รายงานการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบและสร้าง
เครื่องเคลือบสารในสุญญากาศ

Design and Construction of a Vacuum Coating Machine

(ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ประจำปีงบประมาณ 2532-2533 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ)

โดย

รองศาสตราจารย์ โชว สาลีฉัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณสรรค์ ผลโภค
อาจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข
อาจารย์ สวัสดิ์ ปานเนาว์

ภาควิชาฟิสิกส์ และ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

มกราคม 2535

621.692
ร451
ร.4

294 | รายงานการวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ | โชว สาลีฉัน ... [และ | 621.692 ร451 ร.4 | 31011100335017

621.692
ว451
ร.ง

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบและสร้าง เครื่องเคลือบสารระบบสูญญากาศ

Design and Construction of a Vacuum Coating System

(ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2532-2533 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ)

23 ก.พ. 2538

โดย

รองศาสตราจารย์ โชค สาลีฉัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณสรวค์ ผลโภค
อาจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข
อาจารย์ สวัสดิ์ ปานเนาว์

ภาควิชาฟิสิกส์ และ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ ประสานมิตร

มกราคม 2535

192813

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างสูง ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยประเภทการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2532 ถึง 2533 ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้ได้มีโอกาสเริ่มต้นและประสบความสำเร็จในที่สุด

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ และศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ยกส้าน ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาของโครงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ ที่นอกจากให้คำปรึกษาที่มีคุณค่ามากมายแล้ว ยังได้กรุณาให้วัสดุที่ใช้ในการทดลองเคลือบสารอีกด้วย

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ภิยโย ปันยารชุน และศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ที่ได้กรุณาติดตามการทำงานพร้อมกับให้คำเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณพายัพ เรืองแก้ว และคุณมงคล ราชนิยม ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำทางเทคนิคบางประการ

ขอขอบคุณข้าราชการสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติทุกท่าน ที่ได้ให้ความสะดวกในการติดต่อธุรการต่าง ๆ ซึ่งคณะผู้วิจัยมีความประทับใจในไมตรีจิตนี้เป็นอันมาก

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร.ณัฏฐพงษ์ เจริญพิทย์ รองอธิการบดีฝ่ายวิจัย ที่ได้ช่วยเหลือในการประสานงานระหว่างคณะผู้วิจัยกับสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างดี

คณะผู้ดำเนินการวิจัย

มกราคม 2535

บทคัดย่อ

ในการสร้างเครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศ ได้สร้างเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่มีช่องทางเข้าเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร เครื่องสูบนี้สามารถทำให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศสเตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 และสูง 40 เซนติเมตร ลดลงมาจากค่าประมาณ 1.2×10^{-2} มิลลิบาร์เป็นประมาณ 8×10^{-6} มิลลิบาร์ได้ในเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงกับ 20 นาที อัตราเร็วสูงสุดของการสูบที่ภาชนะสุญญากาศของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันมีค่าประมาณ 20 ลิตร/นาทีที่ความดันประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์ โดยความดันวิกฤตของเครื่องมีค่าประมาณ 1.5×10^{-1} มิลลิบาร์

ได้ทำการทดลองเคลือบแผ่นแก้วขนาด 6x2.5 เซนติเมตรด้วยอลูมิเนียมและเงิน ที่ความดัน 1.5×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยแผ่นแก้วอยู่ห่างจากโบ๊ตเป็นระยะ 19 เซนติเมตร ผลการเคลือบพบว่าสารเคลือบมีความราบเรียบ ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยวิธีการแทรกสอดของแสง การวัดความหนาของฟิล์มใช้วิธีเปลี่ยนความถี่ของผลึกเมื่อมีสารมาเกาะที่ผิวผลึก โดยความถี่ที่เปลี่ยนไป 1 Hz เทียบได้กับความหนาของฟิล์มที่เกาะที่ผลึก 0.4544 อังสตรอม

ABSTRACT

A vacuum coating system was constructed. The constructed diffusion pump possesses a circular inlet with diameter of 16 centimeters. The pump can reduce pressure in the vacuum chamber, a cylindrical stainless with 30 centimeters high and diameter of 40 centimeters, from 1.2×10^{-2} millibar to 8×10^{-6} millibar in 1 hour and 20 minutes. The maximum pumping speed at the chamber is 20 liters/min approximately at the pressure 10^{-2} mbar. The critical pressure of the diffusion pump is about 1.5×10^{-1} mbar.

Silver and aluminium coatings on 6x2.5 centimeter glass plates were done at 1.5×10^{-5} millibar. The plates were 19 centimeters away from the boat. Interference results revealed homogeneous thickness of silver and aluminium on the substrates. Thickness measurement bases on changing of frequency of crystal when the crystal's surface was coated. The changing of 1 Hz corresponds to 0.4544 A thickness.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญภาพ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฉ
คำนำ ..... ช
บทที่ 1 ทฤษฎี 1
1.1 ธรรมชาติของสุญญากาศ 1
1.1.1 ธรรมชาติโดยทั่ว ๆ ไปของก๊าซ 1
1.1.2 หน่วยของความดัน 3
1.1.3 องศาของความเป็นสุญญากาศ 3
1.1.4 ระยะปลอดการชน 4
1.1.5 ผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อก๊าซ 4
1.2 ระบบสุญญากาศ 5
1.2.1 ระบบสุญญากาศและปริมาณที่เกี่ยวข้อง 5
1.2.2 ปริมาณของก๊าซและแรงขับ 8
1.2.3 การเปรียบเทียบระบบสุญญากาศกับวงจรไฟฟ้า 8
1.2.4 ความต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม 10
1.2.5 ความต้านทานที่ต่อกันแบบขนาน 11
1.2.6 อัตราเร็วของการสูบ 11
1.2.7 การสูญเสียอัตราเร็วของการสูบ 12
1.2.8 ดีชอฟชัน 13
1.3 เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 14
1.3.1 ลักษณะโดยละเอียดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 15
1.3.2 การคำนวณอัตราเร็วของเครื่องสูบหนุนหลัง 16
1.4 การวัดอัตราเร็วของระบบสุญญากาศ 17
1.5 เครื่องวัดความดันในระบบสุญญากาศ 20
1.5.1 เครื่องวัดแบบเกจพิรานี 21
1.5.2 เครื่องวัดแบบเพนนิง 24
1.6 การระเหยสารด้วยความร้อน 26

1.7 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยแสง 28
1.7.1 การสะท้อนจากแผ่นฟิล์มที่มีระนาบทั้งสองขนานกัน 28
1.7.2 การสะท้อนและหักเหที่แผ่นฟิล์มที่มีด้านทั้งสองไม่ขนานกัน 30
1.7.3 การวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับ
โดยใช้หลักของริ้วแห่งความหนาที่เท่ากัน 31
1.8 การวัดความหนาของฟิล์มด้วยผลึกควอทซ์ 33
บทที่ 2 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ 37
2.1 ระบบสูบอากาศความดันต่ำ 38
2.1.1 เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน 38
2.1.2 เครื่องสูบกลโรตารี 39
2.1.3 แบบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน 40
2.1.4 เครื่องทำความเย็นสำหรับน้ำระบายความร้อนของ
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 50
2.1.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำในท่อระบายความร้อนของเครื่องสูบอากาศ
แบบแพร่ไอและวงจรไฟฟ้าสำหรับขดลวดความร้อนของหม้อต้มน้ำมัน .. 55
2.2 ภาชนะสุญญากาศ 56
2.3 แผ่นฐาน 58
2.3.1 ส่วนล่างของแผ่นฐาน 58
2.3.2 ส่วนบนของแผ่นฐาน 58
2.4 ท่อและวาล์ว 63
2.4.1 ท่อส่วนหน้า 63
2.4.2 ท่อหยาบ 64
2.4.3 ส่วนเชื่อมต่อท่อส่วนหน้าท่อหยาบเครื่องสูบกลโรตารี 65
2.4.4 ชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว 66
2.5 ระบบวัดความดัน 67
2.5.1 เครื่องวัดความดันพิรานี 67
2.5.1.1 การสร้างของหัววัดพิรานี 69
2.5.1.2 วงจรวัดความดัน 71
2.5.1.3 วงจรควบคุมอุปกรณ์ภายนอก 72
2.5.2 เครื่องวัดแบบเพนนิง 73
2.6 ระบบระเหยสาร 75
2.6.1 ขั้วทองแดงจัดยัตโบ๊ต 75

2.6.2 ขั้วไฟฟ้ากระแสสูง 76
2.6.3 ขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 77
2.6.4 ฉากกั้นการระเหย 78
2.6.5 ส่วนจับยึดและถาดวางชิ้นงาน 79
2.6.7 ระบบอบชิ้นงาน 80
2.6.8 ระบบวัดความหนา 81
2.6.8.1 อุปกรณ์จับผลึก 81
2.6.8.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ 83
2.6.8.3 วงจรนับความถี่ 85
2.6.8.4 การปรับเทียบเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง 85
2.6.8.5 วิธีการปรับเทียบเครื่องวัดความหนา 85
2.7 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 87
2.7.1 หม้อแปลงสำหรับลวดความร้อน 87
2.7.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 88
2.7.3 หม้อแปลงจ่ายไฟฟ้าของลวดความร้อนอบชิ้นงาน 88
2.7.4 เครื่องวัดอุณหภูมิภายในภาชนะเคลือบสาร 89
บทที่ 3 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 90
3.1 การหารอยรั่วของตัวถังเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 90
3.2 การตรวจสอบการรั่วซึมของข้อต่อต่าง ๆ 90
3.2.1 การตรวจสอบส่วนที่เชื่อมต่อกับเครื่องสูบกลโรตารี 90
3.2.2 การตรวจสอบส่วนที่เหลือของระบบ 90
3.3 การหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน 91
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ 107
4.1 ข้อสรุป 104
4.2 ข้อเสนอแนะ 105
เอกสารอ้างอิง 106
ภาคผนวก 1 การเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน 107
ภาคผนวก 2 วิธีการเคลือบสาร 110
ภาคผนวก 3 การวัดความหนาของฟิล์มด้วยวิธีการแทรกสอด 111
Technical Data 117

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซในภาชนะปิด 1
รูปที่ 1.2 ระบบสุญญากาศที่มีความดัน10^{-3}-10^{-7} มิลลิเมตรของปรอท 6
รูปที่ 1.3 การไหลของก๊าซในระบบสุญญากาศ 8
รูปที่ 1.4 การเปรียบเทียบระหว่างระบบสุญญากาศกับวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย 9
รูปที่ 1.5 เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 14
รูปที่ 1.6 โครงสร้างของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 15
รูปที่ 1.7 แสดงการสูญเสียความร้อนจากลวดโลหะที่ถูกเผาจนร้อน 22
รูปที่ 1.8 วงจรวีสโตนบริดจ์ในเกจพิรานี 23
รูปที่ 1.9 การวางตัวของคาโธด อาโนด และสนามแม่เหล็กในหัววัดแบบเพนนิง 24
รูปที่ 1.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันของเครื่องวัดแบบเพนนิง .. 25
รูปที่ 1.11 แสดงระยะ r และมุม θ ในกฎของคุตเสน 27
รูปที่ 1.12 การสะท้อนหลาย ๆ ครั้งที่แผ่นฟิล์มที่มีด้านข้างขนานกัน 29
รูปที่ 1.13 ฟิล์มอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นลิ่มอยู่ระหว่างแผ่นแก้ว 2 แผ่น 30
รูปที่ 1.14 ฟิล์มบาง BC ของสารตัวอย่างที่เคลือบบนแผ่นแก้ว 32
รูปที่ 1.15 ก. ริ้วมืด-สว่างในช่วง AB 32
ข. ริ้วมืด-สว่างตรงบริเวณ B 32
รูปที่ 1.16 การตัดผลึกแบบ AT 34
รูปที่ 2.1 แผนภาพของเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น 37
รูปที่ 2.2 แบบส่วนประกอบภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 41
รูปที่ 2.3 แบบส่วนประกอบภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 42
รูปที่ 2.4 แบบการพันท่อทองแดงเพื่อใช้เป็นท่อระบายความร้อนของ
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 43
รูปที่ 2.5 ส่วนขยายที่ 1 ของส่วนประกอบภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 44
รูปที่ 2.6 ส่วนขยายที่ 2 ของส่วนประกอบภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 45
รูปที่ 2.7 ส่วนขยายของแบบของส่วนประกอบภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ 46
รูปที่ 2.8 ตัวถังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันซึ่งสร้างขึ้นตามแบบ 47
รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอที่สร้างขึ้น 48
รูปที่ 2.10 แสดงการประกอบชิ้นส่วนในรูปที่ 2.9 ให้เป็นปล่องไอและท่อเจ็ต 49
รูปที่ 2.11 ก. แสดงโครงสร้างของเครื่องทำความเย็น 51
ข. แสดงภาคตัดด้านข้างของเครื่องทำน้ำเย็น 51

ค. แสดงภาคตัดด้านบนของเครื่องทำน้ำเย็น 52
ง. แสดงภาคตัดด้านหน้าของเครื่องทำน้ำเย็น 52
จ. เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบายความร้อนในเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ ... 53
รูปที่ 2.12 วงจรระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำในท่อระบายความร้อน
และวงจรไฟฟ้าของขดลวดความร้อนหม้อต้มน้ำมัน 55
รูปที่ 2.13 ภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้น 56
รูปที่ 2.14 แบบภาชนะสุญญากาศ 57
รูปที่ 2.15 แบบด้านล่างของแผ่นฐาน 59
รูปที่ 2.16 ส่วนขยายแบบด้านล่างของแผ่นฐาน 60
รูปที่ 2.17 ส่วนขยายแบบด้านล่างของแผ่นฐาน 61
รูปที่ 2.18 แบบของแผ่นฐาน 62
รูปที่ 2.19 แบบท่อส่วนหน้า 63
รูปที่ 2.20 แบบท่อหยาบ 64
รูปที่ 2.21 ส่วนเชื่อมต่อท่อส่วนหน้าท่อหยาบเครื่องสูบกลโรตารี 65
รูปที่ 2.22 ชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว 66
รูปที่ 2.23 วงจรแปลงความดันเป็นความต่างศักย์แบบอุณหภูมิคงที่ 68
รูปที่ 2.24 โครงสร้างของหัววัดพิรานี 69
รูปที่ 2.25 รายละเอียดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 70
รูปที่ 2.26 วงจรเรียงกระแส 71
รูปที่ 2.27 วงจรความดัน 72
รูปที่ 2.28 วงจรควบคุมอุปกรณ์ภายนอก 73
รูปที่ 2.29 วงจรสมบูรณ์ของเครื่องวัดพิรานี 74
รูปที่ 2.30 แบบขั้วทองแดงจัดยึดโบ๊ต 75
รูปที่ 2.31 แบบขั้วไฟฟ้าทองแดงสำหรับจ่ายกระแสสูงให้แก่โบ๊ต 76
รูปที่ 2.32 แบบขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสำหรับทำโกลว์ดิสชาร์จ
เพื่อไล่ก๊าซที่ฝังอยู่ในเนื้ออุปกรณ์ 77
รูปที่ 2.33 แบบฉากกั้นการระเหย 78
รูปที่ 2.34 แบบชิ้นส่วนจัดยึดและวางชิ้นงาน 79
รูปที่ 2.35 แบบระบบอบชิ้นงาน 80
รูปที่ 2.36 ส่วนบนของอุปกรณ์จับผลึก 81
รูปที่ 2.37 ส่วนฐานของอุปกรณ์จับผลึก 82
รูปที่ 2.38 วงจรออสซิลเลเตอร์ 83

รูปที่ 2.39 วงจรวัดความถี่ 84
รูปที่ 2.40 การเคลือบสารบนแผ่นแก้วแบบชั้นบันได 85
รูปที่ 2.41 การต่อวงจรไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดกระแสสูงความต่างศักย์ต่ำ
สำหรับลวดความร้อนระเหยสาร 87
รูปที่ 2.42 การต่อวงจรไฟฟ้าของหม้อแปลงความต่างศักย์สูงเข้ากับ
ขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 2 ขั้ว 88
รูปที่ 2.43 การต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้กับขดลวดความร้อนอบชิ้นงาน 88
รูปที่ 2.44 การต่อเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัพเปิล 89
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสุญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิด
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 1 99
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสุญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิด
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 2 100
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสุญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิด
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 3 101
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสุญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิด
เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของผลการทดลองเฉลี่ย 102
รูปที่ ผ3.1 การจัดวางเครื่องมือการวัดความหนาของฟิล์มด้วยวิธีแทรกสอดของแสง 111
รูปที่ ผ3.2 ริ้วมืด-สว่างที่เกิดจากการเคลือบฟิล์มแบบชั้นบันได 112

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของอากาศและปริมาตรเป็นร้อยละที่ระดับน้ำทะเล 2
ตารางที่ 1.2 การจำแนกองศาแห่งสุญญากาศตามความดันภายในระบบ 3
ตารางที่ 1.3 แสดงค่านิจของการขับก๊าซของวัตถุชนิดต่าง ๆ 13
ตารางที่ 1.4 ค่าคงที่และความไวของผลิกที่ตัดแบบ AT ที่มีต่อมวลสารที่มาเกาะติด 35
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลการเคลือบอลูมิเนียมและเงินเป็นชั้นบันไดที่ความหนาต่าง ๆ
สำหรับปรับเทียบเครื่องวัดความหนา 86
ตารางที่ 3.1 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก
ของการทดลองในช่วง 4 วันแรก 92
ตารางที่ 3.2 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก
ของการทดลองในช่วง 4 วันที่สอง 93
ตารางที่ 3.3 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก
ของการทดลองในช่วง 4 วันที่สาม 94
ตารางที่ 3.4 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วน
ของการทดลอง 4 วันแรก 95
ตารางที่ 3.5 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วน
ของการทดลอง 4 วันที่สอง 96
ตารางที่ 3.6 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วน
ของการทดลอง 4 วันที่สาม 97
ตารางที่ 3.7 ความดันเฉลี่ยภายในภาชนะสุญญากาศทั้ง 3 ครั้ง 98
ตารางที่ 3.8 อัตราการสูบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่ความดันต่าง ๆ 103
ตารางที่ ผ3.1 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 1 113
ตารางที่ ผ3.2 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 2 114
ตารางที่ ผ3.3 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 3 115
ตารางที่ ผ3.4 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 4 116

คำนำ

เครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศเป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของแข็งและวัสดุศาสตร์ ในปี พ.ศ.2533 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตรยังไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ใช้เลย เครื่องชนิดนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือหลักสำหรับผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์อื่นๆได้อีกมาก เช่น ใช้สร้างสารกึ่งตัวนำ เซลสุริยะ ใช้เคลือบสารที่ผิวเลนซ์และกระจกเพื่อใช้สร้างทัศนูปกรณ์ต่าง ๆ ใช้ในการเคลือบผิววัสดุอื่นๆด้วยสารต่าง ๆ คุณภาพจากการเคลือบด้วยระบบสุญญากาศนี้จะมีผิวเรียบสม่ำเสมอดีกว่าใช้วิธีอื่น ๆ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถใช้สร้างสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆเพื่อใช้ในการวิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้นด้วย

ในต่างประเทศที่มีความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจะมีใช้กันแพร่หลายในมหาวิทยาลัยและในงานอุตสาหกรรมบางอย่างสำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพสูง เช่น อุตสาหกรรมกล้องถ่ายรูป แว่นตา เคลือบแผ่นฟิล์มบางเพื่อป้องกันแสงและรังสีความร้อนอุตสาหกรรมผลิตกระจกรถยนต์ โคมและแผ่นสะท้อนแสง อุตสาหกรรมผลิตทัศนูปกรณ์ เช่น กล้องโทรทัศน์ กล้องส่องทางไกล กล้องจุลทัศน์เป็นต้น ในอุตสาหกรรมที่สำคัญในปัจจุบัน ก็คืออุตสาหกรรมด้านอิเลกทรอนิกส์ ใช้ผลิตสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมนี้อย่างแพร่หลาย สำหรับในประเทศไทยขณะนี้กำลังจะพัฒนาเพื่อเป็นประเทศอุตสาหกรรม การนำเครื่องมือนี้มาใช้ยังมีน้อยมากจะมีใช้อยู่บ้างก็คือตามมหาวิทยาลัยบางแห่ง ใช้เพื่อการวิจัยและประกอบการเรียนการสอนซึ่งมีขนาดเล็ก การนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเท่าที่ทราบขณะนี้มีใช้ในโรงงานผลิตกระจก 2 แห่ง และโรงงานผลิตกระจกเงา กระจกรถยนต์และเคลือบสารทั่วไป 2 แห่ง ซึ่งเป็นโรงงานขนาดเล็กและเป็นการซื้อเทคโนโลยีมาใช้โดยตรงยังมีปัญหาในเรื่องการซ่อมดูแลรักษาเครื่องเหล่านี้เนื่องจากประเทศไทยยังขาดแคลนนักเทคโนโลยีทางด้านนี้มาก การเคลือบสารต่างๆในประเทศไทย ในขณะนี้ส่วนใหญ่เป็นการเคลือบด้วยไฟฟ้า เป็นกรรมวิธีที่ต้องใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดควันพิษในขณะทำการชุบเคลือบผิว สารเคมีที่เหลือจากการชุบส่วนใหญ่ทางโรงงานมักจะปล่อยทิ้งลงท่อระบายน้ำซึ่งเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ถ้ามีการพัฒนามาใช้การเคลือบผิวสารโดยการใช้เครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศ จะเป็นการลดมลพิษดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและยังสามารถป้องกันอันตรายได้ไม่ยากนัก การสร้างเคลือบสารระบบสุญญากาศนอกจากจะได้ประโยชน์เพื่อใช้งานต่างๆดังกล่าวแล้วยังเป็นการสร้างและพัฒนาบุคคลากร ในสาขาเทคโนโลยีทางด้านนี้อีกด้วยซึ่งได้แก่คณะผู้ทำการวิจัยจะได้ทราบและรู้เทคนิคและหลักฟิสิกส์ของเครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศ อันจะก่อให้เกิดทักษะในการดูแลรักษาการซ่อมหรือปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือเหล่านี้ได้ในโอกาสต่อไปและยังเป็นการประหยัดงบประมาณแผ่นดิน ในการสั่งซื้อเครื่องมือสำเร็จรูปจากต่างประเทศมาใช้ซึ่งมีราคาแพงมากอีกด้วย

บทที่ 1 ทฤษฎี

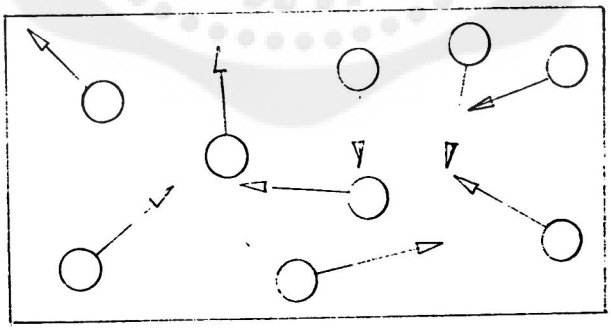
1.1 ธรรมชาติของสุญญากาศ

คำว่า *สุญญากาศ* ตรงกับคำในภาษาอังกฤษว่า vacuum ซึ่งเป็นคำที่มาจากภาษากรีก มีความหมายว่า *ที่ว่าง* ในทางปฏิบัติถ้ามีภาชนะปิดอยู่อันหนึ่งแล้วมีการสูบเอาอากาศ ก๊าซ และ ไอของสารต่าง ๆ ในภาชนะนั้นออกมาก็จะเรียกสภาวะในภาชนะหลังการสูบว่า *สุญญากาศ* เห็นได้ว่าความเป็นสุญญากาศของภาชนะจะมากน้อยเพียงไหนขึ้นกับการสูบเอาอากาศออกจากภาชนะนั้นได้มากน้อยเพียงใด หากสูบอากาศออกจากภาชนะได้มากความเป็นสุญญากาศของภาชนะก็มาก นอกจากนี้ในความเป็นจริงแล้วไม่มีระบบใดหรือภาชนะใดที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์ เพราะไม่มีเครื่องมือใดที่สามารถสูบเอาอากาศ ก๊าซ และไอชนิดอื่น ๆ ออกจากระบบนั้นหรือภาชนะนั้นได้อย่างหมดจด

1.1.1 ธรรมชาติโดยทั่ว ๆ ไปของก๊าซ

คำว่า *ก๊าซ* ในเรื่องของสุญญากาศหมายถึง ก๊าซที่ไม่กลั่นตัว (noncondensable gases) และไอ (vapors) ทุกชนิด[1] โดยคำว่าก๊าซที่ไม่กลั่นตัวหมายถึง ก๊าซที่ไม่สามารถที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวหรืออัดตัวเป็นของแข็งได้ภายใต้สภาวะปกติ ตัวอย่างของก๊าซที่ไม่กลั่นตัวได้แก่ อากาศแห้ง และไอน้ำก็เป็นตัวอย่างที่ดีของไอที่มีอยู่ในอากาศโดยทั่วไป

ก๊าซประกอบไปด้วยโมเลกุลเล็ก ๆ จำนวนมากมาย โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วในทุกทิศทุกทางและอาจจะชนกันเองหรือชนกับผนังภาชนะแล้วเกิดการสะท้อน การชนผนังภาชนะทำให้เกิดความดันขึ้นที่ผนังนั้น



รูปที่ 1.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซในภาชนะปิด

รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซในภาชนะปิด ซึ่งแต่ละโมเลกุลอาจจะมีอัตราเร็วต่างกันไป อย่างไรก็ดีสามารถพิจารณาได้ว่าโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากัน เรียกอัตราเร็วนี้ว่า *อัตราเร็วเฉลี่ย* นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโดยเฉลี่ยแล้วก็ยังถือได้ว่าจำนวนโมเลกุลที่

เคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางเท่ากันอีกด้วย และเมื่อก๊าซในภาชนะได้รับความร้อนจากภายนอก อัตราเร็วเฉลี่ยนี้จะมีค่าสูงขึ้น

เนื่องจากอากาศเป็นก๊าซที่มีส่วนเกี่ยวข้องมากเรื่องของสุญญากาศ การทราบข้อมูลเกี่ยวกับอากาศจึงอาจจะเป็นประโยชน์ อากาศประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งมีไนโตรเจนและอ๊อกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ตาราง 1.1 แสดงถึงองค์ประกอบของก๊าซต่าง ๆ ในอากาศที่ระดับน้ำทะเล

ชนิดของก๊าซ	ปริมาตร ร้อยละ
ไนโตรเจน	78.08
อ๊อกซิเจน	20.95
อาร์กอน	0.93
คาร์บอนไดอ๊อกไซด์	0.03
นีออน	0.0018
ฮีเลียม	0.0005
มีเทน	0.0002
คริพตอน	0.0001
ไฮโดรเจน	0.00005

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของอากาศแห้งและปริมาตรเป็นร้อยละที่ระดับน้ำทะเล[2]

ไม่ว่าจะเป็นอากาศหรือก๊าซชนิดอื่น ๆ หรือไอของธาตุใด ๆ ก็ตาม ระยะระหว่างโมเลกุลจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลมาก ๆ และถ้ามีการสูบเอาก๊าซนั้นออกไปจากภาชนะปิด ระยะระหว่างโมเลกุลนี้ก็จะมีค่ามากขึ้น

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าโมเลกุลก๊าซวิ่งด้วยอัตราเร็วสูงในทิศทางต่าง ๆ กัน ซึ่งนอกจากจะทำให้โมเลกุลชนกันเองแล้ว ยังทำให้โมเลกุลเหล่านี้ชนผนังภาชนะอีกด้วย โดยเมื่อโมเลกุลชนผนังภาชนะแล้วจะสะท้อนกลับเข้ามานั้น โมเลกุลก็จะถ่ายทอดโมเมนตัมให้แก่ผนังทำให้เกิดเป็นแรงที่กระทำต่อผนังภาชนะ แรงที่โมเลกุลก๊าซกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วยของผนังก็คือ **ความดัน (pressure)** ของก๊าซในภาชนะนั้นนั่นเอง ซึ่งความดันนี้เป็นปริมาณที่สำคัญมากในทางสุญญากาศ เมื่อมีการสูบเอาก๊าซออกจากภาชนะความดันก็จะลดลง เพราะจำนวนโมเลกุลที่ชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาลดลง เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ก๊าซอุณหภูมิของก๊าซก็จะสูงขึ้น อันมีผลทำให้อัตราเร็วของโมเลกุลภายในมากขึ้นไปด้วย จำนวนครั้งที่โมเลกุลชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาจึงเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้

ความดันของก๊าซเพิ่มขึ้น

1.1.2 หน่วยของความดัน

จากนิยามของความดันเห็นได้ว่าหน่วยของความดันคือหน่วยของ แรง/พื้นที่ หน่วยของความดันในระบบ SI คือ *นิวตัน/ตารางเมตร* หรือ *พาสคาล* มีการกำหนดค่าความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลเมื่ออุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสว่าเท่ากับ *ความดัน 1 บรรยากาศ* ซึ่งความดันนี้มีค่าประมาณ 10^5 นิวตัน/ตารางเมตร ความดันขนาดนี้สามารถดันปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้สูงถึง 760 มิลลิเมตร และจากการที่ความดันของอากาศสามารถดันให้ปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้นี้เองจึงได้มีการใช้ *ความสูงของปรอท* เป็นหน่วยวัดความดันขึ้นอีกหน่วยหนึ่ง โดยความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 10^5 นิวตัน/ตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตรของปรอท

นอกจากหน่วย บรรยากาศ นิวตัน/ตารางเมตร และ ความสูงของปรอทแล้วยังมีการใช้หน่วยอื่น ๆ ในการวัดความดันอีก ดังนี้

หน่วย ทอรร์ (torr) โดยกำหนดว่า 1 ทอรร์ เท่ากับ 1 มิลลิเมตรของปรอท

หน่วย บาร์ (bar) โดยกำหนดว่า 1 บาร์ เท่ากับ 750.06 มิลลิเมตรของปรอท

หน่วย ไมครอน (micron) กำหนดว่า 1 ไมครอน เท่ากับ 10^{-3} ทอรร์

ในทางเทคนิคเกี่ยวกับสุญญากาศมักใช้หน่วย มิลลิเมตรของปรอท หรือ ทอรร์ หรือ บาร์ ในการวัดความดัน มากกว่าหน่วย นิวตัน/ตารางเมตร

1.1.3 องศาของความเป็นสุญญากาศ

องศาแห่งสุญญากาศเป็นปริมาณที่แสดงว่าระบบปิดหนึ่ง ๆ มีความเป็นสุญญากาศมากน้อยเท่าใด ทั้งนี้ได้มีการจำแนกถึงความเป็นสุญญากาศโดยใช้ความดันภายในระบบนั้นเป็นเกณฑ์ ดังนี้[1]

องศาแห่งสุญญากาศ	ความดันภายในระบบ (มิลลิเมตรของปรอท)
ต่ำ (low vacuum)	760 - 25
ปานกลาง (medium vacuum)	25 - 10^{-3}
สูง (high vacuum)	10^{-3} - 10^{-6}
สูงมาก (very high vacumm)	10^{-6} - 10^{-9}
สูงอย่างมาก (ultra high vacuum)	10^{-9} และน้อยกว่า

ตารางที่ 1.2 การจำแนกองศาแห่งสุญญากาศ ตามความดันภายในระบบ

1.1.4 ระยะปลอดการชน (Mean Free Path)

ในหัวข้อก่อน ๆ ได้ชี้ให้เห็นว่า โมเลกุลก๊าซในภาชนะมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงและอาจชนกันเองก่อนที่จะชนผนังภาชนะ พิจารณาโมเลกุลเฉพาะตัวโมเลกุลหนึ่งซึ่งจะเรียกว่าโมเลกุล A ระยะทางที่ Aเคลื่อนที่ได้หลังการชนกับโมเลกุลอื่นแต่ละครั้งไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาโมเลกุล B อีกตัวหนึ่งก็จะพบว่าระยะระหว่างการชนของ B ไม่เท่ากับของ A อย่างไรก็ดีสามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างการชนของแต่ละโมเลกุลของก๊าซได้ เรียกระยะเฉลี่ยนี้ว่า *ระยะปลอดการชน*

ค่าของระยะปลอดการชนขึ้นกับความดัน โดยก๊าซที่มีความดันมากจะมีระยะปลอดการชนที่สั้น ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ก๊าซที่มีความดันมากจะมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงกว่าก๊าซความดันต่ำ และสำหรับระบบปิดอันหนึ่ง ๆ ถ้าความดันของก๊าซในระบบนั้นต่ำพอ โมเลกุลของก๊าซก็จะสามารถเคลื่อนที่จากผนังด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งได้โดยไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่น เรียกความดันในสภาวะนี้ว่า *ช่วงความดันของโมเลกุลอิสระ (free molecule pressure region)*[1] ซึ่งในสภาวะนี้ระยะปลอดการชนจะมีค่ายาวมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะที่ใส่ก๊าซ ในทางกลับกันก็มีช่วงของความดันที่ระยะปลอดการชนมีค่าน้อยกว่าขนาดของภาชนะมาก ในกรณีเช่นนี้เมื่อโมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งโมเลกุลนั้นจะชนกับโมเลกุลอื่นหลายครั้ง หากก๊าซในสภาวะดังกล่าวนี้กำลังไหลอยู่ในท่อ การไหลจะมีลักษณะเหมือนการไหลของของเหลวที่มีความหนืดสูงจึงเรียกความดันในช่วงที่มีระยะปลอดการชนสั้น ๆ นี้ว่า ช่วงหนืด (viscous region)[1]

ค่าของระยะปลอดการชนของก๊าซแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยก๊าซที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าก๊าซที่มีโมเลกุลเล็กกว่า และถึงแม้ว่าอากาศจะประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด แต่ก็ได้มีการหาค่าเฉลี่ยของระยะปลอดการชนของอากาศไว้ดังนี้[1]

ระยะปลอดการชน (เซนติเมตร) = 5/(ความดันในหน่วยไมครอน)

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ระยะปลอดการชนเป็นปริมาณที่มีความสำคัญต่อการวัดการไหลของก๊าซระหว่างปลายทั้งสองของท่อที่มีความดันต่างกัน

1.1.5 ผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อก๊าซ

เมื่อมีความดันภายนอกมากระทำต่อก๊าซปริมาณหนึ่ง ก๊าซปริมาณนั้นจะมีปริมาตรลดลง บอยล์ (Boyle) ได้ศึกษาผลของความดันที่มีต่อก้อนก๊าซจนได้ผลสรุปออกมาเป็นกฎของบอยล์ซึ่งมีใจความว่า

เมื่ออุณหภูมิคงที่ ปริมาตรของก้อนก๊าซจะแปรผันอย่างผกผันกับความดันของก๊าซนั้น

นอกจากนี้ ชาร์ล (Charle) ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาตรของก๊าซและนำผลการศึกษานี้

ตั้งเป็นกฎของชาร์ล โดยกฎนี้มีใจความว่า

เมื่อความดันคงที่ ปริมาตรของก๊าซจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิของก๊าซในหน่วยองศาสัมบูรณ์

จะเห็นว่ากฎของบอยล์และกฎของชาร์ล ได้กล่าวถึงผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อปริมาตรของก๊าซ โดยเมื่อปริมาณหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอีกปริมาณหนึ่งต้องคงที่ แต่ในทางปฏิบัติทั้งอุณหภูมิและความดันอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้พร้อม ๆ กัน การศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองนี้พร้อม ๆ กันที่มีต่อก๊าซทำให้เกิด *กฎก๊าซ (Gas Law)* ขึ้นโดยกฎนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของก๊าซเมื่อความดัน อุณหภูมิ ตลอดจน จำนวนโมลของก๊าซเปลี่ยนไป กฎนี้เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$PV = nRT$$

โดย P = ความดันของก๊าซ

V = ปริมาตรของก๊าซ

n = จำนวนโมลในก้อนก๊าซ

T = อุณหภูมิของก๊าซในหน่วยองศาสัมบูรณ์

R = ค่านิจของก๊าซ ซึ่งมีค่าประมาณ 8.31 ในระบบ SI

จากกฎก๊าซนี้เห็นว่า ถ้าจำนวนโมลของก๊าซคงที่ ผลคูณระหว่างความดันและปริมาตรหารด้วยอุณหภูมิในหน่วยองศาสมบูรณ์ของก๊าซก้อนหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ก็คือค่านิจของก๊าซนั่นเอง

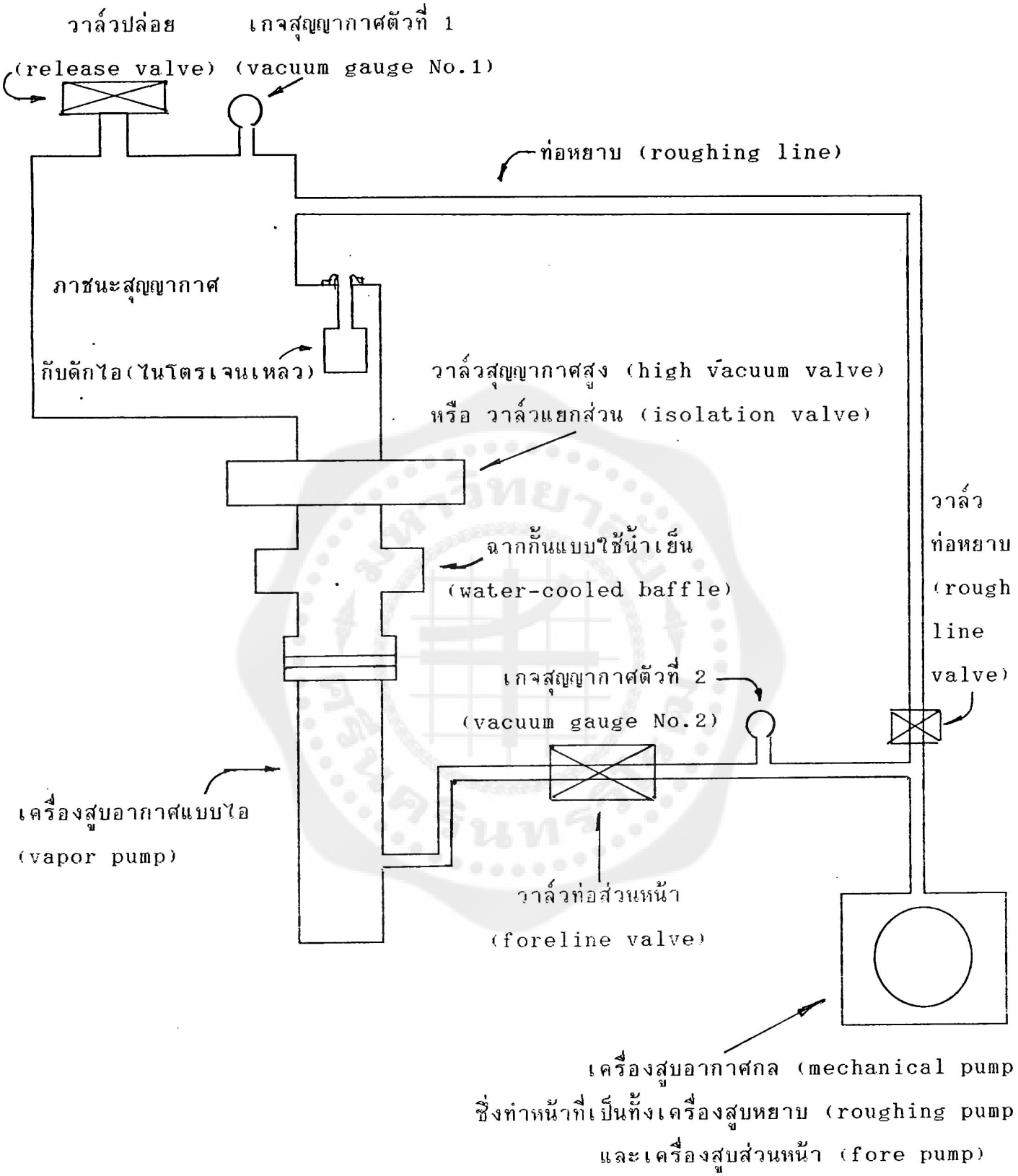
1.2 ระบบสุญญากาศ

1.2.1 ระบบสุญญากาศและปริมาณที่เกี่ยวข้อง

ระบบสุญญากาศทั้งหลายอาจจะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน อย่างไรก็ตีระบบสุญญากาศหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ส่วนที่ต้องการให้เป็นสุญญากาศ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า ***ภาชนะสุญญากาศ*** (vacuum vessel)
- ระบบสูบอากาศ
- ระบบท่อที่เชื่อมระหว่างระบบสูบอากาศ และ ภาชนะสุญญากาศ

นอกจากส่วนประกอบหลักเหล่านี้แล้วอาจจะมีอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติมเช่น วาล์ว(valve) ที่ดักไอ(trap) เป็นต้น ความจำเป็นและความต้องการอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นกับการออกแบบและการใช้งาน



