg.C, 60% R.H,				Selection	36,645.0 kcal / h				
								Selection	146,580.1 Btu / h				
Required air(40 ACH)		7,881.84	CMH	Supply air		8,500.00		CMH					
Exhaust air		800.00	CMH	Exhaust air		800.00		CMH					
Fresh air		1,200.00	CMH	Fresh air		1,200.00		CMH					
Concept Design													
CAC-1-1 (New)		150,000.0	Btu / H	8,500.00	CMH	80 mm.Aq	1.0	Set					
COF-1-1 (New)				1,200.00	CMH	10 mm.Aq	1.0	Set	set 15 Pa.				
CEF-1-1 (New)				800.00	CMH	25 mm.Aq	1.0	Set					
FFU-1-1				Not Require									
For Machine Operated													
General							420.00	CMH					
Gasket Assy Machine (Existing)							1 Set	380.00	CMH				

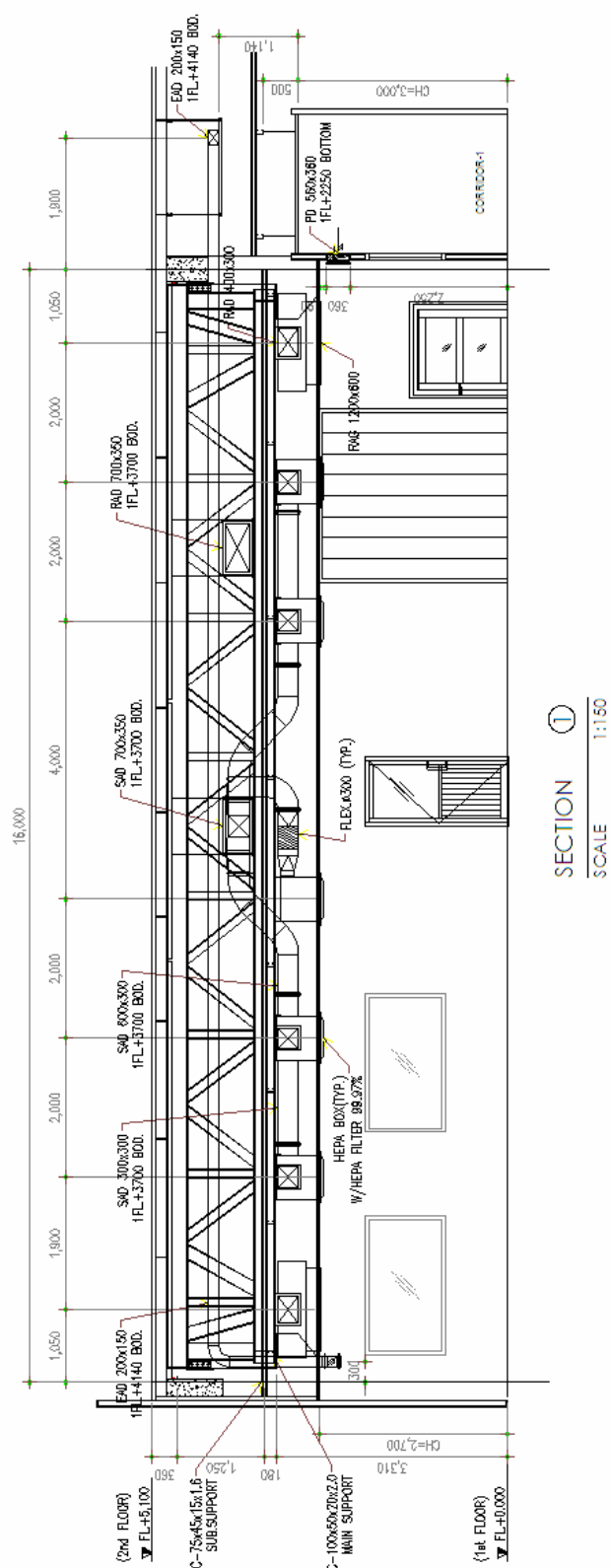


SCALE	SCHEMATIC DIAGRAM CLEAN ROOM SYSTEM	NOTE
-------	-------------------------------------	------

ภาพประกอบ 42 แผนผังการทำงานของระบบปรับอากาศของห้องสะอาด



ภาพประกอบ 44 ภาพขยายระบบท่อลมภายในห้องสะอาด



ภาพประกอบ 45 ภาพตัดขนาดและแนวท่อลม

ภาคผนวก ข

ข้อมูลประกอบการใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลเชิงตัวเลข

สำหรับในกรณีที่กำหนดเงื่อนไขของปัญหาการไหลเป็นแบบ Unsteady state ต้องทำการคำนวณหาค่า time step size ให้ได้เสียก่อนแล้วนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณหาจำนวนรอบของการคำนวณซ้ำอีกทีหนึ่ง ซึ่งสูตรการคำนวณมีดังนี้

$$\text{Time step size } (d_t) = \frac{\text{Size} / \text{Speed}}{4} = \frac{\text{Minimum cell size} / V_{inlet}}{4} = \frac{0.001 / 1.312}{4} = 0.000191$$

$$\text{Number of iteration} = \frac{\text{Courant number} / V_{inlet}}{d_t} = \frac{0.25 / 1.312}{0.000191} = 1000$$

ใส่ค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวต่าง Iteration และค่า Max Iteration per time step ซึ่งโดยทั่วไปกำหนดไว้ประมาณ 15-20 iterations

ภาคผนวก ค
รายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด

รายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด (Instrument Calibration Report)

ใช้ทำการตรวจวัดในสภาวะ At rest (Jan. 9, 2008) และสภาวะ At operation (Mar. 23, 2008)

1. Instrument : Particle Counter
 Maker : MET ONE
 Model : 3313-LLD-AL
 Calibration by : Hach Ultra Analytics (HUA)
 Serial No. : 70601064
 Last Calibrated : Jun. 21, 2007
 Application : Particle Counts
 Date of use : Jan. 9, 2008 / Mar. 23, 2008

2. Instrument : Scan Leak Test
 Maker : MET ONE
 Model : 3313-LLD-AL
 Calibration by : Hach Ultra Analytics (HUA)
 Serial No. : 70601064
 Last Calibrated : Jun. 21, 2008
 Application : Particle Counts
 Date of use : Jan. 9, 2008 / Mar. 23, 2008