รูปที่ 1.2 ระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} มิลลิเมตรของปรอท

ถ้าต้องการให้ภาชนะสุญญากาศมีความดัน 10^{-3} มิลลิเมตรของปรอทหรือสูงกว่าก็ทำได้โดยต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับเครื่องสูบกลโรตารี (rotary mechanical pump) ก็เป็นการเพียงพอ แต่ถ้าต้องการให้ภาชนะมีความดันต่ำขนาด 10^{-5} มิลลิเมตรของปรอทหรือต่ำกว่า ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบอากาศแบบไอ (vapor pump) ร่วมกับเครื่องสูบกล รูปที่ 1.2 แสดงผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่ให้ความดันต่ำกว่า 10^{-5} มิลลิเมตรของปรอท ท่อหยาบ (roughing line) ในระบบนี้เป็นท่อที่ต่อเชื่อมระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบกลโดยตรง โดยก่อนที่จะใช้เครื่องสูบแบบไอสูบอากาศออกจากภาชนะ จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบกลทำการสูบจนความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 10^{-3} มิลลิเมตรของปรอทเสียก่อน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการเรียกเครื่องสูบกลในระบบนี้ว่า *เครื่องสูบหยาบ (roughing pump)*

ในขณะที่เครื่องสูบกลกำลังทำงานนี้ต้องเปิดวาล์วท่อหยาบ (roughing line valve) พร้อมกับปิดวาล์วท่อส่วนหน้า (foreline valve) จนความดันในภาชนะมีค่า 10^{-2} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตรของปรอทแล้วจึงทำการสูบอากาศที่เหลือด้วยเครื่องสูบอากาศแบบไอ โดยในขณะนี้จะต้องปิดวาล์วท่อหยาบพร้อมกับเปิดวาล์วท่อส่วนหน้าและวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) ซึ่งวาล์วตัวหลังนี้สามารถแยกภาชนะสุญญากาศออกจากส่วนที่เหลือของระบบได้ บางครั้งจึงเรียกวาล์วตัวนี้ว่า *วาล์วแยกส่วน (isolation valve)* อากาศที่เครื่องสูบแบบไอสูบออกจากภาชนะจะไปรวมกันอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องสูบแบบไอ จากนั้นเครื่องสูบกลจะสูบเอาอากาศส่วนนี้ให้ออกสู่ภายนอกอีกต่อหนึ่ง เรียกเครื่องสูบกลที่ทำหน้าที่นี้ว่า *เครื่องสูบส่วนหน้า* (fore pump) เรียกท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบแบบไอกับเครื่องสูบส่วนหน้าว่า *ท่อส่วนหน้า* (fore line) และเรียกวาล์วปิด-เปิดท่อส่วนหน้าว่า *วาล์วท่อส่วนหน้า* ระบบสุญญากาศบางระบบแยกเครื่องสูบกลที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบส่วนหน้าและเครื่องสูบหยาบออกจากกัน แต่บางระบบก็ใช้เครื่องสูบเพียงตัวเดียวในการทำหน้าที่ทั้งสอง ระบบที่แสดงในรูปที่ 1.2 เป็นระบบที่ใช้เครื่องสูบกลเพียงตัวเดียว

วาล์วปล่อย (release valve) ที่แสดงในรูป 1.2 ทำหน้าที่ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะทำให้ความดันภายในภาชนะเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยจะเปิดวาล์วปล่อยนี้เมื่อไม่ต้องการให้สภาพภายในภาชนะไม่เป็นสุญญากาศ

เครื่องมือวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศเรียกว่าเกจสุญญากาศ (vacuum gauge) ซึ่งระบบสุญญากาศที่แสดงในรูปที่ 1.2 ประกอบด้วยเครื่องวัดนี้ 2 ตัวคือเกจสุญญากาศตัวที่ 1 เกจตัวนี้ต้องมีความสามารถวัดความดันต่ำได้ เพราะเครื่องวัดนี้ต้องวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} มิลลิเมตรของปรอท ส่วนเกจตัวที่ 2 ทำหน้าที่วัดความดันในท่อส่วนหน้าซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบแบบไอกับเครื่องสูบกล

นอกจากเครื่องสูบอากาศ วาล์ว และเครื่องวัดความดันแล้ว ระบบสุญญากาศความดันต่ำยังประกอบไปด้วยฉากกั้น (baffle) ซึ่งถ้าเครื่องสูบอากาศแบบไอในระบบเป็นแบบที่ใช้น้ำมันก็มักจะใช้ฉากกั้นแบบน้ำเย็น แต่ถ้าเครื่องสูบใช้ปรอทก็อาจจะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวมาเป็นฉากกั้น

1.2.2 ปริมาณของก๊าซ และ แรงขับ (Quantity of Gas and Throughput)

ได้มีการนิยาม *ปริมาณของก๊าซ* ว่า เป็นผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของก๊าซที่ปรากฏที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบนิยามของปริมาณก๊าซนี้กับกฎก๊าซจะเห็นได้ว่า ค่าของปริมาณก๊าซนี้แปรผันโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของก๊าซ

นอกจาก *ปริมาณของก๊าซ* แล้วยังมีการกำหนดปริมาณที่เรียกว่า *แรงขับ (throughput)* ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซโดยกำหนดว่า *ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ แรงขับ ก็คือ ปริมาณของก๊าซที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของส่วนของระบบสุญญากาศในหนึ่งหน่วยเวลา*

รูปที่ 1.3 การไหลของก๊าซในระบบสุญญากาศ

ในรูปที่ 1.3 การที่ก๊าซจะไหลจากซ้ายไปขวาได้นั้นความดันทางซ้ายจะต้องมากกว่าความดันทางขวา ถ้าสามารถวัดปริมาณก๊าซที่ผ่านระนาบ A ได้โดยตรงว่ามีค่าเท่าใดในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ จะคำนวณค่าแรงขับได้โดยตรง โดยนำจำนวนของก๊าซนั้นหารด้วยช่วงเวลาที่ใช้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดปริมาณของก๊าซได้โดยตรง โดยปริมาณที่สามารถวัดได้คือความดันที่จุด A และปริมาตรก๊าซที่ไหลผ่านระนาบ A ในหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นถ้าให้

P เป็นความดันที่จุด A

V เป็นปริมาตรก๊าซที่ไหลผ่านระนาบ A ในเวลา t วินาที

Q เป็นแรงขับ

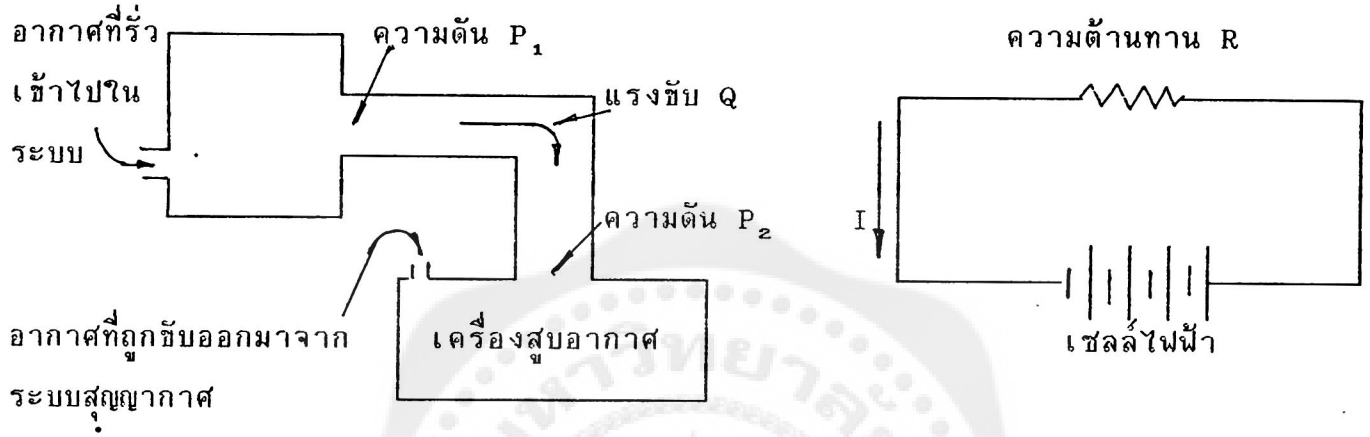
จะได้ว่า $Q = PV/t$

หน่วยของแรงขับในระบบ SI คือ พาสคาล-เมตร^3/วินาที

1.2.3 การเปรียบเทียบระบบสุญญากาศกับวงจรไฟฟ้า

การทำความเข้าใจระบบสุญญากาศ อาจทำได้โดยเปรียบเทียบระบบสุญญากาศกับวงจรไฟฟ้า โดยเครื่องสูบอากาศและการไหลของก๊าซในระบบเปรียบได้กับเซลล์ และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ ในรูปที่ 1.4 เครื่องสูบอากาศจะสูบก๊าซที่รั่วเข้ามาในระบบทำให้ก๊าซเหล่านี้ไหลผ่านระบบสุญญากาศทั้งระบบ และถูกขับออกไปสู่อากาศภายนอกตรงบริเวณเครื่องสูบนั้น การไหลของอากาศผ่านระบบ

สุญญากาศนี้เทียบได้กับการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร โดยกระแส I ก็คือปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านจุดต่าง ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาหรือแรงขับ ส่วนเครื่องสูบอากาศก็เทียบได้กับเซลล์ไฟฟ้า ในทางไฟฟ้านั้นความต้านทานของวงจรมีสาเหตุมาจากทั้งตัวต้านทานและเส้นลวดตัวนำ และความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองของตัวต้านทาน ความต้านทาน และกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ V = IR



รูปที่ 1.4 การเปรียบเทียบระหว่างระบบสุญญากาศกับวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย

ในระบบสุญญากาศส่วนประกอบต่าง ๆ ของมันเช่น ท่อ หรือ กับดักไอ เป็นตัวก่อให้เกิดความต้านทานต่อการไหลของก๊าซ เรียกความต้านทานนี้ว่าอิมพีแดนซ์ (impedance) จึงเทียบอิมพีแดนซ์นี้ได้กับความต้านทานในทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเทียบความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าได้กับ ความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างปลายทั้งสองของอุปกรณ์ในระบบสุญญากาศ การเปรียบเทียบนี้ทำให้เขียนกฎของโอห์มสำหรับระบบสุญญากาศได้ว่า

ความดันที่แตกต่างกัน = ความต้านทาน x แรงขับ

ดังนั้นถ้าให้ W เป็น ความต้านทานของระบบสุญญากาศ

P_1 เป็น ความดันตรงจุดตั้งต้นของการไหลของอากาศ

P_2 เป็น ความดันตรงจุดปลายของการไหลของอากาศ

Q เป็น แรงขับ

ก็จะได้ว่า $$W = \frac{P_1 - P_2}{Q}$$

1.2.4 ความต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม

ในทางไฟฟ้าเมื่อมีความต้านทานต่อกันแบบอนุกรม ความต้านทานรวมจะมีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานแต่ละตัว ในระบบสุญญากาศก็เช่นกันเมื่อส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ความมต้านทานของระบบที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับผลบวกของความต้านทานของส่วนประกอบแต่ละตัว เช่น เครื่องสูบอากาศอาจจะต่อกับภาชนะสุญญากาศโดยผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ท่อทั้งหลาย กับดักไอ ฉากกั้น และ วาล์วต่าง ๆ ดังในรูปที่ 1.2 ถ้าให้

W_1 เป็น ความต้านทานของเครื่องสูบอากาศ

W_2 เป็น ความต้านทานของกับดักไอ

W_3 เป็น ความต้านทานของฉากกั้น

W_4 เป็น ความต้านทานของวาล์วต่าง ๆ

W เป็น ความต้านทานรวม

จะได้ว่า $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$

ในทางปฏิบัติ บางครั้งอาจจะไม่กล่าวถึงความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ แต่จะกล่าวถึง *ความนำ (conductance)* แทนซึ่งทั้งในทางไฟฟ้าและสุญญากาศได้นิยามความนำไว้ว่า *ความนำ คือ ส่วนกลับของความต้านทาน* เหตุที่ใช้ความนำแทนความต้านทานเพราะเมื่อนำนิยามของความนำนี้ไปรวมกับนิยามของอัตราเร็วของเครื่องสูบแล้ว จะทำให้ได้อัตราเร็วของการสูบที่แท้จริงที่ภาชนะสุญญากาศ ในตัวอย่างของระบบสุญญากาศที่กล่าวมาข้างบน ถ้า

U_1 เป็น ความนำของเครื่องสูบอากาศ

U_2 เป็น ความนำของกับดักไอ

U_3 เป็น ความนำของฉากกั้น

U_4 เป็น ความนำของวาล์วต่าง ๆ

U เป็น ความนำรวม

ก็จะสามารถเขียนความนำรวมของระบบสุญญากาศได้ว่า

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} + \frac{1}{U_4}$$

หน่วยของความนำในระบบ SI คือ ลูกบาศก์เมตร/วินาที ในทางปฏิบัติมักจะใช้หน่วย ลิตร/นาที หรือ ลิตร/วินาที เป็นหน่วยของความนำ สำหรับหน่วยของความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ก็เป็นส่วนกลับของหน่วยที่กล่าวนี้ นั่นคือหน่วยของความต้านทานอาจจะเป็น วินาที/ลูกบาศก์เมตร หรือ นาที/ลิตร หรือ วินาที/ลิตร ทั้งนี้ขึ้นกับระบบที่ใช้

1.2.5 การต่อความต้านทานแบบขนาน

ในทางไฟฟ้าถ้ามีความต้านทานหลายตัวต่อกันแบบขนาน ความต้านทานรวมของวงจรก็จะลดลง ทั้งนี้เพราะมีเส้นทางหลายเส้นที่จะให้กระแสไหลไปได้พร้อม ๆ กัน ในระบบสุญญากาศก็เช่นกันหากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเชื่อมต่อกันแบบขนาน ความต้านทานของระบบที่มีต่อการไหลของอากาศก็จะลดลงอันมีผลทำให้ค่าความนำเพิ่มมากขึ้น

ถ้าให้ $W_1, W_2, W_3, W_4, \ldots$ เป็นความต้านทานของอุปกรณ์ชิ้นที่ 1,2,3,4,... ของระบบสุญญากาศ ตามลำดับโดยอุปกรณ์เหล่านี้ต่อกันแบบขนาน และให้ W เป็นความต้านทานรวมของระบบ จะได้ว่า

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \frac{1}{W_3} + \frac{1}{W_4} + \ldots$$

และถ้า $U_1, U_2, U_3, U_4, \ldots$ เป็นความนำของอุปกรณ์เหล่านี้ในขณะที่ U เป็นความนำรวมของระบบ จะได้ว่า

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \ldots$$

ตัวอย่างของการต่ออุปกรณ์แบบขนานได้แก่การต่อท่อหยาบจากภาชนะสุญญากาศไปยังเครื่องสูบกลตังที่แสดงในรูป 1.2 ซึ่งท่อนี้ต่อแบบขนานกับส่วนอื่นของระบบสุญญากาศ

1.2.6 อัตราเร็วของการสูบ (Pump Speed)

สิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศสนใจก็คือ ระบบที่ตนมีนั้นสามารถทำให้สภาพภายในภาชนะเป็นสุญญากาศได้เร็วเพียงใด ปริมาณที่บอกถึงอัตรานี้ก็คือ อัตราเร็วของการสูบ โดยกำหนดว่า[1]

อัตราเร็วของการสูบ ณ จุดใดในระบบสุญญากาศ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงขับต่อความดัน ณ จุดนั้น

นั่นคือ

อัตราเร็วของการสูบ = แรงขับ/ความดัน

หรือ $S = Q/P$

โดย S เป็นอัตราเร็วของการสูบ

Q เป็นแรงขับ

และ P เป็นความดัน

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่า แรงขับก็คือผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านไปต่อหน่วยเวลา

จึงกล่าวได้ว่า อัตราเร็วของการสูบก็คือปริมาตรก๊าซที่ไหลไปในหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นหน่วยของอัตราสูบในระบบ SI จึงเป็น ลูกบาศก์เมตร/วินาที สำหรับในทางปฏิบัติมักจะใช้หน่วย ลิตร/นาที

เครื่องสูบอากาศแต่ละเครื่องจะสูบอากาศ (ได้แก่ก๊าซและไอชนิดต่าง ๆ) ออกจากระบบได้ในช่วงความดันช่วงหนึ่งเท่านั้น โดยจะเป็นความดันในช่วงใดนั้นขึ้นกับการออกแบบและสมบัติของเครื่องสูบอากาศ นอกจากนี้อัตราเร็วในการสูบจะลดลงเมื่อความดันลดลงและเมื่อความดันในระบบสุญญากาศมีค่าลดลงถึง *ค่าความดันต่ำสุด (ultimate pressure)* อัตราเร็วของการสูบจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ค่าความดันต่ำสุดที่กล่าวถึงนี้คือ ค่าความดันน้อยที่สุดตรงบริเวณช่องทางเข้าของเครื่องสูบอากาศที่เครื่องนั้นสามารถทำได้[3] ถ้าระบบสุญญากาศเป็นระบบที่ไม่สะอาด คือมีก๊าซและไอที่ต้องสูบออกเป็นจำนวนมาก ก็ต้องใช้เวลาในการสูบนานจึงจะทำให้ความดันตรงบริเวณช่องทางเข้าของเครื่องสูบมีค่าเท่ากับความดันต่ำสุด และถ้าระบบมีการรั่วไหลก็จะทำให้ความดันน้อยที่สุดที่ได้มีค่าสูงกว่าความดันต่ำสุดอีกด้วย

1.2.7 การสูญเสียอัตราเร็วของการสูบ

ถ้าสามารถต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับเครื่องสูบอากาศได้โดยตรง อัตราเร็วของการสูบที่ภาชนะก็จะมีค่าเท่ากับอัตราเร็วที่ช่องทางเข้าของเครื่องสูบ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับเครื่องสูบโดยตรง โดยจำเป็นต้องต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ (เช่น ท่อต่าง ๆ) ไว้ระหว่างภาชนะกับเครื่องสูบ ทำให้อัตราเร็วของการสูบที่ภาชนะมีค่าน้อยกว่าอัตราสูบที่ช่องทางเข้าของเครื่องสูบ เรียกลักษณะนี้ว่าเกิดการสูญเสียอัตราเร็วของการสูบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการสูบตรงบริเวณทั้ง 2 เป็นดังนี้[1]

$$S_n = \frac{S_m}{1 + WS_m}$$

โดย S_n เป็น อัตราเร็วของการสูบตรงบริเวณภาชนะสุญญากาศ

S_m เป็น อัตราเร็วของการสูบที่ช่องทางเข้าของเครื่องสูบอากาศ

W เป็น อิมพีแดนซ์ หรือ ความต้านทานของอุปกรณ์สุญญากาศที่ต่อระหว่างภาชนะและเครื่องสูบ หรือถ้าให้ U เป็นค่าความนำของระบบสุญญากาศนี้ ก็จะเขียนสมการข้างบนได้ว่า

$$S_n = \frac{S_m U}{S_m + U}$$

ตัวอย่างเช่น ระบบสุญญากาศที่ต้องการอัตราเร็วของการสูบที่ภาชนะ 1200 ลิตร/นาที และความนำของอุปกรณ์อื่นเป็น 5000 ลิตร/นาที ก็จะคำนวณหาอัตราเร็วของการสูบตรงเครื่องสูบอากาศได้ดังนี้

$$S_n = \frac{S_m U}{S_m + U}$$

หรือ

$$S_m = \frac{S_n U}{U - S_n}$$

ทำให้ได้

$$S_m = \frac{1200 \times 5000}{5000 - 1200} = 1580 \text{ ลิตร/นาที}$$

นั่นคือถ้าต้องการให้อัตราเร็วของการสูบที่ภาชนะสุญญากาศมีค่าเป็น 1280 ลิตร/นาที โดยอุปกรณ์อื่นมีความนำ 5000 ลิตร/นาที อัตราเร็วของการสูบที่เครื่องสูบจะต้องมีค่าอย่างน้อย 1580 ลิตร/นาที การที่กล่าวว่าความเร็วของการสูบต้องมีค่าอย่างน้อย 1580 ลิตร/นาที ก็เพราะในการคำนวณถือว่าไม่มีการรั่วไหลของอากาศในระบบ แต่ในทางปฏิบัติระบบสุญญากาศต้องมีการรั่วไหลบ้างไม่มากก็น้อย จึงต้องใช้เครื่องสูบอากาศที่มีอัตราเร็วของการสูบสูงกว่าค่าที่คำนวณได้

1.2.8 ดีซอฟชัน (desorption)

ดีซอฟชันคือการที่โมเลกุลก๊าซหลุดออกมาจากผิวของภาชนะ ถ้าเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในภาชนะที่ภายในมีความดันต่ำจะเรียกว่า *การขับก๊าซ (outgassing)* โดยขบวนการขับก๊าซนี้จะรวมเอาก๊าซที่ซึมผ่านผนังภาชนะไว้ด้วย ตาราง 1.3[3] แสดงถึงค่านิจของการขับก๊าซ หรือ อัตราการหลุดของก๊าซจากผิวต่อพื้นที่

วัสดุ	$k \times 10^{-7}$ torr.l.s^{-1}.cm^2
เหล็กกล้า	1.75
ทองแดง	23.0
ทองเหลือง	10.0
ยางซิลิโคน	90.0
ไนลอน	120.0

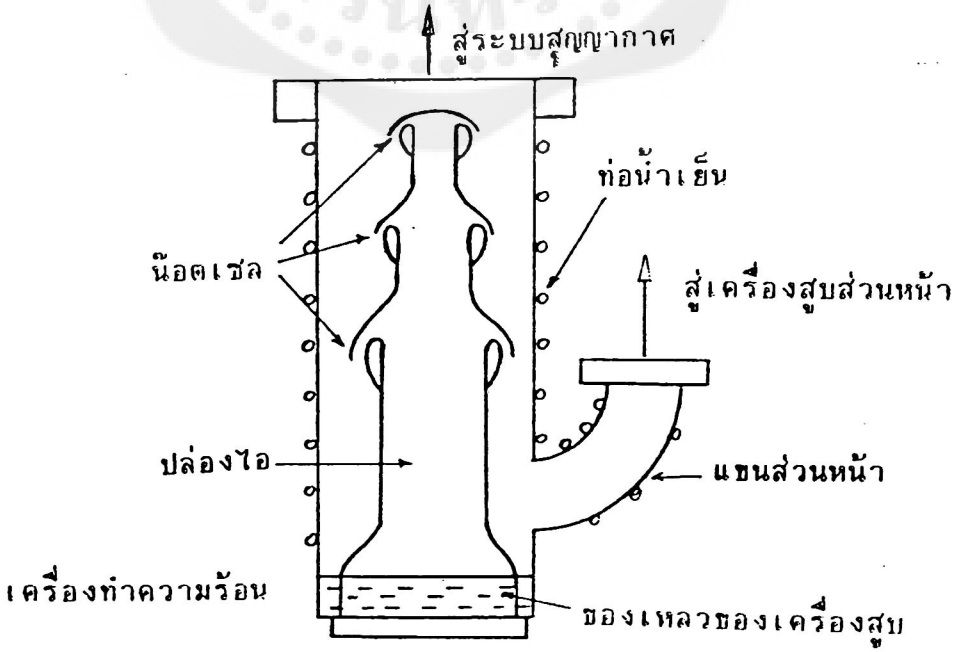
ตารางที่ 1.3 แสดงค่านิจของการขับก๊าซ (k) ของวัตถุชนิดต่าง ๆ

1.3 เครื่องสูบอากาศแบบไอ (vapor pump)

เครื่องสูบอากาศแบบไอ เป็นเครื่องสูบอากาศที่ใช้ไอของของเหลวเป็นตัวการสำคัญในการสูบ ในที่นี้จะเรียกของเหลวนี้ว่า ของเหลวของเครื่องสูบ (pump fluid) ระบบสุญญากาศที่มีเครื่องสูบแบบไอสามารถลดความดันในภาชนะสุญญากาศลงได้ถึง 10^{-7} มิลลิเมตรของปรอท[1] ด้วยเหตุนี้จึงเรียกเครื่องสูบอากาศแบบไอว่า *เครื่องสูบความดันต่ำ*

มีการแบ่งเครื่องสูบอากาศแบบไอออกเป็น 2 ชนิด[1] ซึ่งทั้ง 2 ชนิดมีส่วนประกอบร่วมกันคือ หม้อต้ม (boiler) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการต้มของเหลวของเครื่องสูบให้กลายเป็นไอ โดยของเหลวนี้อาจจะเป็นน้ำมันหรือปรอทก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับการออกแบบ เมื่อของเหลวกลายเป็นไอแล้ว ไอนี้ก็จะเป็นตัวผลักดันให้ก๊าซหรือไอของสารต่าง ๆ ที่หลุดออกมาจากภาชนะสุญญากาศให้ออกไปนอกระบบ เครื่องสูบทั้ง 2 ชนิดนี้คือ เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ (diffusion vapor pump) และเครื่องสูบอากาศแบบตัวฉีด (ejector pump) ในที่นี้จะกล่าวเพียงเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอเท่านั้น

รูปที่ 1.5 แสดงให้เห็นถึงหลักการของ *เครื่องสูบแบบแพร่ไอ* ไอของของเหลวของเครื่องสูบจากหม้อต้มไหลผ่านรูเปิดแคบ ๆ ที่เรียกว่าน๊อตเซลด้วยความเร็วสูง ในทิศทางทำมุมก้มกับแนวระดับ เมื่อโมเลกุลก๊าซหรือไอที่ออกมาจากภาชนะสุญญากาศ เคลื่อนที่ลงมาจนเข้ามาอยู่ในกระแส (jet) ของไอของของเหลว ไอนี้ก็จะผลักดันให้โมเลกุลก๊าซหรือไอจากภาชนะเคลื่อนที่ลงไปทางด้านล่างของเครื่องสูบ จากนั้นเครื่องสูบกลก็จะสูบเอาโมเลกุลของอากาศและไอนี้ออกไปนอกระบบสุญญากาศ อันเป็นการหมดขั้นตอนในการสูบ



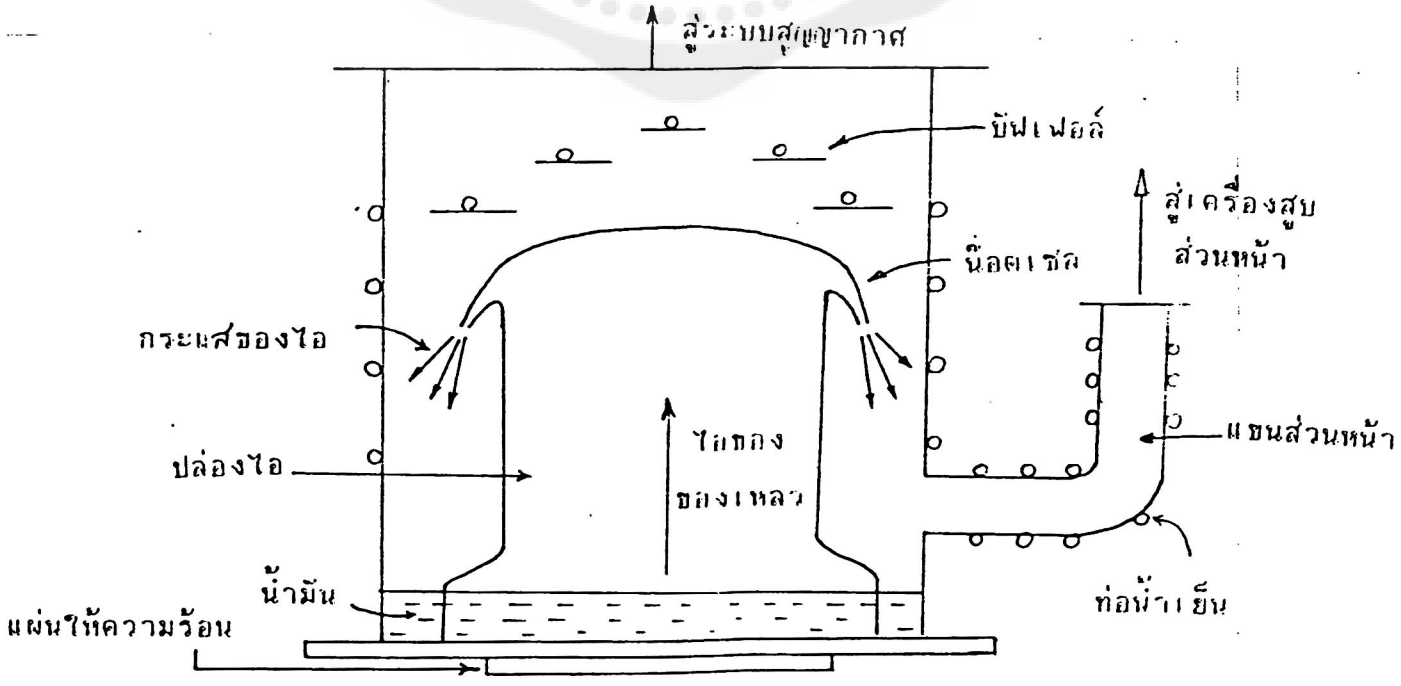
รูปที่ 1.5 เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ

จากกลไกการทำงานเห็นได้ว่า เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอที่ดีควรใช้เวลาในขั้นตอนของการผลักดันให้โมเลกุลก๊าซหรือไอจากภาชนะสุญญากาศลงมายังส่วนล่างของเครื่องให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อโมเลกุลก๊าซหรือไอเหล่านั้น จะได้มีโอกาสในการฟุ้งกระจายกลับเข้ามาในภาชนะสุญญากาศน้อยลง การที่เครื่องสูบจะมีสมบัติเช่นนี้ได้นั้นของเหลวของเครื่องสูบที่ใช้ต้องมีโมเลกุลขนาดใหญ่

นอกจากนี้การออกแบบเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอยังจะต้องตระหนักถึงระยะระหว่างขอบนอกของน็อตเซลกับผนังภายในของเครื่องสูบ โดยระยะดังกล่าวนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าระยะปลอดการชนของโมเลกุลหรือไอที่จะสูบออก ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลหรือไอเหล่านี้อันอาจจะส่งผลทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่กลับขึ้นไปยังภาชนะสุญญากาศอีกได้

1.3.1 ลักษณะโดยละเอียดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ

การเริ่มต้นใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอมีขึ้นในปี 1915[1] โดยใช้ปรอทเป็นของเหลวของเครื่องสูบ และในปี 1928 จึงได้เริ่มมีการใช้น้ำมันเป็นของเหลวของเครื่องสูบ ปัจจุบันเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเป็นของเหลวของเครื่องสูบ และเรียกเครื่องสูบอากาศที่ใช้น้ำมันนี้ว่า *เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน* รูปที่ 1.6 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ โดยของเหลวที่ใช้อาจจะเป็นปรอทหรือน้ำมันก็ได้ ในทางปฏิบัติเนื่องจากขนาดของน็อตเซลก็ดี ความร้อนที่ใช้ในการต้มของเหลวให้กลายเป็นไอก็ดี ตลอดจนระบบความเย็นที่ใช้ในการดักไอ ที่ใช้สำหรับปรอทและน้ำมันมีลักษณะต่างกัน ดังนั้นจะนำเครื่องสูบอากาศที่ออกแบบให้ใช้กับน้ำมันมาใช้กับปรอทไม่ได้ และเครื่องที่ออกแบบให้ใช้ปรอทก็ใช้กับน้ำมันไม่ได้เช่นกัน



รูปที่ 1.6 โครงสร้างของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ

ในรูป 1.6 เมื่อไอน้ำมัน (หรือไอปรอท) ลอยขึ้นมาตามปล่องไอ (chimney) ไปยังส่วนบน แล้วออกสู่ช่วงกลางของเครื่องสูบ ซึ่งช่วงกลางนี้อยู่ระหว่างผนังของเครื่องกับปล่องไอทางน็อตเซล เนื่องจากช่องทางออกของน็อตเซลมีขนาดเล็กไอของน้ำมันที่ออกมาจึงมีแรงขับดัน (คือมีลักษณะเป็นไอพ่น(jet)) ปลายของน็อตเซลมีทิศทำมุมก้มกับแนวราบและพุ่งไปยังผนังของเครื่อง ซึ่งมีท่อน้ำเย็นพันอยู่โดยรอบเป็นเกลียวตลอดความสูงของเครื่องสูบ เมื่อไอน้ำมันกระทบกับผนังซึ่งเย็นนี้ ไอก็จะกลั่นตัวเป็นของเหลวในลักษณะของฟิล์มบาง[4] กลับตกลงไปยังหม้อต้มอีกครั้ง อากาศที่ถูกสูบออกจึงไม่มีโอกาสที่ฟุ้งกระจายกลับไปยังภาชนะสุญญากาศอีกได้ การที่ไอน้ำมันกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวทำให้ระบบของเหลวของเครื่องสูบเป็นระบบปิด นั่นคือนำของเหลวที่ใช้ในการผลักดันอากาศจากภาชนะสุญญากาศให้ออกไปจากระบบ กลับมาใช้ใหม่ได้อีก

อากาศจากภาชนะสุญญากาศที่ถูกไอน้ำมันขับดันลงมาทางด้านล่างจะถูกเครื่องสูบส่วนหน้า ซึ่งมักจะเป็นเครื่องสูบกลโรตารี สูบออกไปนอกระบบสุญญากาศ เรียกท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันกับเครื่องสูบส่วนหน้าว่า แขนส่วนหน้า (forearm) ท่อนี้จะมีลักษณะตั้งขึ้นในแนวดิ่ง และมีท่อน้ำเย็นพันโดยรอบเป็นเกลียวตลอดทั้งท่อเช่นเดียวกับตัวเครื่องสูบ ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำมันหลุดออกไปจากเครื่องสูบอากาศความดันต่ำได้

ส่วนบนของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันจะเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศ โดยระหว่างระบบสุญญากาศกับเครื่องสูบจะมีฉากกำบัง (baffle) ต่ออยู่ ฉากดังกล่าวเป็นท่อใหญ่ที่มีท่อน้ำเย็นพันเป็นเกลียวโดยรอบ ฉากกำบังนี้มีหน้าที่ลดปริมาณของไอน้ำมันที่จะแพร่กระจายเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ

เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่แสดงในรูปที่ 1.6 มีน็อตเซลเพียงอันเดียวเรียกเครื่องสูบที่มีลักษณะนี้ว่าเครื่องสูบอากาศจังหวะเดียว (single-stage pump) เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอโดยทั่วไปมักจะมีน็อตเซลมากกว่า 1 อัน เรียกเครื่องสูบเหล่านี้ว่าเครื่องสูบอากาศแบบหลายจังหวะ (multi-stage pump)

1.3.2 การคำนวณอัตราเร็วของเครื่องสูบหนุนหลัง

สมการในการคำนวณอัตราเร็วของเครื่องสูบหนุนหลังคือ[3][5]

$$\text{อัตราเร็วของเครื่องสูบหนุนหลัง} > \frac{\text{แรงขับมากที่สุดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ}}{\text{ความดันวิกฤต}}$$

โดย ความดันวิกฤต(critical pressure) คือความดันของระบบสุญญากาศในขณะที่เครื่องสูบแบบแพร่ไอเริ่มทำงาน

1.4 การวัดอัตราเร็วของระบบสูบอากาศ

สมการที่แสดงค่าความดันในระบบสุญญากาศคือ[6]

$$PS = -V(dP/dt) + Q + Q_o \quad .....(1)$$

โดย P คือ ความดัน ณ จุดในระบบสุญญากาศที่กำลังพิจารณา

S คือ อัตราเร็วของเครื่องสูบ ณ จุดเดียวกัน

V คือ ปริมาตรของส่วนของระบบที่กำลังพิจารณา

Q คือ อัตราขับของก๊าซที่ไหลเข้าสู่ระบบ

Q_o คือ อัตราขับอันเนื่องมาจากการขับก๊าซ (outgassing) ของผนังของภาชนะ

ในการวัดอัตราการสูบของเครื่องสูบอากาศ ผู้วัดมักจะกำหนดเงื่อนไขเพื่อทำให้สมการ (1) ง่ายขึ้น เช่นกำหนดให้การขับก๊าซมีค่าน้อยจนตัด Q_o ทิ้งได้ และให้สภาวะที่ระบบสุญญากาศทำงานมีความดันคงที่และอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบมีค่าคงที่จนถือได้ว่า Q มีค่าคงที่ ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ทำให้เขียนสมการ (1) ได้ใหม่ว่า

$$S = Q/P \quad .....(2)$$

สมการ (2) ก็คือนิยามของอัตราการสูบที่ปรากฏอยู่ในหัวข้อ 3.3 ซึ่งสมการนี้ใช้ได้ดีกับช่วงความดันของเครื่องสูบกลทั้งหลาย[6] ในกรณีของเครื่องสูบกลนี้อัตราเร็วของการสูบขึ้นกับความดันที่ทางเข้าเครื่องเป็นอันมากและอัตราสูบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความดันทางเข้านี้มีค่าเข้าใกล้ความดันต่ำสุดของเครื่องสูบ ดังนั้นการวัดค่าความดันต่ำสุดของเครื่องสูบกลแต่ละเครื่องจึงทำได้โดยสังเกตอัตราการสูบของเครื่อง โดยความดันเมื่ออัตราการสูบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์คือความดันต่ำสุดของเครื่องสูบกล

การตรวจสอบว่าการขับก๊าซจากผนังภาชนะมีความสำคัญเพียงใด (หรือระบบมีการรั่วไหลเท่าใด) ทำได้โดยสูบอากาศออกจากระบบด้วยเครื่องสูบกลจนความดันลดลงมากที่สุด แล้วปิดวาล์วตรงเครื่องสูบซึ่งทำให้อัตราการสูบเป็นศูนย์ หากระบบไม่มีการรั่วไหล Q ในสมการ (1) จะเป็นศูนย์ ทำให้เขียนสมการ (1) ได้ใหม่ว่า

$$dP/dt = Q_o/V \quad .....(3)$$

เมื่ออินติเกรตสมการ (3) โดยกำหนดให้ความดันของระบบเมื่อเริ่มปิดวาล์วเท่ากับความดันต่ำสุด P_o และค่าความดันที่เวลา t ใด ๆ เป็น P ก็จะทำให้ได้ว่า

$$P = P_o + (Q_o/V)t \quad .....(4)$$

จากสมการ (4) เห็นได้ว่าหากบันทึกค่าความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนับจากเริ่มปิดวาล์ว แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟ ก็จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ Q_o/V โดยการแทนค่าปริมาตรของส่วนของระบบสุญญากาศที่กำลังพิจารณาก็จะทำให้ทราบค่าการขับก๊าซของผนังหรือ Q_o ได้ เมื่อนำค่า Q_o ที่ได้นี้ไปแทนค่าใน (1) โดยใช้เงื่อนไขว่าไม่มีการรั่วไหลทำให้ Q เท่ากับศูนย์ และที่ความดันต่ำสุดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันมีค่าเป็นศูนย์ ก็จะได้

$$S_o = Q_o/P_o \qquad \text{.....(5)}$$

โดย S_o เป็นอัตราการสูบที่ความดันต่ำสุด หากเงื่อนไขที่ใช้ในการพิสูจน์สมการ (5) เป็นจริง คือ ไม่มีการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่ระบบ และอัตราขับเนื่องจากการขับก๊าซของภาชนะมีค่าน้อย ค่าของ S_o ที่ได้ในสมการ (5) ต้องมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการสูบที่ความดันสูง ๆ ซึ่งเป็นสัญญาณที่แสดงว่าค่า S_o ที่คำนวณได้เป็นอัตราการสูบที่ความดันต่ำสุดจริง ๆ

วิธีการอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วัดอัตราเร็วของเครื่องสูบคือ ในขณะที่กำลังสูบอากาศออกจากระบบ ให้บันทึกค่าความดันของระบบที่เปลี่ยนไปกับเวลา ถ้าระบบไม่มีการรั่วไหลและหากถือได้ว่าการขับก๊าซมีค่าน้อยมาก ก็จะเขียนสมการ (1) ได้เป็น

$$SP = -V(dP/dt) \qquad \text{.....(6)}$$

เมื่ออินติเกรตสมการข้างบน โดยให้ P_1 และ P_2 เป็นความดันของระบบที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ จะได้สมการของอัตราเร็วของเครื่องสูบเป็น

$$S = 2.30 \frac{V}{t_2 - t_1} \log \frac{P_1}{P_2} \qquad \text{.....(7)}$$

การใช้สมการ (7) ต้องมีความระมัดระวัง เพราะถ้าภาชนะสุญญากาศมีปริมาตรน้อยอัตราการลดลงของความดันในขณะที่เครื่องสูบกลกำลังสูบอากาศจะมีค่ามาก ทำให้อัตราขับก๊าซของผนังมีค่ามากพอที่ไม่สามารถจะตัดทิ้งได้ นอกจากนี้อัตราขับนี้ยังมีค่าไม่คงที่อีกด้วย กรณีเช่นนี้จะใช้สมการ (7) ไม่ได้ ระบบที่ใช้สมการ (7) ได้ต้องเป็นระบบที่ภาชนะสุญญากาศมีขนาดใหญ่จน อัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันในขณะทำการสูบมีค่าน้อยมาก ลักษณะเช่นนี้ผนังของภาชนะจะอยู่ในสภาพสมดุลทำให้อัตราขับก๊าซของผนังมีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ อย่างไรก็ดีสมการ (7) มีส่วนดีคือไม่จำเป็นต้องทราบอัตราขับก๊าซก็สามารถทำการคำนวณได้

สำหรับเครื่องสูบแบบแพร่ไอ อัตราเร็วของการสูบไม่ได้ขึ้นกับความดันของระบบ และความดัน

ต่ำสุดก็ไม่ได้เกิดจากการที่อัตราเร็วของเครื่องสูบเข้าใกล้ศูนย์ แต่ค่าของความดันต่ำสุดเกิดจากข้อจำกัดของระบบที่ไม่สามารถลดความดันต่อไปได้เนื่องจากการขับก๊าซของผนัง ในระหว่างการทำงานของเครื่องสูบแบบแพร่ไอนั้นค่าความดันจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนคงที่ สภาวะเช่นนี้ทำให้เขียนสมการ (1) ใหม่ได้ว่า

$$PS = Q + Q_o \qquad .....(8)$$

หากระบบสุญญากาศไม่มีการรั่วไหลจะเรียกความดันที่คงที่นี้ว่า ***ความดันพื้นฐาน*** (base pressure) และในที่นี้จะใช้สัญญลักษณ์ P_o ซึ่งในกรณีของความดันพื้นฐานนี้สามารถเขียนสมการ (8) ได้ว่า

$$P_o = Q_o/S \qquad .....(9)$$

อัตราการสูบ S ในสมการ (8) และ (9) เป็นปริมาณเดียวกัน เพราะอัตราการสูบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอไม่ขึ้นกับความดัน

การคำนวณหาอัตราเร็วของเครื่องสูบแบบแพร่ไอสามารถทำได้โดยบันทึกค่าความดันของระบบสุญญากาศซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไปนับจากเครื่องสูบเริ่มทำงาน โดยในกรณีของเครื่องสูบแบบแพร่ไอนี้ค่าของการขับก๊าซของผนังภาชนะมีความสำคัญจึงตัดทิ้งไม่ได้ อย่างไรก็ดีถ้าถือว่าไม่มีก๊าซภายนอกไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ก็จะทำให้เขียนสมการ (1) ได้ว่า

$$PS = -V(dP/dt) + Q_o \qquad .....(10)$$

เมื่อแทนค่า Q_o จากสมการ (9) ลงใน (10) ก็จะได้ว่า

$$V(dP/dt) = -S(P-P_o) \qquad .....(11)$$

เมื่ออินติเกรต (11) โดยให้ P_1 และ P_2 เป็นความดันของระบบที่เวลา t_1 และ t_2 จะได้สมการของอัตราเร็วของเครื่องสูบเป็น

$$S = 2.30 \frac{V}{t_2 - t_1} \log \frac{P_1 - P_o}{P_2 - P_o} \qquad .....(12)$$

สมการ (12) มีข้อได้เปรียบเหมือนกับสมการ (7) คือไม่ต้องวัดอัตราการไหลของก๊าซ อย่างไรก็ดีผลการวัดอัตราสูบจากสมการ (14) จะให้ผลถูกต้องเมื่อระบบสุญญากาศนั้นไม่มีการรั่วไหล

1.5 เครื่องวัดความดันในระบบสุญญากาศ

เครื่องมือที่ใช้วัดความดันในระบบสุญญากาศเรียกว่า เครื่องวัดความดัน หรือ *เกจสุญญากาศ* (vacuum gauge) หรือ *เกจความดัน* (pressure gauge) เครื่องวัดนี้มีหลายแบบโดยแต่ละแบบมีความเหมาะสมที่จะวัดค่าความดันได้ในช่วงที่ต่างกัน โดยทั่วไปในการวัดความดันค่าสูง ๆ จะใช้หลักการที่ให้แรงดันของก๊าซกระทำต่อเครื่องวัดโดยตรง แล้วนำแรงนั้นมาแปลงผลเป็นความดัน ส่วนการวัดความดันที่มีค่าต่ำ ๆ จะใช้สมบัติบางประการของก๊าซและไอ เช่นการนำความร้อนมาเป็นหลักในการวัด อาจจำแนกเครื่องวัดความดันออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้[1]

1 เครื่องวัดแบบไฮโดรสแตติก(hydrostatic gauge) เป็นเครื่องวัดความดันที่ใช้แรงดันจริงของก๊าซเป็นตัวหลักในการวัด ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ มาโนมิเตอร์ (manometer) เกจแม็คลาวด์ (McLeod gauge) เกจบัวดอง (bourdon gauge) เป็นต้น

2 เครื่องวัดแบบการนำความร้อน (thermal conductivity gauge) หลักการทำงานของเครื่องวัดชนิดนี้มาจากความจริงที่ว่า ค่าการนำความร้อนของก๊าซขึ้นกับค่าความดัน ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) เครื่องวัดแบบเทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple gauge) เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้สามารถวัดความดันได้ในช่วง $760\text{-}10^{-3}$ ทอรร์ เนื่องจากการทำวิจัยนี้ได้มีการใช้เครื่องวัดแบบพิรานีในการวัดความดันที่เกิดจากการสูบอากาศของเครื่องสูบกล ดังนั้นจะได้กล่าวถึงเครื่องวัดแบบพิรานีอย่างละเอียดต่อไป

3 เครื่องวัดแบบ (viscosity gauge) เป็นเครื่องวัดที่ใช้หลักว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความดันความหนืดของก๊าซจะเปลี่ยนไปด้วย ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบแลงมัวร์ (Langmuir viscosity gauge)

4 เครื่องวัดแบบเรดิโอมิเตอร์ (radiometer gauge) ใช้หลักการว่า โมเลกุลที่มีอัตราเร็วสูง (คือมีอุณหภูมิสูง) สามารถก่อให้เกิดแรงได้มากกว่าโมเลกุลที่มีอัตราเร็วต่ำ(ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ) ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดคุดเซน (Knudsen gauge)

5 เครื่องวัดแบบไอออไนเซชัน (ionization gauge) เครื่องวัดชนิดนี้จะวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซแล้วแปลงกระแสที่วัดได้เป็นความดัน ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดเทอร์ไมออนิกไอออไนเซชัน(thermionic ionization gauge) เครื่องวัดแบบเพนนิง หรือ เครื่องวัดแบบฟิลลิป หรือ เครื่องวัดแบบคาโธดเย็น (penning or philips or cold cathode gauges) (เนื่องจากระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นได้ใช้เครื่องวัดแบบเพนนิงในการวัดความ

ต้นต่ำ จึงจะกล่าวถึงเครื่องมือชนิดนี้อย่างละเอียดต่อไป) มักจะใช้เครื่องวัดจำพวกไอออไนเซชันนี้ในการวัดก๊าซความดันต่ำ เช่น เครื่องวัดแบบเพนนิงสามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-6} ทอรร์ ในขณะที่เครื่องวัดแบบเทอร์ไมออนิกไอออไนเซชันวัดความดันได้ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-11} ทอรร์

6 เครื่องวัดแบบหลอดดิสชาร์จ (discharge tube gauge) เครื่องวัดชนิดนี้มีหลักในการทำงานว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มากพอเข้าไปในก๊าซความดันต่าง ๆ กัน ก๊าซนั้นสามารถเรืองแสงได้โดยสีของแสงที่ได้ขึ้นกับค่าความดันของก๊าซ เครื่องวัดชนิดนี้วัดความดันได้ในช่วง 5 ถึง 0.01 ทอรร์ และมักจะใช้เครื่องวัดชนิดนี้ในการตรวจสอบรอยรั่วของระบบสุญญากาศ

1.5.1 เครื่องวัดแบบเกจพิรานี (Pirani Gauge)

เครื่องวัดแบบพิรานี เป็นเครื่องวัดความดันที่จัดอยู่ในประเภทเครื่องวัดการนำความร้อน หลักการของเครื่องวัดจำพวกนี้ก็คือ เมื่อมีวัตถุร้อนในภาชนะสุญญากาศ ความร้อนที่วัตถุสูญเสียไปในขณะใด ๆ ขึ้นกับค่าความดันภายในภาชนะในขณะนั้น อย่างไรก็ดีหลักการนี้เป็นจริงต่อเมื่อความดันในขณะนั้นพอเหมาะจนทำให้ระยะปลอดการชนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเปรียบเทียบได้กับขนาดของภาชนะที่ใส่วัตถุร้อนนั้น[1] ในกรณีของเครื่องวัดแบบพิรานี วัตถุร้อนคือลวดตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นไส้ของเครื่องวัด (filament) และภาชนะที่บรรจุก็คือหัวของเครื่องวัดนั่นเอง วิธีการที่วัตถุสูญเสียความร้อนในสุญญากาศมีได้ 3 วิธีคือ

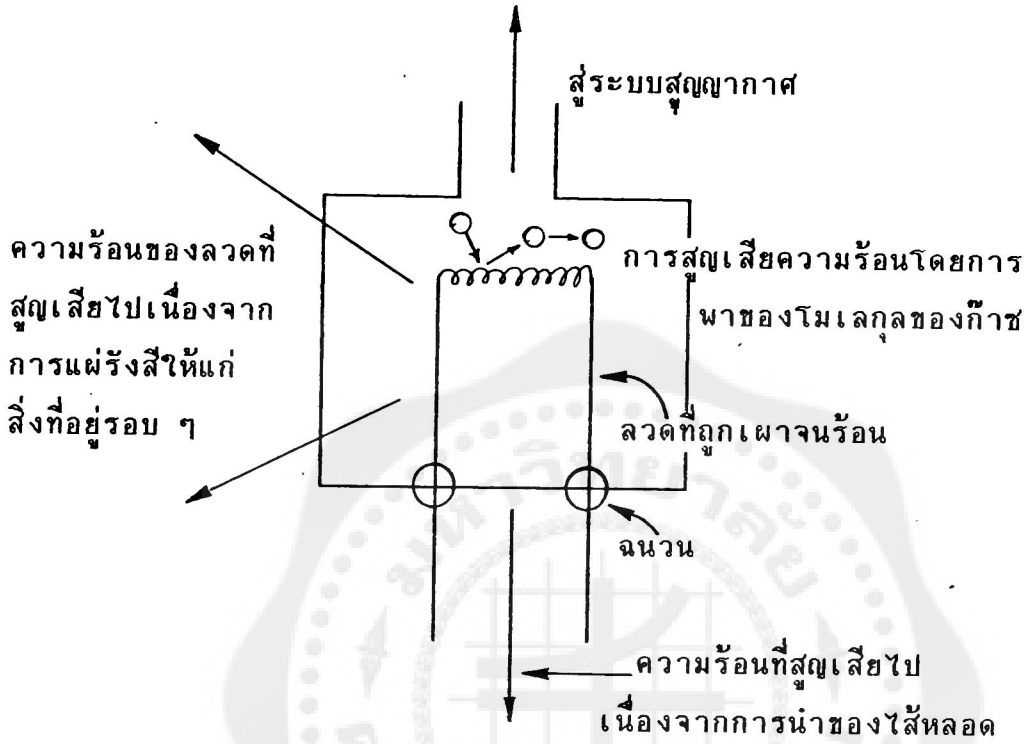
1. โดยการนำโดยไส้หลอด
2. โดยการแผ่รังสีไปให้สิ่งที่อยู่รอบ ๆ
3. โดยการพาด้วยโมเลกุลก๊าซ

เครื่องวัดแบบพิรานีและเครื่องวัดการนำความร้อนทั้งหลายใช้สมบัติที่ 3 ในการวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้นข้อจำกัดของเครื่องวัดจำพวกนี้ก็คือ ถ้าการสูญเสียความร้อนในแบบที่ 3 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียด้วยวิธีการแบบที่ 1 และ 2 เครื่องวัดก็จะไม่สามารถวัดความดันได้

รูปที่ 1.7 แสดงกลไกทั้ง 3 ของการสูญเสียความร้อนของไส้ของหัววัดในเครื่องวัดแบบพิรานี เห็นได้ว่าสำหรับกลไกแบบที่ 3 นั้น โมเลกุลก๊าซที่วิ่งเข้ามากระทบไส้ของเครื่องจะพาเอาความร้อนจากลวดตัวนำออกไป หากมีจำนวนโมเลกุลที่เข้ามากระทบมาก ความร้อนที่ลวดสูญเสียก็มากอุณหภูมิของลวดก็จะลดลง แต่ถ้าจำนวนโมเลกุลที่เข้ามากระทบลดน้อยลงการพาความร้อนก็ลดลงไปด้วย อุณหภูมิของลวดก็สูงขึ้น อย่างไรก็ดีลักษณะที่กล่าวมานี้จะเป็นจริงในช่วงของความดันช่วงหนึ่งเท่านั้น กล่าวคือ เมื่อความดันมีค่ามากจำนวนโมเลกุลที่เข้ามากระทบลวดตัวนำก็มีค่ามาก ในขณะเดียวกันอัตราการชนระหว่างโมเลกุลก็มีค่าสูง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันในช่วงนี้จึงไม่มีผลต่ออัตราการสูญเสียความร้อน การวัดความดันจึงไม่เป็นผล ค่าของความดันที่ทำให้มีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น

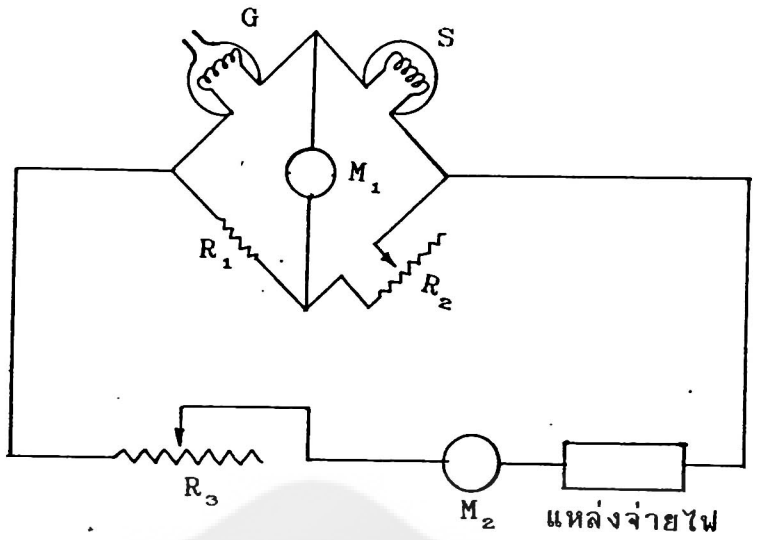
192813

เป็นค่าจำกัดบนของการวัดความดันของเครื่องวัดแบบพิรานี ในทางกลับกันถ้าความดันมีค่าน้อยมาก ๆ จำนวนโมเลกุลที่เข้ามากระทบลวดตัวนำจะมีเพียง 2-3 ตัว การสูญเสียความร้อนอันเนื่องมาจากการนำผ่านไส้หลอดและการแผ่รังสีจึงมีผลมากกว่า การวัดความดันก็ไม่ได้ผลเช่นกัน ค่าความดันน้อยค่านี้ก็คือข้อจำกัดล่างของเครื่องวัดแบบพิรานี



รูปที่ 1.7 แสดงการสูญเสียความร้อนจากลวดโลหะที่ถูกเผาจนร้อน

วงจรไฟฟ้าของเครื่องวัดแบบพิรานีเป็นวงจรวัดความต้านทานของไส้หลอดซึ่งทำด้วยลวดตัวนำ โดยใช้หลักการว่าค่าความต้านทานของลวดโลหะขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานของโลหะจะมากขึ้นด้วย และหากความดันมีค่าเหมาะสมค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามความดัน ดังนั้นการวัดความต้านทานของไส้หลอดจึงเท่ากับว่าเป็นการวัดความดันไปด้วย จากที่ได้กล่าวมาแล้วนี้เห็นได้ว่าลวดตัวนำที่จะมาทำเป็นไส้ของหัววัด ต้องมีสมบัติที่ค่าความต้านทานอ่อนไหวต่ออุณหภูมิมาก ลวดที่ใช้ในเครื่องวัดแบบพิรานีส่วนใหญ่มักจะเป็นทังสเตนหรือนิคเกิล เครื่องวัดแบบพิรานีบางแบบใช้อุปกรณ์กึ่งตัวนำที่เรียกว่าเทอร์มิสเตอร์ (thermistor) เป็นไส้ของหัววัดเพราะความต้านทานของอุปกรณ์ชนิดนี้มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิเป็นอันมาก สำหรับเครื่องวัดแบบพิรานีที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นชนิดที่ไส้ของหัววัดเป็นทังสเตน วงจรไฟฟ้าในเครื่องวัดแบบพิรานีคือวงจรวีสโตนส์บริดจ์ (wheatstone bridge) ดังในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 วงจรวีสโตนบริดจ์ในเกจพิรานี

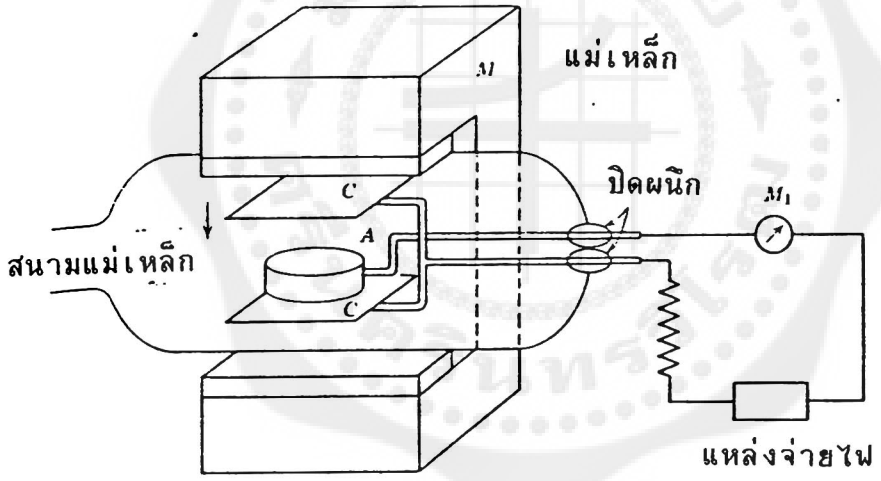
ดังที่ได้กล่าวแล้วว่า การทำงานของเครื่องวัดแบบพิรานีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลวดที่นำมาเป็นไส้หลอด ดังนั้นอุณหภูมิของห้องทดลองที่เปลี่ยนไปในแต่ละวันอาจจะทำให้ค่าของความดันที่วัดได้ไม่ถูกต้อง การแก้ไขความคลาดเคลื่อนของการวัดนี้ทำได้โดยให้หนึ่งในความต้านทานที่เหลืออีกสามตัวในวงจรบริดจ์ เป็นความต้านทานที่ทำด้วยลวดตัวนำที่มีลักษณะเหมือนกับลวดตัวนำที่ทำหน้าที่ไส้ของหัววัดทุกประการ ในที่นี้จะเรียกลวดตัวนำเส้นที่ 2 นี้ว่า *ขดลวดชดเชย* ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไส้ของหัววัดจะเหมือนกับผลที่มีต่อลวดชดเชย

ในรูป 1.8 G คือหัววัดของเครื่องวัดแบบพิรานีและ S คือหลอดที่บรรจุขดลวดชดเชยไว้ และ R_1 กับ R_2 คือความต้านทานที่เหลืออีก 2 ตัวของวงจรบริดจ์ เมื่อค่าความต้านทานของไส้หลอดไม่พอเหมาะ (ซึ่งความต้านทานนี้ขึ้นกับความดันในหลอด) ที่จะทำให้บริดจ์สมดุล ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมิเตอร์ M_1 ซึ่งมักจะเป็นไมโครแอมมิเตอร์ ค่าของกระแสนี้จะถูกเปรียบเทียบ (calibrate) ให้กลับเป็นค่าของความดัน ทั้งนี้เมื่อทำให้ความดันภายในหลอดวัดมีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าค่าที่อ่านจากเครื่องวัดแบบพิรานีมีค่าเป็นศูนย์ ก็สามารถปรับแอมมิเตอร์ M_1 ให้อ่านค่าศูนย์ได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน R_2 สำหรับแหล่งจ่ายไฟในวงจรมีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่บริดจ์ โดยสามารถปรับค่ากระแสให้มีค่าเหมาะสมได้ด้วยความต้านทาน R_3 และสามารถอ่านค่ากระแสนี้ได้จากมิเตอร์ M_2 ซึ่งมักจะเป็นมิลลิแอมมิเตอร์ เครื่องวัดแบบพิรานีโดยทั่วไปในท้องตลาดมักจะไม่มีแอมมิเตอร์ M_2 แต่จะใช้วงจรไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบให้จัดกระแสในวงจรได้อย่างเหมาะสมแทน จากข้อจำกัดบนและล่างที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้เครื่องวัดแบบพิรานีโดยทั่วไปมีขอบเขตของการวัดความดันอยู่ในช่วง 760 ถึง 10^{-3} ทอรร์

1.5.2 เครื่องวัดแบบเพนนิง

เครื่องวัดแบบเพนนิงมีชื่อเรียกอีก 2 ชื่อคือ เครื่องวัดแบบฟิลลิป และเครื่องวัดแบบไอออไนเซชันแบบคาโธดเย็น[1] เครื่องวัดชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่ใช้เป็นอาโนดซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นโลหะอีก 2 แผ่นที่เป็นคาโธด แผ่นโลหะทั้ง 3 อยู่ในสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กถาวร ซึ่งทิศของสนามตั้งฉากกับระนาบของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่าง 2000 ถึง 4000 โวลต์เกิดขึ้นระหว่างขั้วอาโนดกับขั้วคาโธดจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากคาโธดและเคลื่อนที่เข้าหาอาโนดตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้า แต่สนามแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างอาโนดและคาโธดทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ขึ้นแก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นเกลียวจากคาโธดไปยังอาโนดแทนที่จะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง ทำให้ระยะของการเดินทางของอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่นี้มันจะชนโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ในบริเวณนั้นด้วยทำให้โมเลกุลเหล่านั้นแตกตัวเป็นไอออน ไอออนบวกจะเคลื่อนที่กลับไปยังคาโธด ในขณะที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแตกตัวนี้ จะมีพฤติกรรมเหมือนกับอิเล็กตรอนที่หลุดมาจากคาโธด คือจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวจากอาโนดไปคาโธด และชนโมเลกุลอื่นของก๊าซต่อไป

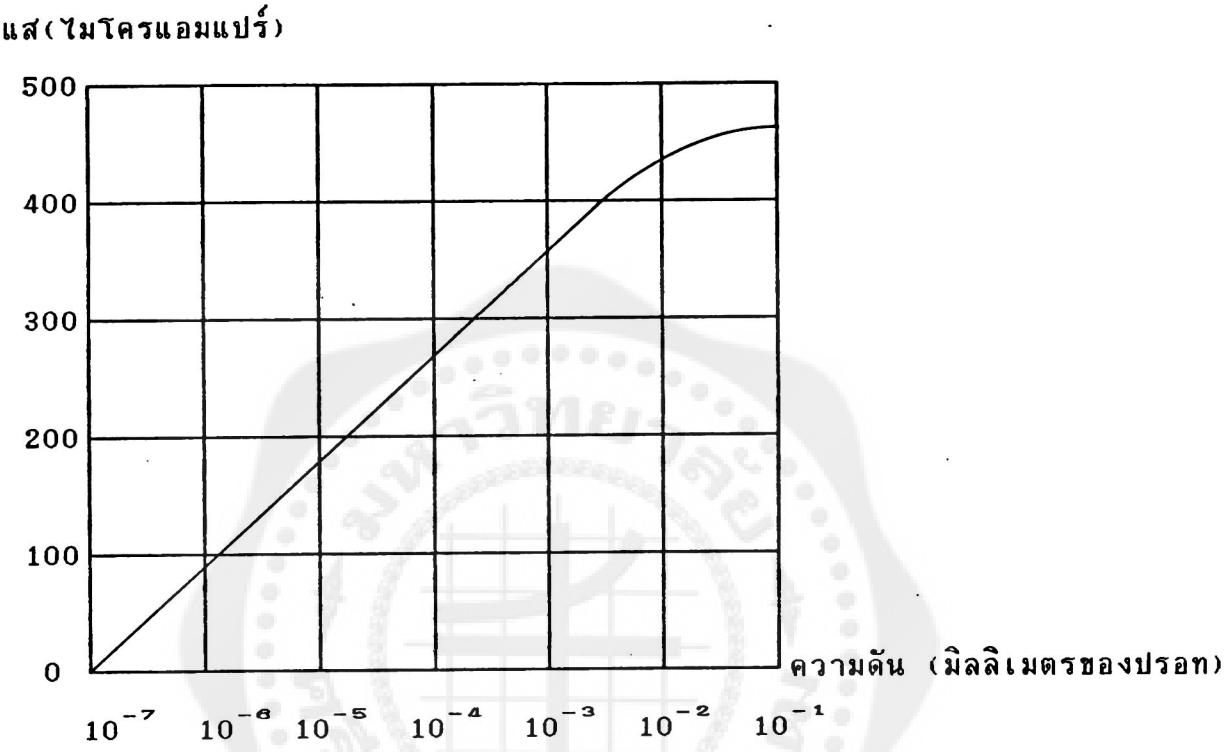


รูปที่ 1.9 การวางตัวของคาโธด อาโนด และ สนามแม่เหล็กในหัววัดของเครื่องวัดแบบเพนนิง

ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่มาถึงขั้วไฟฟ้าทั้งสองไม่ว่าจะเป็นไอออนบวกหรืออิเล็กตรอนจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลต่อไปในวงจรและสามารถตรวจวัดได้ การที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างมากนี้ทำให้การชนโมเลกุลอากาศหรือการไอออไนซ์มีขึ้นมากกระแสไฟฟ้าจึงมีค่ามากด้วย ทำให้สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดนี้จึงมีขนาดมากพอจนไม่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องขยายสัญญาณใด ๆ สำหรับเครื่องวัดแบบเพนนิง

กระแสที่วัดได้ในเครื่องวัดแบบเพนนิงขึ้นกับความดันของก๊าซ โดยถ้าความดันมีค่ามากจำนวนโมเลกุลก๊าซก็จะมาก ทำให้จำนวนครั้งของการชนมีค่าสูง กระแสที่ไหลจึงมากเช่นกัน ในทางกลับกัน

ถ้าความดันมีค่าน้อยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ก็มีค่าน้อยไปด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันของเครื่องวัดแบบเพนนิงมีลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.10 และความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันนี้จะสิ้นสุดที่ความดันประมาณ 10^{-2} มิลลิเมตรของปรอท ซึ่งค่าความดันนี้เป็นขอบเขตจำกัดของการวัดของเครื่องวัดแบบเพนนิง การใช้เครื่องวัดแบบเพนนิงมีข้อเสียเปรียบบ้างโดยอาจจะกล่าวได้เป็นหัวข้อดังนี้



รูปที่ 1.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความดันของเครื่องวัดแบบเพนนิง

1. ค่าความดันที่วัดได้ไม่ละเอียดเท่ากับเครื่องวัดชนิดอื่น เช่นเครื่องวัดแบบเทอร์ไมออนิก (อิเล็กตรอนในเครื่องวัดแบบเทอร์ไมออนิกหลุดจากคาโธดได้โดยการใช้ความร้อนจากฟิลาเมนท์)

2. ต้องใช้ไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง ๆ กับเครื่องมืออันอาจจะก่อให้เกิดอันตรายได้

3. จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็ก ทำให้ต้องระวังไว้เสมอว่า ต้องไม่นำอุปกรณ์อื่นที่อาจจะถูกทำลายได้ด้วยสนามแม่เหล็ก เช่นแผ่นจานแม่เหล็กที่ใช้เก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ไปไว้ใกล้ ๆ กับหัววัดเป็นอันขาด

อย่างไรก็ดีการใช้เครื่องวัดแบบเพนนิงก็มีข้อดีอยู่หลายประการซึ่งสามารถนำมาจำแนกได้ดังนี้

1. วงจรไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องวัดเป็นวงจรง่าย ๆ

2. ขอบเขตของการวัดความดันค่อนข้างกว้าง คือสามารถวัดความดันได้ตั้งแต่ 10^{-2} ลงมาจนถึง 10^{-7} มิลลิเมตรของปรอท

3. การที่ไม่ต้องมีลวดฟิลาเมนท์ ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องวัดนาน

1.6 การระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal Evaporation)

หลักการของการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารคือ[8] เมื่อให้ความร้อนแก่สารที่จะระเหยด้วยปริมาณที่เพียงพอสารนั้นก็จะระเหยกลายเป็นไอ เมื่อไอนั้นไปกระทบวัตถุที่มีเย็นกว่า ไอของสารก็จะควบแน่นกลับมาเป็นของแข็งอีกครั้งในรูปแบบของฟิล์มบางเกาะติดบนผิวของวัตถุนั้น เรียกวัตถุที่เกิดฟิล์มบางว่า *วัตถุรองรับ* (substrate)

ถ้าในช่วงระหว่างต้นกำเนิดถึงวัตถุรองรับมีก๊าซอื่นปนอยู่ด้วย อะตอมของสารระเหยระเหยจะชนกับอะตอมของก๊าซเหล่านั้นทำให้อะตอมของสารระเหยกระเจิงไปในทิศทางต่าง ๆ ทั้งนี้พบว่าถ้าอะตอมที่หลุดออกมาจากสารระเหยมี 1 ส่วน ส่วนของอะตอมที่กระเจิงออกไปจะแปรผันโดยตรงกับ[7] $\exp(-d/L)$

โดย d เป็นระยะทางที่อะตอมของสารระเหยเดินทางเข้าไปในก๊าซที่ล้อมรอบนั้น

และ L เป็นระยะปลอดการชนของอะตอมของก๊าซ

จะเห็นว่าถ้าระยะปลอดการชนของก๊าซที่อยู่รอบ ๆ เพิ่มขึ้น ส่วนของอะตอมของสารระเหยที่จะเกิดการกระเจิงจะน้อยลง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 10^{-4} ทอร์พบว่าระยะปลอดการชนของอากาศมีค่า 45 เซนติเมตร และระยะปลอดการชนนี้จะเพิ่มขึ้นเป็น 4500 เซนติเมตรเมื่อความดันลดลงเป็น 10^{-6} ทอร์ที่อุณหภูมิเดียวกัน[7] ดังนั้นในการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารนี้ถ้าระยะระหว่างต้นกำเนิดและวัตถุรองรับมีค่าในช่วง 10 ถึง 50 เซนติเมตร ต้องทำให้ความดันในบริเวณนั้นต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ จึงจะทำให้อะตอมของสารระเหยเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง[7][8]

แลงมัวร์ (Langmuir) เขียนสมการแสดงอัตราการระเหยของสารจากพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ของผิวที่สะอาดในสุญญากาศไว้ว่า[7]

$$\text{อัตราการระเหย} = 5.83 \times 10^{-2} p_e \sqrt{M/T} \quad \text{กรัม/(ตารางเซนติเมตร)(วินาที)}$$

โดย P_e คือ ความดันของสารระเหยในหน่วยทอร์ ภายใต้สภาวะไออิ่มตัว(saturated-vapor)

T คือ อุณหภูมิ

และ M คือ มวลโมเลกุลของสารระเหย

นอกจากสมการข้างบนแล้วก็อาจจะเขียนอัตราการระเหยในหน่วยของ โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีได้ดังนี้[7]

$$\text{อัตราการระเหย} = 3.513 \times 10^{22} p_e \sqrt{1/MT}$$

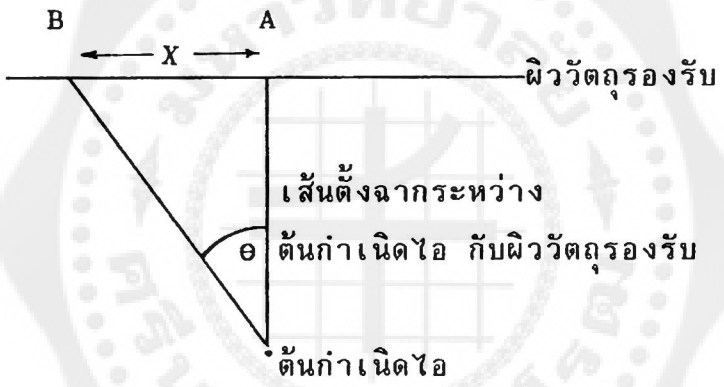
สำหรับอัตราการเกาะติดของไอของสารระเหยบนผิวของวัตถุรองรับนั้น นอกจากจะขึ้นกับอัตราการระเหยแล้วยังขึ้นกับรูปร่างและตำแหน่งของต้นกำเนิดไอ ตลอดจนสัมประสิทธิ์ของความควบแน่น (condensation coefficient) ของสารระเหยด้วย

การสร้างฟิล์มบางในอุดมคติจะมีต้นกำเนิดไอที่สะอาด มีขนาดเป็นจุด (point source) ซึ่งจะให้ไออย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้วัตถุรองรับต้องมีพื้นผิวที่สะอาดและมีลักษณะเป็นระนาบ[7] กรณีอุดมคตินี้อัตราการเกาะติดของสารระเหยเป็นไปตามกฎของคุตเสน(Knudsen) ซึ่งกล่าวว่า[7][9]

อัตราการเกาะติด แปรผันโดยตรงกับ $\cos\theta/r^2$

โดย r เป็น ระยะในแนวเส้นตรงระหว่างต้นกำเนิดกับจุดบนผิวของวัตถุรองรับ

θ เป็น มุมระหว่างระยะทาง r กับเส้นที่ลากตั้งฉากระหว่างจุดกำเนิดไอกับวัตถุรองรับ



รูปที่ 1.11 แสดงระยะ r และมุม θ ในกฎของคุตเสน

ในรูปถ้า d_o เป็นความหนาของสารระเหยที่เกาะติดบนสารรองรับตรงตำแหน่ง A ซึ่งอยู่เหนือต้นกำเนิดพอดี และห่างจากต้นกำเนิดเป็นระยะ h

d_1 เป็นความหนาของสารระเหยที่เกาะติดบนสารรองรับที่ B ซึ่งห่างจาก A เป็นระยะในแนวราบ เท่ากับ X

และหากค่าสัมประสิทธิ์ของการควบแน่นตรงตำแหน่งทั้งสองเท่ากันจะได้ว่า[7]

$$d/d_o = 1/[1+(x/h)^2]^{3/2}$$

ถ้าต้นกำเนิดของสารระเหยมีลักษณะเป็นระนาบที่มีพื้นที่น้อย ๆ และระนาบนั้นขนานกับพื้นผิวของสารรองรับ อัตราการเกาะตัวจะแปรผันโดยตรงกับ $\cos^2\theta/r^2$ และสมการของการกระจายความหนาที่ส่วนต่าง ๆ จะเป็น

$$d/d_o = 1/[1+(X/h)^2]^2$$

ในกรณีทั้ง 2 ความหนาต่างก็จะลดลงร้อยละ 10 ถ้า X = h/4

ในทางปฏิบัติ มักจะทำการเคลือบฟิล์มบางบนวัตถุรองรับโดยการทำให้สารระเหยร้อนจนหลอมเหลว การให้ความร้อนแก่สารระเหยก็ทำได้โดยใช้ลวดฟิลาเมนท์หรือใช้แผ่นโลหะที่มีหลุมอยู่ตรงกลาง เรียกแผ่นโลหะนี้ว่า เรือ (boat) สิ่งที่ต้องระวังในการเลือกใช้เรือ หรือลวดฟิลาเมนท์ก็คือ โลหะที่เป็นเรือหรือฟิลาเมนท์ต้องไม่เกิดเป็นโลหะผสม (alloy) กับสารระเหย หรือไม่เกิดปฏิกริยาทางเคมีกับสารระเหย และที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือเรือหรือฟิลาเมนท์ต้องไม่หลอมละลายก่อนสารระเหย ดังนั้นโลหะที่ทำเป็นเรือหรือฟิลาเมนท์ต้องเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง

1.7 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยแสง

1.7.1 การสะท้อนจากแผ่นฟิล์มที่มีระนาบทั้งสองขนานกัน

รูปที่ 1.12 แสดงรังสีแสง SA จากต้นกำเนิดแสง S ซึ่งมีขนาดเป็นจุดและอยู่ในอากาศ รังสีนี้ตกกระทบบนผิวของวัสดุโปร่งแสงที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มที่จุด A ทำให้รังสีแสงบางส่วนจะสะท้อนขึ้นไปในอากาศเป็นรังสีที่ 1 ในขณะเดียวกันรังสีที่เหลือจะหักเหไปในทิศของ AF ที่จุด F นี้รังสีที่หักเหมาจาก A ส่วนหนึ่งจะหักเหออกสู่อากาศทางด้านล่างของฟิล์ม ในขณะที่รังสีที่เหลือสะท้อนกลับเข้ามาในฟิล์มแล้วไปกระทบขอบบนของฟิล์มที่ B ทำให้เกิดการหักเหเป็นรังสีที่ 2 ในขณะเดียวกันที่จุด B นี้ก็เกิดการสะท้อนกลับมาในฟิล์ม และเป็นเช่นนี้เรื่อยไปทำให้เกิดเป็นรังสีแสงต่าง ๆ ดังรูป ความเข้มของแสงในรังสีที่ 3,4,.. จะลดลงอย่างรวดเร็วและสามารถตัดทิ้งไปได้โดยไม่ต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณ[18]

เมื่อรังสีที่ 1 และ 2 ผ่านเข้าไปในเลนส์ L (ซึ่งอาจจะเป็นเลนส์ตา) รังสีทั้งสองนี้จะซ้อนทับกัน(superpose) โดยระยะทางที่รังสีทั้ง 2 เดินทางจากต้นกำเนิด s ไปยังเลนส์ L ไม่เท่ากัน เรียกผลต่างของระยะทางนี้ว่า ระยะทางเชิงทัศน์ที่แตกต่างกัน (optical path difference) ถ้าให้ Δ เป็นระยะทางที่แตกต่างกันนี้จะได้ว่า[18]

$$\Delta = n(AF+FB) - AD$$

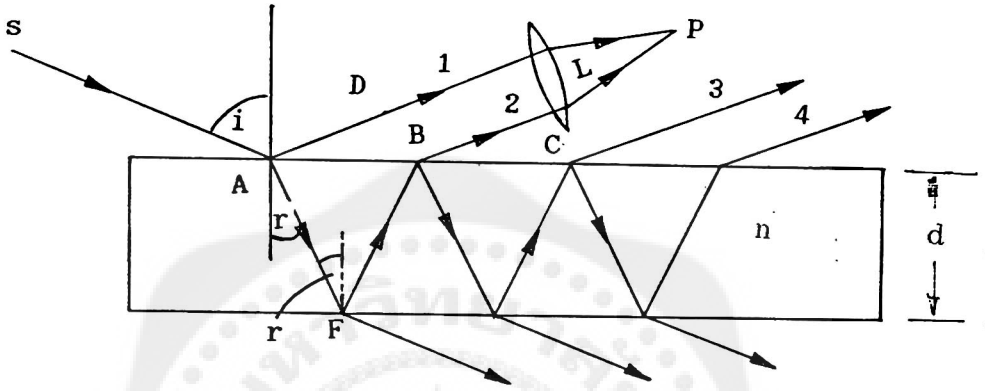
$$= \frac{2nd}{\cos r} - AB\sin i \qquad \text{.....(13)}$$

โดย n คือ ค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของฟิล์ม

d คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม

i คือ มุมตกกระทบของแสงจาก s

r คือ มุมหักเหในฟิล์ม



รูปที่ 1.12 การสะท้อนหลาย ๆ ครั้งที่แผ่นฟิล์มที่มีด้านข้างขนานกัน

จากนิยามของการหักเหทำให้เขียนความสัมพันธ์ระหว่าง sin*i* และ sinr ได้ว่า

$$\sin i = n\sin r \qquad \text{.....(14)}$$

นอกจากนี้ ในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า

$$AB = 2d\tan r \qquad \text{.....(15)}$$

ทำให้เขียนสมการที่ (13) ได้ใหม่เป็น

$$\Delta = 2nd\cos r \qquad \text{.....(16)}$$

เนื่องจากการสะท้อนที่ A เป็นการสะท้อนของแสงที่มีผิวสะท้อนเป็นตัวกลางที่หนาแน่นมากกว่า รังสีสะท้อนจึงมีเฟสเปลี่ยนไป π เรเดียน ทำให้เขียนสมการของการซ้อนทับกันของรังสีที่ 1 และ

รังสีที่ 2 แบบเสริมกันและแบบหักล้างกันได้ดังแสดงในสมการ (17) และ (18) ตามลำดับดังนี้