3. Instrument : Humidity / Temperature Meter
 Maker : DIGICON
 Model : DM-750 Digital
 Calibration by: Sangchai Meter Calibration Laboratory
 Serial No. : L914427
 Last Calibrated : May. 22, 2007
 Application : Humidity and Temperature Measurement
 Date of use : Jan. 9, 2008 / Mar. 23, 2008

ใช้ทำการตรวจวัดในสถานะ At operation (Jul. 12, 2009)

1. Instrument : Air flow and uniformity
 Maker : ALNOR
 Model : EBT-721
 Calibration by : Hach Ultra Analytics (HUA)
 Serial No. : 90513015
 Last Calibrated : Aug. 19, 2008
 Application : Airflow and Differential Pressure Measurement
 Date of use : Jul. 12, 2009

2. Instrument : Particle Counter
 Maker : MET ONE
 Model : 3313
 Calibration by : Hach Ultra Analytics (HUA)
 Serial No. : 70601064
 Last Calibrated : Jul. 12, 2008
 Application : Particle Counts
 Date of use : Jul. 12, 2009

3. Instrument : Thermometer / Hygrometer
 Maker : TSI
 Model : 7415
 Calibration by : Hach Ultra Analytics (HUA)
 Serial No. : T74150837001
 Last Calibrated : Sep. 09, 2008
 Application : Temperature and Humidity Measurement
 Date of use : Jul. 12, 2009

ภาคผนวก ง

ผลการพิจารณาดอรับงานวิจัยในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย (ME-NETT) ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ง. ผลการพิจารณาตอบรับงานวิจัยในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย (ME-NETT) ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23

4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนก้อยแก้ว อ.สุเทพ อ.เชียงใหม่ 50200
โทร. 053944144 ต่อ 414 แฟกซ์ 053944145 email: menett2009@dome.eng.cmu.ac.th
<http://menett2009.eng.cmu.ac.th>

วันที่ 30 กันยายน 2552

เรียนคุณ จิรพันธ์ เรืองสุภณิมิต, จุฬารัตน์ คุรุเจริญ, ไพศาล นาคผล

คณะกรรมการจัดงาน ME-NETT23 มีความยินดีที่จะแจ้งให้ทราบว่าคุณค่าของงานเรื่อง

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขทาง
พลศาสตร์ของไหล (The Design of Air Condition System in a Clean Room and Application of
Computational Fluid Dynamics)

ได้รับการตอบรับให้เข้าร่วมเสนอผลงานแบบ oral presentation ท่านสามารถดูผลการประเมินของ
คณะกรรมการประเมินบทความ (reviewer) ซึ่งประกอบไปด้วยคณาจารย์ผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกลจากมหาวิทยาลัยทั่วประเทศ ได้โดย login เข้าที่เว็บไซต์ของงานประชุมฯ

คณะกรรมการจัดงานฯ ขอให้ท่านโปรดแก้ไขบทความโดยพิจารณาข้อคิดเห็นของ
คณะกรรมการ และจัดเตรียมบทความฉบับสมบูรณ์ (final paper) ในรูป MS WORD (download ไฟล์
ต้นแบบได้ที่เว็บไซต์) และขอให้ท่าน upload ไฟล์เข้าสู่ระบบภายในวันที่ 12 ตุลาคม 2552

อนึ่งขอให้ท่านและคณะ กรุณาลงทะเบียนเพื่อร่วมงานล่วงหน้าภายในวันที่ 15 ตุลาคม 2552
ซึ่งจะได้รับส่วนลดตามรายละเอียดแสดงในเว็บไซต์ของงานประชุมฯ

ขอแสดงความนับถือ

ผศ.ดร. อัทฉัย ปรีชาวุฒิจพงศ์
ประธานคณะกรรมการจัดงาน ฯ

อภิธานศัพท์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ

ACH	อัตราการหมุนเวียนของอากาศ (Air Change Rate), h^{-1}
BF	ตัวประกอบการคูณความร้อนจากบัลลาสต์ (Ballast heat Factor)
CLF	ตัวประกอบภาระการทำความเย็น (Cooling Load Factor)
SHGF	ตัวประกอบการคูณปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain Factor), kcal/h.m^2
TD	ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนัง (Temperature Difference), $^{\circ}\text{C}$
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transmission Coefficients), $\text{kcal/h.m}^2.^{\circ}\text{C}$
UCL	ขีดจำกัดความเชื่อมั่นบน (Upper Confidence Limit)

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดที่ของอากาศไหลผ่าน (Cross-sectional area), m^2
c	ระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศ
C_{μ}	ค่าคงที่ของ μ_t , $C_{\mu}=0.09$
$C_{\varepsilon 1}$	ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{\varepsilon 1}=1.44$
$C_{\varepsilon 2}$	ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{\varepsilon 2}=1.92$
$C_{\varepsilon 3}$	ค่าคงที่ตัวที่ 3 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{\varepsilon 3}=1.0$
D	เทอมเสริมของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $D = \frac{2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2$
$D_{i,c}$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของฝุ่นละออง, $D_{i,c} \approx v$
$D_{i,m}$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอน้ำ, $D_{i,m} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2}$
E	เทอมเสริมของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $E = \frac{2\mu}{\rho} \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m} \right)^2$
$f_{\varepsilon 1}$	ฟังก์ชันการหน่วงตัวที่ 1 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $f_{\varepsilon 1}=1.0$

$f_{\varepsilon 2}$	ฟังก์ชันการหน่วงตัวที่ 2 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $f_{\varepsilon 2} = 1 - 0.3 \exp(-\text{Re}_t^2)$
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity acceleration), m/s^2
h	เอนทาลปี
L	ค่าความยาววิกฤต (Characteristic length), m , $L = \frac{4A}{P}$
m	เศษส่วนมวลของไอน้ำ, $m = \frac{m_v}{m_v + m_a}$
p	ความดัน
P	ความยาวโดยรอบพื้นที่ที่น้ำตัด (The wetted perimeter), m
P_k	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างพลังงานในสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน $P_k = -\rho u'_j u'_i \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$
Q_s	ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Gain; SHG), kcal/h
Q_l	ความร้อนแฝง (Latent Heat Gain; LHG), kcal/h
R	ค่าของก๊าซสากล (Universal Gas Constant), $R = 8,314 \text{ J/(kmol.K)}$
Re_t	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของความปั่นป่วน, $\text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$
$Sc_{t,c}$	สมิตน์นัมเบอร์ของความปั่นป่วนของฝุ่นละออง, $Sc_{t,c} = 1.0$
$Sc_{t,m}$	สมิตน์นัมเบอร์ของความปั่นป่วน (Turbulent Schmidt Number) ของไอน้ำ
S_c	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆของสมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย
S_i	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆของสมการโมเมนตัมที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
S_k	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
S_ε	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
Δt	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Difference), $^\circ\text{C}$, $\Delta t = (t_o - t_r)$
t_{ji}	เทนเซอร์ของความเค้น, $t_{ji} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$