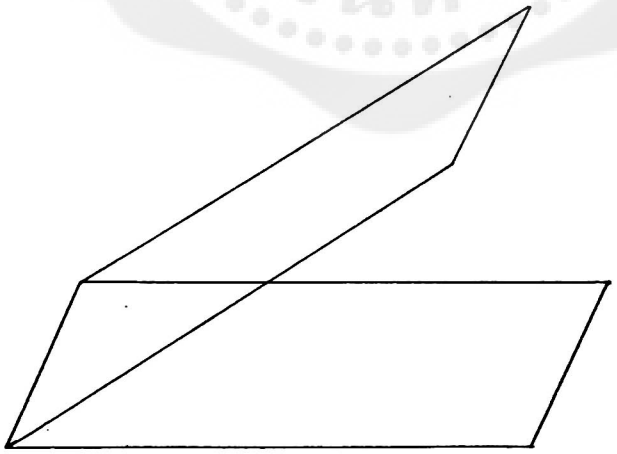
สมการของการเสริมกัน $2ndcosr = (m+(1/2))\lambda$ .....(17)

สมการของการหักล้าง $2ndcosr = m\lambda$ .....(18)

กรณีที่ต้นกำเนิดแสงมีลักษณะเป็นจุดดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 1 สิ่งที่จะปรากฏแก่ผู้สังเกตก็คือริ้ว (fringe) มืดหรือริ้วสว่างเพียงริ้วเดียว โดยจะเป็นริ้วชนิดใดนั้นขึ้นกับระยะทางเชิงทัศน์ที่แตกต่างกัน แต่ถ้าในการทดลองต้องการให้การแทรกสอดที่สังเกตได้มีลักษณะเป็นริ้วมืดและสว่างสลับกันไปก็จำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิดแสงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนถือได้ว่าไม่เป็นจุด ในกรณีเช่นนี้ริ้วสว่าง(หรือริ้วมืด) แต่ละริ้วจะมีระยะทางเชิงทัศน์ที่แตกต่างกันที่สอดคล้องกับตัวมันเอง ซึ่งนั่นก็หมายความว่าริ้วแต่ละริ้วมีมุมหักเหที่คงที่ ภาพของริ้วมืดและสว่างที่ปรากฏให้เห็นจะมีลักษณะเป็นวงกลมมืดและสว่างหลายวงซ้อนกันโดยวงกลมทุกวงมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เรียกวงของริ้วมืดหรือริ้วสว่างแต่ละวงว่า[10][11] ริ้วแห่งความเอียงที่เท่ากัน (fringes of equal inclination)

1.7.2 การสะท้อนและหักเหที่แผ่นฟิล์มที่มีด้านทั้งสองไม่ขนานกัน

ถ้าระนาบทั้งสองของแผ่นฟิล์มยังคงเป็นระนาบที่มีผิวราบเรียบแต่ไม่ขนานกัน ระนาบทั้งสองจะตัดกันที่ปลายด้านหนึ่งของฟิล์มทำให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นลิ่ม (wedge) การสร้างฟิล์มในลักษณะนี้ทำได้โดยใช้แผ่นแก้วสองแผ่นมาประกบกัน แล้วให้ปลายข้างหนึ่งแยกออกจากันเล็กน้อย การทำเช่นนี้จะก่อให้เกิด *ฟิล์มอากาศ* ขึ้นระหว่างแผ่นแก้ว ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 ฟิล์มอากาศที่มีลักษณะแผ่นลิ่มอยู่ระหว่างแผ่นแก้ว 2 แผ่น

ในกรณีของฟิล์มลิ่มนี้ แสงจากฟิล์มที่เข้าสู่ตาผู้สังเกตจะไม่ขนานกันอีกต่อไป แต่ล่าแสงจะลู่ออกจากันมาจากฟิล์ม[11] อย่างไรก็ดีระยะทางเชิงทัศน์ที่แตกต่างกันของรังสีแต่ละคู่ยังคงเป็นไปตามสมการที่ (16) ซึ่งถ้าทำการสังเกตในทิศที่ตั้งฉากกับฟิล์มก็จะทำให้มุมหักเหมีค่าน้อยจึงเขียนสมการ (17) และ (18) ของการเสริมกันและหักล้างกันได้ใหม่เป็นสมการ (19) และ (20) ว่า

สมการของการเสริมกัน $2nd = (m+(1/2))\lambda$ .....(19)

สมการของการหักล้าง $2nd = m\lambda$ .....(20)

จากสมการ (19) และ (20) เห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาริ้วชนิดเดียวกัน 2 ริ้วที่ติดต่อกัน (เช่นริ้วมืด 2 ริ้วที่ติดกัน) ค่าของ m จะต่างกันอยู่ 1 ลักษณะเช่นนี้มีผลทำให้ผลต่างระหว่างค่า nd ของริ้วชนิดเดียวกัน 2 ริ้วที่ติดกันมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ จากที่กล่าวมาเห็นได้ชัดเจนว่าจุดทุกจุดบนริ้วมืดแต่ละริ้วหรือริ้วสว่างแต่ละริ้วก็คือทางเดินของแนวบนลิ่มที่มีความลึกเท่ากัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการเรียกชื่อริ้วแต่ละริ้วว่าริ้วแห่งความหนาที่เท่ากัน (fringes of equal thickness)[10][11]

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นแก้วเป็นฟิล์มอากาศ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มจึงเป็น 1 ผลต่างของความลึกของฟิล์มอากาศที่สอดคล้องกับริ้วชนิดเดียวกันที่ติดกันจึงมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$

1.7.3 การวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับ โดยใช้หลักของริ้วแห่งความหนาที่เท่ากัน

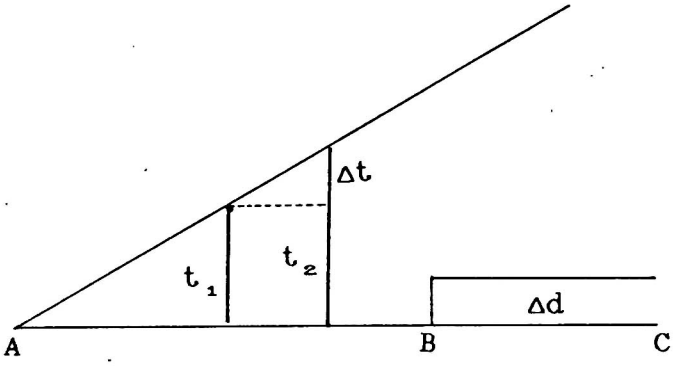
ก่อนที่จะกล่าวถึงการใช้หลักในการเกิดริ้วแห่งความหนาที่เท่ากัน ในการวัดความหนาของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มต้องทำความเข้าใจก่อนว่า ฟิล์มที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มี 2 ความหมายคือ

1. ฟิล์มที่เป็นสารตัวอย่างซึ่งต้องการทราบความหนา ฟิล์มนี้จะเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งอาจจะเป็นแผ่นแก้วแผ่นหนึ่งในจำนวน 2 แผ่นที่จะนำมาทำเป็นขอบของลิ่มอากาศ

2. ฟิล์มอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นลิ่มและเกิดจากการประกบกันของแผ่นแก้ว 2 แผ่น ฟิล์มนี้เป็นฟิล์มที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหหลาย ๆ ครั้งจนเกิดเป็นริ้วมืดสว่าง (เหมือนกับฟิล์มในรูปที่ 1)

การเคลือบฟิล์มบางของสารตัวอย่างลงบนแผ่นแก้วทำให้ผิวมีลักษณะเป็นขั้นบันได เมื่อนำแผ่นแก้วอีกแผ่นมาประกบ ก็จะทำให้เกิดฟิล์มบางของอากาศที่มีลักษณะเป็นลิ่มอยู่ระหว่างแผ่นแก้วนั้น โดยการเปลี่ยนแปลงของความหนาของลิ่มไม่ได้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1.14

ช่วง AB ที่แสดงในรูปที่ 1.14 เป็นช่วงที่การเปลี่ยนแปลงความหนาของลิ่มฟิล์มอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ความแตกต่างของความหนาของฟิล์มอากาศที่ทำให้เกิดริ้วชนิดเดียวกัน 2 ริ้วที่ติดกันจึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ ในรูปถ้าให้ t_1 และ t_2 เป็นความลึกของฟิล์มอากาศที่ทำให้เกิดริ้วมืดที่ m และที่ m+1 ตามลำดับ และ Δt เป็นผลต่างของความลึกทั้งสองจะได้ว่า Δt เท่ากับ $\lambda/2$ ลักษณะของริ้วมืด-สว่างในช่วง AB เป็นดังรูปที่ 1.15ก

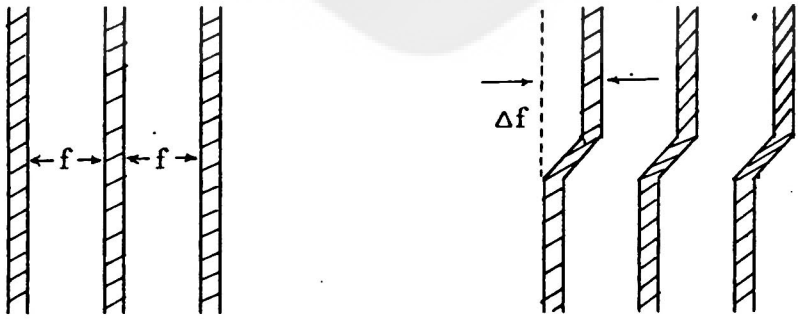


รูปที่ 1.14 ฟิล์มบาง BC ของสารตัวอย่างที่เคลือบบนแผ่นแก้ว

ที่จุด B ในรูปที่ 1.14 ความหนาของฟิล์มอากาศเปลี่ยนไปอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดการเหลื่อมกันของริ้วมืด-สว่าง จากสมการ (20) ของการเกิดริ้วมืดและจากการที่ตระหนักว่าเนื้อของลิ่มฟิล์มเป็นอากาศซึ่งมีดัชนีหักเหเป็น 1 ทำให้เขียนสมการของการเปลี่ยนแปลงของริ้วมืดนี้ได้ว่า

$$2\Delta d = (\Delta m)\lambda \qquad \text{.....(21)}$$

โดย Δd เป็นความหนาของฟิล์มของสารตัวอย่างที่เคลือบลงบนบริเวณ BC และ Δm เป็นอันดับของการแทรกสอดที่เปลี่ยนไป ในรูปที่ 1.15ก ระยะ f คือระยะระหว่างริ้วมืด 2 ริ้วที่ติดต่อกันในช่วง AB ของแผ่นแก้วในรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.15 ก)ริ้วมืด-สว่างในช่วง AB ข)ริ้วมืด-สว่างตรงบริเวณ B

ถ้าความหนาของฟิล์มสารตัวอย่างที่เคลือบบนกระจกแผ่นล่าง Δd เท่ากับ $\lambda/2$ ค่าของ Δm จะเป็น 1 และริ้วมืดแต่ละริ้วก็จะเลื่อนไปเป็นระยะเท่ากับ f แต่ถ้า Δd มีค่าน้อยกว่า $\lambda/2$ ระยะเหลื่อม

ก็จะน้อยกว่า f รูปที่ 1.15ข แสดงการเหลื่อมกันของริ้วตรงจุด B โดยระยะเหลื่อมมีค่าเป็น Δf ในกรณีเช่นนี้จะเขียนสมการของ Δm ได้เป็น[12]

$$\Delta m = (\Delta f/f) \qquad \text{.....(22)}$$

เมื่อแทนค่า Δm จากสมการ (22) ลงในสมการ (21) จะได้สมการของความหนาของแผ่นฟิล์มของสารตัวอย่างที่เคลือบตรงบริเวณ BC เป็น

$$\Delta d = (\Delta f/f)(\lambda/2) \qquad \text{.....(23)}$$

ในการทดลอง ผู้ทำการทดลองต้องทราบว่าความยาวคลื่นของแสงที่เกิดการแทรกสอดนั้นเป็นเท่าใด ดังนั้นเมื่อวัดระยะระหว่างริ้วมืดตรงบริเวณก่อนเคลือบสาร และระยะเหลื่อมของริ้วมืดตรงบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่เคลือบกับส่วนที่ไม่ได้เคลือบ ก็จะทราบความหนาของฟิล์มของสารตัวอย่างได้

1.8 การวัดความหนาของฟิล์มด้วยผลึกควอทซ์

การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยผลึกควอทซ์มีหลักการว่า เมื่อมีมวลสารมาเกาะติดบนผิวด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของผลึกควอทซ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกจะเปลี่ยนไป โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้ขึ้นอยู่กับ ความหนา ค่าคงที่ของความยืดหยุ่น (elastic constant) และ ความหนาแน่น ของมวลสารที่เข้ามาเกาะติด[7]

การตัดผลึกที่ใช้ในการวัดความหนาต้องเป็นไปในลักษณะที่ระนาบของแผ่นผลึกทำมุม 35 องศา 20 ลิปดากับแกน c ของผลึก[7] เรียกการตัดแบบนี้ว่าการตัดแบบ AT ซึ่งการตัดแผ่นผลึกแบบนี้ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกเปลี่ยนไปไม่เกิน 5×10^{-6} เฮิร์ตซ์ในช่วงอุณหภูมิ $-20^{\circ}C$ ถึง $60^{\circ}C$[13] สำหรับความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกที่ตัดแบบ AT จะเป็นดังสมการ[14]

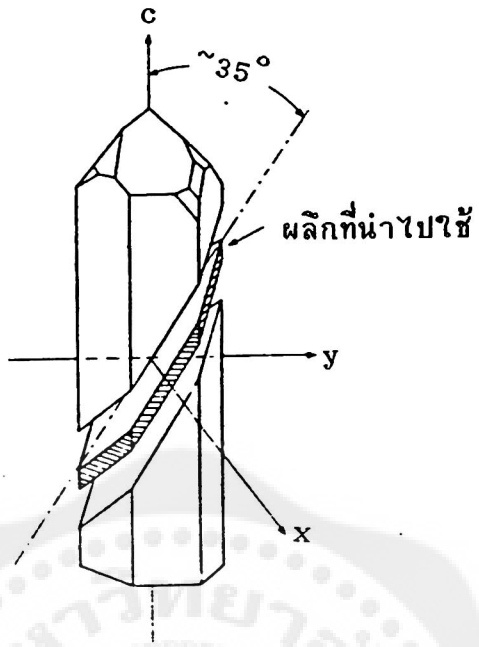
$$f = (1/2d)(e/\rho)^{1/2} = N/d \qquad \text{.....(24)}$$

เมื่อ d เป็นความหนาของผลึก

ρ เป็นความหนาแน่นของผลึก

e เป็นค่าคงที่แห่งความยืดหยุ่น (elastic constant)

และ $N = (e/4\rho)^{1/2}$



รูปที่ 1.16 การตัดผลึกแบบ AT

วอร์นเนอร์(Warner)และสต๊อกบริดจ์(Stockbridge)[15]แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่ Δf ที่เกิดจากการเกาะของมวล m บนพื้นผิวซึ่งมีพื้นที่ A ในระบบที่เป็นตัวสั่นพ้องเชิงกลแบบปฏิบัพ (antinodal mechanical resonator) เขียนได้เป็น

$$\Delta f = -f(km/\rho Ad) \qquad .....(25)$$

เมื่อค่าคงที่ k มีค่าประมาณ 1 และเครื่องหมายลบแสดงการลดลงของความถี่
จากสมการ (1) และ (2) ทำให้เขียน Δf ได้ใหม่ว่า

$$\Delta f = (-f\,k\,m)/N\rho A$$
$$= -Cm/A$$
$$= -Ct\rho_{film} \qquad .....(26)$$

เมื่อ $C = f^2k/N\rho$ = ค่าคงที่ของผลึก

และ $m = At\rho_{film}$ ซึ่ง t และ ρ_{film} เป็นความหนาและความหนาแน่นของฟิล์มตามลำดับ

ถ้าสมมุติว่าฟิล์มมีความหนาอย่างสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นคงที่ จะได้ว่าความหนาเฉลี่ยของฟิล์มเท่ากับ $\Delta f/C\rho_{film}$ ตารางที่ 1 แสดงค่า C และพารามิเตอร์ของผลึกควอทซ์ที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน

ความถี่เรโซแนนซ์ (MHz)	ความหนาของผลึก (mm)	น้ำหนักสาร/พื้นที่ (gm/cm^2) ที่เปลี่ยนไปต่อความถี่ 1 Hz	การเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อหน่วยความหนาแน่นของฟิล์มหนา 1 A°	ความหนาสูงสุดของความหนาแน่น 1 หน่วย ($\Delta f/f=1\%$)
1	1.67	4.42×10^{-7}	0.022	44.2
3	0.56	4.91×10^{-8}	0.203	14.73
6	0.28	1.23×10^{-8}	0.815	7.38
10	0.167	4.42×10^{-9}	2.26	4.42
15	0.11	1.96×10^{-9}	5.1	2.92

ตารางที่ 1.4 ค่าคงที่และความไวของผลึกที่ตัดแบบ AT ที่มีต่อมวลสารที่มาเกาะติด[7]

เป็นที่น่าสังเกตจากสมการ (26) ว่า ความถี่ที่เปลี่ยนไป Δf เป็นสัดส่วนกับ f^2 ด้วยเหตุนี้ผลึกที่มีความถี่เรโซแนนซ์สูงจะมีความไวมากกว่าผลึกที่มีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำ อย่างไรก็ดี Δf จะแปรผันแบบเชิงเส้นกับมวล m ตามสมการ (25) เฉพาะเมื่อความหนาของฟิล์ม (t) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของผลึก (d) ประกอบกับ Δf มีค่าน้อยกว่า 0.01f ทำให้การวัดความหนาของฟิล์มด้วยผลึกมีขีดจำกัด โดยผลึกที่มีความไวสูงสามารถวัดความหนาของฟิล์มได้น้อยและผลึกที่มีความไวต่ำจะวัดความหนาของฟิล์มได้มากกว่า ผลึกที่ใช้กันทั่วไปจะมีความถี่เรโซแนนซ์ 5 ถึง 6 เมกกะเฮิร์ตซ์ สำหรับความถี่ในช่วงนี้ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก 1.8×10^{-8} กรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งในกรณีฟิล์มของเหล็กจะเทียบได้กับเป็นการเกาะติดของชั้นเดียว (monolayer) 0.12 ชั้น หากเหล็กที่มาเกาะติดมีจำนวนชั้นเดียว 25000 ชั้นการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะเท่ากับ 1%[7] ซึ่งถ้าความหนามรค่ามากกว่านี้ Δf ก็จะไม่มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับความหนาของฟิล์ม ก่อนที่จะใช้ผลึกในการวัดความหนาของฟิล์มหากมีการเคลือบอลูมิเนียมลงบนผิวของผลึกชั้นหนึ่งก่อน ก็จะทำให้การล้างสารที่เกาะติดบนผลึกทำได้ด้วยการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่านั้นซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย ทำให้สามารถนำผลึกมาใช้ใหม่ได้

กระบวนการวัดความหนาของฟิล์มด้วยผลึกเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นให้ผลึกสั่นด้วยไฟฟ้า โดยต้องต่อขั้วไฟฟ้าตรงบริเวณกึ่งกลางหน้าผลึกทั้ง 2 ด้าน การเชื่อมต่อต้องเป็นไปในลักษณะที่ทำให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดความต้านทานในวงจรเรโซแนนซ์ การสั่นของผลึกเป็นการสั่นในรูปแบบเรโซแนนซ์อนุกรมซึ่งความจุไฟฟ้าขนานจะมีผลเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าของความจุนี้ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้การสั่นที่ความถี่สูงของผลึกมีเสถียรภาพที่ดี

ข้อจำกัดของความไวสูงสุดของอุปกรณ์วัดความหนานี้ได้แก่สิ่งต่อไปนี้ ความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ความสามารถในการสั่นของผลึก และวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยทั่วไปความไวของอุปกรณ์จะมีค่าประมาณ 10^{-8} กรัม/ตารางเซนติเมตร[7]

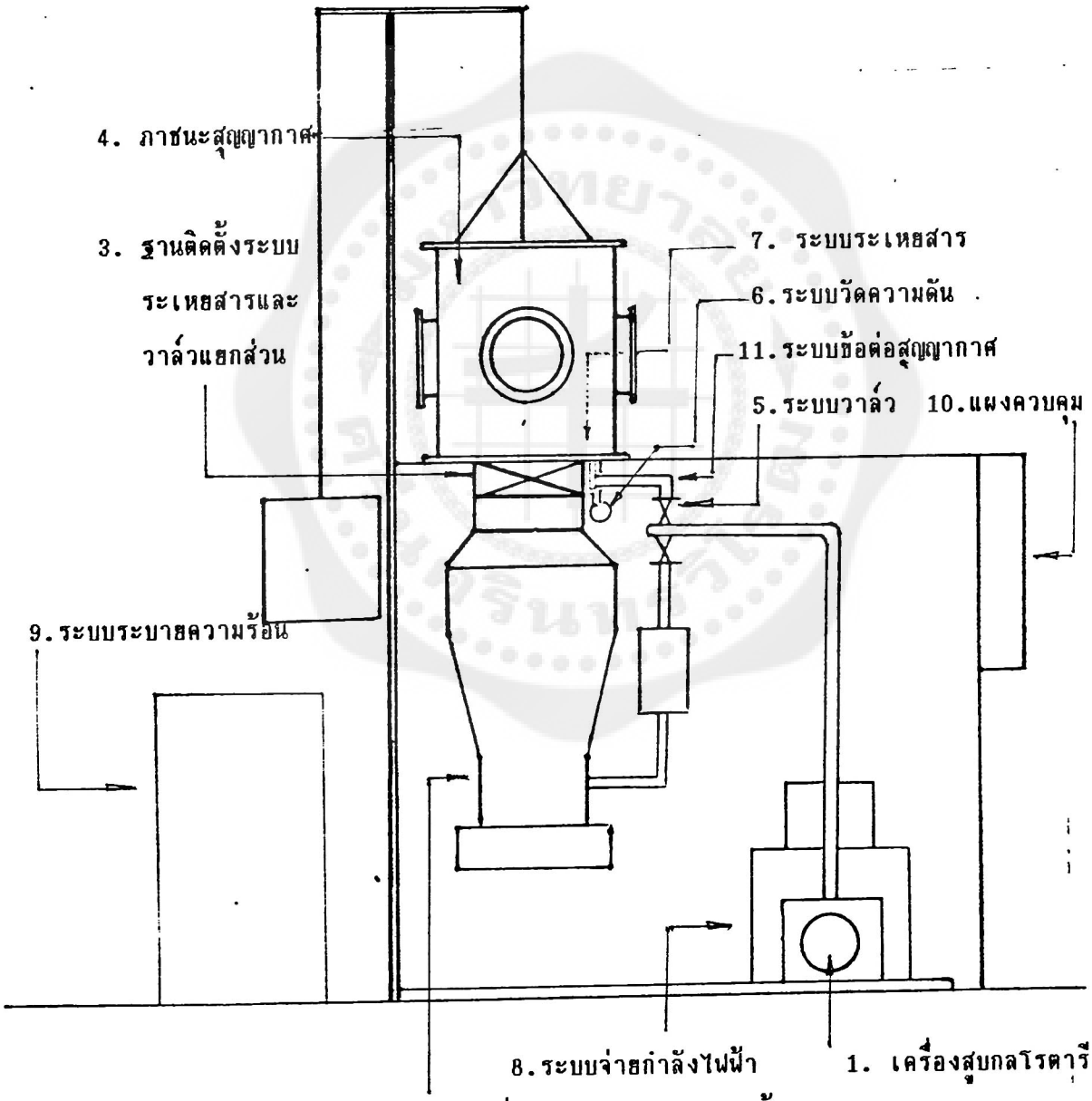
ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.6 ว่าการเคลือบสารด้วยระบบสุญญากาศต้องใช้ความร้อนในการหลอมละลายสารเคลือบ เมื่อไอของสารนี้ไปเกาะติดบนผิวผลึกก็จะนำเอาความร้อนไปด้วย ทำให้ผิวผลึกมีอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้การแผ่รังสีความร้อนของลวดความร้อนที่ใช้ในการหลอมละลายก็ยังเป็นองค์ประกอบอีกอันหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิของผลึกเพิ่มขึ้น อันจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของฟิล์มเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการระบายความร้อนออกจากผลึก ซึ่งอาจจะทำได้โดยสร้างตัวเรือนขึ้นมาเพื่อรองรับผลึกแล้วใช้ท่อน้ำเย็นพันรอบ ๆ ตัวเรือนนี้ และเปิดช่องตัวเรือนนี้เท่าที่จำเป็น

เนื่องจากความถี่ของผลึกควอทซ์เป็นตัวกำหนดความถี่ของของวงจรออสซิลเลเตอร์ เมื่อความถี่ของผลึกเปลี่ยนไปความถี่ที่ได้จากวงจรจึงเปลี่ยนไปด้วย การวัดความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้ทำได้โดยใช้เครื่องนับจำนวนพัลส์ ซึ่งสามารถให้ความละเอียดในช่วง 1 เฮิรตซ์ที่ความถี่ 6 เมกกะเฮิรตซ์ การวัดอัตราเปลี่ยนแปลงของความถี่นี้ ซึ่งก็เท่ากับเป็นการวัดอัตราการเกาะของสารบนผลึก ทำได้โดยป้อนสัญญาณจากเครื่องนับนี้ต่อไปยังเครื่องหาอนุพันธ์ของพัลส์ (pulse diferential unit)

เครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางแบบผลึกควอทซ์นี้ นอกจากจะใช้วัดความหนาของฟิล์มและอัตราการเกาะของสารแล้ว ยังสามารถใช้ควบคุมอัตราการระเหยของสารได้อีกด้วย โดยสามารถนำเครื่องวัดความหนานี้ไปควบคุมกำลังที่ป้อนให้กับขดลวดความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวสารระเหย

บทที่ 2
การออกแบบและการสร้าง
เครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ

เครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศประกอบด้วย ระบบสูบอากาศความดันต่ำ ภาชนะสุญญากาศ พร้อมทั้งแผ่นฐาน ระบบระเหยสาร ระบบระบายความร้อน ข้อต่อและท่อต่าง ๆ รูปที่ 2.1 เป็นแผนภาพที่แสดงถึงระบบและส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.1 แผนภาพของเครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น

รายละเอียดของระบบต่าง ๆ จะได้กล่าวเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ระบบสูบอากาศความดันต่ำ

ระบบสูบอากาศความดันต่ำในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบกลแบบโรตารี เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันและระบบทำความเย็น ระบบสูบอากาศนี้สามารถทำให้ความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงไปในถึงระดับ 10^{-3} ถึง 10^{-6} มิลลิบาร์

2.1.1 เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้เพราะเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่มีรูปร่างเช่นนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้ไนโตรเจนเหลวในการดักไอ[4] ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องสูบ นอกจากนี้ยังเลือกน้ำมันซิลิโคน ดีซี 704 (silicone DC 704) ของบริษัทเอดเวอร์ดเป็นน้ำมันของเครื่องสูบ ซึ่งความดันต่ำสุดได้จากที่น้ำมันนี้ที่ 20°C มีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-6} มิลลิบาร์[18]

เนื่องเป็นการเหมาะสมกับการใส่อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการระเหยสาร ไว้ในภาชนะสุญญากาศจึงได้ออกแบบให้ภาชนะสุญญากาศให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตรวัสดุที่ใช้สร้างเป็นสเตนเลส ภาชนะนี้วางอยู่บนแผ่นกลมสเตนเลสที่เรียกว่าแผ่นฐาน (base plate) โดยที่ตรงกลางแผ่นฐานมีช่องรูปวงกลม ซึ่งเป็นช่องทางผ่านของอากาศที่สูบออกจากภาชนะให้ลงไปยังเครื่องสูบแบบแพร่ไอ ในการสร้างนี้ได้ให้เส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเป็น 16เซนติเมตร ระหว่างแผ่นฐานกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอมีข้อต่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตรเชื่อมต่ออยู่ ข้อต่อนี้มีกลไกเปิดปิดวาล์วแยกส่วนซึ่งเป็นวาล์วที่อยู่ระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอ (ดูรูปที่ 2.15 และ 2.17 ประกอบ)

ที่ความดันประมาณ 10^{-4} มิลลิบาร์ การไหลของก๊าซจะมีลักษณะที่เรียกว่า การไหลโมเลกุล (molecular flow) ทำให้เขียนความสัมพันธ์ระหว่างความนำของช่องและพื้นที่ของมันได้ดังนี้[6]

$$C = 11.6A$$

โดย C คือความนำของช่องในหน่วย ลิตร/วินาที

และ A คือพื้นที่หน้าตัดของช่องในหน่วยตารางเซนติเมตร

ผลการคำนวณตามสมการข้างบนปรากฏว่า ความนำของช่องมีค่าเป็น 2,332 ลิตร/วินาที

นอกจากนี้เมื่อก๊าซอยู่ในสภาวะการไหลโมเลกุล ก็จะทำให้เขียนความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอัตราเร็วสูบของเครื่องสูบแบบแพร่ไอกับความนำของช่องได้ว่า[6]

$$S = 0.2C$$

ทาให้สามารถคำนวณได้ว่าอัตราเร็วของเครื่องสูบแบบแพร่ไอที่จะสร้างต้องเป็น 466 ลิตร/วินาที แต่เนื่องจากระบบอาจจะมีการรั่วไหล ในการออกแบบจึงได้เพิ่มอัตราสูบขึ้นอีกร้อยละ 25 เพื่อให้ครอบคลุมการรั่วไหลนี้ ทำให้อัตราสูบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่ออกแบบมีค่าเป็น

$$S = 466 + 116.5 = 582.5 \text{ ลิตร/วินาที}$$

ผลการคำนวณที่ได้นี้ทำให้กล่าวได้ว่า เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันที่จะสร้างขึ้นต้องมีอัตราเร็วของการสูบประมาณ 600 ลิตร/วินาที

เนื่องจากในการคำนวณอัตราเร็วของเครื่องสูบที่ได้ผลข้างบน ได้มาจากการที่ก๊าซมีการไหลแบบโมเลกุลเมื่อความดันมีค่าประมาณ 10^{-4} มิลลิบาร์ ดังนั้นแรงขับสูงสุดของเครื่องสูบแบบแพร่ไอที่สร้างขึ้นจะมีค่าซึ่งคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{แรงขับ} = Q = SP = (600 \times 10^{-4}) \text{ มิลลิบาร์-ลิตร/วินาที}$$

นั่นคือแรงขับสูงสุดของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างนี้มีค่า 600×10^{-4} มิลลิบาร์-ลิตร/วินาที

2.1.2 เครื่องสูบกลโรตารี

ในหัวข้อ 1.3.2 ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องสูบกลโรตารีที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องสูบหนุนหลังจะต้องมีอัตราเร็วของการสูบมากกว่าอัตราส่วนระหว่างแรงขับมากที่สุดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันต่อความดันวิกฤต เรือ

$$\text{อัตราเร็วของเครื่องสูบหนุนหลัง} > \frac{\text{แรงขับสูงสุดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ}}{\text{ความดันวิกฤต}}$$

โดยความดันวิกฤตคือความดันในระบบสุญญากาศขณะที่เครื่องสูบแบบแพร่ไอเริ่มทำงาน ในงานวิจัยนี้ได้ซื้อเครื่องสูบกลโรตารีของบริษัทเอดเวอร์ด (Edwards) แบบ E2M12 ซึ่งมีกำลังสูบสูงสุด 238 ลิตร/นาทีหรือ 3.97 ลิตร/วินาทีเพื่อใช้ในระบบสุญญากาศความดันต่ำ จากอัตราสูบสูงสุดนี้ และค่าแรงขับสูงสุดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอที่ได้คำนวณไว้ในหัวข้อ 2.1.1 ซึ่งมีค่าเป็น 600×10^{-4} มิลลิบาร์-ลิตร/วินาทีนี้ ถ้าให้ P_c เป็นความดันวิกฤตของระบบสุญญากาศจะได้ว่า

$$P_c = \frac{600 \times 10^{-4}}{3.97} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ มิลลิบาร์}$$

นั่นคือจากการออกแบบขนาดของช่องที่เชื่อมต่อระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน และจากสมบัติของเครื่องสูบโรตารีที่ได้มา ทำให้ระบบสุญญากาศมีความดันวิกฤตเท่ากับ 1.5×10^{-2} มิลลิบาร์

2.1.3 แบบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

ส่วนประกอบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน แบ่งออกได้เป็นส่วนประกอบภายนอกและส่วนประกอบภายใน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ส่วนประกอบภายนอก

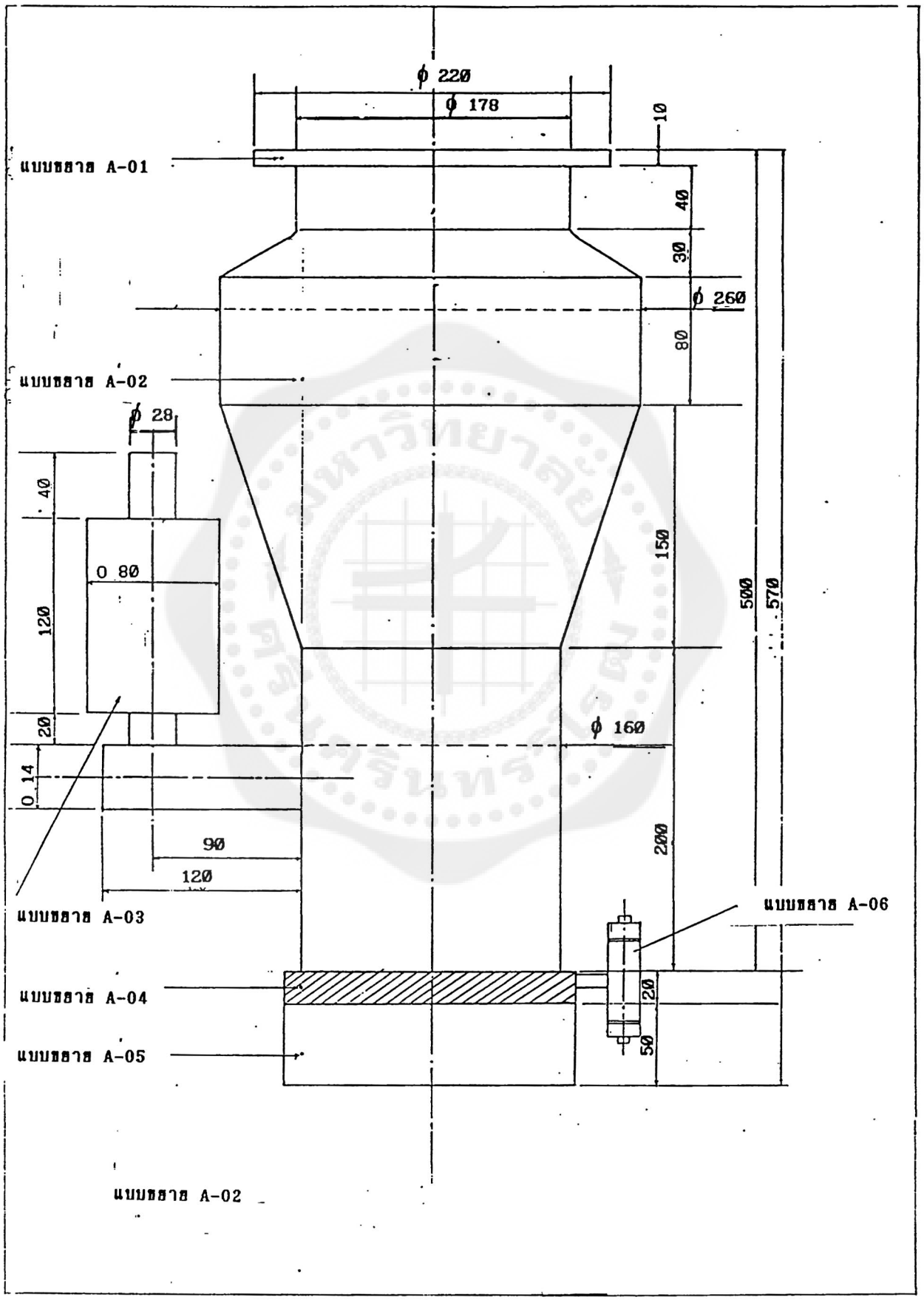
เป็นชั้นนอกของเครื่องสูบ ทำด้วยแผ่นสเตนเลสม้วนและเชื่อมให้มีรูปทรงตามแบบในรูปที่ 2.2 โดยส่วนกลางขยายขนาดให้ใหญ่กว่าช่องหน้าแปลน ผนังภายนอกมีท่อน้ำที่ทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร พันอยู่โดยรอบเพื่อระบายความร้อนให้แก่ผนัง ทั้งนี้เพื่อว่าเมื่อโมเลกุลของไอน้ำมันมากระทบผนัง พลังงานจลน์ของไอจะลดลงและกลั่นตัวเป็นหยดน้ำมันไหลกลับลงสู่อ่างน้ำมันด้านล่าง

ภายในส่วนของที่ควบแน่น(condenser) (ซึ่งต่อเชื่อมกับเครื่องสูบกลโรตารีด้วยท่อและวาล์วส่วนหน้า) มีฝอยสเตนเลสบรรจุอยู่ฝอยนี้ทำหน้าที่ดักไอน้ำมัน โดยภายนอกของที่ควบแน่นนี้มีท่อน้ำเย็นพันอยู่โดยรอบเพื่อระบายความร้อน และทำให้น้ำมันกลั่นตัวไหลกลับเข้าสู่อ่างน้ำมัน

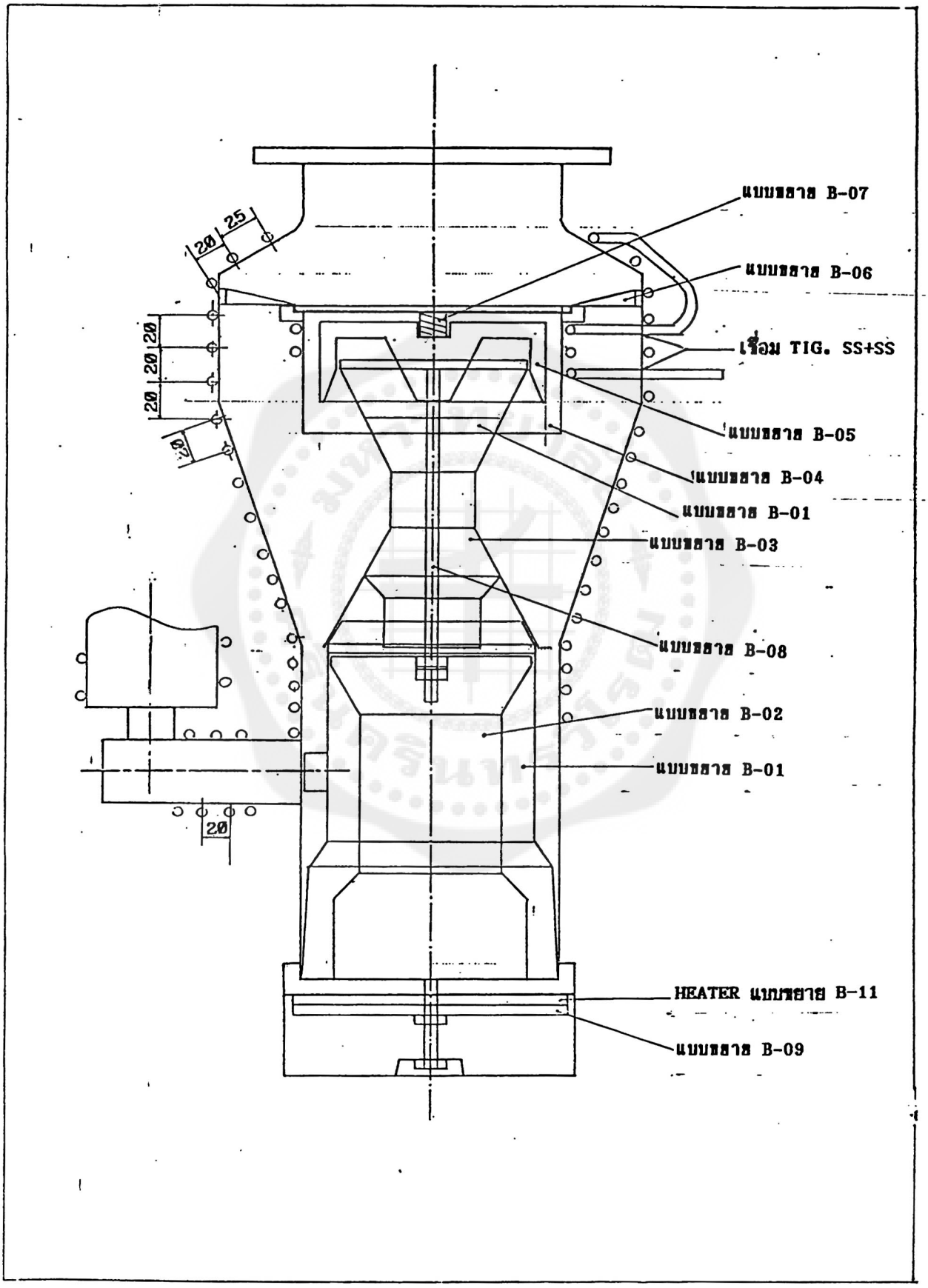
ส่วนประกอบภายใน

มีลักษณะเป็นชั้นตามรูปที่ 2.9 ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้สร้างขึ้นตามแบบในรูปที่ 2.7 เมื่อประกอบชิ้นส่วนเหล่านี้เข้าด้วยกันแล้ว จะมีลักษณะภายนอกดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนลักษณะภายในเป็นท่อสวมซ้อนกัน 2 ชั้น ท่อทั้ง 2 นี้ทำหน้าที่เป็นปล่องไอ ส่วนล่างของท่อนี้จมอยู่ในอ่างน้ำมัน เครื่องสูบอากาศนี้จึงมีปล่องไอ 2 ปล่องซ้อนกัน