T	อุณหภูมิ
T_i	ความรุนแรงของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity), $T_i = 0.01$
T_r	อุณหภูมิอ้างอิง
u_i	ความเร็วที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
U_0	ความเร็วที่ทางเข้า (Velocity inlet), m/s, $U_0 = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}$
U	ขนาดของความเร็วในแนวแกน x, m/s
V	ขนาดของความเร็วในแนวแกน y, m/s
W	ขนาดของความเร็วในแนวแกน z, m/s
Δw	ความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้น (Air humidity ratio difference), $lb H_2O / lb dry air$, $\Delta w = (w_o - w_r)$
x_i	ระบบพิกัดฉากที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์

สัญลักษณ์ภาษากรีก

δ_{ij}	Kronecker Delta
β	สัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ, $\beta = \frac{1}{T_r(K)}$
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy; TKE), m^2/s^2
k_{inlet}	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ทางเข้า, m^2/s^2
ε	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Dissipation Rate; TDR), m^2/s^3
ε_{inlet}	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ทางเข้า, m^2/s^3
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (Density), $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
μ	ความหนืดพลวัตของอากาศ (Dynamic Viscosity), $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
μ_t	ความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulence viscosity), $\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
Δ	ค่าการเปลี่ยนแปลง
σ_k	Effective Prandtl Number for the diffusion of Turbulence, $\sigma_k = 1.0$
σ_T	Turbulence Prandtl Number for the diffusion of Total Energy, $\sigma_T = 0.9$
σ_ε	ค่าคงที่ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

ตัวกำกับบน

‘ ค่าแก้ไข

ตัวกำกับล่าง

o สถานะนอกห้อง (Outdoor state)

r สถานะภายในห้อง (Indoor state)

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23

4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

การออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดและการประยุกต์ใช้การคำนวณ เชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

The design of Air Conditioning System in a Clean Room and Application of Computational Fluid Dynamics

จิรนนท์ เรืองศุภนิมิต¹, จุฑารัตน์ คุรุเจริญ² และ ไพศาล นาผล³

^{1, 2, 3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ต.ศรีระกระบือ

อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร: 0-3732-2609

E-mail: jiranan@toenec.th.com¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนวิธีการออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาด โดยได้นำการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาประยุกต์ใช้ ผ่านแบบจำลองการไหลของอากาศเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างจริง และอยู่บนสมมติฐานที่สามารถใช้ปฏิบัติงานจริงได้ สำหรับกรณีศึกษาได้ทำการออกแบบระบบปรับอากาศที่ระดับความสะอาด Class 10K สำหรับโรงงานผลิตไส้กรองกระดาษ โดยขั้นตอนการออกแบบเริ่มจากการคำนวณภาระการทำความเย็น จากนั้นร่างแบบแสดงรายละเอียดตำแหน่ง และขนาดของแต่ละอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศไว้ ขั้นตอนไปเริ่มในส่วนของการโปรแกรม ได้มีการสร้างรูปแบบจำลองและขอบเขตคล้ายกับแบบที่ร่างไว้ในรูปแบบ 3 มิติโดยใช้โปรแกรม Gambit กำหนดให้รูปแบบของการไหลเป็นแบบความปั่นป่วน $k-\epsilon$ และประมวลผลวิเคราะห์โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT มาช่วยในการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการหมุนเวียนของอากาศ, ความเร็วอย่างสม่ำเสมอในแนวตั้ง และระดับความเข้มข้นของฝุ่นละออง ขั้นตอนต่อไปนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ในเบื้องต้นมาปรับปรุงแก้ไขในส่วนของการออกแบบจากนั้นดำเนินการก่อสร้างจริงและทดสอบการใช้ปฏิบัติงานจริง จากผลการทดสอบระดับความสะอาดของห้องพบว่าในสภาวะที่ห้องไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร นั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน U.S. Federal Standard 209E ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการศึกษาค้นคว้านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบปรับอากาศของห้องสะอาดของโครงการใหม่ในอนาคตต่อไป

คำหลัก: ห้องสะอาด, ระดับของความสะอาด, อัตราการหมุนเวียนของอากาศ, การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

Abstract

The objective of this research was to study the design methodology of air conditioning system in a clean room. Model simulation under Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to predict behavior of air flow leading to the optimum design before construction and practicality. In this case, design on cleanliness class 10K for a factory of filter production. The design process starts to calculate the cooling load and draft the detail drawing of air conditioning system. The next, in this computer programming, the computer model has been made, boundary in three dimensions and analyze by Gambit computer programming. Used the turbulence flow model, k- ϵ standard model is employed and analysis of air flow conducted by the FLUENT software. For related variable such as Air change rate, Vertical uniform air velocity, Particle concentration. The next, applied the preliminary analysis result to adjust as for designing after that proceeding to construction work and operational test. From room cleanliness classification test in condition without operate both person and machine found the acceptance criteria U.S. Federal Standard 209E that agree with the analysis result of simulation. This research result is able to consider for further application of air conditioning system for clean room design.

Keywords: Clean room, Cleanliness Classes, Air change rate, Computational Fluid Dynamics

1. บทนำ

การออกแบบระบบปรับอากาศของห้องสะอาด นับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะถ้าเป็นโครงการขนาดใหญ่ ซึ่งต้องมีการลงทุนในระบบปรับอากาศหลายร้อยหรือหลายพันล้านบาท ถ้าหากออกแบบได้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ก็สามารถช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างและ ลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นได้เป็นอย่างมาก สิ่งทีวิศวกรต้องให้ความสำคัญในการออกแบบควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง นอกเหนือจากอุณหภูมิ ความดันอากาศ ความชื้น แสงสว่าง และอนุภาคสิ่งเจือปนแล้ว อัตราการหมุนเวียนของอากาศ (Air Change Rate: ACH) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง จากการศึกษาเอกสาร และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงการเพิ่มปริมาณ ACH ซึ่งไม่แน่ว่าจะสามารถช่วยรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดได้มากขึ้น การเลือกปริมาณ ACH โดยปราศจากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม

แล้ว อาจจะทำให้เกิดความสับสนเปลืองในแง่ของต้นทุนการก่อสร้าง เช่นเลือกใช้เครื่องปรับอากาศที่ใหญ่เกินไป หรือในแง่ของต้นทุนการผลิต เช่นค่าไฟ ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองและนำไปสู่การบอกถึงประสิทธิภาพการหมุนเวียนอากาศของห้องในที่สุด CFD จึงได้เข้ามามีบทบาทเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ทำนายพฤติกรรมดังกล่าว ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้อง ช่วยให้ทั้งวิศวกรและเจ้าของโครงการมั่นใจในผลการออกแบบยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนการออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาด โดยนำ CFD เข้ามามีส่วนช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เลือกใช้นั้นเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตและสามารถนำมาใช้ปฏิบัติงานจริงได้

2. การดำเนินการวิจัย

ห้องสะอาดที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นห้องสะอาด Weld C/R สำหรับโรงงานผลิตไส้กรองกระดาษของบริษัท ยามาฮิน ประเทศไทย จำกัด ณ นิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จ.พระนครศรีอยุธยา ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ขั้นตอนการคำนวณออกแบบ, ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ และขั้นตอนทดสอบปฏิบัติงานจริง

2.1 ขั้นตอนการคำนวณออกแบบ

ขั้นตอนแรก กำหนดให้ห้องสะอาดนี้เป็นห้องสะอาดประเภท Conventional C/R ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ขนาดของห้องสะอาดที่มากที่สุดในทิศทาง x, y และ z มีค่าเท่ากับ 4.45, 2.7 และ 16.4 m ตามลำดับ ออกแบบอุณหภูมิห้องที่ $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50%, ความดันภายในห้อง 15 Pa และแสงสว่าง 25 W/m^2 จำนวนผู้ปฏิบัติงาน 15 คน เครื่องจักรขนาด 16.1 kW และพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักรขนาด 800 CMH ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณภาระการทำความเย็น (Cooling Load Calculation)

1. ภาระการทำความเย็นจะเป็นผลรวมจากความร้อนจากแหล่งต่างๆ ดังนี้
 - 1.1 โดยการนำความร้อน (Conduction) ผ่านกำแพงกระจก ผนังกันห้อง พื้น ฝ้า และหลังคาที่ถูกแดดส่อง
 - 1.2 โดยการแผ่รังสี (Radiation) ผ่านกระจกหรือผ่านวัสดุอื่นที่โปร่งแสง
 - 1.3 เกิดจากคน แสงสว่างจากดวงไฟ อุปกรณ์ไฟฟ้า และจากอากาศอุ่นภายนอกในขณะเปิดประตูหรือผ่านขอบหน้าต่าง
- ผลรวม Cooling Load ทั้งหมดของห้องสะอาดเท่ากับ 36,645 Kcal/H หรือ 146,580 Btu/H

2. ทำการเลือกขนาดเครื่องปรับอากาศหรือ

เครื่องส่งลมเย็น (Air Handling Unit) จากผลรวมของ Cooling Load ในที่นี้เลือกที่ 150,000 Btu/H (8,500 CMH) จากนั้นทำการตรวจสอบขนาดเครื่องปรับอากาศที่เลือกใช้มีปริมาณลมส่ง (Supply Air) เพียงพอต่อความต้องการอากาศ (Require Air) ที่ระดับความสะอาดของห้องที่จะออกแบบหรือไม่

จาก พื้นที่ห้อง: $4.45 \times 16.4 = 73 \text{ m}^2$
 ปริมาตรห้อง: $73 \times 2.7 = 197 \text{ m}^3$
 (ระดับความสะอาด Class 10,000 เลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศ 40 ACH)

ความต้องการอากาศ (Require Air) สำหรับห้องสะอาด: $197 \times 40 = 7,880 \text{ CMH}$ (ซึ่ง $< 8,500 \text{ CMH}$) แต่จากข้อมูลก่อนการออกแบบเราทราบว่าพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักรขนาด 800 CMH ซึ่งเมื่อรวมกับความต้องการอากาศของห้องจะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่า 8,500 CMH อยู่เล็กน้อย และโดยปกติของการออกแบบระบบปรับอากาศนั้นจำเป็นต้องมีอากาศใหม่ (Fresh Air) จากภายนอกเข้ามาหมุนเวียนในระบบเป็น 2 เท่าของปริมาตรห้อง ฉะนั้นเราจึงทำการหาปริมาณอากาศใหม่บวกกับปริมาณอากาศที่เสียไปกับพัดลมดูดอากาศของเครื่องจักร ซึ่งคือพัดลมเติมอากาศ (Fresh Air Fan) ที่เข้าสู่ระบบมีขนาดเท่ากับ

$$(197 \times 2) + 800 = 1,200 \text{ CMH}$$

3. จากขั้นตอนคำนวณ Cooling Load ทำให้เราทราบขนาดเครื่องปรับอากาศและปริมาณลมส่ง (Supply Air) ซึ่งนำไปสู่การออกแบบระบบท่อส่งลมต่อไป การออกแบบระบบท่อส่งลมเลือกใช้วิธีการคำนวณ Equal Friction method ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องทำการศึกษาแบบแปลน, การจัดวางตำแหน่งหัวจ่ายลมและช่องลมกลับ, ปริมาณลมและขนาดของแต่ละหัวจ่ายลม (โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต), กำหนดแนวท่อลม เชื่อมโยงเครื่องส่งลมเย็นและหัวจ่ายลม ซึ่งในที่นี้จะไม่แสดงการคำนวณขนาดท่อลม ผู้ออกแบบสามารถศึกษาได้จากพื้นฐานการออกแบบทั่วไป

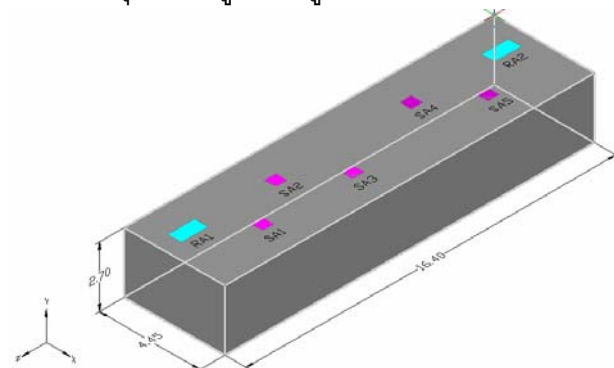
4. ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณหาขนาดหัวจ่าย

CST-032273

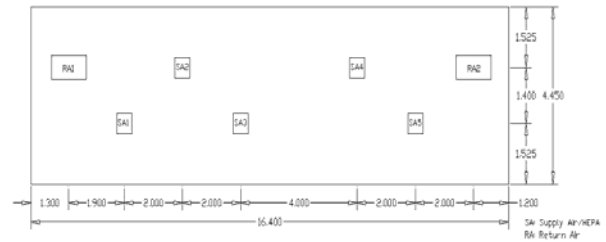
ลม ดูจาก Spec. ของผู้ผลิตที่ความเร็วของอากาศไหลผ่านหัวจ่าย (Face Velocity) โดยทั่วไปใช้ 500 fpm ขนาดหัวจ่ายลม 24"(W) x 24"(H) x 12"(D) มีปริมาณการไหลของอากาศ เท่ากับ 1,700 CMH) เมื่อความต้องการจ่ายลมทั้งหมด 8,500 CMH ดังนั้นจำนวนหัวจ่ายที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 5 หัวจ่าย หัวจ่ายลมทั้งหมดมีการติดตั้งแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงชนิด HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters) ซึ่งมีประสิทธิภาพ 99.99% และ 12" Deep Filter

5. ระบบปรับอากาศโดยทั่วไปจะต้องมีลมกลับ (Return Air) จำนวนหนึ่งเพื่อเป็นการหมุนเวียนอากาศเก่าไปผสมกับอากาศใหม่จากภายนอกในช่อง Chamber แล้วผ่าน Coil ทำความเย็นกลับเข้าสู่บริเวณปรับอากาศวนเวียนเป็นวัฏจักรอย่างนี้เรื่อยไป โดยทั่วไปปริมาณลมที่หมุนเวียนกลับเข้า Chamber อยู่ที่ประมาณ 80% ของปริมาณลมจ่ายให้กับห้อง นั่นคือ 8,500 x 0.8 เท่ากับ 6,800 CMH โดยปกติความเร็วที่ช่องลมกลับคือ 250 fpm ขนาดช่องลมกลับ 24"(W) x 48"(H) ซึ่งมีปริมาณการไหลของอากาศที่ผ่านช่องลมกลับเท่ากับ 3,400 CMH ดังนั้นจำนวนช่องลมกลับที่ใช้คือ 2 ช่อง ในที่นี้จะไม่แสดงการคำนวณขนาดท่อลมเช่นกัน

6. ร่างแบบแสดงรายละเอียดตำแหน่งและขนาดของแต่ละอุปกรณ์ (รูปที่ 1, รูปที่ 2 และตารางที่ 1)



รูปที่ 1 รูปร่างขนาดของห้องสะอาดที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 2 ตำแหน่งหัวจ่ายลม HEPA และช่องลมกลับ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของห้องสะอาด Weld C/R

ความกว้างที่สุด (x)	4.45 m.
ความสูง (y)	2.7 m.
ความยาวที่สุด (z)	16.4 m.
หัวจ่ายลม HEPA	5 หัวจ่าย (0.6 m x 0.6 m)
ช่องลมกลับ	2 ช่อง (0.6 m x 1.2 m)

2.2 ขั้นตอนจำลองการไหลของอากาศ

การวิเคราะห์การไหลในที่นี้จะกำหนดให้เป็น การไหลที่สภาวะคงที่แบบอัดตัวไม่ได้และเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบปิดจาก 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε

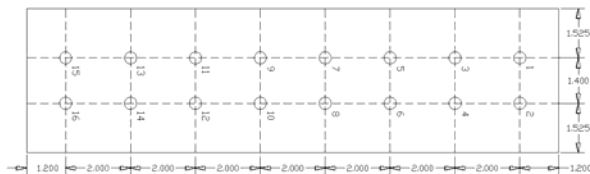
ผลการคำนวณที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัด (ตารางที่ 2) บนระนาบที่สูงจากพื้น 1 m ซึ่งเป็นระดับที่อยู่บริเวณใบหน้าของผู้นั่งทำงานภายในห้องที่สามารถรับรู้ถึงความแรงของการไหลของอากาศภายในห้องได้ โดยตำแหน่งที่ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณบนระนาบดังกล่าว (รูปที่ 3) ซึ่งมีทั้งหมด 16 ตำแหน่ง

ตารางที่ 2 ค่าความเร็วลัพท์บนระนาบสูง 1 เมตร

ตำแหน่งการวัด	ความเร็วลัพท์ (m/s)		% ความคลาดเคลื่อน (%Error)
	ผลการวัด (Measured)	ผลการคำนวณ (Compute)	
1	0.067	0.074	10
2	0.049	0.050	2
3	0.074	0.081	10
4	0.057	0.067	18

CST-032273

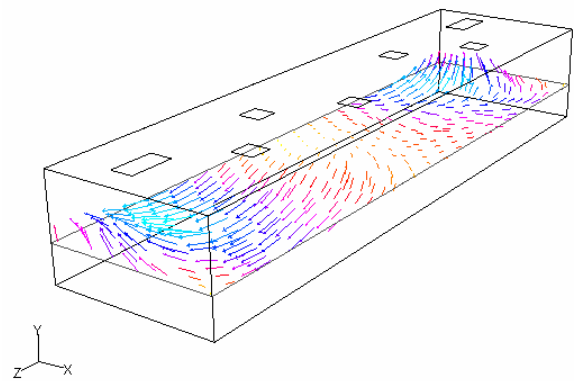
5	0.058	0.047	19
6	0.022	0.038	73
7	0.011	0.016	46
8	0.058	0.021	64
9	0.009	0.014	56
10	0.018	0.025	32
11	0.058	0.050	14
12	0.035	0.043	23
13	0.076	0.084	11
14	0.053	0.071	34
15	0.061	0.071	16
16	0.042	0.058	38