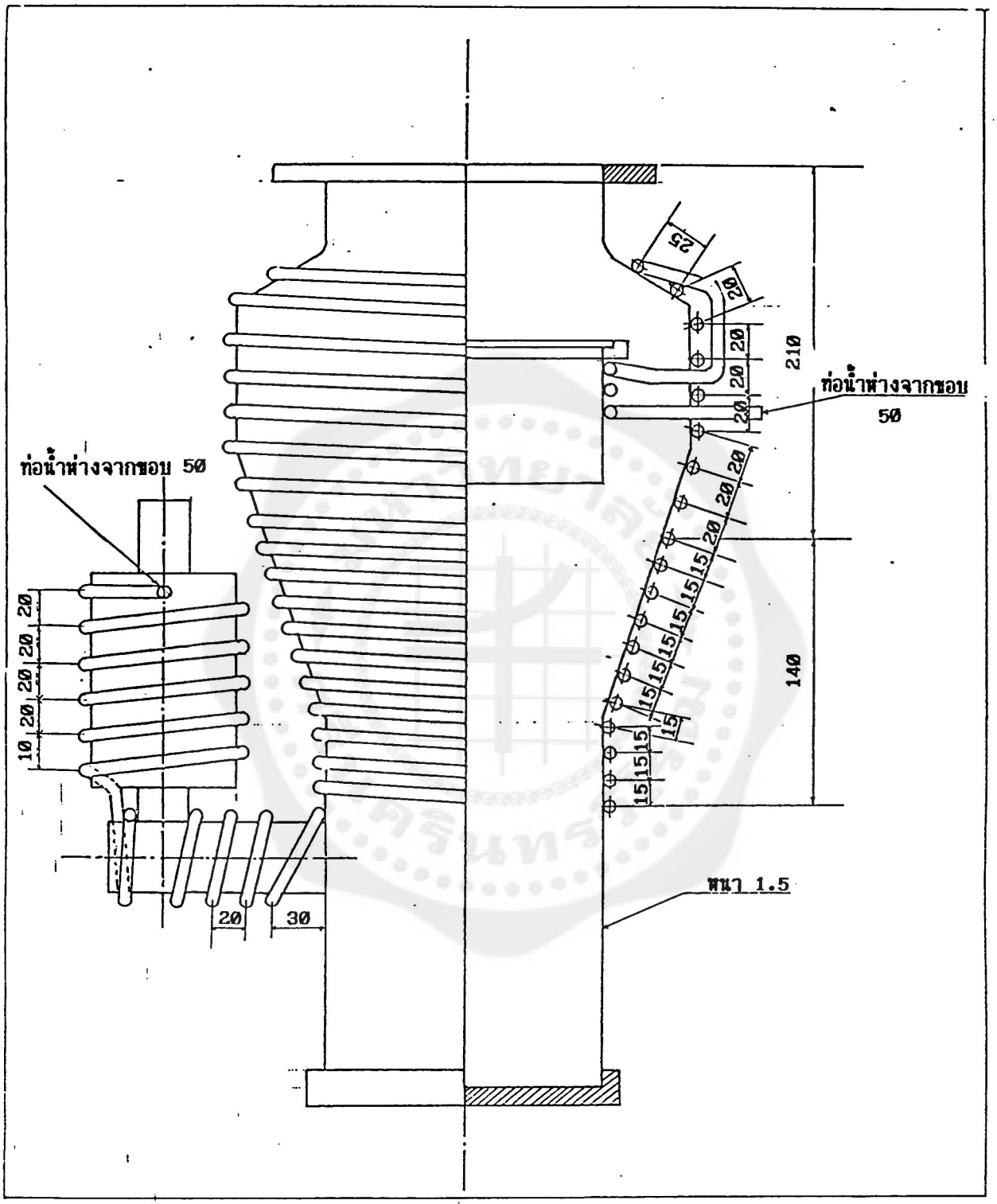
รูปที่ 2.2 ถึง 2.7 แสดงถึงแบบและส่วนขยายต่าง ๆ ของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้น รูปที่ 2.8 แสดงถึงตัวถังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอที่สร้างขึ้นตามแบบในรูปที่ 2.2 ถึง 2.4 สำหรับรูปที่ 2.9 ทั้ง ก และ ข แสดงถึงชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ซึ่งสร้างขึ้นตามแบบในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.10 ก็คือท่อไอและช่องเจ็ต ซึ่งได้จากการประกอบชิ้นส่วนในรูปที่ 2.9 เข้าด้วยกัน จากแบบหมายเลข 2 ในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้นนี้เป็นเครื่องสูบแบบ 2 จังหวะ เพราะมีน็อตเซลหรือท่อเจ็ตอยู่ 2 ตำแหน่งด้วยกัน



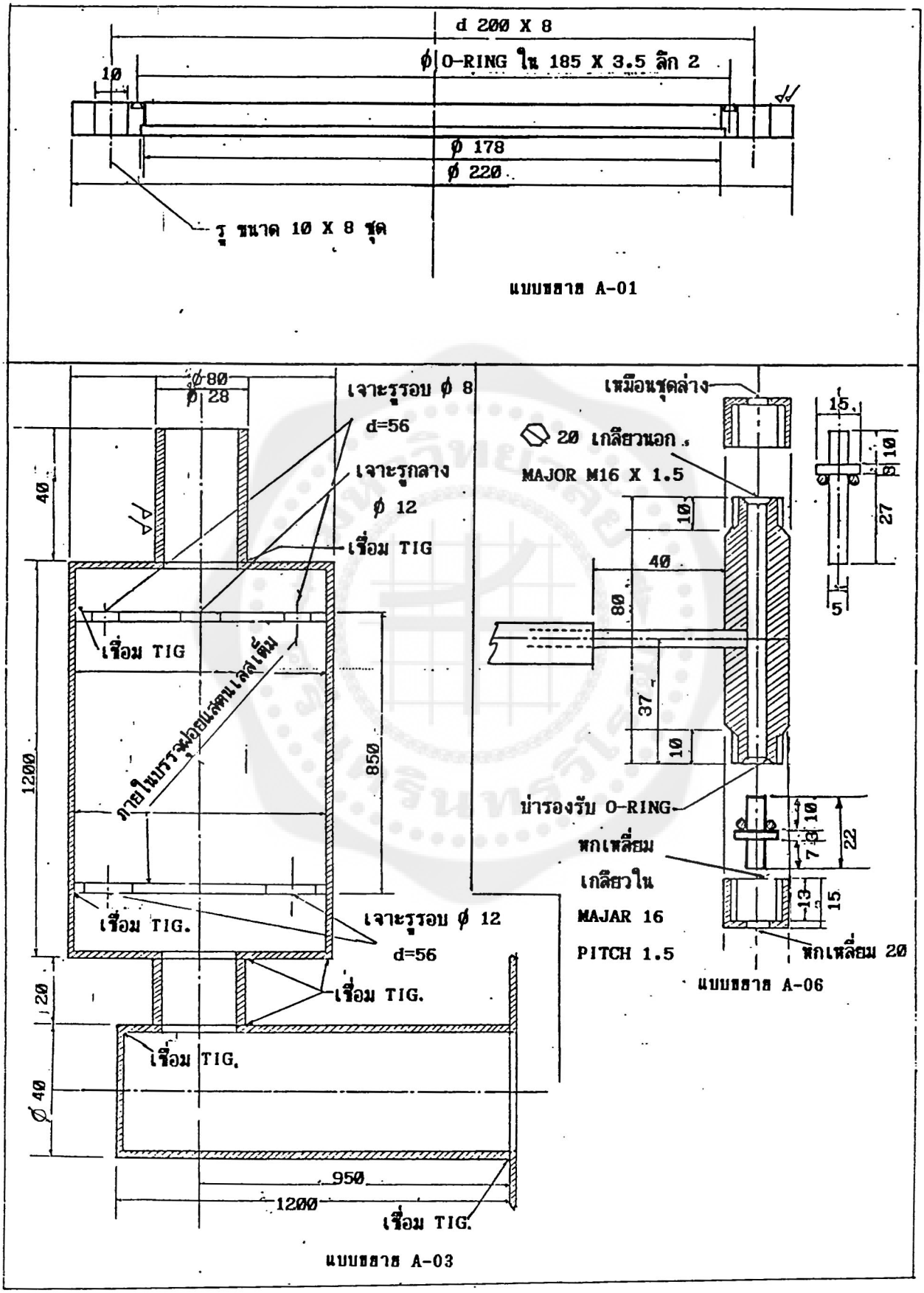
รูปที่ 2.2 แบบส่วนประกอบภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ



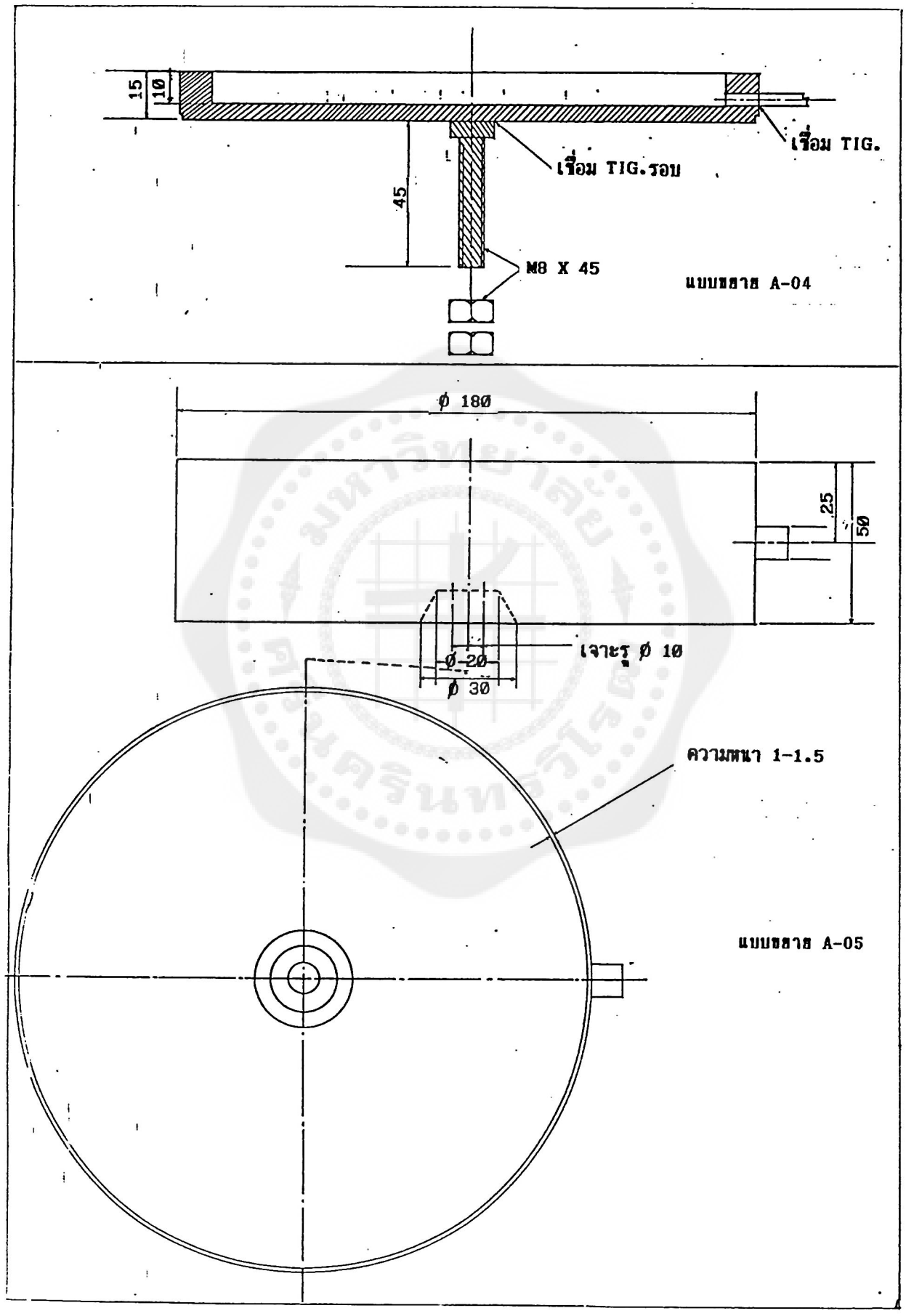
รูปที่ 2.3 แบบส่วนประกอบภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ



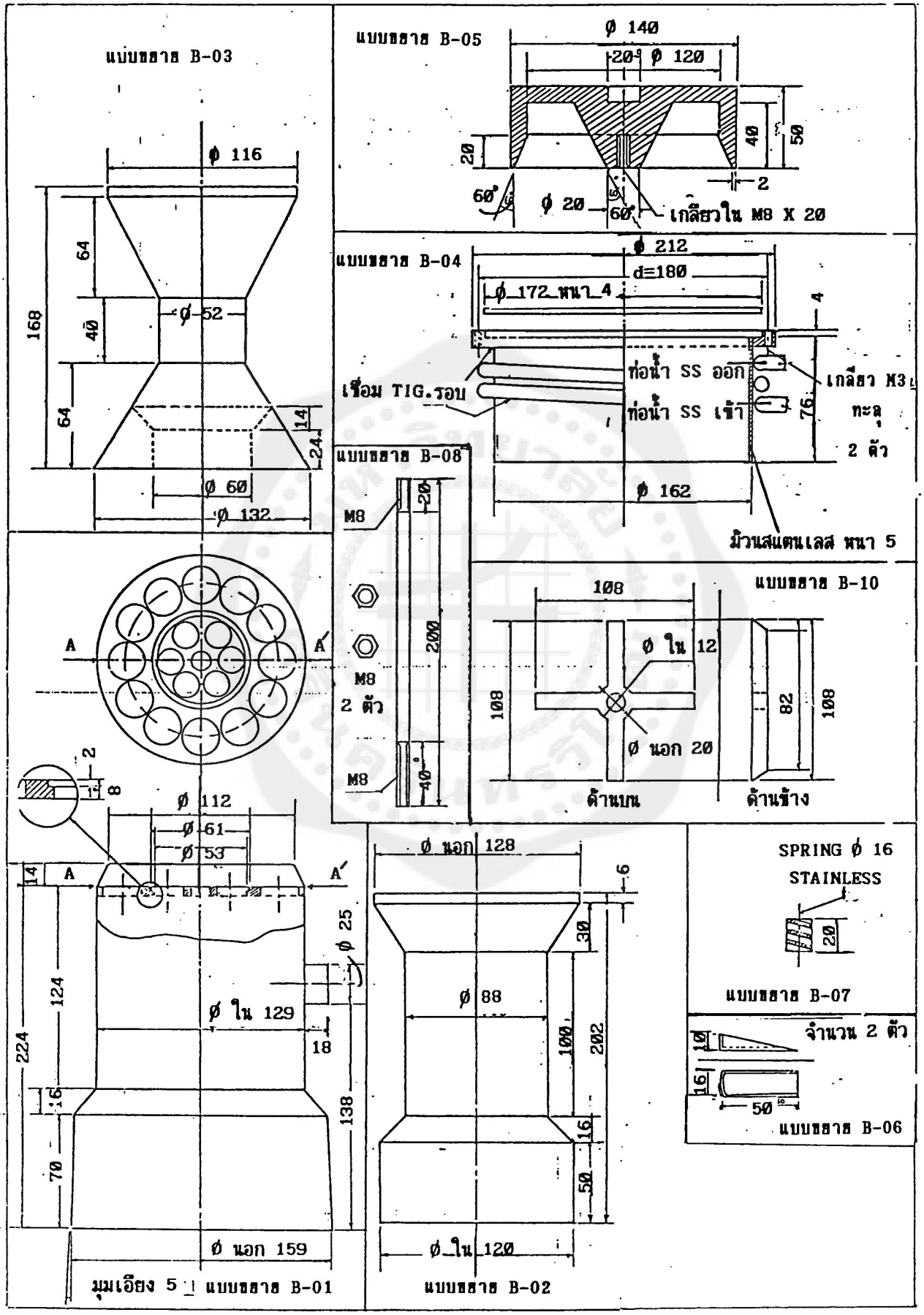
รูปที่ 2.4 แบบการพันท่อทองแดงเพื่อใช้เป็นท่อระบายความร้อน ของเครื่องสูบอากาศแบบแผ่ไอ ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร



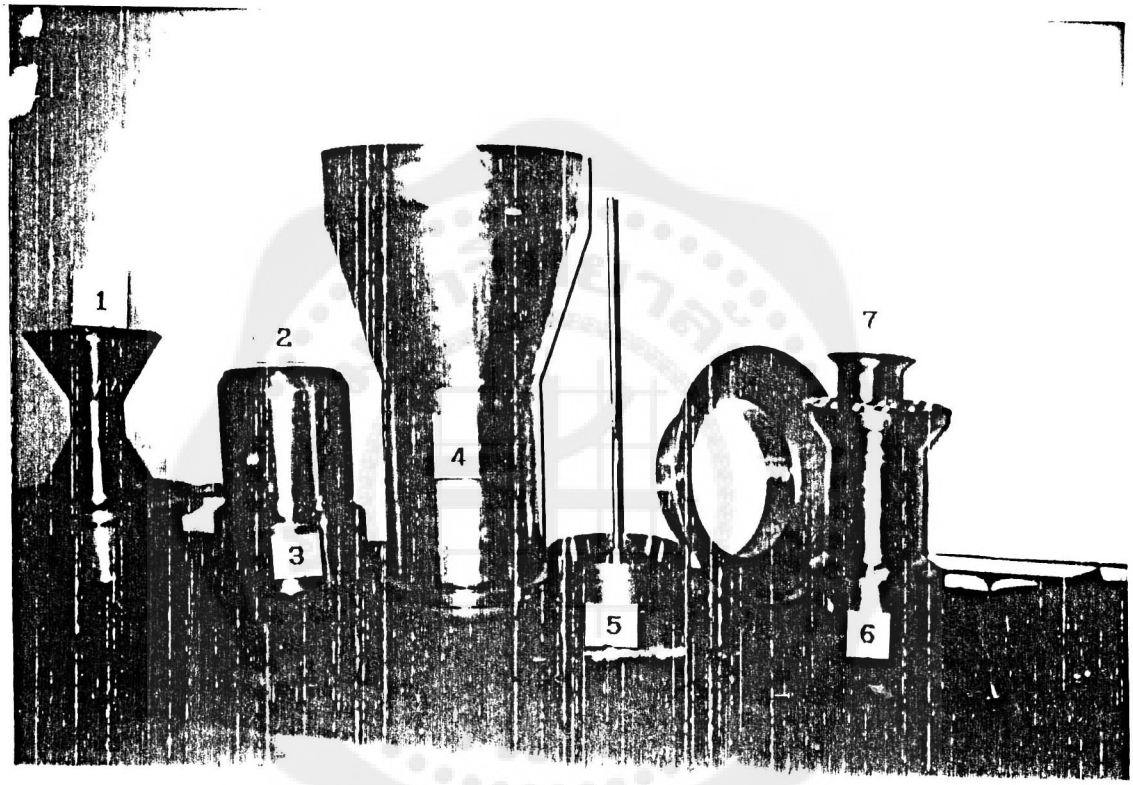
รูปที่ 2.5 ส่วนขยายที่ 1 ของส่วนประกอบภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ



รูปที่ 2.6 ส่วนขยายที่ 2 ของส่วนประกอบภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ



รูปที่ 2.7 ส่วนขยายของแบบของส่วนประกอบภายในของเครื่องสูบอากาศแบบแผ่ไอ



1. ส่วนของปล่องไอชั้นใน
2. ช่องเจ็ตล่าง
3. ปล่องไอชั้นนอก
4. ส่วนของตัวปั๊มชั้นนอก
5. ช่องเจ็ตบน
6. ปล่องไอชั้นใน
7. ส่วนของปล่องไอชั้นใน

รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนภายในและภายนอกของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้น

2.1.4 เครื่องทำความเย็นสำหรับน้ำระบายความร้อนของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

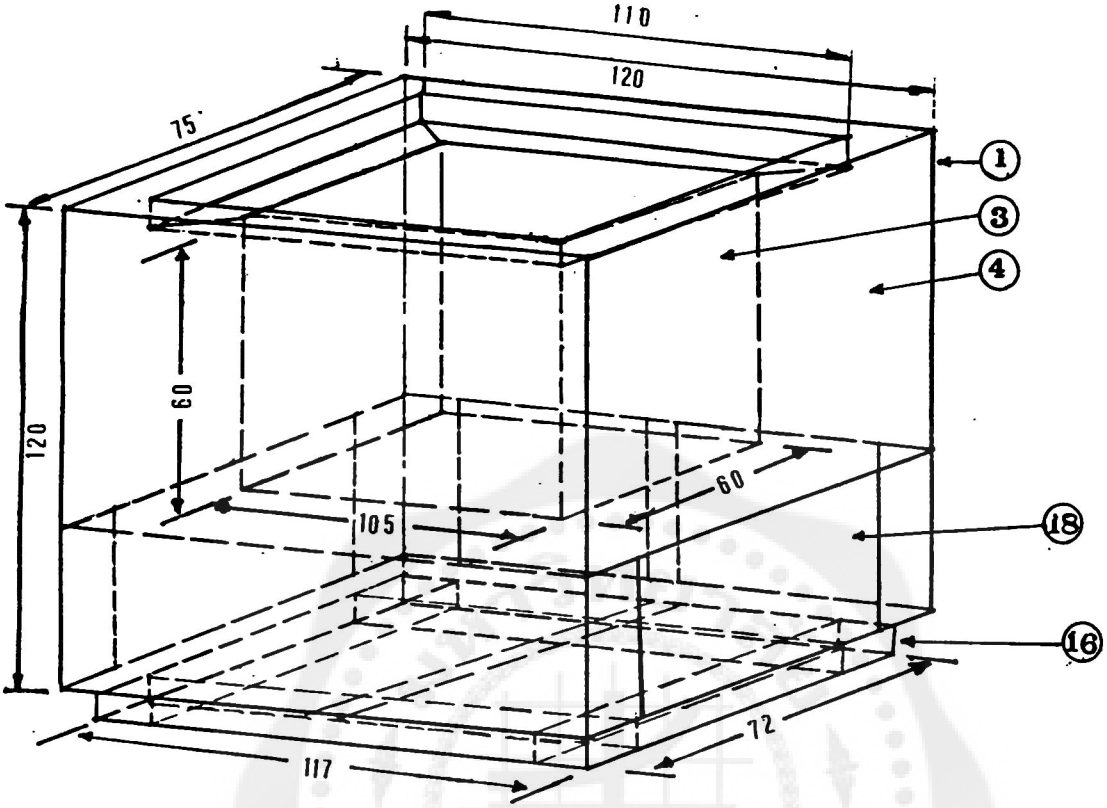
ดังที่ได้กล่าวแล้วว่า การทำงานของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันเริ่มต้นด้วยการต้มน้ำมันให้เดือดจนกลายเป็นไอ แต่ในขณะเดียวกันเครื่องสูบก็ต้องการความเย็นเพื่อที่จะทำให้ไอน้ำมันนั้นกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวอีก เครื่องสูบจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อน นอกจากนี้ระบบระบายความร้อนยังมีหน้าที่ช่วยในการระบายความร้อนของระบบระเหยสารอีกด้วย

ระบบระบายความร้อนประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำ เครื่องทำความเย็นที่สร้างประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ (compressor) ขนาด 1 แรงม้า เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตัวขยาย (expander) และเครื่องควบแน่น(condenser) ซึ่งประกอบด้วยแผงรังผึ้งและพัดลมสำหรับระบายความร้อน ท่อพักน้ำยา และตัวทำให้แห้ง (dryer)

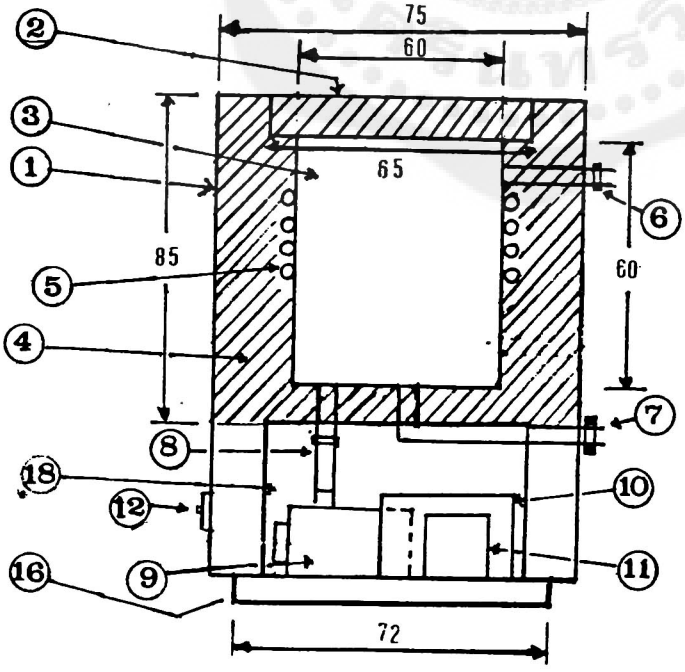
โครงของเครื่องทำความเย็นทำด้วยสเตนเลสขนาด 120x75x120 เซนติเมตร ติดล้อ 4 ล้อ เพื่อความสะดวกแก่การขนย้าย

สำหรับถังน้ำก็ทำด้วยสเตนเลสเช่นกัน ตัวถังมีขนาด 105x60x85 เซนติเมตร โดยถังน้ำนี้บรรจุอยู่ในส่วนบนของโครงของเครื่องทำความเย็น ด้านบนมีฝาปิด-เปิด ที่ผนังทั้ง 4 มีท่อน้ำเย็นเชื่อมต่อกับเครื่องทำความเย็น โดยทั้งที่ท่อน้ำเย็นและผนังทั้ง 4 ตลอดจนด้านบนของถังต่างก็มีโฟมซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนหล่อหุ้มอยู่ ด้านล่างของถังมีท่อน้ำซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องทำความเย็นและยังมีท่อน้ำทิ้ง ด้านบนมีท่อน้ำเข้า ท่อทุกท่อมีวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำ

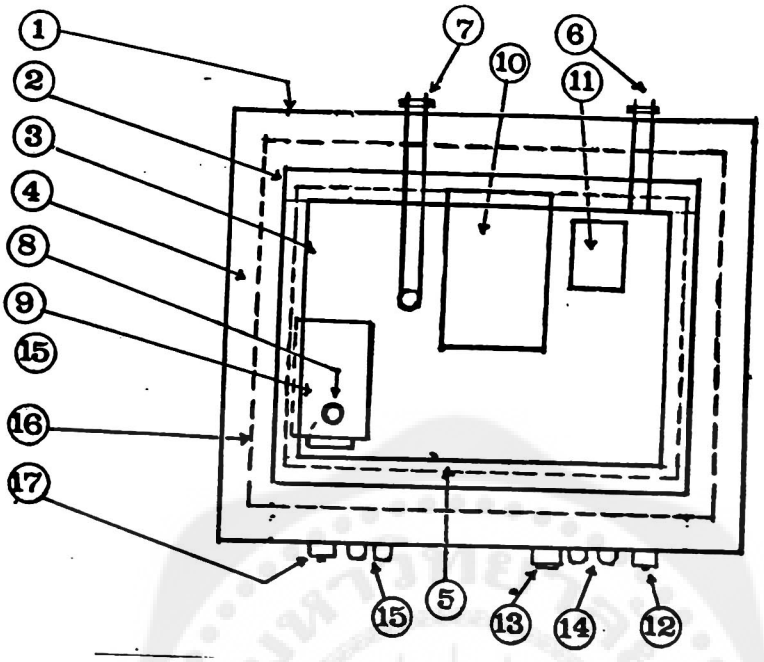
ในระบบระบายความร้อนนี้ได้ใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 160 วัตต์ ในการทำให้น้ำจากระบบนี้ไหลเวียนอยู่ในเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันและในระบบระเหยสาร รายละเอียดต่าง ๆ ของระบบระบายความร้อนนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.11 ก ข ค ง และ จ



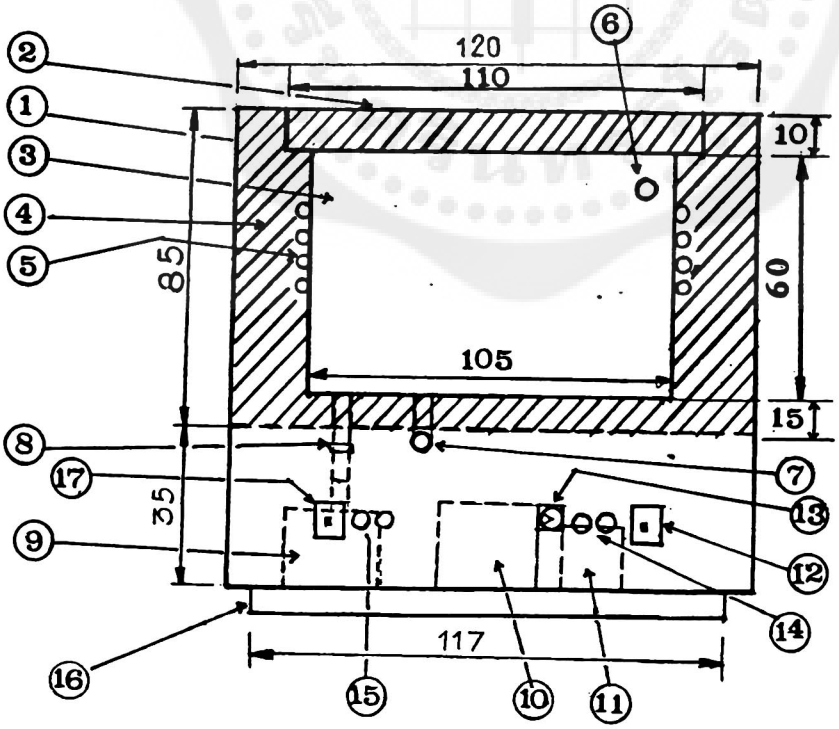
ก. ภาพแสดงโครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น



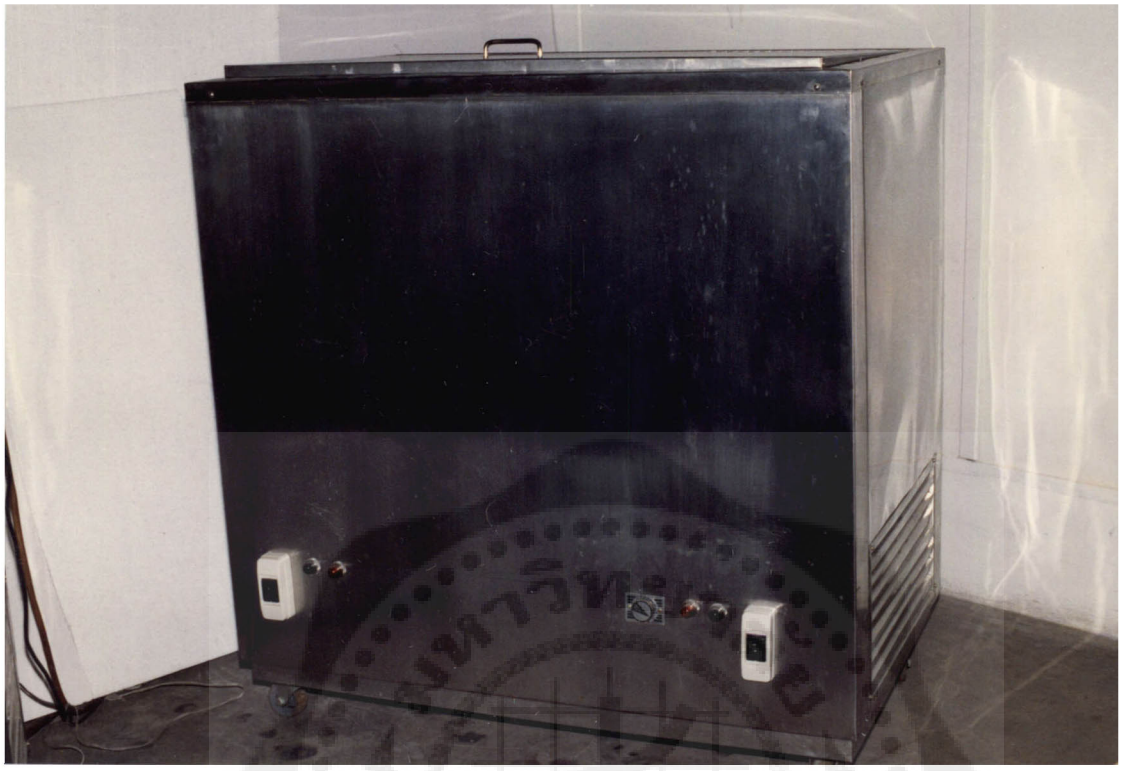
ข. ภาพแสดงภาคตัดด้านข้างของเครื่องทำน้ำเย็น



ค. ภาพแสดงภาคตัดด้านบนของเครื่องทำน้ำเย็น



ง. ภาพแสดงภาคตัดด้านหน้าของเครื่องทำน้ำเย็น



รูปที่ 2.11 เครื่องทำความเย็นสำหรับระบายความร้อนในเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

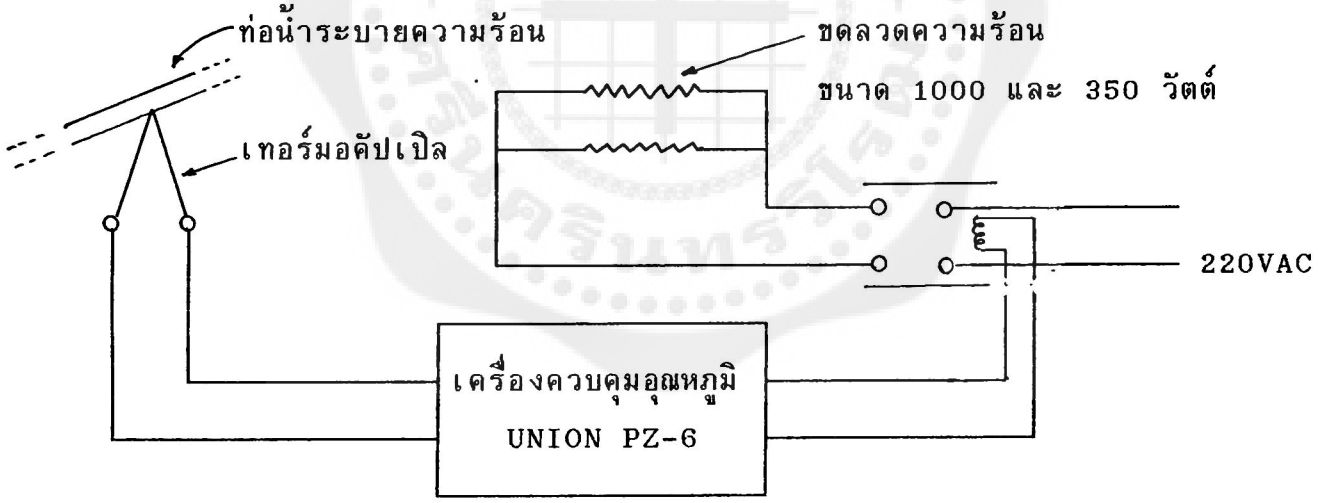
1. โครงสร้างภายนอกทำด้วยแผ่นสเตนเลสหนา 1 มม.
2. ถังน้ำเย็นทำด้วยแผ่นสเตนเลสหนา 1 มม.
3. ฝาปิดถังน้ำเย็นทำด้วยแผ่นสเตนเลสหนา 1 มม. ภายในบุด้วยโฟมเป็นฉนวนความร้อน
4. ท่อความเย็นของระบบเครื่องทำความเย็นทำด้วยท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม.
5. ช่องบุโฟมหุ้มถังน้ำเย็นสำหรับเป็นฉนวนความร้อน
6. ท่อสำหรับน้ำจากเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ไหลกลับเข้าถังน้ำเย็น
7. ท่อปล่อยน้ำทิ้ง(เมื่อต้องการทำความสะอาด)
8. ท่อดูดน้ำจากถังด้วยเครื่องสูบน้ำ เพื่อส่งไปยังท่อระบายความร้อนที่เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน
9. เครื่องสูบน้ำ กำลังขนาด 160 วัตต์

10. แผงรังผึ้งและพัดลมระบายความร้อน
11. คอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำความเย็นขนาด 1 แรงม้า
12. สวิทช์ควบคุมเครื่องทำความเย็น
13. ปุ่มปรับเครื่องควบคุมเครื่องทำความเย็น
14. หลอดหน้าปัดเครื่องทำความเย็น
15. หลอดหน้าปัดเครื่องสูบน้ำ
16. ฐานตั้งรองรับเครื่องทำความเย็น ทำด้วยไม้เนื้อแข็งขนาดหน้ากว้าง 2.5 นิ้ว หนา 1.5 นิ้ว
17. สวิทช์ควบคุมเครื่องสูบน้ำ
18. ช่องติดแผงระบายอากาศ สำหรับระบายความร้อนจากส่วนล่างของเครื่อง

2.1.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำในท่อระบายความร้อนของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันและวงจรไฟฟ้าสำหรับขดลวดความร้อนของหม้อต้มน้ำมัน

เนื่องจากการทำงานส่วนหนึ่งของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันก็คือ การต้มให้น้ำมันกลายเป็นไอ ซึ่งต้องใช้น้ำเย็นจากระบบระบายความร้อนที่ได้กล่าวไปแล้วมาใช้ในการกลั่นให้ไอน้ำมันนี้กลับมาเป็นของเหลวอีก ในการนี้หากระบบระบายความร้อนไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน การทำงานของเครื่องสูบก็จะมีประสิทธิภาพลดลง และอาจจะทำให้มีไอน้ำมันหลุดรอดเข้าไปในภาชนะสูญญากาศ นอกจากนี้ไอน้ำมันยังอาจจะถูกเครื่องสูบส่วนหน้าสูบออกไปจากระบบสูญญากาศอีกด้วย ทำให้สิ้นเปลืองน้ำมัน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมสำหรับตัดไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดความร้อนของหม้อต้มน้ำมัน

ในการสร้างได้ทำการควบคุมอุณหภูมิของผนังเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน โดยติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดปรับตั้งอุณหภูมิได้ที่มีชื่อการค้าว่า UNION แบบ PZ-6 โดยระบบควบคุมมีเทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) ซึ่งติดอยู่ที่ผนังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน เป็นตัวตรวจสอบอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของน้ำในท่อระบายความร้อนสูงขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิที่ผนังของเครื่องสูบสูงขึ้นด้วย เมื่ออุณหภูมินี้สูงเกินกว่าค่าที่กำหนด สวิตช์อัตโนมัติก็จะตัดวงจรของขดลวดความร้อนทันที