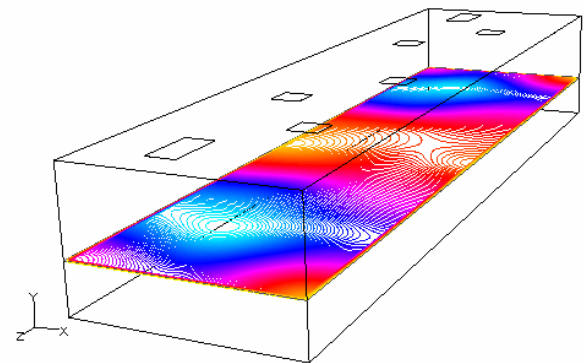
รูปที่ 3 ตำแหน่งต่าง ๆ บนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตรที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่แสดงในรูปของเวกเตอร์และเส้นแสดงขนาดความเร็วที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 เมตร (รูปที่ 4 และรูปที่ 5) ซึ่งเป็นระนาบของการปฏิบัติงาน พบว่าการไหลของอากาศหลังจากออกจากหัวจ่าย HEPA เกิดการไหลหมุนวนของอากาศบริเวณเพดานห้องใกล้หัวจ่าย HEPA และเริ่มมีกระจายตัวของอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอในบริเวณโดยรอบของหัวจ่ายบนระนาบความสูง 1 เมตร ซึ่งแสดงว่าอากาศใหม่ที่ไหลออกจากหัวจ่าย HEPA สามารถไหลเข้าแทนที่อากาศบริเวณดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองน้อยลงซึ่งเป็นความปรารถนาของผู้ออกแบบห้องสะอาด แต่สำหรับบริเวณที่มีการไหลวนของอากาศ ได้ทำการปรับแก้การออกแบบโดยติดตั้งช่องลมกลับใกล้ผนังที่สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อทำการลดการไหลวนของอากาศที่เกิดจาก

การที่อากาศไหลออกจากหัวจ่าย HEPA ปะทะลงพื้นห้องและไหลไปกระทบที่บริเวณผนังโดยรอบซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละออง จากผลการวิเคราะห์การไหลของอากาศนี้สามารถนำข้อมูลการออกแบบที่ทำการปรับแก้ไว้ในเบื้องต้นไปใช้ก่อสร้างจริงและปฏิบัติงานจริงได้



รูปที่ 4 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร



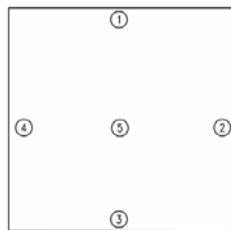
รูปที่ 5 เส้นแสดงขนาดความเร็วบนระนาบ 1 เมตร

2.3 ขั้นตอนทดสอบปฏิบัติงานจริง

วิธีดำเนินการทดสอบมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มทำการเดินระบบปรับอากาศจนได้สภาวะของอุณหภูมิและความชื้นคงที่ ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Humidity Tests) ของห้องสะอาดในแต่ละ zone ที่สนใจ ในที่นี้ทำการวัด 3 zone บันทึกผล และหาค่าเฉลี่ย
2. ตรวจสอบรอยรั่วของแผ่นกรอง HEPA ที่ติด

ตั้งในหัวจ่ายลม(HEPA Filter Installation Leak Test) ทั้ง 5 หัวโดยใช้หัวตรวจรั่ว (Aerosol Probe) ทำการ Scan ไปมาตามขอบโดยรอบและบริเวณพื้นผิวตรงกลางของแผ่นกรอง HEPA ตามตำแหน่ง 5 ตำแหน่ง (รูปที่ 6) โดยให้ระยะห่างระหว่าง Probe กับ แผ่นกรอง HEPA ห่างกันประมาณ 1" ทำการ Scan เป็นไปอย่างช้าๆโดยใช้ความเร็วไม่เกิน 10 ft/min เครื่องนับอนุภาคจะทำการนับจำนวนฝุ่นละอองที่ผ่านแผ่นกรอง HEPA ออกมาเป็นจำนวนอนุภาคต่อปริมาตร 1 m³ ในแต่ละตำแหน่งเครื่องจะทำการ print ผลการวัดออกมา เก็บผลการวัด และหา %รอยรั่วของแผ่นกรอง HEPA จากนั้นดำเนินการตรวจสอบซ้ำจนครบทั้ง 5 หัวจ่าย



รูปที่ 6 ตำแหน่งทดสอบอนุภาคที่ผ่าน HEPA

3. ตรวจวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นและมลสารภายในห้องสะอาดหรือการตรวจสอบระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Room Cleanliness Classification Test) เพื่อเป็นการทดสอบว่าห้องสะอาดที่ทำการออกแบบนี้มีจำนวนอนุภาคฝุ่นไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน จากการสุ่มตัวอย่างอากาศ (Sample) โดยหาจำนวนจุดในการวัดตามสูตรของ Federal Standard 209E สำหรับ Non Laminar Flow คือ

$$\begin{aligned} \text{จำนวนจุด} &= A / \sqrt{N} \quad (A=\text{พื้นที่ห้อง; ft}^2, N=\text{Class}) \\ &= (73\text{m}^2 \times 10.76) / \sqrt{10000} \\ &\cong 9 \text{ จุด} \end{aligned}$$

ขั้นตอนต่อไปแบ่ง grid พื้นที่ห้องออกเป็น 9 zone กำหนดหมายเลข zone และทำการตั้ง Probe ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละ zone โดยให้ระดับความสูงของ Probe อยู่สูงจากพื้น 40" (หรือ 1 m) ตั้งเวลาการวัดที่ 1 min/sample ใช้เครื่องนับอนุภาคนับจำนวนของ

อนุภาคที่มีขนาด 0.5 μm หรือใหญ่กว่า หน่วยการวัดเป็นจำนวนอนุภาคต่อปริมาตร 1 m³ เครื่องจะทำการ print ผลการวัดออกมา เก็บผลการวัด และทำการวัดต่อไปจนครบทั้ง 9 zone สำหรับการตรวจสอบระดับความสะอาดของห้องสะอาดจะดำเนินการตรวจสอบเหมือนกันใน 2 สภาวะคือ

1) ในสภาวะที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและ เครื่องจักร (At rest)

2) ในสภาวะที่ห้องสะอาดมีการทำงานของบุคลากรและ เครื่องจักรเป็นปกติ (At operational)

4. ตรวจวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นและมลสารภายในทำการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบที่ได้โดยอ้างอิงจากมาตรฐานของห้องสะอาด Federal Standard 209E Airborne Particulate Cleanliness Classes

3. ผลและการวิเคราะห์ผล

เนื่องจากสนใจเฉพาะการไหลของอากาศซึ่งมีผลต่อการสะสมปริมาณของฝุ่นละอองที่อาจจะเกิดขึ้นภายในห้องเท่านั้น ในที่นี้จึงไม่แสดงผลการวัดอุณหภูมิและความชื้น

3.1 ตรวจสอบรอยรั่วของแผ่นกรอง (HEPA Filter Installation Leak Test)