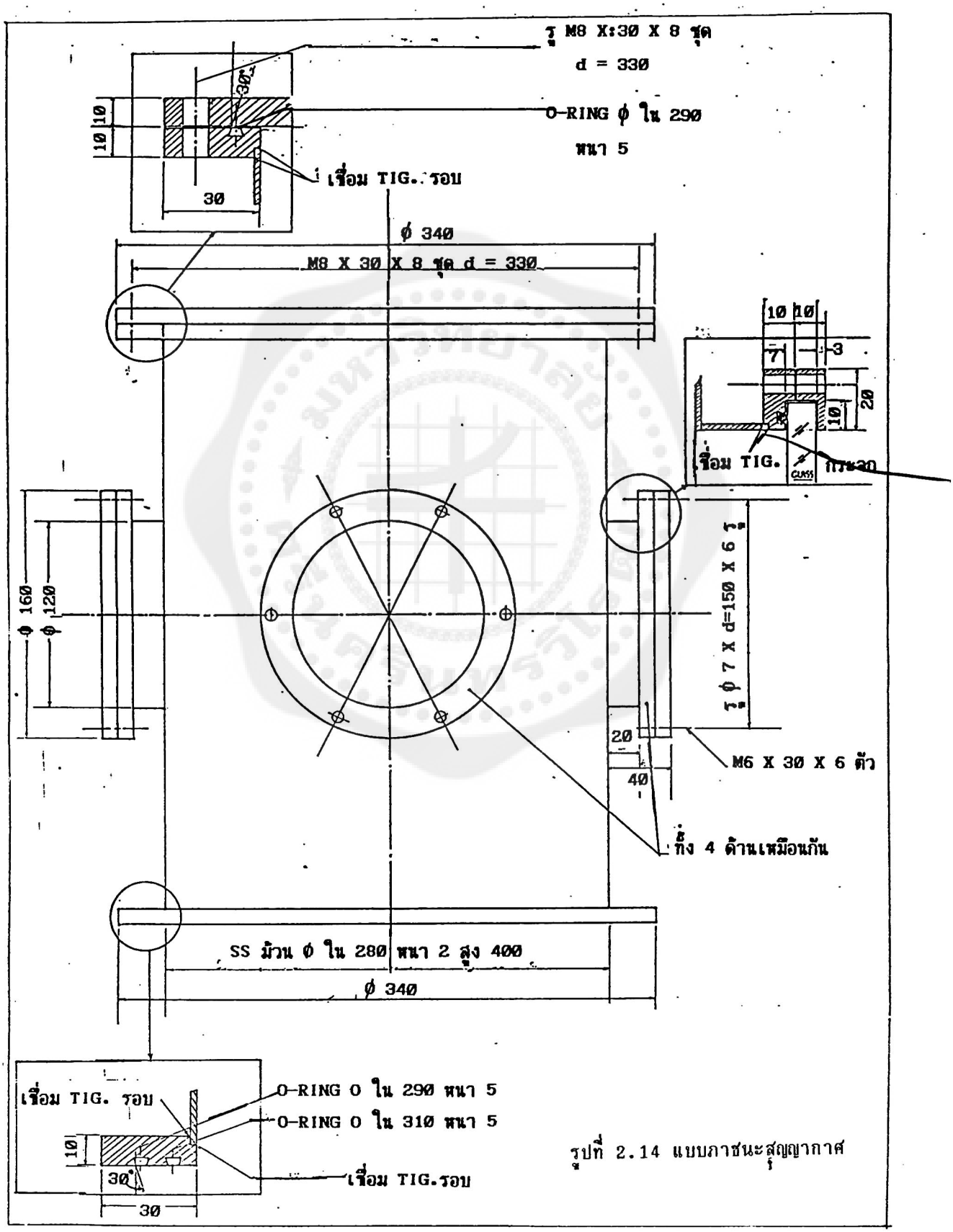
รูปที่ 2.12 วงจรระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำในท่อระบายความร้อน และวงจรไฟฟ้าของขดลวดความร้อนหม้อต้มน้ำมัน

นอกจากจะตรวจสอบอุณหภูมิในระบบสูญญากาศแล้ว ระบบควบคุมอุณหภูมิยังเป็นตัวป้องกันไม่ให้ระบบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันทำงานในกรณีที่ระบบทำความเย็นล้มเหลวอีกด้วย

2.2 ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศ คือ ภาชนะที่ครอบลงบนแผ่นฐาน ตัวภาชนะทำด้วยโลหะสเตนเลส และมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ทางด้านข้างมีช่องกระจก 4 ด้านเพื่อให้สามารถเห็นภายในภาชนะขณะทำการเคลือบสาร โดยระหว่างผิวกระจกและหน้าแปลนในแต่ละด้านมียางกลม (O-ring) คั่นอยู่ รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นภาชนะสุญญากาศซึ่งสร้างขึ้นตามแบบหมายเลข 11 ในรูปที่ 2.14

รูปที่ 2.13 ภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้น แสดงให้เห็นแผ่นปิดด้านบน และวงแหวนยึดกระจกที่ช่องมอง



รูปที่ 2.14 แบบภาชนะสุญญากาศ

2.3 แผ่นฐาน (Base Plate)

แผ่นฐาน เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน แผ่นฐานทำด้วยสเตนเลส สามารถแบ่งแผ่นฐานออกเป็นด้านบนและด้านล่าง โดยด้านบนมีรูปร่างเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร ส่วนด้านล่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยส่วนบนและส่วนล่างมีแนวแกนกลางร่วมกัน

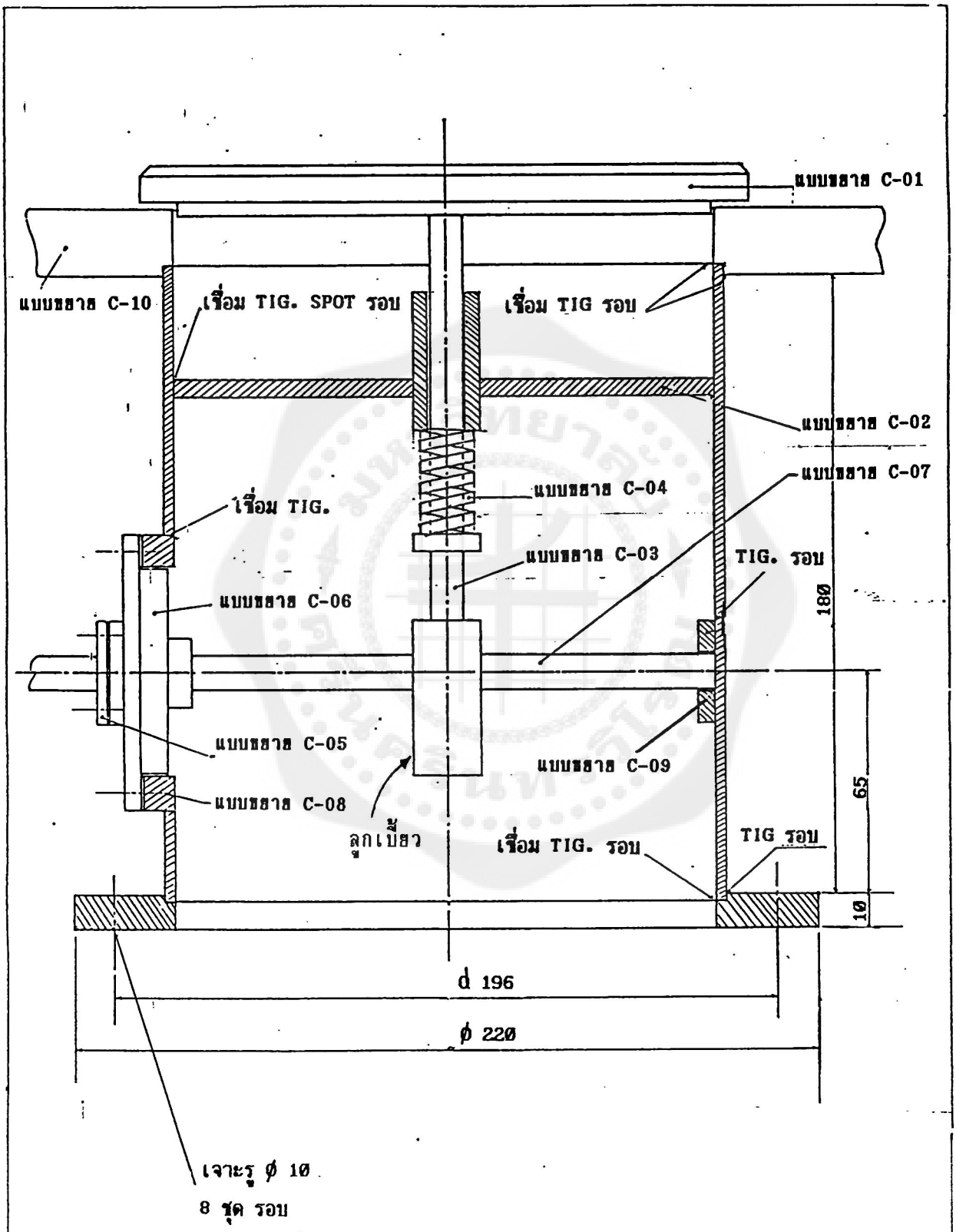
2.3.1 ส่วนล่างของแผ่นฐาน

ส่วนนี้ของแผ่นฐานคือข้อต่อที่ได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อ 2.1.1 รายละเอียดของส่วนนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15, 2.16 และ 2.17

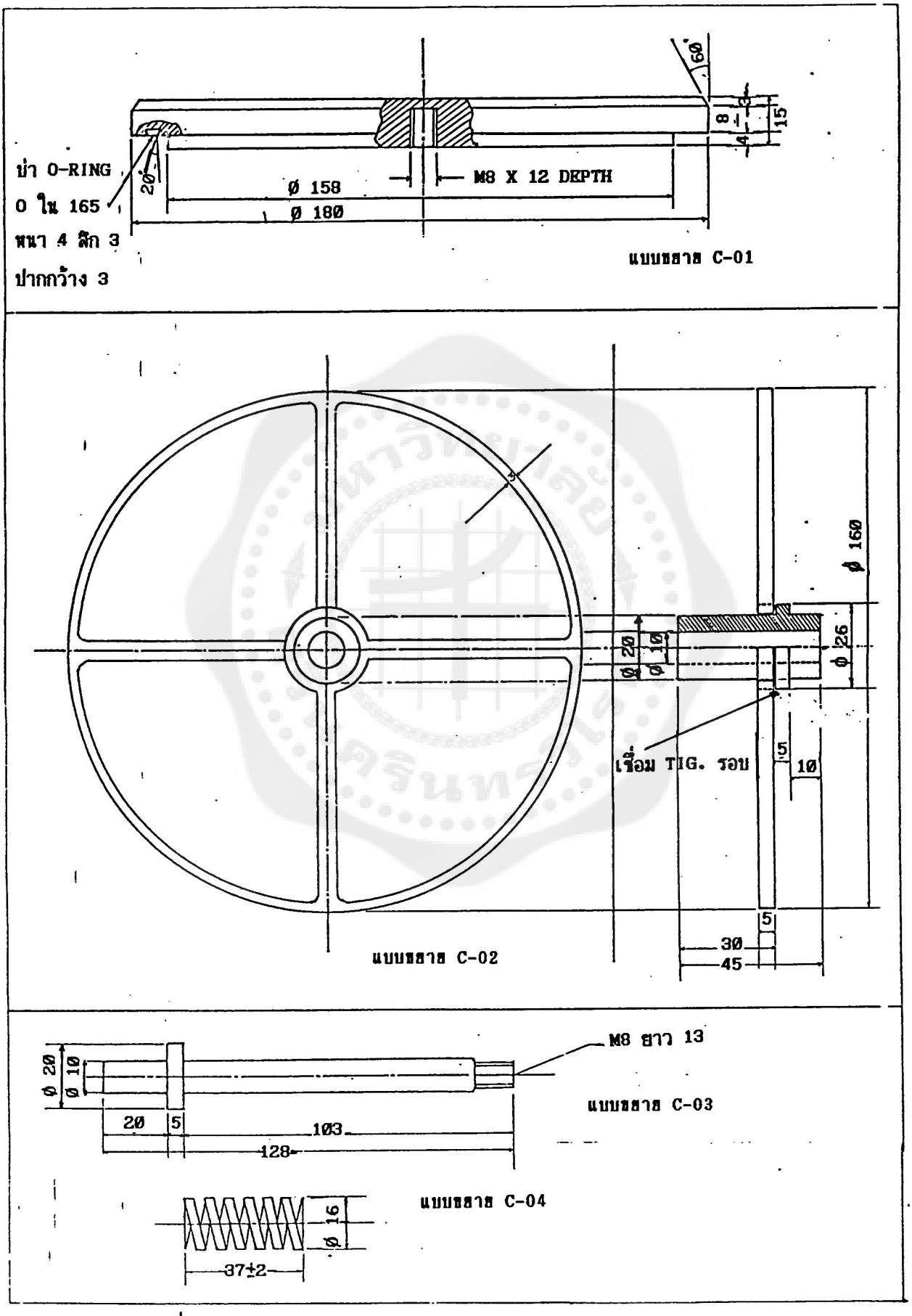
ในรูปที่ 2.15 เห็นได้ว่าฝาวาล์วมีก้านวาล์วติดอยู่ในแนวดิ่ง ปลายล่างของก้านวาล์วนี้ตั้งอยู่บนลูกเบี้ยว เมื่อหมุนแกนลูกเบี้ยวในขณะที่วาล์วปิดลูกเบี้ยวก็จะดันก้านวาล์วขึ้นทำให้ฝาวาล์วเปิดออก พร้อมกับทำให้สปริงก้านาวาล์วหด เมื่อต้องการปิดก็หมุนแกนลูกเบี้ยวกลับ สปริงบนก้านวาล์วก็จะยืดทำให้ฝาวาล์วปิดอีกครั้งหนึ่ง

2.3.2 ส่วนบนของแผ่นฐาน

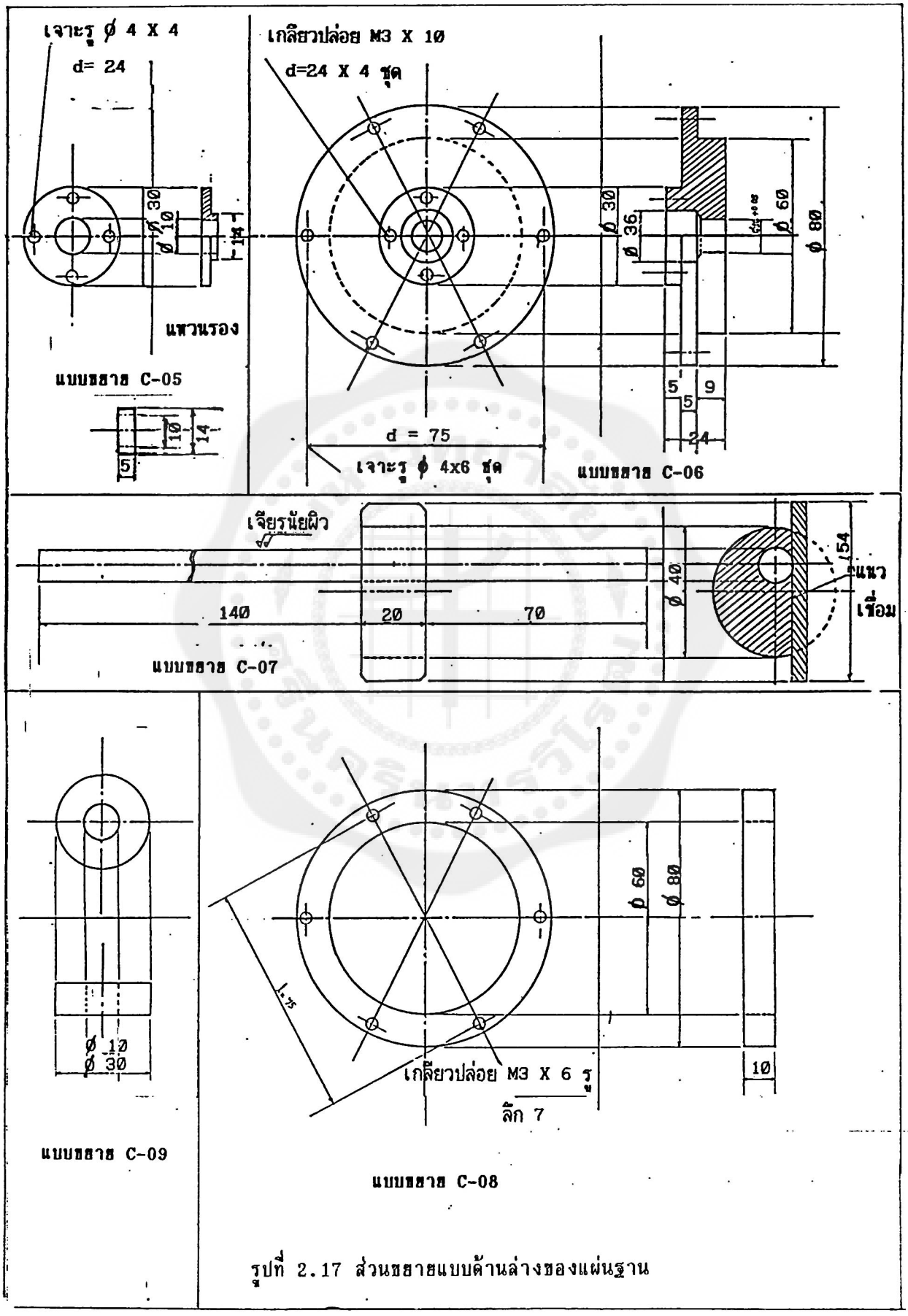
ด้านบนของแผ่นฐานเป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร ตรงกลางมีช่องกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ในแนวเส้นรอบวงรัศมี 14 เซนติเมตร รอบจุดศูนย์กลางมีช่องวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.6 เซนติเมตร จำนวน 12 ช่อง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร จำนวน 5 ช่อง ตามรายละเอียดในรูปที่ 2.18 ช่องเหล่านี้มีไว้เพื่อใส่ขั้วไฟฟ้าของระบบระเหยสารและอุปกรณ์ตรวจวัดความดัน



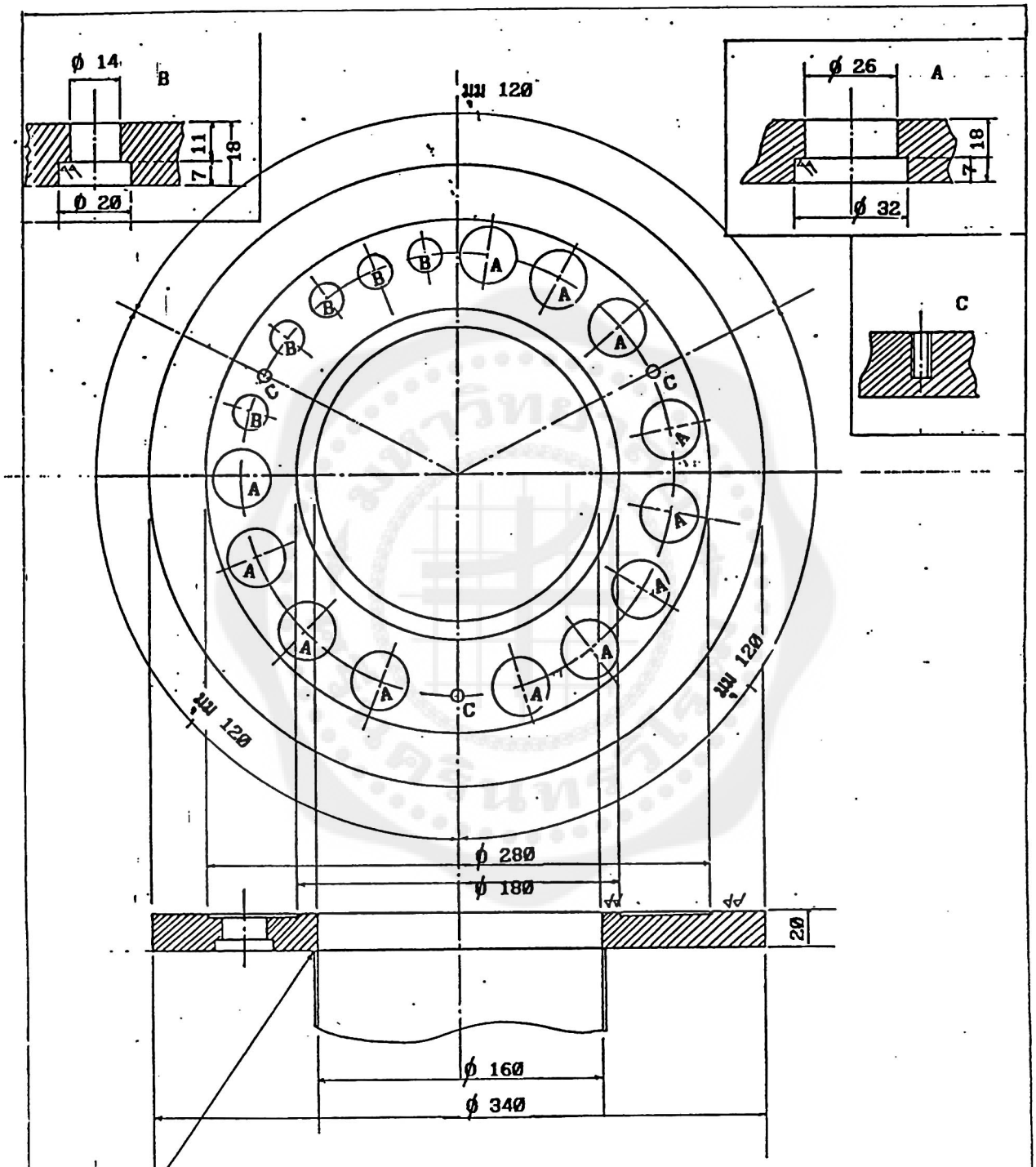
รูปที่ 2.15 แบบด้านล่างของแผ่นฐาน



รูปที่ 2.16 ส่วนขยายแบบด้านล่างของแผ่นฐาน



รูปที่ 2.17 ส่วนขยายแบบด้านล่างของแผ่นฐาน



แบบขยาย C-10

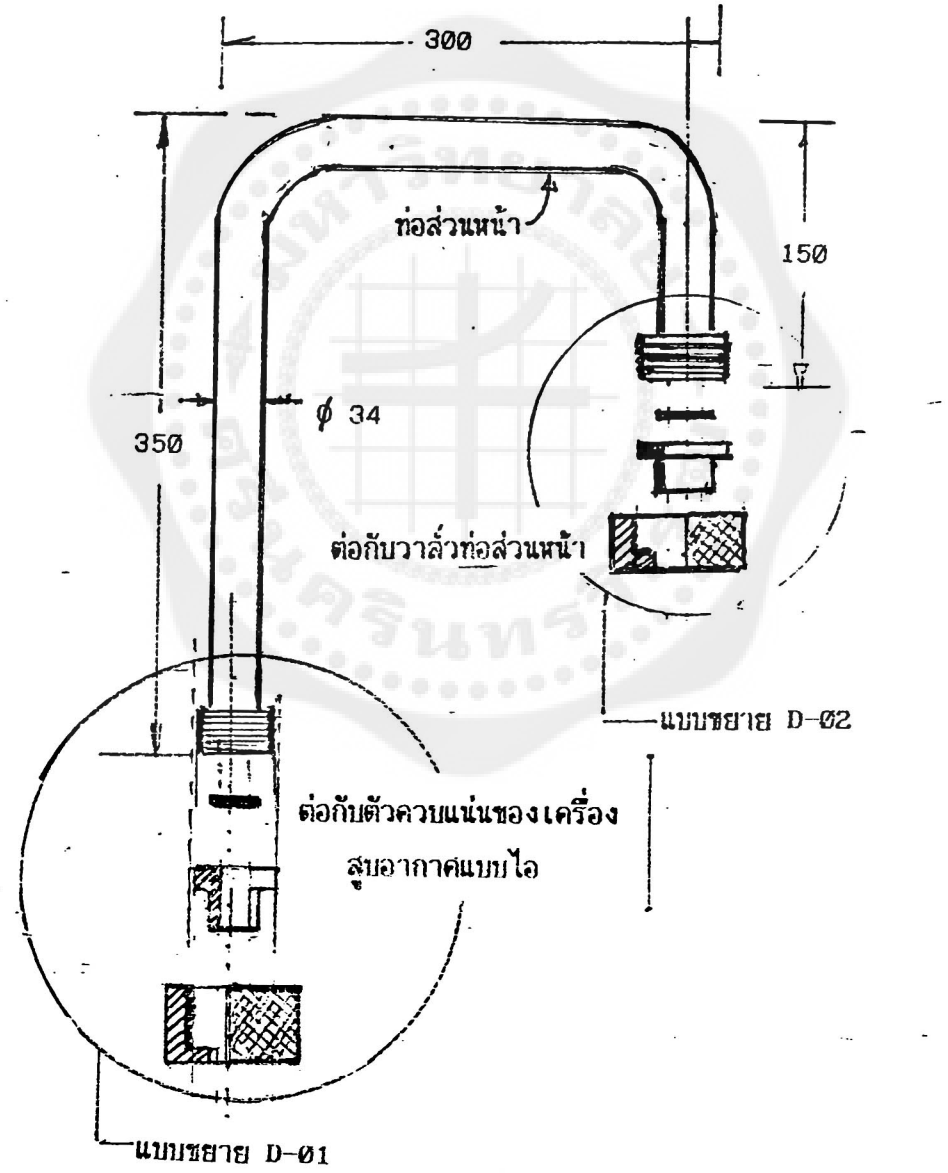
รูปที่ 2.18 แบบของแผ่นฐาน

2.4 ท่อและวาล์ว

การวางท่อและวาล์วในระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นเป็นไปตามโครงสร้างในรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าท่อในระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ท่อส่วนหน้า ท่อหยาบ และส่วนเชื่อมต่อระหว่างท่อส่วนหน้า ท่อหยาบ และเครื่องสูบกลโรตารี

2.4.1 ท่อส่วนหน้า

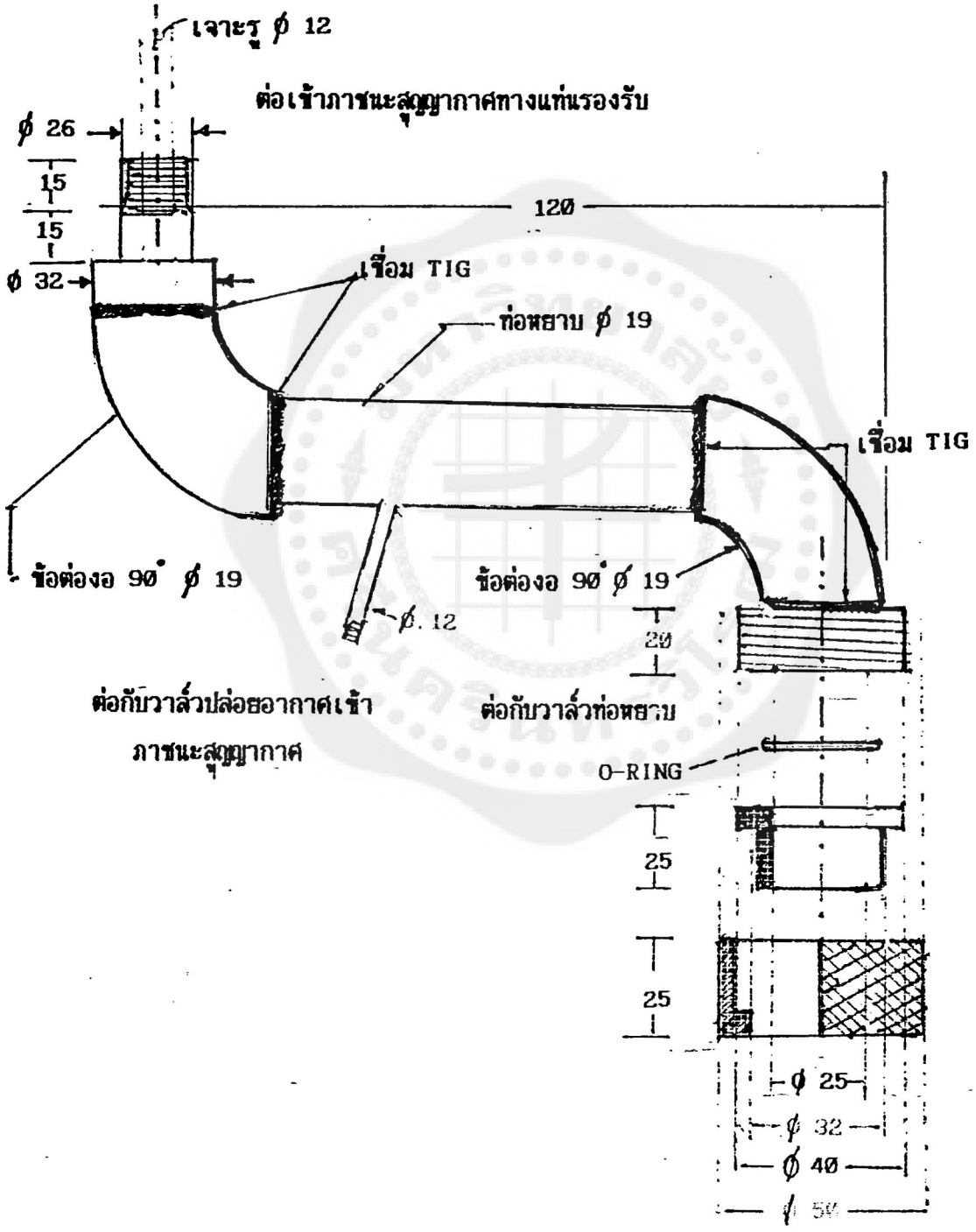
ท่อส่วนหน้าเป็นท่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร หน้าที่ของท่อนี้ก็คือลำเลียงโมเลกุลของอากาศออกจากเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันไปยังเครื่องสูบกลโรตารี รูปที่ 2.19 แสดงแบบของท่อส่วนหน้าที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.19 แบบท่อส่วนหน้า

2.4.2 ท่อหยาบ

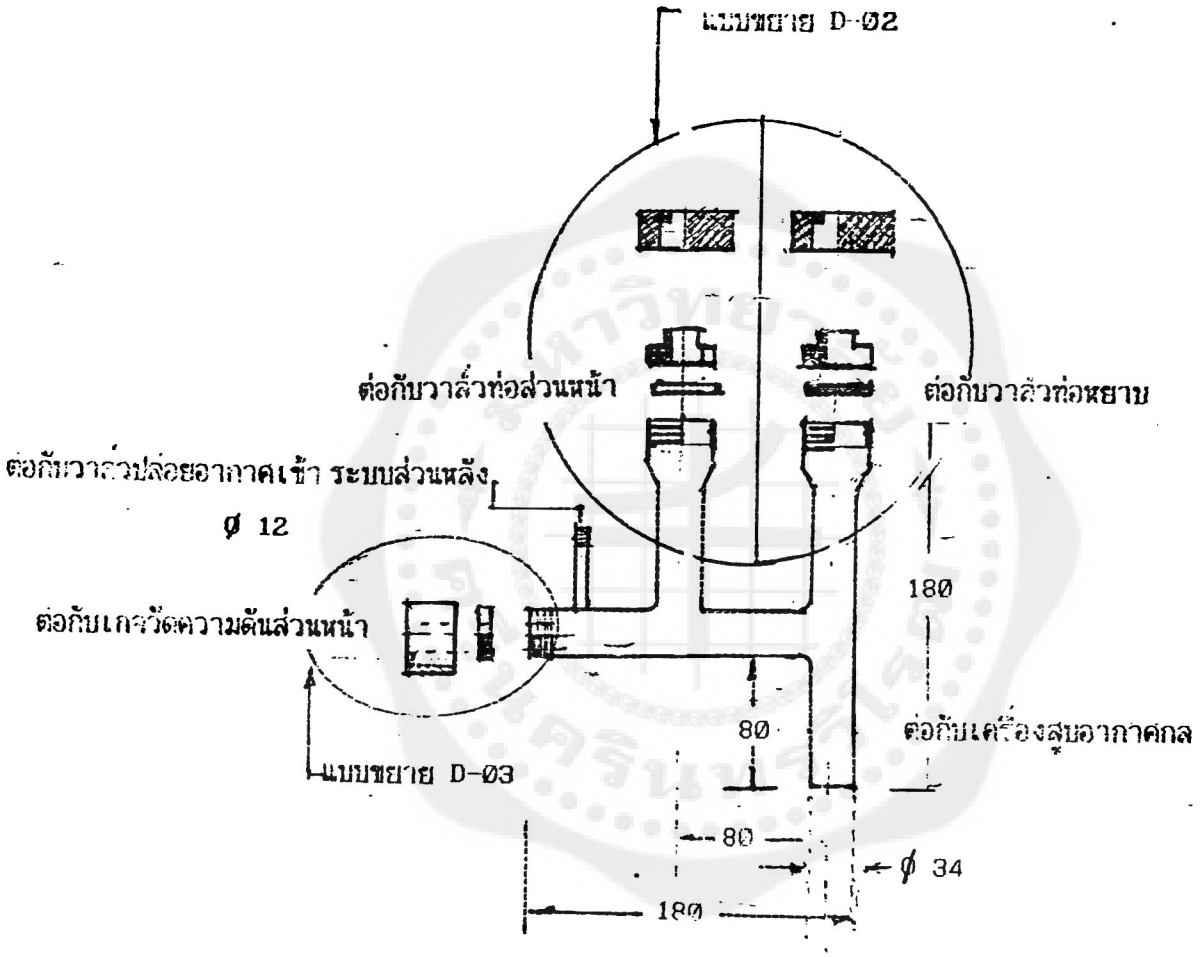
ท่อหยาบ เป็นท่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร หน้าที่ของท่อนี้คือลำเลียงโมเลกุลของอากาศออกจากภาชนะสูญญากาศในขณะที่ใช้เครื่องสูบกลโรตารี ปลายด้านหนึ่งของท่อต่อเข้ากับภาชนะสูญญากาศทางฐานรองรับ และปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับวาล์วท่อหยาบด้วยชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว (screwed coupling pack) รูปที่ 2.20 แสดงแบบของท่อหยาบที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.20 แบบท่อหยาบ

2.4.3 ส่วนเชื่อมต่อท่อส่วนหน้าท่อหยาบเครื่องสูบกลโรตารี

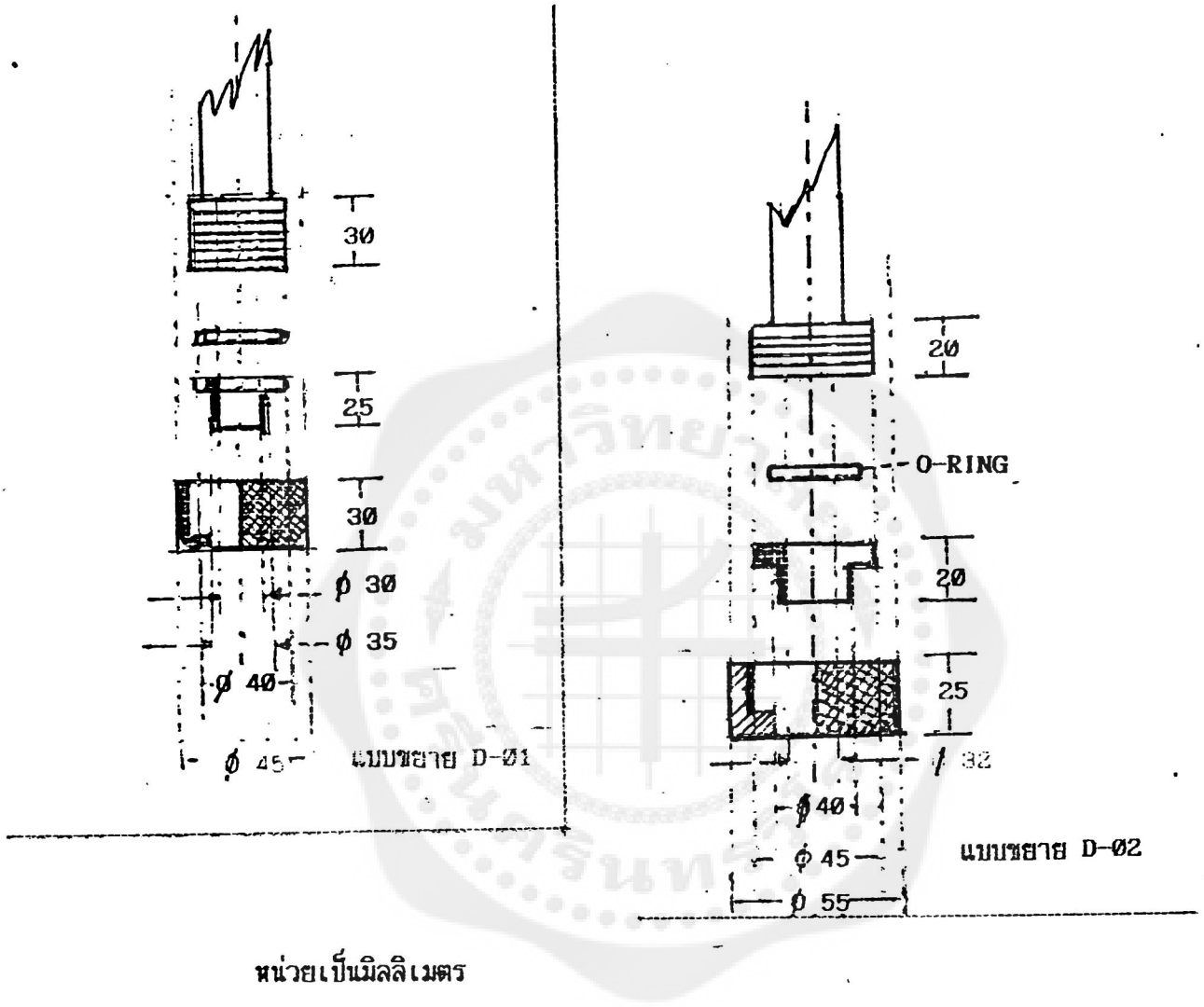
ส่วนเชื่อมต่อท่อส่วนหน้าท่อหยาบเครื่องสูบกลโรตารีมีลักษณะเป็นท่อ 3 ทาง ทำด้วยสเตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ส่วนเชื่อมต่อนี้ทำหน้าที่เชื่อมเครื่องสูบกลโรตารีเข้ากับท่อส่วนหน้าและท่อหยาบ นอกจากนี้ในส่วนที่เชื่อมกับท่อส่วนหน้ายังมีท่อสำหรับติดตั้งวาล์วปล่อยสำหรับปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะ รูปที่ 2.21 แสดงแบบของส่วนเชื่อมต่อนี้



รูปที่ 2.21 ส่วนเชื่อมต่อท่อส่วนหน้าท่อหยาบเครื่องสูบกลโรตารี

2.4.4 ชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว

ชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว มีหน้าที่เชื่อมต่อวาล์วโซเลนอยด์กับท่อส่วนต่าง ๆ โดยใช้วิธีขันเกลียวเพื่อดันวงแหวนไปกดบนยางกลมให้แนบกับผิวของท่อ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่ระบบสุญญากาศ รูปที่ 2.22 แสดงแบบของชุดเชื่อมต่อแบบเกลียวที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.22 ชุดเชื่อมต่อแบบเกลียว

การเชื่อมบริเวณข้อต่อและข้องอต่าง ๆ เป็นการเชื่อมแบบ TIG

วาล์วทั้งหมดในระบบมี 5 ตัวด้วยกันคือ วาล์วท่อหยาบ วาล์วท่อส่วนหน้า วาล์วปล่อย วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ระบบส่วนหน้า และวาล์วแยกส่วน โดยวาล์ว 4 ตัวแรกเป็นวาล์วโซเลนอยด์ชนิดปกติปิด และสามารถกักความดันได้ถึง 10^{-6} มิลลิบาร์ ส่วนวาล์วแยกส่วนเป็นวาล์วเชิงกล (mechanical valve) ซึ่งรายละเอียดและหลักการทำงานของวาล์วแยกส่วนนี้ ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.3.1

2.5 ระบบวัดความดัน

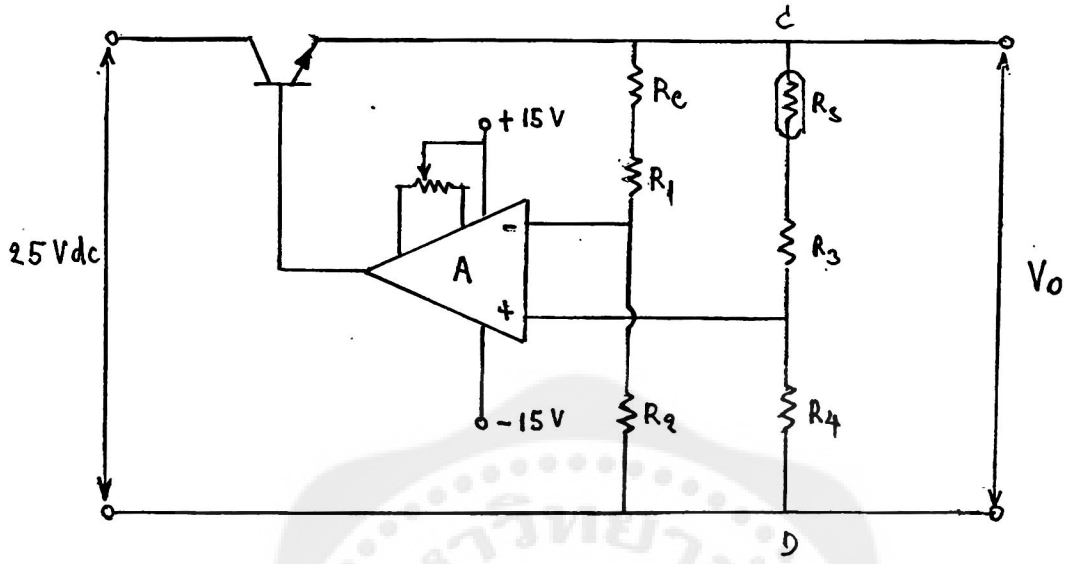
ระบบวัดความดันที่ใช้กับระบบสูญญากาศที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องวัด 2 แบบคือ เครื่องวัดแบบพิรานีและแบบเพนนิ่ง รายละเอียดของเครื่องวัดทั้งสองแบบมีดังต่อไปนี้