ตารางที่ 3 แสดงผลการนับจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองที่ผ่านแผ่นกรอง HEPA ของหัวจ่ายลมทั้ง 5 หัวจ่าย

Filter No.	MP.	Class Limit			Meat Spec.	
		0.5	1.0	5.0	Yes.	No.
1	1	35	0	0	X	
	2	0	0	0	X	
	3	0	0	0	X	
	4	0	0	0	X	
	5	70	0	0	X	
2	1	35	0	0	X	
	2	0	0	0	X	

CST-032273

	3	0	0	0	X	
	4	35	0	0	X	
	5	0	0	0	X	
3	1	0	0	0	X	
	2	35	0	0	X	
	3	35	0	0	X	
	4	0	0	0	X	
	5	0	0	0	X	
4	1	35	0	0	X	
	2	35	0	0	X	
	3	35	0	0	X	
	4	0	0	0	X	
	5	35	0	0	X	
5	1	35	0	0	X	
	2	0	0	0	X	
	3	35	0	0	X	
	4	0	0	0	X	
	5	0	0	0	X	

จากผลการทดสอบพบว่า จำนวนอนุภาคฝุ่นละอองขนาด 0.5 μm ที่ไหลผ่านหัวจ่ายลม SA1 สำหรับตำแหน่งที่ 1 นับได้ 70 อนุภาคต่อปริมาตรอากาศ 1 m^3 จาก Federal Standard 209E ที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ระบุความเข้มข้นของขนาดอนุภาคฝุ่นละออง 0.5 μm ไม่ควรเกิน 353,000 อนุภาค/ m^3 สามารถคำนวณหา % การรั่วของแผ่นกรอง HEPA ได้ดังนี้

%การรั่วของแผ่นกรอง HEPA

$$= (70 / 353,000) \times 100$$

$$= 0.019\% \quad (\text{ซึ่ง} > 0.01\%)$$

เนื่องจากประสิทธิภาพของแผ่นกรอง HEPA ที่ใช้มีค่า 99.99% ฉะนั้น %การรั่วของค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ไม่ควรเกิน 0.01% แต่จากผลการคำนวณที่ได้เท่ากับ 0.019% ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกรองฝุ่น

ละอองลดลงอาจส่งผลกระทบต่อระดับความสะอาดของห้องสะอาดที่ออกแบบ

สำหรับที่หัวจ่าย SA2, SA3, SA4 และ SA5 ที่วัดได้ 35 อนุภาคต่อปริมาตรอากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่า %การรั่วของแผ่นกรอง HEPA เท่ากับ 0.009% ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้

3.2 ตรวจวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองภายในห้อง (Room Cleanliness Classification Test)

ตารางที่ 4 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตร ในสภาวะที่ห้องสะอาดไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร

Room Name	Measuring Point	Particle Count	
		0.5 μm or Larger	5.0 μm or Larger
Weld C/R (Class10K)	1	4,615	210
	2	9,370	489
	3	10,733	979
	4	7,936	734
	5	12,621	909
	6	7,097	454
	7	8,810	664
	8	9,649	804
	9	12,027	524
	95% UCL	10,748	793

ในกรณีนี้จำนวนจุดทดสอบน้อยกว่า 10 จุด ต้องหาจาก 95% Upper Confidential Limit หรือ 95%UCL จากสูตร

$$95\%UCL = \text{AVERAGE (TEST DATA)} + \text{STDEV (TEST DATA)} / \text{POINT}^{0.5} \times \text{FACTOR}$$

สำหรับ 0.5 μm :

$$95\%UCL = 9,206.44 + \left[\frac{2,486.72}{9^{0.5}} \right] \times 1.86$$

$$= 9,206.44 + 1,541.76$$

$$= 10,748$$

CST-032273

สำหรับ 5.0 μm ;

$$\begin{aligned} 95\% \text{UCL} &= 640.78 + \left[\frac{244.78}{9^{0.5}} \right] \times 1.86 \\ &= 640.78 + 151.76 \\ &= 793 \end{aligned}$$

ตารางที่ 5 แสดงผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรในสภาวะที่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติ

Room Name	Measuring Point	Particle Count	
		0.5 μm or Larger	5.0 μm or Larger
Weld C/R (Class10K)	1	3,129,265	12,516
	2	11,790,045	12,201
	3	8,707,522	10,069
	4	1,622,126	7,027
	5	793,513	7,901
	6	705,655	9,614
	7	455,019	5,419
	8	1,023,172	2,902
	9	684,399	4,964
	95% UCL	5,780,158	10,121

สำหรับ 0.5 μm ;

$$\begin{aligned} 95\% \text{UCL} &= 3,212,301.78 + \left[\frac{4,141,703.84}{9^{0.5}} \right] \times 1.86 \\ &= 3,212,301.78 + 2,567,856.38 \\ &= 5,780,158 \end{aligned}$$

สำหรับ 5.0 μm ;

$$\begin{aligned} 95\% \text{UCL} &= 8,068.11 + \left[\frac{3,311.19}{9^{0.5}} \right] \times 1.86 \\ &= 8,068.11 + 2,052.94 \\ &= 10,121 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 4 พบว่าผลการวัดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศหนึ่งลูกบาศก์เมตรก็คือค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนในอากาศที่ไหล

ผ่านแผ่นกรอง HEPA เข้าสู่ห้องสะอาดนั่นเอง ค่าที่วัดได้สำหรับสภาวะที่ห้องไม่มีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักร มีค่าเท่ากับ 10,748 อนุภาค/ m^3 ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน Federal Standard 209E ที่ระดับความสะอาด Class 10,000 (ระบุนความเข้มข้นของขนาดอนุภาคฝุ่นละออง 0.5 μm มีค่าไม่เกิน 353,000 อนุภาค/ m^3) จึงสามารถสรุปได้ว่าห้องสะอาดในสภาวะนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบ แต่จากตารางที่ 5 สำหรับสภาวะที่ห้องมีการทำงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกตินี้ พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองคือ 5,780,158 อนุภาค/ m^3 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานค่อนข้างมาก เนื่องจากค่า Particle Count ในแต่ละจุดมีการกระจายตัวของข้อมูลไม่สม่ำเสมอทำให้ค่า STDEV (Standard Error of the mean of the averages) มีค่าสูง เมื่อนำมาคำนวณหา 95%UCL ค่าที่ได้จึงมีค่าสูงตามไปด้วยแต่ยังไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะนำมาคัดค้านการไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เพราะจะเห็นได้ว่าค่าที่วัดเกือบทุกจุดเกิน 353,000 ทั้งนี้ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าห้องสะอาดในสภาวะนี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากการตรวจสอบในภายหลังพบสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ห้องสะอาดในขณะที่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกติที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานนั้น อาจเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1) การละเลยการป้องกันก่อให้เกิดสิ่งสกปรกของผู้ปฏิบัติงานเช่น พนักงานสวมใส่รองเท้าที่ใช้ทำงานให้ห้องสะอาดออกไปเดินภายนอกโดยไม่มีการเปลี่ยนรองเท้าที่เตรียมไว้ให้

2) เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ปฏิบัติงานนี้ถูกย้ายมาจากโรงงานเก่า อาจไม่ได้ทำความสะอาดก่อนทำการขนย้ายเข้ามาที่ห้องสะอาดใหม่ซึ่งก็อาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผลการวัดความเข้มข้นฝุ่นละอองมีค่าสูงก็เป็นได้

3) ความถี่ของการทำความสะอาดหลังการ

ปฏิบัติงานน้อยมาก หากเทียบกับกระบวนการผลิตประเภทอื่นซึ่งกระบวนการผลิตประเภทนี้เกี่ยวข้องกับเยื่อกระดาษที่ใช้ทำไส้กรองซึ่งก็อาจจะก่อให้เกิดการฟุ้งของฝุ่นละอองได้มากกว่า

4) พฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงาน การทำงานในห้องสะอาดต้องมีการเคลื่อนไหวเป็นไปอย่างเชื่องช้าเพื่อไม่ให้เกิดการก่อดั้วของสิ่งสกปรก ซึ่งจากสังเกตการณ์พนักงานยังละเลยกับข้อปฏิบัติอยู่

4. สรุป

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาทั้งขั้นตอนการคำนวณออกแบบ ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CFD ในจำลองการไหลของอากาศ และขั้นตอนการทดสอบการปฏิบัติงานจริง พบว่าการเลือกใช้ค่าอัตราการหมุนเวียนอากาศที่ 40 ACH เป็นค่าที่เหมาะสมกับห้องสะอาดที่ระดับความสะอาด Class 10,000 (ค่าแนะนำให้อยู่ในช่วง 50-100 ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินความจำเป็นสำหรับกระบวนการผลิตประเภทนี้) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการปฏิบัติงานจริงที่สภาวะห้องที่ไม่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักร แต่สำหรับผลการทดสอบที่สภาวะห้องที่มีการปฏิบัติงานของบุคลากรและเครื่องจักรเป็นปกตินั้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอาจเกิดจากสาเหตุสำคัญที่ได้กล่าวไว้แล้วนั้น สำหรับในขั้นตอนการจำลองโดยการนำ CFD มาใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศนั้นพบว่าอนุภาคของฝุ่นละอองไม่ส่งผลกระทบต่อการไหลของอากาศซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) ดังนั้นจากการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดจึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมฝุ่นละอองที่ถูกกระทำโดยการไหลของอากาศ พฤติกรรมของฝุ่นละอองถูกศึกษาผ่านสมการการชนถ่ายของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่แสดงถึงจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในปริมาตรหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถที่จะนำ CFD มาใช้วิเคราะห์การไหลได้ในเบื้องต้นก่อนที่จะ

นำไปใช้ก่อสร้างจริงได้ ประโยชน์ที่ได้จากผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐานให้แก่ผู้ออกแบบเป็นสำคัญ แต่ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมากเพราะห้องสะอาดนั้นมิได้ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 เพียงอย่างเดียว อีกทั้งต้องนำไปปรับปรุงประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมประเภทอื่นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ยามาฮิน ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่ของห้องสะอาดที่ใช้ในการทดสอบ เก็บข้อมูลของงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทวี เวชพฤติ และกิตติพงศ์ เตมียะประดิษฐ์. (2531). การออกแบบห้องสะอาด (Design of Clean room). สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [2] บริษัทโกลบอลเทค จำกัด (2545). การออกแบบและการตรวจสอบคลีนรูมในสถานที่ผลิตยา.
- [3] เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2546). การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก. ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี
- [4] เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2547). การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องสะอาด. บทความวิชาการ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย 9: 45-52
- [5] ดลพร กุลศานต์. (2550). การศึกษาปัญหาการยศาสตร์ของพนักงานที่ปฏิบัติงานภายในห้องสะอาดสำหรับโรงงานอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารศึกษาด้านวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- [6] Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Cai. W. J.,
and Lee, E. L. (1999). Approaches for
Improving air flow uniformity in unidirectional
flow clean room. Building and Environment
34: 275-284
- [7] Fluent Inc. (2001). Fluent user's guide:
version 6. United States of America:
Fluent Inc.
- [8] Hu, S. C., Chauah, Y. K., and Yen, M.C.
(2002). Design and evaluation of a Mini
environment for semiconductor manufacture
processes. Building and Environment
37: 201-208
- [9] Rouaud, O., and Havet, M. (2002).
Computation of the air flow in a pilot scale
clean room using k- ϵ turbulence models.
International Journal of Refrigeration 25:351-
361
- [10] Rouaud, O., and Havet, M. (2005). Numerical
investigation on the efficiency of transient
contaminant removal from a food processing
clean room using ventilation effectiveness
concepts. Journal of food Engineering
68:163-174
- [11] Tian, Z.F., Tu, J.Y., Yeoh, G.H., Yuen, R.K.K.
(2005). On the numerical study of
contaminant particle concentration in indoor
airflow. The Australian research council
project ID LP0347399.
- [12] บริษัทโกลบอลเทค จำกัด (2545). Clean room
validation, <http://www.globaltech.co.th>
- [13] Alain Brochet. (2002). Enhancing
clean room design with airflow modeling,
<http://www.cr.pennet.com>

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวจิรนนท์ เรืองศุภนิมิต
วันเดือนปีเกิด	เกิดวันที่ 27 มกราคม 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 11/1 ถ.ประชาสงเคราะห์ แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพฯ 10320
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท โทเอนค (ประเทศไทย) จำกัด อาคารบางกอกทาวเวอร์ ชั้น 14 ห้อง 1402 แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนกาญจนาอนุเคราะห์
พ.ศ. 2541	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนกาญจนาอนุเคราะห์
พ.ศ. 2545	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2552	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