2.5.1 เครื่องวัดความดันพิรานี

เครื่องวัดความดันพิรานีที่สร้างขึ้นในการวิจัยนี้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ หลักในการทำงานของเครื่องวัดนี้ก็คือ เปลี่ยนความดันให้เป็นความต่างศักย์โดยควบคุมอุณหภูมิของลวดความร้อนให้คงที่

ในรูปที่ 2.23 ออปแอมป์ซึ่งได้รับการป้อนกลับแบบลบ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของเส้นลวดความร้อนให้คงที่ เป็นผลให้ความต่างศักย์ที่ทางออก (V_o) มีความสัมพันธ์กับความดัน ในวงจรนี้ ตัวต้านทาน R_s ซึ่งเป็นลวดความร้อนและมีค่าความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ ทำหน้าที่เป็นแขนหนึ่งของวงจรบริดจ์ ส่วนตำแหน่งของตัวต้านทาน R_s นี้ในระบบสูญญากาศอยู่ภายในภาชนะสูญญากาศ เพราะว่าค่าความต้านทานของ R_s ขึ้นกับอุณหภูมิของเส้นลวด และตัวการสำคัญในการระบายความร้อนจากเส้นลวดก็คือโมเลกุลของอากาศ โดยอัตราการระบายความร้อนจะมีค่ามากถ้าอากาศในภาชนะสูญญากาศมีมาก ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของลวด R_s ลดลงค่าความต้านทานของลวด R_s จึงมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อความดันในภาชนะสูญญากาศมีค่าเปลี่ยนไป หากต้องการให้อุณหภูมิของลวดคงที่ กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเส้นลวดจะต้องเท่ากับกำลังความร้อนที่ระบายออกจากเส้นลวด

ในขณะที่มีการสูบอากาศออกจากภาชนะสูญญากาศ อัตราการระบายความร้อนจะลดลง ทำให้อุณหภูมิของเส้นลวด R_s มีค่าสูงขึ้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกซึ่งจ่ายไปยังจุด C ลดลง กำลังงานทางไฟฟ้าในเส้นลวดจึงลดลง การลดลงของกำลังทางไฟฟ้านี้เป็นการชดเชยกำลังความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความดันที่ลดลง ดังนั้นอุณหภูมิของเส้นลวดจึงปรับเข้าสู่อุณหภูมิเดิม



รูปที่ 2.23 วงจรแปลงความดันเป็นความต่างศักย์แบบอุณหภูมิคงที่

การป้อนกลับเช่นนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาเพื่อรักษาอุณหภูมิของเส้นลวดให้คงที่ซึ่งมีผลทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล และเนื่องจากอัตราการระบายความร้อนของเส้นลวดขึ้นกับความดันในภาชนะสูญญากาศนี่เอง เมื่อความดันในภาชนะมีค่าเปลี่ยนไป ความต่างศักย์ V_o ที่ทำให้วงจรบริดจ์สมดุลก็จะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย จึงสามารถใช้ V_o เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความดันในภาชนะสุญญากาศได้

สำหรับความต่างศักย์ระหว่างจุด C กับ D ก็มีความสัมพันธ์กับปริมาณอากาศในระบบเช่นกัน โดยเมื่อมีอากาศในระบบมาก ศักย์ไฟฟ้าที่ C จะสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถวัดความดันโดยใช้มิเตอร์ที่มีสเกลเหมาะสมวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด C กับ D

หัววัดพิรานี เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับรู้การเปลี่ยนแปลงของความดันในระบบ การทำงานของหัววัดนี้ใช้หลักการที่ว่า การถ่ายเทพลังงานจากพื้นผิวเส้นลวดความร้อนแปรผันกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเส้นลวดความร้อนกับผนังของหัววัด และแปรผันกับความดันภายในระบบตามสมการ

$$W = \frac{\alpha}{2}\frac{\gamma+1}{\gamma-1}(R_o/2\pi MT_w)^{1/2}(T_f-T_w)P$$

โดย W คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานจากพื้นผิวของเส้นลวดความร้อน 1 ตารางเซนติเมตร

α คือ accomodation coefficient ซึ่งสำหรับผิวโลหะทั่วไปมีค่า 0.7

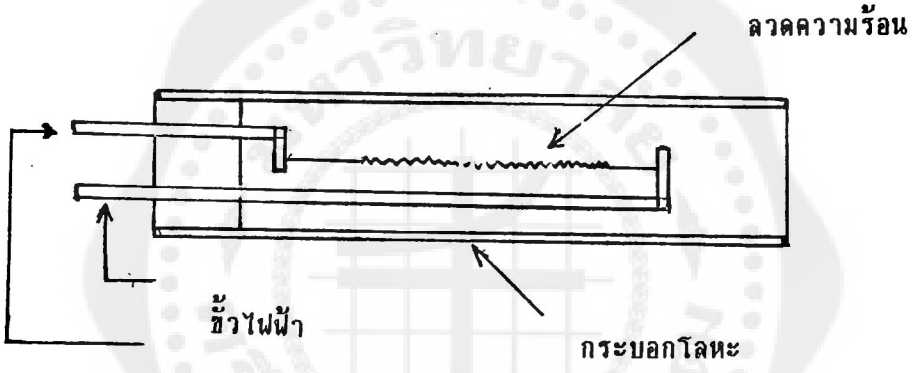
R_o คือ ค่านิจของก๊าซต่อโมล

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ

T_w คือ อุณหภูมิของผนังหัววัด

T_f คือ อุณหภูมิของเส้นลวดความร้อน

รูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของหัววัดพิรานีประกอบด้วยลวดความร้อนทังสเตน ซึ่งจัดวางอยู่ในแนวกลางของกระบอกโลหะ ปลายทั้งสองของลวดถูกยึดด้วยขั้วไฟฟ้า



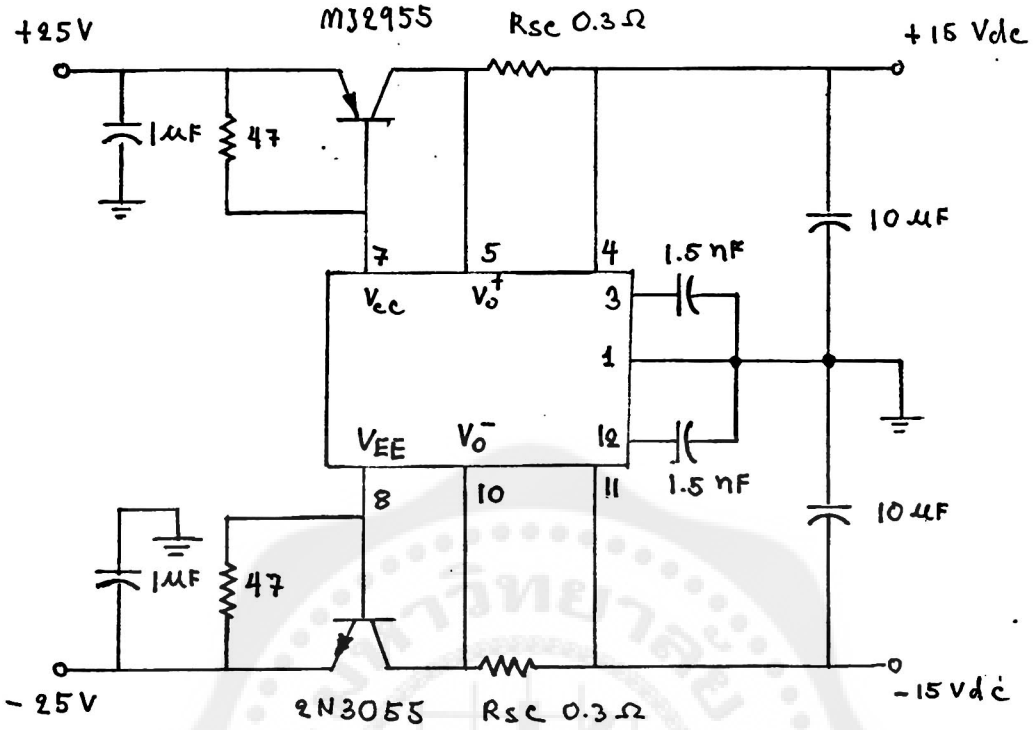
รูปที่ 2.24 โครงสร้างของหัววัดพิรานี

2.5.1.1 การสร้างเครื่องวัดความดันพิรานี

เครื่องวัดความดันพิรานีที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง วงจรวัดความดัน วงจรควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งวงจรสมบูรณ์ของเครื่องวัดแสดงดังในรูปที่ 2.29 เมื่อการสร้างเสร็จเรียบร้อย ก็ได้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นนี้กับเครื่องวัดแบบพิรานีของบริษัทเอดเวอร์ด

-แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

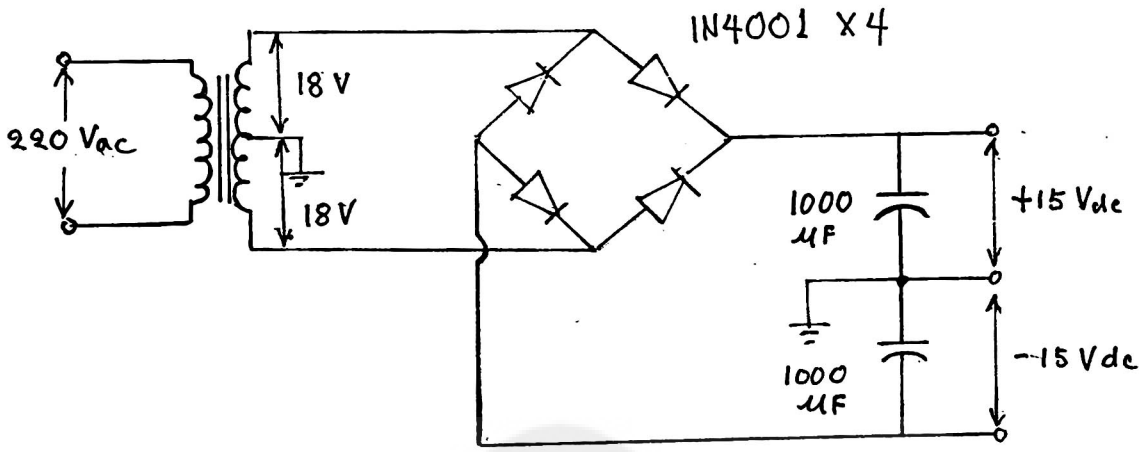
แหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้แก่วงจรเครื่องวัดความดันแบบพิรานี เป็นวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแทรคคิง (tracking) ที่ให้ความต่างศักย์ทางออกเป็นบวกและลบ 15 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ 2 แอมแปร์ วงจรนี้ได้สร้างขึ้นตามวงจรแนะนำไอซีหมายเลข MC1568[17] ซึ่งมีวงจรตามรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 รายละเอียดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ในวงจร ตัวต้านทาน R_{sc} ทำหน้าที่จำกัดกระแสในวงจร ค่าของ R_{sc} ที่ใช้คือ 0.3 โอห์ม 2 วัตต์ ซึ่งทำให้ได้ค่ากระแสทางออกสูงสุด (I_{sc}) เป็น 2 แอมแปร์

ความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับทางเข้าของวงจรรูปที่ 2.25 เป็นความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรเรียงกระแส (rectifier) ที่ให้ความต่างศักย์เป็นบวกและลบ 25 โวลต์ ตามรูปที่ 2.26 หม้อแปลงที่ใช้ในวงจรเป็นหม้อแปลงที่ตำแหน่งกลางให้ค่าความต่างศักย์เป็นบวกและลบ 18 โวลต์ กระแสสูงสุด 2 แอมแปร์



รูปที่ 2.26 วงจรเรียงกระแส

หม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงที่มีต่ำแหน่งกลางให้ค่าความต่างศักย์บวกและลบ 18 โวลต์ กระแสสูงสุด 2 แอมแปร์

2.5.1.2 วงจรวัดความดัน

รูปที่ 2.27 แสดงวงจรวัดความดันที่สร้างขึ้น ในรูปนี้เห็นได้ว่าได้กำหนดความต้านทานภายในวงจรบริดจ์เป็น R_c = 49 โอห์ม R_1 = 36 โอห์ม R_2 = 50 โอห์ม R_s = 56 โอห์ม R_3 = 29 โอห์ม และ R_4 = 50 โอห์ม ค่าความต่างศักย์ทางออก V_o ของวงจรเป็นไปตามสมการ

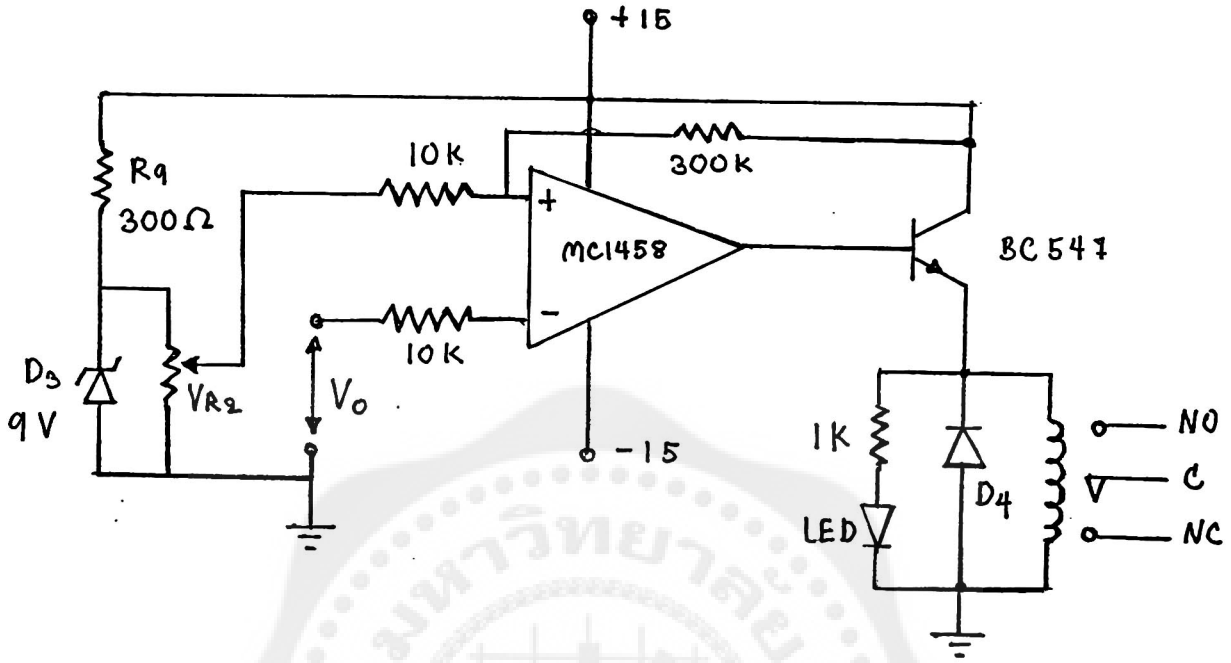
$$V_o = (\alpha A A_o)^{1/2}(273/T_w)^{1/4}(T_f-T_w)^{1/2}(R_s+R)(P/R_s)^{1/2}$$

ซึ่งจากการกำหนดค่าความต้านทานต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นทำให้ V_o มีค่า 0.7 โวลต์ที่ความดัน 10^{-3} ทอร์ และ เท่ากับ 6 โวลต์ที่ 10^{-1} ทอร์ ตัวต้านทาน R_c ที่ใช้เป็นเส้นลวดขนาด 0.04 มิลลิเมตร ยาว 109 เซนติเมตร พันรอบแกนที่เป็นผนังหัววัด

ความต้านทาน R_c ทำหน้าที่ชดเชยความต่างศักย์ที่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผนังหัววัด

ความต้านทาน R_s เป็นความต้านทานของลวดความร้อน จากเงื่อนไขการสมดุลของวงจรบริดจ์ ความต้านทานของลวดนี้จะมีค่าเป็น 56 โอห์ม หรือ มีอุณหภูมิ 125°C

ตัวต้านทาน R_5 V_{R1} และ ไดโอด D_1 D_2 ประกอบเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ให้ความต่างศักย์ที่ขั้วลบของมิเตอร์ โดยความต่างศักย์นี้แปรค่าได้จาก 0 ถึง 1.4 โวลต์



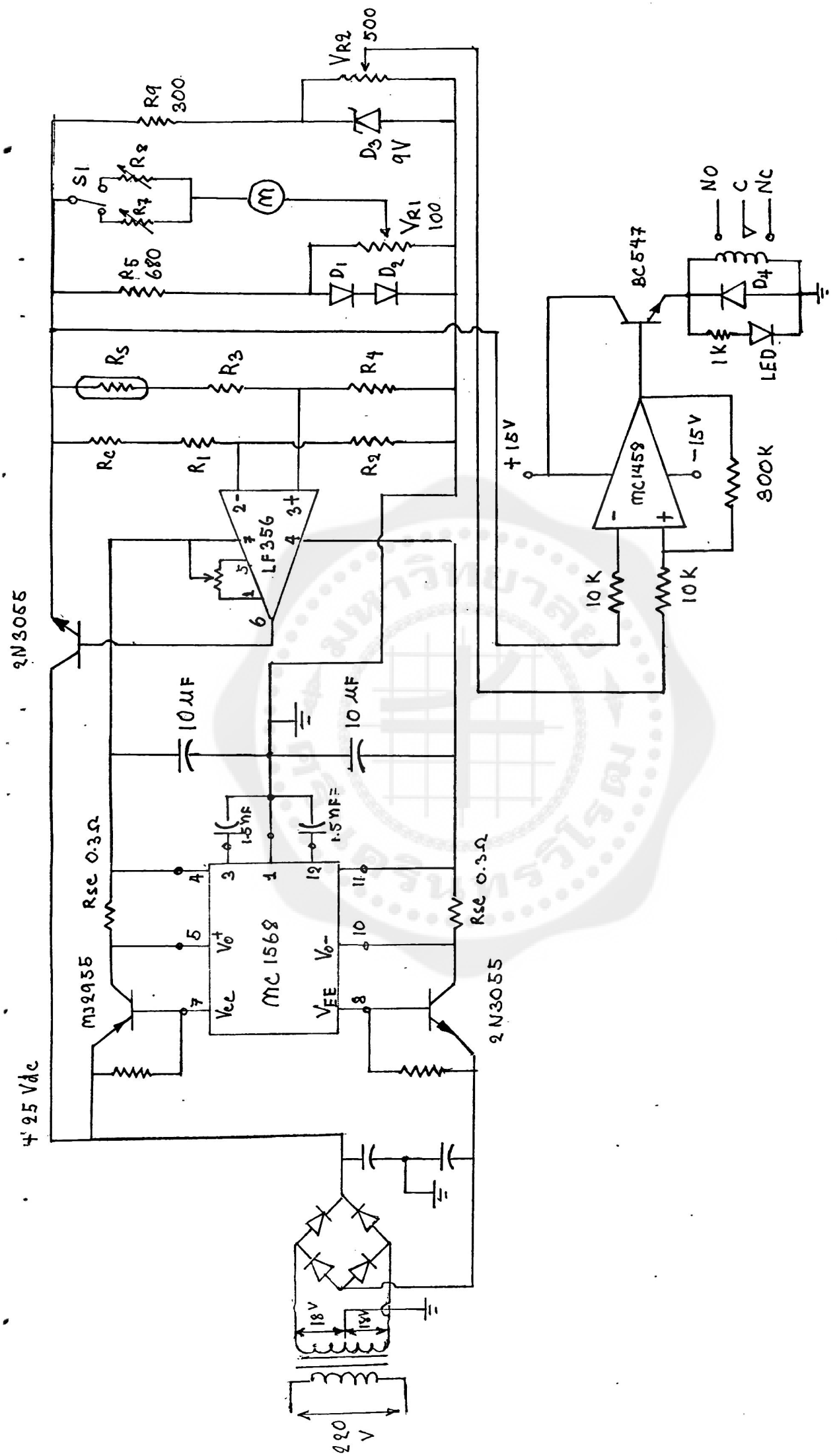
รูปที่ 2.28 วงจรควบคุมอุปกรณ์ภายนอก

รูปที่ 2.28 แสดงวงจรควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งในวงจรนี้ประกอบด้วยออปแอมป์ NC1458 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบความต่างศักย์ โดยจะเปรียบเทียบ V_o กับความต่างศักย์ที่ทางเข้าบวกของออปแอมป์ ถ้า V_o ที่ทางเข้าลบต่ำกว่าค่าความต่างศักย์ที่ทางเข้าบวก ออปแอมป์จะให้ค่าความต่างศักย์ทางออกเป็น 12 โวลต์ ความต่างศักย์จะป้อนต่อไปให้กับสวิตช์แม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่ตัดต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ภายนอก (โดยมีทรานซิสเตอร์ BC547 เป็นทรานซิสเตอร์ผ่าน)

ตัวต้านทาน R_9 V_{R2} และ ซีเนอร์ไดโอด D_3 ประกอบกันเป็นวงจรให้ความต่างศักย์อ้างอิงสำหรับทางเข้าบวกของออปแอมป์ ความต่างศักย์นี้แปรค่าได้จาก 0 ถึง 9 โวลต์

2.5.2 เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง

เครื่องวัดความดันแบบเพ็นนิ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความดันในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-7} มิลลิบาร์ เครื่องวัดแบบเพนนิ่งที่ใช้กับระบบสูญญากาศที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องวัดของบริษัทเอดเวอร์ด โดยหัววัดเป็นแบบ CP25 และวงจรควบคุมเป็นแบบ penning8



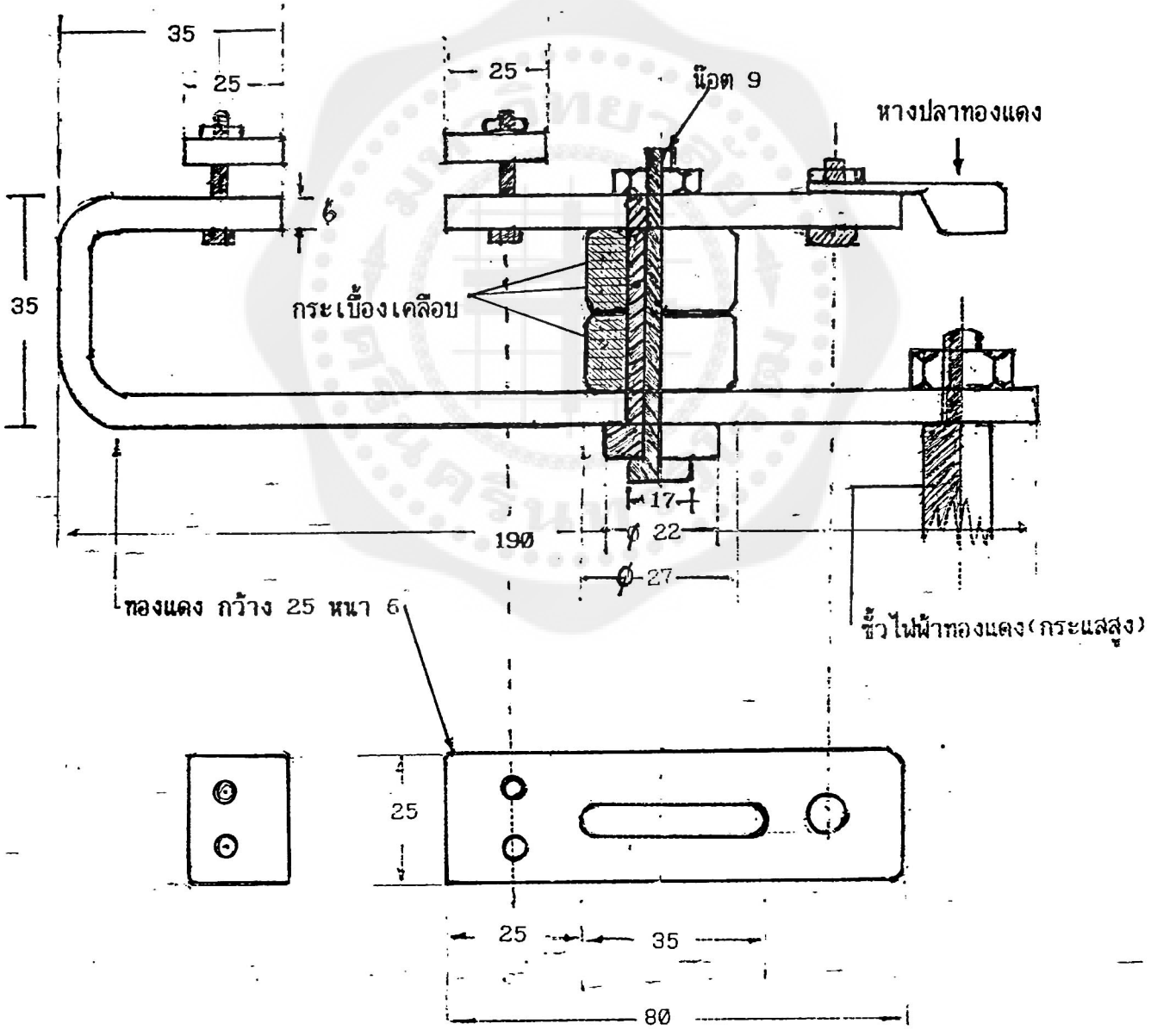
รูปที่ 2.29 วงจรสมบูรณ์ของเครื่องวัดพิราณี

2.6 ระบบระเหยสาร

ระบบระเหยสารเป็นระบบที่อยู่ภายในภาชนะสูญญากาศ ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ คือ ขั้วทองแดงจับยึดโบ๊ต ขั้วไฟฟ้ากระแสสูง (high current feed through) ฉากกั้นการระเหย (shutter) ส่วนจัดยึดและถาดวางชิ้นงาน ตัวจ่ายความร้อนสำหรับอบชิ้นงาน ขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง และเครื่องวัดความหนา

2.6.1 ขั้วทองแดงจับยึดโบ๊ต

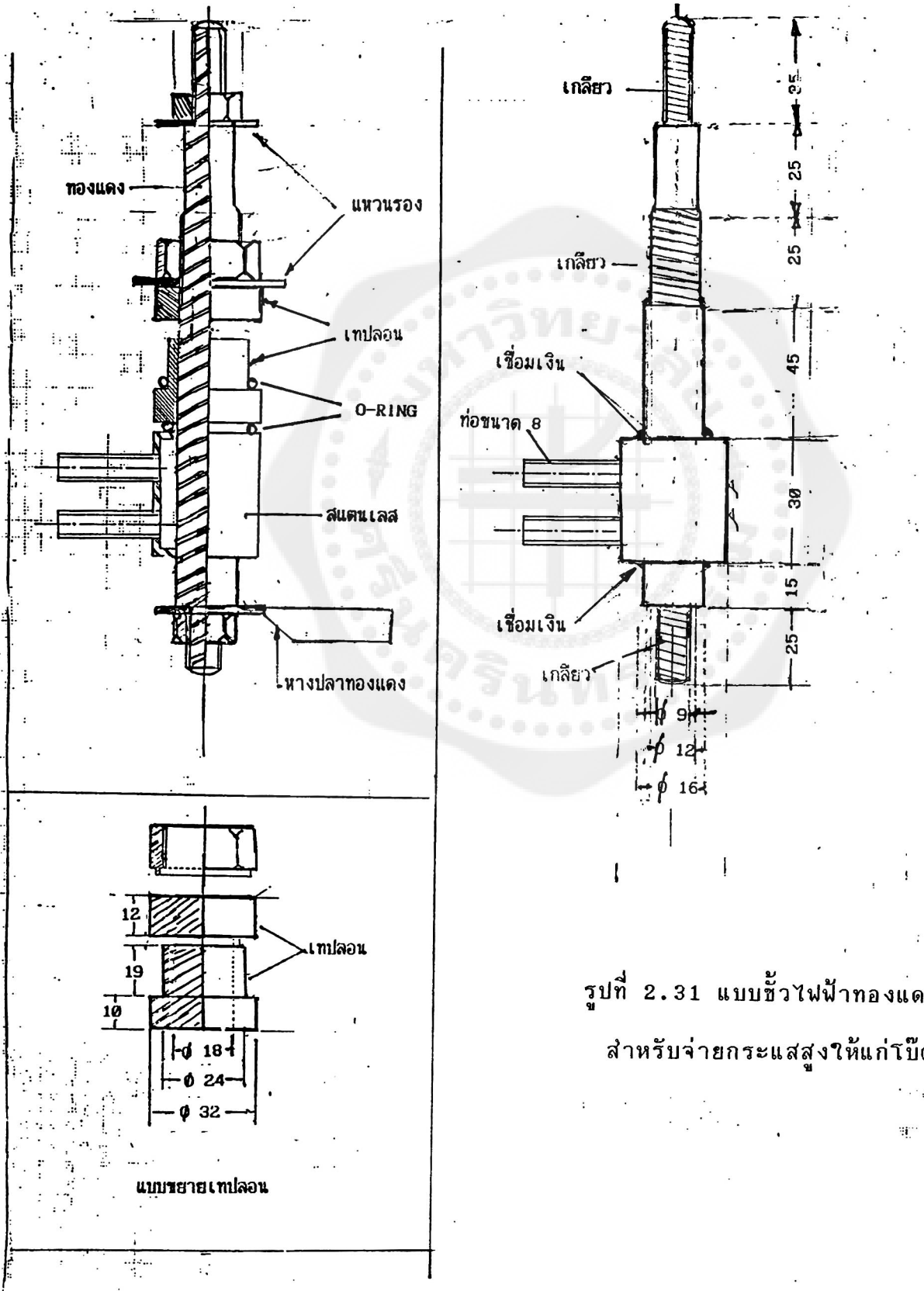
มีลักษณะตามแบบในรูปที่ 2.30 ขั้วจับยึดนี้ทำหน้าที่ยึดโบ๊ตและเชื่อมต่อโบ๊ตกับขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสูงเพื่อจ่ายกระแสให้แก่โบ๊ต อันจะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นแก่ตัวโบ๊ตซึ่งมีสารเคลือบวางอยู่ ความร้อนนี้จะทำให้สารเคลือบหลอมเหลวและระเหยกลายเป็นไอภายในสภาวะสูญญากาศ



รูปที่ 2.30 แบบขั้วทองแดงจัดยึดโบ๊ต

2.6.2 ขั้วไฟฟ้ากระแสสูง

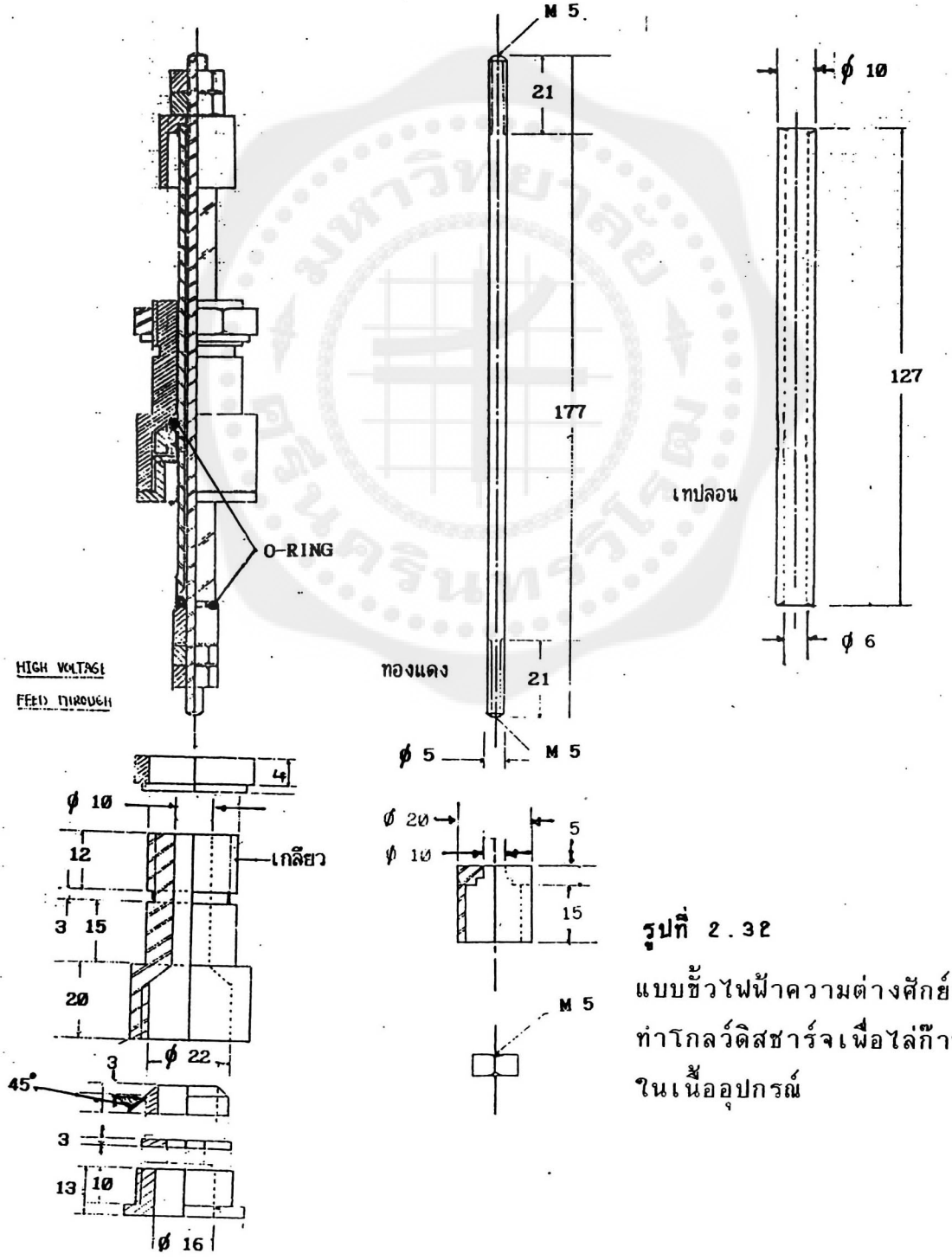
ขั้วไฟฟ้ากระแสสูงเป็นขั้วทองแดง ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อขั้วจับยึดโบ๊ตภายในภาชนะสูญญากาศกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอก ส่วนล่างของขั้วมีท่อน้ำเย็นสำหรับระบายความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า ระหว่างขั้วไฟฟ้านี้กับแผ่นฐานมีฉนวนซึ่งทำด้วยเทฟลอนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าลงสู่แผ่นฐาน รูปที่ 2.31 เป็นแบบแสดงรายละเอียดของขั้วไฟฟ้ากระแสสูง



รูปที่ 2.31 แบบขั้วไฟฟ้าทองแดงสำหรับจ่ายกระแสสูงให้แก่โบ๊ต

2.6.3 ขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

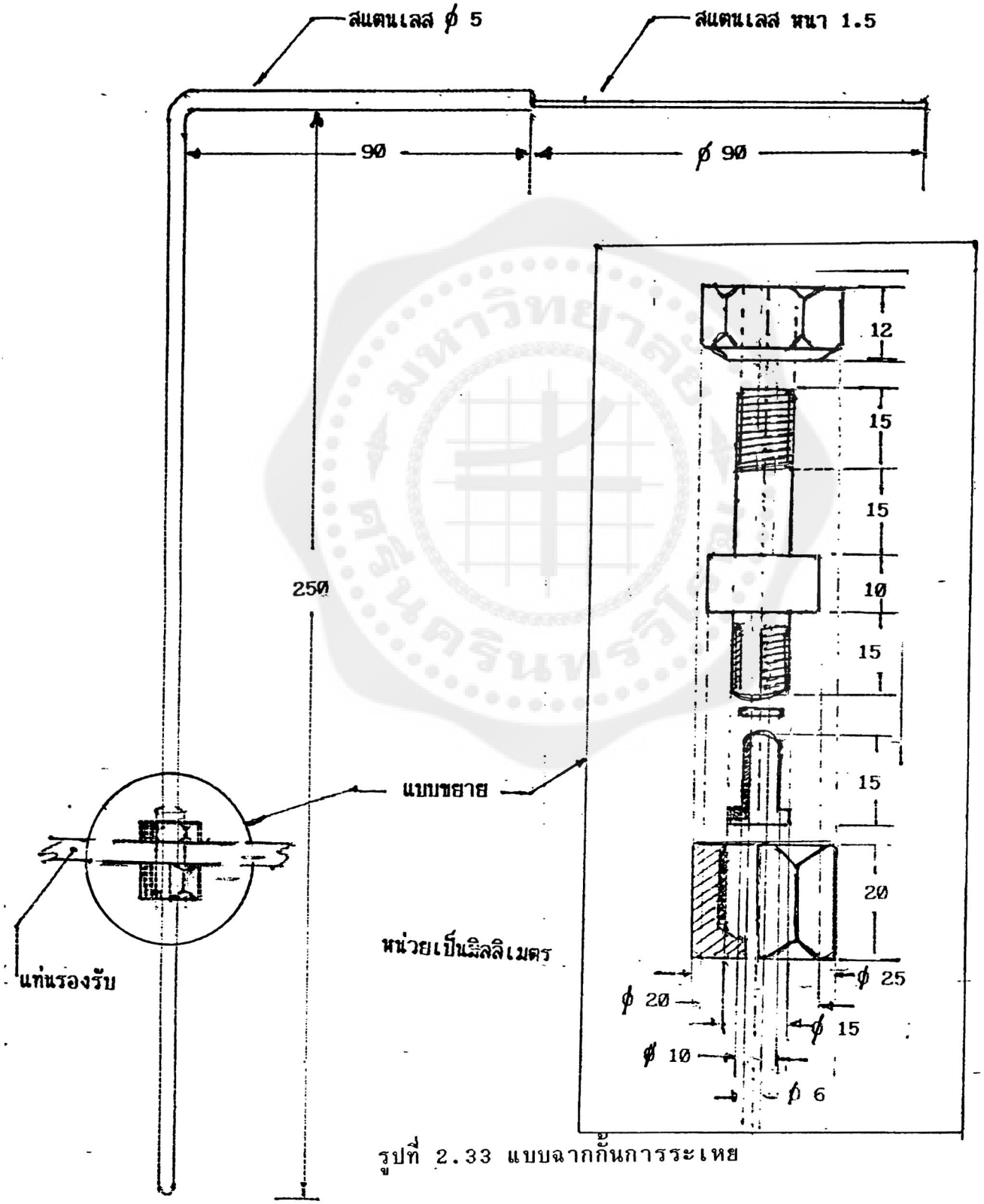
ขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (high voltage feedthrough) เป็นขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่มีโครงสร้างเหมือนกัน ขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะวางอยู่ในตำแหน่งข้างเคียงกัน หน้าที่ของขั้วไฟฟ้านี้คือทำให้เกิดโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองสูงเพียงพอ จุดประสงค์ของการเกิดโกลว์ดิสชาร์จก็คือไล่ก๊าซที่ฝังอยู่ในเนื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในภาชนะสูญญากาศ ขั้วไฟฟ้านี้ประกอบด้วย ครอบตัวนำ แกนตัวนำ ฉนวน และชุดยึดขั้วไฟฟ้ากับแผ่นฐาน รูปที่ 2.32 เป็นแบบแสดงรายละเอียดของขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนี้ แกนกลางของขั้วไฟฟ้าซึ่งทำด้วยสเตนเลสทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับชุดยึดขั้วไฟฟ้ากับแผ่นฐานเป็นฉนวนทำด้วยเทฟลอน ปลายด้านบนของขั้วไฟฟ้าเป็นครอบสเตนเลสซึ่งทำหน้าที่ให้ประจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.32
แบบขั้วไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสำหรับทำโกลว์ดิสชาร์จเพื่อไล่ก๊าซที่ฝังอยู่ในเนื้ออุปกรณ์

2.6.4 ฉากกั้นการระเหย

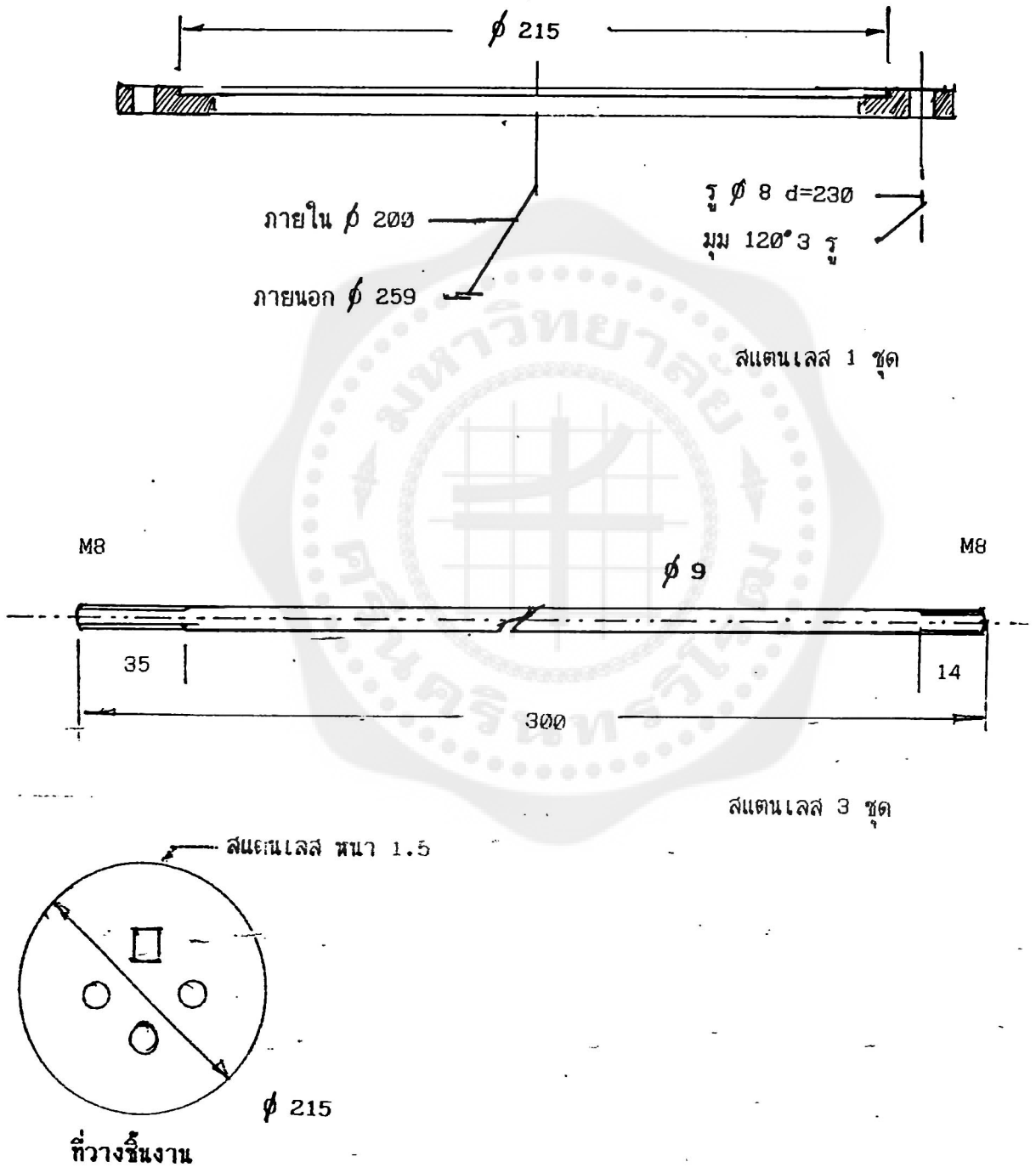
ฉากกั้นการระเหยมีลักษณะเป็นแผ่นสเตนเลสกลม มีก้านหมุน (Rotary Shaft Vacuum Seals) สำหรับต่อกับลูกบิดภายนอกแผ่นฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.33 ฉากกั้นนี้มีทำหน้าที่กั้นการระเหยของสารจากโบ๊ตไปยังแผ่นรองรับ โดยเมื่อบิดก้านของฉากกั้นจะทำให้ฉากกั้นเลื่อนไปอยู่เหนือโบ๊ต ฉากก็จะบังไม่ให้ไอของสารระเหยไปยังแผ่นรองรับ



รูปที่ 2.33 แบบฉากกั้นการระเหย

2.6.5 ส่วนจับยึดและถาดวางชิ้นงาน

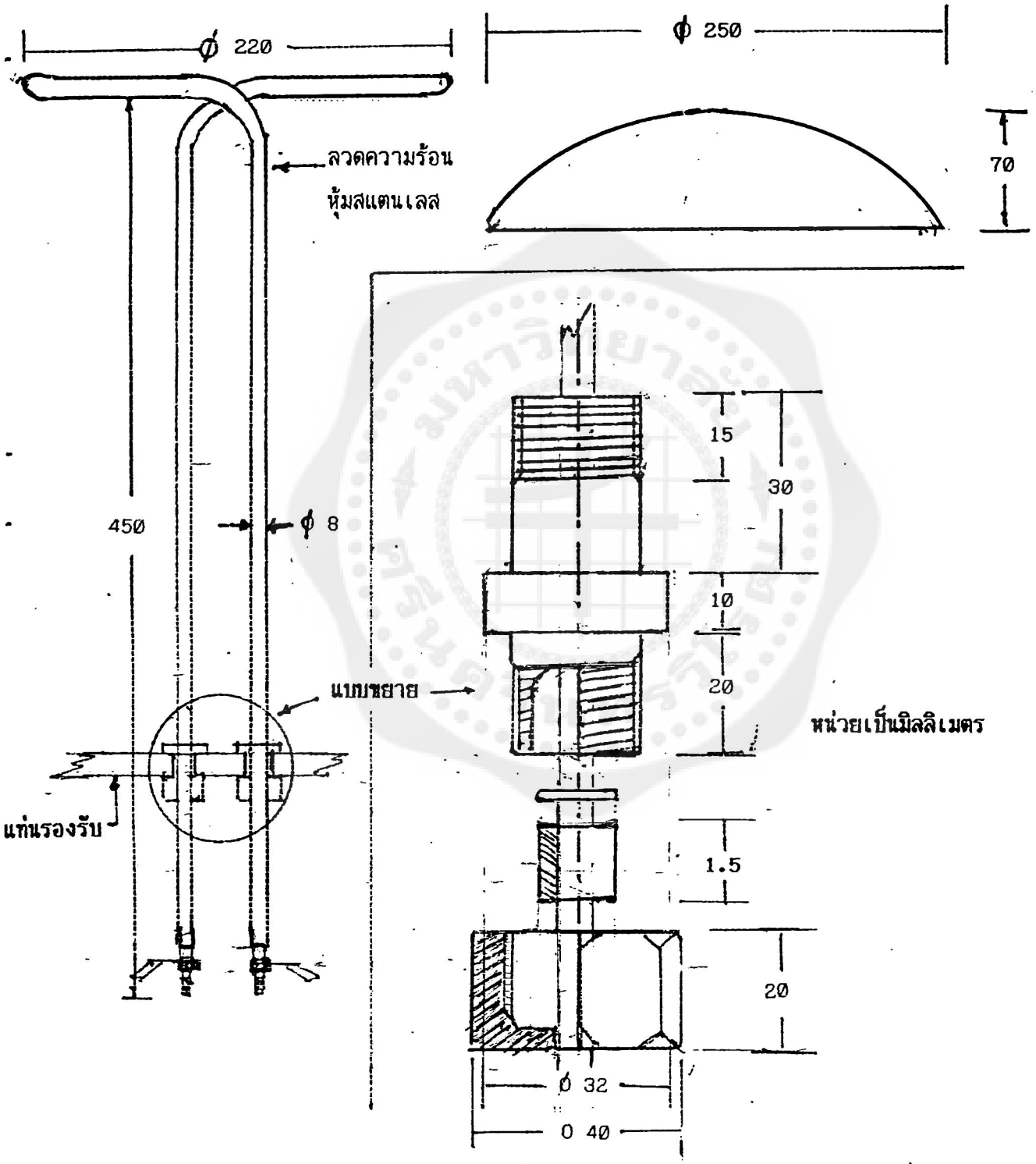
ส่วนจับยึดและถาดวางชิ้นงาน ประกอบด้วยขาสามขา ปลายของแต่ละมีเกลียวยึดกับแผ่นฐาน ปลายอีกด้านหนึ่งก็มีเกลียวยึดกับวงแหวนซึ่งมีขอบด้านในกลึงเป็นบ่า สำหรับวางถาดกลมสเตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 215 มิลลิเมตร บนถาดมีช่องสำหรับให้สารระเหยผ่านไปเกาะที่แผ่นรองรับ ซึ่งวางอยู่บนถาด รายละเอียดของส่วนจับยึดและถาดวางชิ้นงานแสดงอยู่ใน รูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แบบชิ้นส่วนจัดยึดและวางชิ้นงาน

2.6.7 ระบบอบชิ้นงาน

ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ลวดความร้อนขดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 220 มิลลิเมตร ฝาอบซึ่งมีลักษณะเป็นรูปโดม ชุดจับยึดขั้วไฟฟ้ากับแผ่นฐาน รายละเอียดของระบบแสดงอยู่ในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แบบระบบอบชิ้นงาน

2.6.8 เครื่องวัดความหนา

การออกแบบสร้างเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

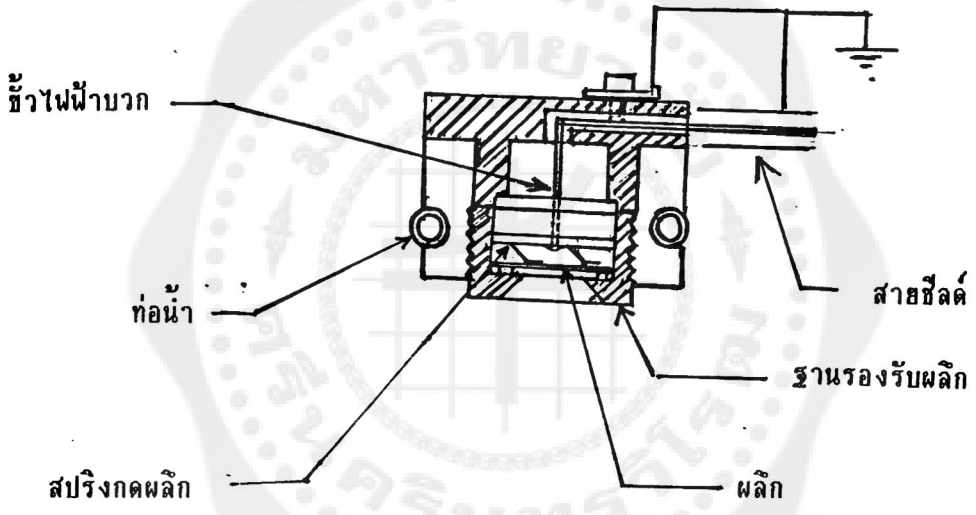
สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ซึ่งได้แก่ วงจรออสซิลเตอร์เพื่อใช้ประกอบกับผลึกซึ่งผลิตโดยบริษัทเอดเวอร์ด อุปกรณ์ยึดผลึก และเครื่องนับความถี่ที่สร้างขึ้น

ผลึกที่ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบาง

ผลึกที่ใช้เป็นผลึกแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร มีขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นฟิล์มทองทั้งสองด้าน แผ่นผลึกมีความถี่ในการสั่นเท่ากับ 6 เมกกะเฮิรซ์ท

2.6.8.1 อุปกรณ์จับผลึก

อุปกรณ์จับผลึกที่ออกแบบสร้างขึ้น มีส่วนประกอบคือ



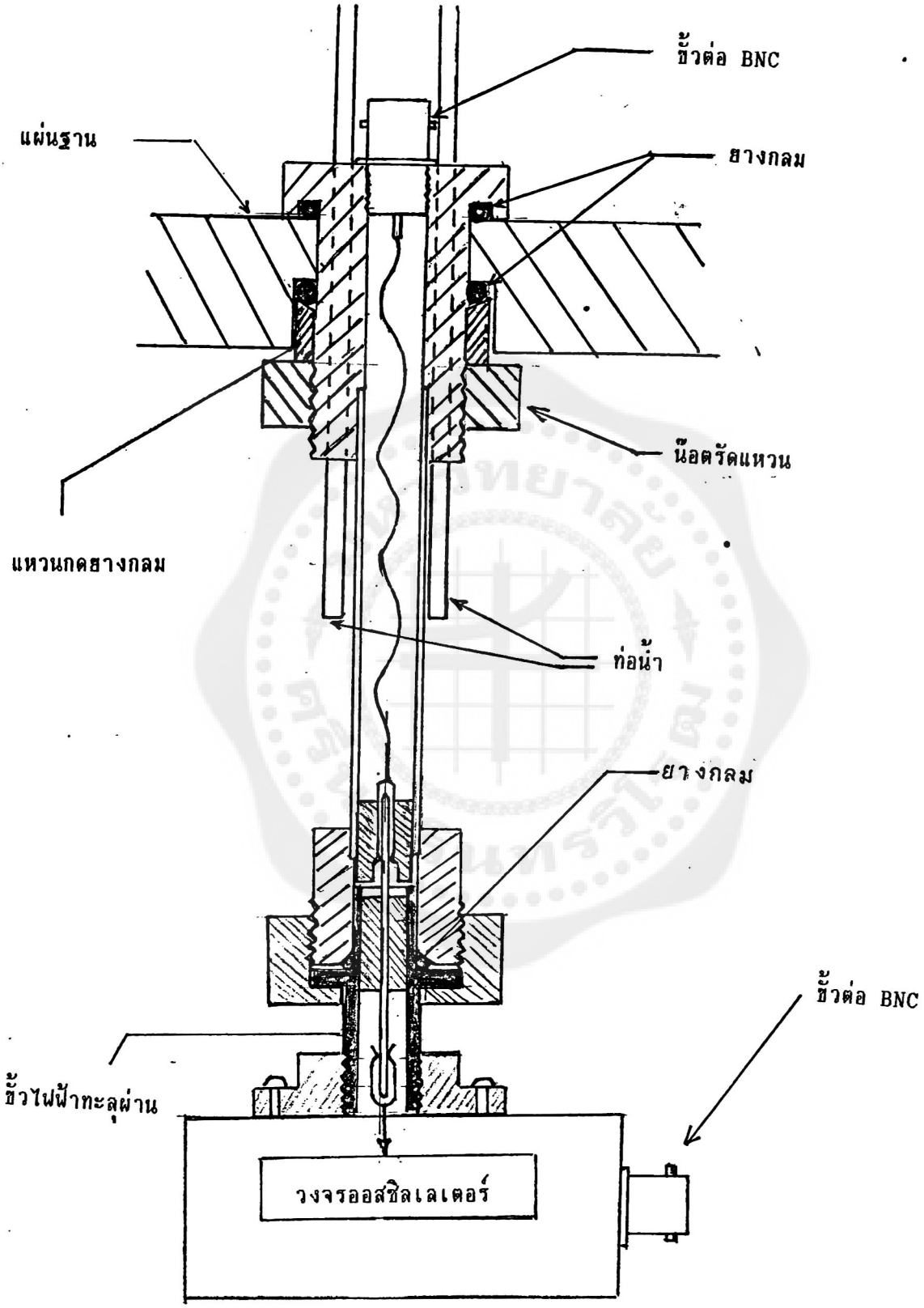
รูป 2.36 ส่วนบนของอุปกรณ์จับผลึก

1. ส่วนบน

อุปกรณ์จับผลึกส่วนบนเป็นตัวเรือนสำหรับบรรจุผลึก ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.36 แผ่นผลึกนี้ได้รับการบรรจุอยู่ในตัวเรือน ซึ่งมีช่องเปิดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร แผ่นผลึกตั้งอยู่บนฐานวางผลึกซึ่งทำด้วยทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วดินของวงจรออสซิลเลเตอร์ ด้านบนของผลึกมีแผ่นโลหะสปริงบาง ๆ 2 ชิ้นกดลงเพื่อไม่ให้เคลื่อนที่ได้ แผ่นสปริงนี้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งของผลึก บนตัวเรือนซึ่งทำด้วยสเตนเลส มีท่อเล็ก ๆ สำหรับให้น้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนออกจากผลึก ทำให้อุณหภูมิของผลึกไม่เปลี่ยนแปลงมากในขณะทำการเคลือบสาร

2. ส่วนฐาน

ส่วนฐานของอุปกรณ์ยึดผลึก ได้รับการออกแบบให้เข้ากับช่องบนฐานของภาชนะสูญญากาศ ส่วนฐานนี้ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.37

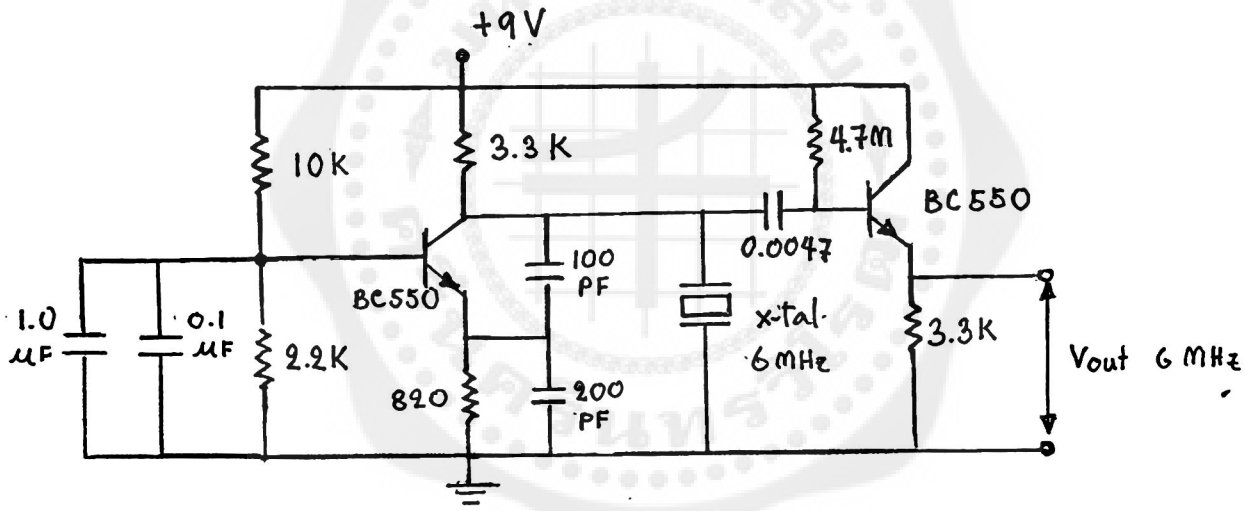


รูปที่ 2.37 ส่วนฐานของอุปกรณ์จับผลึก

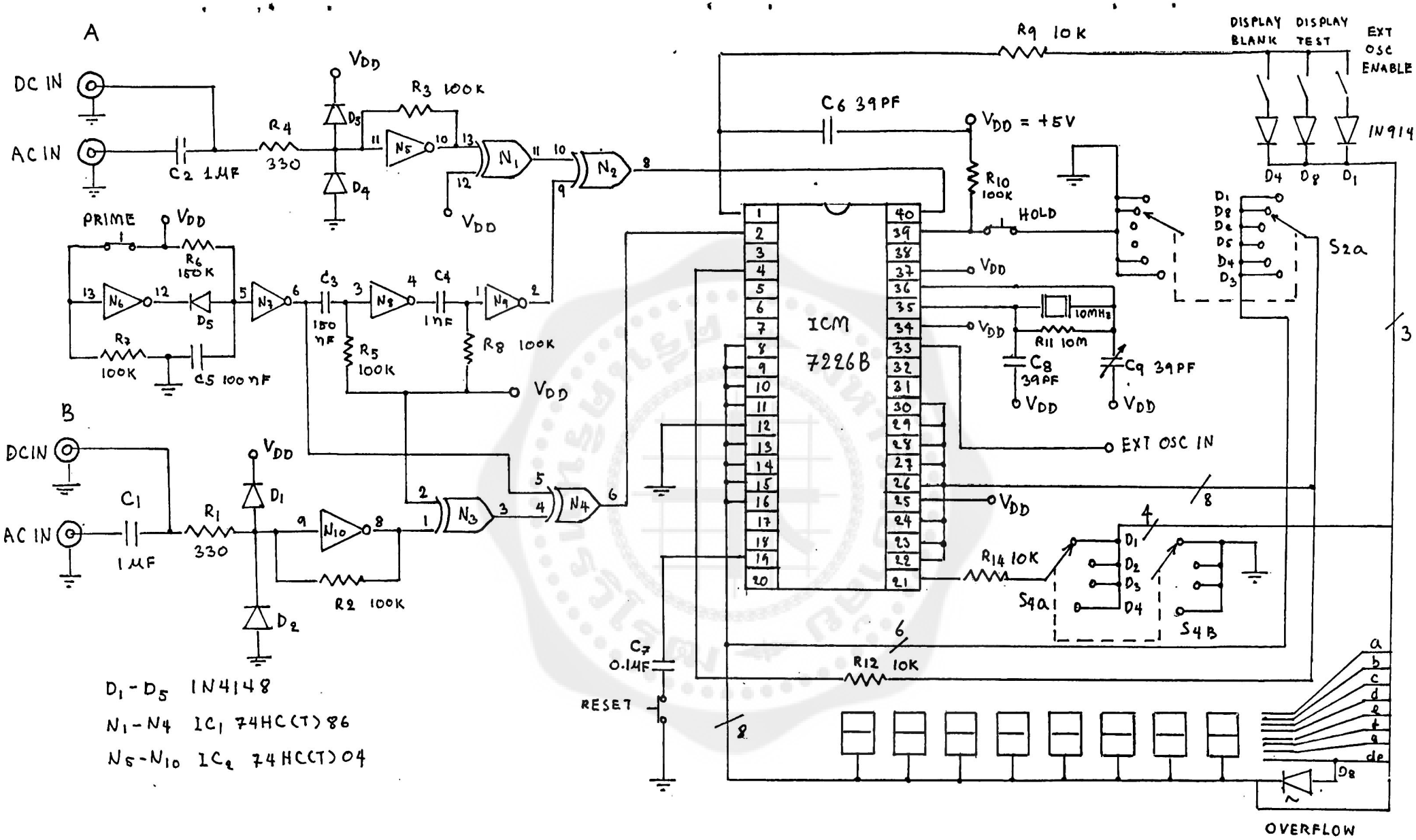
สายจากผลึกที่อยู่ส่วนบนของอุปกรณ์ยึดผลึก เป็นตัวที่เชื่อมต่อส่วนฐานด้วยสายชีลด์โดยใช้ขั้วต่อ BNC นอกจากนี้ส่วนฐานยังมีท่อน้ำซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำไประบายความร้อนออกจากบริเวณผลึก พร้อมกับทำหน้าที่ยึดอุปกรณ์ส่วนบนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ในส่วนล่างสุดเป็นกล่องบรรจุวงจรออสซิลเตอร์ ซึ่งมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับส่วนบนโดยผ่านขั้วไฟฟ้า ที่ได้รับการออกแบบเป็นรูปหน้าแปลนสำหรับกดบนยางกลม เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าสู่ระบบ

2.6.8.2 วงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเต่อร์เป็นวงจรทำให้เกิดการป้อนกลับ (feed back) แบบแคลบ (clapp) ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในรูปแบบอนุกรม วงจรขยายที่ใช้เป็นชนิดเบสร่วม (common base) สัญญานที่ทางออกของทรานซิสเตอร์ Q_1 จะถูกส่งไปยังทรานซิสเตอร์ผ่าน Q_2 ซึ่งมีจุดกระทำการที่ตำแหน่งตัดขาด (cut off) ทำให้ได้สัญญานทางออกเป็นแบบคลื่นรูปครึ่งคลื่น สัญญานนี้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรนับความถี่



รูปที่ 2.38 วงจรออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 2.39 วงจรวัดความถี่

2.6.8.3 วงจรเครื่องนับความถี่

วงจรนับความถี่ที่แสดงในรูปที่ 2.39 เป็นวงจรตามแบบวงจรในคู่มือแนะนำไอซีหมายเลข ICM7266B ซึ่งเป็นไอซีนับความถี่ขนาด 8 หลักและสามารถวัดความถี่ได้ถึง 10 MHz โดยให้ความละเอียดได้ถึงหลักหน่วยหรือ 1 Hz

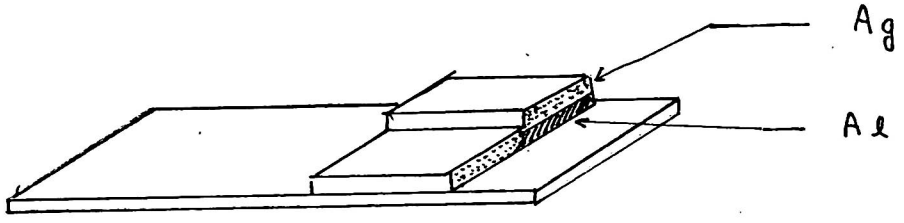
2.6.8.4 การปรับเทียบเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบาง

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยความถี่ในการสั่นของผลึกนั้น ความคลาดเคลื่อนในการวัดเกิดขึ้นได้เนื่องจาก ตำแหน่งการวางผลึกและแผ่นวัสดุที่ต้องการเคลือบไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นที่ใช้ในการคำนวณความหนาของฟิล์มเป็นความหนาแน่นของสารที่เป็นก้อน ซึ่งไม่เท่ากับความหนาแน่นของสารในสภาพฟิล์มบาง

เพื่อให้การคำนวณค่าความหนาของฟิล์มบนแผ่นวัสดุที่ทำการเคลือบได้อย่างถูกต้อง จำเป็นต้องทำการปรับเทียบค่าความหนาของฟิล์มที่เกาะบนผลึก กับความหนาจริงของฟิล์มที่เกาะบนแผ่นวัสดุ การทดสอบการปรับเทียบทำได้โดย คำนวณหาค่าอัตราส่วนของความหนาของสารที่เกาะบนแผ่นวัสดุต่อความหนาของฟิล์มบนผลึก ถ้าให้ T_m เป็นความหนาของฟิล์มบนผลึก และ T_i เป็นความหนาของฟิล์มที่ต้องการเคลือบบนวัสดุ อัตราส่วนนี้จะเป็น T_i/T_m จากอัตราส่วนนี้ทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาจริงบนแผ่นวัสดุที่ทำการเคลือบได้เมื่อทราบความหนาของฟิล์มบนผลึก

2.6.8.5 วิธีการปรับเทียบเครื่องวัดความหนา

ในการปรับเทียบนี้ได้เคลือบสารอะลูมิเนียมและเงินลงบนแผ่นกระจกเป็นลักษณะขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 การเคลือบสารบนแผ่นแก้วแบบขั้นบันได

ในการปรับเทียบได้เคลือบสารบนแผ่นแก้ว 2 ครั้งคือ โดยในครั้งแรกเป็นการเคลือบอะลูมิเนียมบนครึ่งหนึ่งของพื้นที่ของแผ่นแก้ว ซึ่งทำได้โดยปิดแผ่นแก้วนั้นไว้ครึ่งหนึ่งด้วยวัสดุอื่นเช่นแผ่นไมกา การเคลือบครั้งแรกนี้ได้กระทำจนได้ความหนาของอะลูมิเนียมบนแผ่นแก้วมีค่าประมาณ 1000 อังสตรอม ซึ่งการได้ความหนาที่ต้องการนี้ทำได้โดยการคำนวณจากความหนาแน่นก้อน (bulk density) ของอะลูมิเนียม ซึ่งจะได้ค่าความถี่เปลี่ยน Δf ที่สอดคล้องกันประมาณ 2200 Hz หลังจากการเคลือบอะลูมิเนียมแล้วก็นำวัสดุที่ปิดแผ่นแก้วไว้ครึ่งหนึ่งออก แล้วทำการเคลือบครั้งที่ 2 ด้วยเงิน โดยให้มีความหนาประมาณ 1000 อังสตรอมบนแผ่นแก้วทั้ง 2 ส่วน ซึ่งหลังจากการเคลือบด้วยเงินแล้วจะได้ฟิล์มบางบนแผ่นแก้วที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดดังรูปที่ 2.40

เนื่องจากชั้นเงินที่เคลือบครั้งที่ 2 มีความหนาเท่ากันตลอดทั้งแผ่น ความแตกต่างของระดับขั้นจึงเท่ากับความหนาของอะลูมิเนียม จากการที่ชั้นของเงินมีลักษณะเป็นฟิล์มที่เป็นขั้นนี้ ทำให้สามารถวัดความหนาของฟิล์มเงินได้ โดยใช้วิธีการแทรกสอดของแสงโดยพิจารณาการเหลื่อมกันของแถบมืดและแถบสว่างแบบฟิโซ (Fizeau fringes) ความหนาของฟิล์มเงินจากวิธีการนี้ถือได้ว่าเป็นค่าความหนาจริงของฟิล์มบนแผ่นแก้วที่ได้รับการเคลือบ[7]

เมื่อนำค่าความหนานี้หารด้วยความหนาที่ได้จากการคำนวณด้วยความถี่เปลี่ยนของผลึก จะได้ค่าอัตราส่วนของความหนาบนแผ่นแก้วต่อความหนาของฟิล์มที่ผลึก ในการปรับเทียบนี้ได้ทำการเคลือบ 4 ตัวอย่าง โดยที่แต่ละตัวอย่างมีความหนาของอลูมิเนียมต่างกัน ตามตารางที่ 2.1

ชั้นที่	ตัวอย่างที่	ความถี่เริ่มต้น Hz	ความถี่สุดท้าย Hz	ความแตกต่างของความถี่	ความหนา Tm(nm)	ความหนา Ti(nm)	Ti/Tm
1	1	5988428	5986982	1446	65	46	0.707
(Al)	2	5988428	5985473	2955	134	93	0.694
	3	5991125	5986058	5067	230	162	0.704
	4	5991125	5985065	6060	275	195	0.709
2	1	5985473	5973758	11715	137	96	-
(Ag)	2	5985473	5973758	11715	137	96	-
	3	5983570	5971310	12260	143	100	-
	4	5983570	5971310	12260	143	100	-

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลการเคลือบอลูมิเนียมและเงินเป็นขั้นบันไดที่ความหนาต่าง ๆ สำหรับปรับเทียบเครื่องวัดความหนา

จากตัวอย่างที่ 1 ในชั้นแรกก่อนเคลือบ ได้ทำการปิดแผ่นกระจกรองรับด้วยไมกาไว้ครึ่งหนึ่งแล้วจึงเคลือบด้วยอลูมิเนียมให้ได้ความหนา 65 nmซึ่งเทียบได้กับความถี่ที่ลดลง 1446 เฮิร์ชท ความหนานี้เป็นความหนาที่คำนวณจากการเปลี่ยนความถี่ในการสั่นของผลึก ซึ่งในที่นี้แทนด้วย Tm ต่อมานำแผ่นไมกาออกแล้วเคลือบด้วยเงินให้ได้ความหนาประมาณ 100 nm หลังจากทำการเคลือบสารทั้งสองชั้นแล้ว นำฟิล์มบางที่ได้ไปวัดความหนาด้วยวิธีการทางแสง โดยการพิจารณาจากแถบการแทรกสอด (Interference Fringes) ซึ่งวิธีการนี้ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 โดยความยาวคลื่นของแสงที่ใช้มีค่าเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงสีแดงที่ได้จากเลเซอร์ของฮีเลียม-นีออน

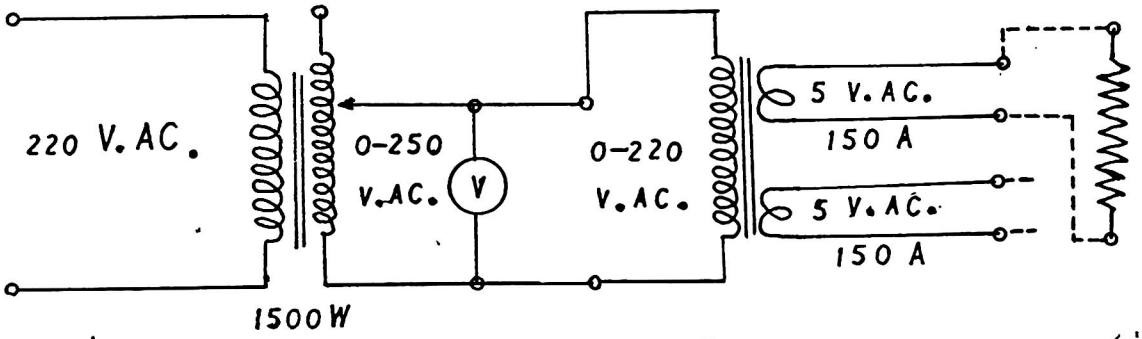
เนื่องจากการวัดด้วยวิธีการทางแสงนี้เป็นวิธีมาตรฐานจึงให้ความหนาที่วัดด้วยวิธีนี้เป็น Ti สำหรับข้อมูลการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยแสงแสดงรายละเอียดในภาคผนวกที่ 3

จากตารางค่า Ti/Tm จะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของความหนาของฟิล์มที่แผ่นรองรับต่อความหนาของฟิล์มที่เกาะบนผลึกมีค่าคงที่ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าเฉลี่ยคือ 0.702 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.006 การเคลือบนี้ได้จัดตำแหน่งของผลึกโดยผลึกอยู่ห่างจากตำแหน่งโบ๊ตเป็นระยะ 15 เซ็นติเมตรและแผ่นรองรับห่างจากโบ๊ต 19 เซ็นติเมตร

2.7 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

2.7.1 หม้อแปลงสำหรับลวดความร้อน

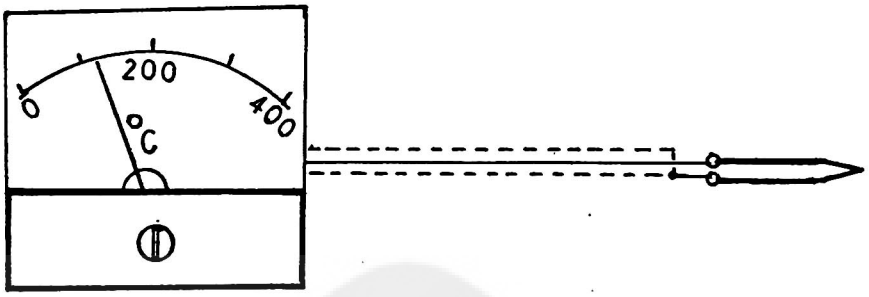
หม้อแปลงสำหรับโบ๊ตหรือลวดความร้อนสำหรับระเหยสารที่จะเคลือบ เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดกระแสสูงความต่างศักย์ต่ำ หม้อแปลงนี้ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 V(1500 VA) ให้เป็น 5 V,150 A และ 5 V 150 A โดยพันขดลวดทุติยภูมิให้แยกออกเป็น 2 ขดแต่ละขดให้ความต่างศักย์ขาออก 5 V ขนาดทนกระแสได้ 150 A ทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 1500 W เมื่อใช้ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองนั้นต่ออนุกรม (10 V,150 A) หรือต่อขนาน (5 V,300 A) ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าไม่เกิน 750 W ก็สามารถเลือกใช้ขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดได้ และเพื่อให้สามารถปรับกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานได้ขนาดต่าง ๆ กันจึงได้ต่อกับหม้อแปลงที่ปรับความต่างศักย์ได้ขนาด 0-250 V.AC,1500 W มีโวลต์มิเตอร์กระแสสลับต่อไว้สำหรับบอกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 การต่อวงจรไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดกระแสสูงความต่างศักย์ต่ำสำหรับลวดความร้อนระเหยสาร

2.7.4 เครื่องวัดอุณหภูมิภายในภาชนะเคลือบสาร

เครื่องวัดอุณหภูมินี้ได้ใช้เทอร์มอคัปเปิลที่มีชื่อการค้า RKC แบบ HPO-30 มีสเกลวัดอุณหภูมิได้ 0-400 C ติดหัวเทอร์มอคัปเปิลไว้ที่แผ่นวางชิ้นงาน



รูปที่ 2.44 แสดงการต่อเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัพเปิล ชื่อการค้า RCK แบบ HPO-30

บทที่ 3

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอ

3.1 การหารอยรั่วของตัวถังเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

การสร้างตัวถังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ได้มีการเชื่อมชิ้นส่วนสเตนเลสต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งหากการเชื่อมไม่ดีพอก็อาจจะทำให้เกิดการรั่วไหลขึ้นได้ ก่อนที่จะบรรจุชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันเข้าไปในตัวถังจึงต้องมีการตรวจสอบการรั่วไหลของตัวถังก่อน

การทดสอบได้กระทำเป็นขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นโลหะรูปวงกลมมาปิดทางด้านบนของตัวถัง โดยที่ตรงกึ่งกลางของแผ่นโลหะได้เจาะช่องไว้เพื่อใส่หัวของเครื่องวัดความดันแบบพิรานี

2. ใช้เครื่องสูบกลสูบอากาศออกจากตัวถังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน โดยสูบผ่านท่อที่เชื่อมระหว่างเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันกับเครื่องสูบกลโรตารี การสูบนี้ได้กระทำจนความดันภายในตัวถังมีค่าคงที่ ซึ่งอ่านค่าจากเครื่องวัดแบบพิรานีได้ประมาณ $6x10^{-3}$ มิลลิบาร์

3. หลังจากที่ได้ความดันคงที่แล้วได้ทำการฉีดก๊าซอะเซทโทนลงไปตามรอยเชื่อมต่อของโลหะ เหตุผลที่ทำเช่นนี้เพราะอะเซทโทนเป็นก๊าซที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก หากตัวถังของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันมีรอยรั่วซึม โมเลกุลของอะเซทโทนก็จะผ่านเข้าไปในตัวถังได้ง่าย อันจะมีผลทำให้ความดันภายในภาชนะเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากเครื่องวัดความดันแบบพิรานี

4. จากการตรวจสอบนี้เมื่อพบรอยรั่วซึม ก็ได้นำตัวถังไปแก้ไข แล้วนำมาตรวจสอบใหม่จนแน่ใจว่าไม่มีการรั่วซึม

3.2 การตรวจสอบการรั่วซึมของข้อต่อต่าง ๆ

หลังจากที่ประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบสุญญากาศตามแผนผังในรูปที่ 1.2 เข้าด้วยกันแล้ว ก็ได้ตรวจสอบรอยรั่วซึมตามข้อต่อต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบส่วนที่เชื่อมต่อกับเครื่องสูบกลโรตารี

ในการตรวจสอบนี้ได้ทำการปิดวาล์วท่อส่วนหน้าและวาล์วท่อหยาบ แล้วทำการตรวจสอบส่วนที่เชื่อมต่อกับเครื่องสูบกลโรตารี โดยการสูบอากาศออกจากส่วนที่เหลือของระบบสุญญากาศจนความดันภายในมีค่าคงที่ จากนั้นได้ฉีดวัดความดันโดยก๊าซอะเซทโทนตามรอยต่อต่าง ๆ แล้วสังเกตความดันที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดันตัวที่ 2 ในรูปที่ 1.2 หากความดันมีค่าเพิ่มขึ้นก็แสดงให้เห็นว่าก๊าซอะเซทโทนสามารถรั่วซึมเข้าไปในระบบได้

3.2.2 การตรวจสอบส่วนที่เหลือของระบบ

ในการตรวจสอบนี้ ได้ทำการเปิดวาล์วท่อหยาบโดยยังคงให้วาล์วท่อส่วนหน้าปิดอยู่แล้วทำการตรวจสอบหารอยรั่วโดยใช้วิธีการตามหัวข้อที่ 3.2.1

3.3 การหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

การหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันกระทำโดย เปิดเครื่องสูบอากาศให้สูบเอาอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศทุกวัน วันละ 3 ชั่วโมงเป็นเวลา 4 วัน โดยในแต่ละวันได้วัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออกทุก ๆ 5 นาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวัดทุก ๆ 20 นาทีอีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากทำการทดลองเช่นนี้เป็นเวลา 4 วันติดต่อกัน ก็ทิ้งระบบไว้เป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงทำการทดลองใหม่ตามวิธีการข้างต้น รวมเป็นการทดลองในลักษณะนี้ 3 ครั้ง

เมื่อการวัดความดันในแต่ละวันเสร็จสิ้นลงได้ปิดวาวล์แยกส่วน (isolation valve) เพื่อเป็นการตัดการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอกับภาชนะสุญญากาศ ในขั้นตอนนี้ได้มีการวัดความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปด้วย ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ถึง 3.7 โดยตารางสุดท้ายเป็นตารางที่แสดงค่าเฉลี่ยของความดันภายในภาชนะสุญญากาศที่เวลาต่าง ๆ ภายหลังที่ได้เปิดเครื่องสูบอากาศแบบพร่ไอ นอกจากตารางทั้งหลายที่กล่าวแล้ว ยังได้แสดงผลการทดลองด้วยกราฟในรูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.4

การทดลองนี้ ได้บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการทำความเย็นให้แก่เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอไว้ด้วย ปรากฏว่าอุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้าของน้ำมีค่าประมาณ 10 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ออกมาจากเครื่องสูบแบบแพร่ไอมีค่าประมาณ 21 องศาเซลเซียส และก่อนเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอทุกครั้งความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 2.8×10^{-2} มิลลิบาร์

การทดลองครั้งที่ 1				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ			
เวลา (นาที) หลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
5	3.3×10^{-2}	3.9×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.3×10^{-2}
10	5.9×10^{-2}	3.9×10^{-2}	2.6×10^{-3}	9.2×10^{-3}
15	2.6×10^{-3}	7.9×10^{-4}	5.9×10^{-4}	7.5×10^{-4}
20	2.5×10^{-4}	6.8×10^{-4}	3.3×10^{-4}	2.9×10^{-4}
25	6.8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.8×10^{-5}	2.0×10^{-5}
30	6.6×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.6×10^{-5}
35	5.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.2×10^{-5}
40	2.6×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-5}
45	1.8×10^{-5}	1.2×10^{-5}	9.7×10^{-6}	1.1×10^{-5}
50	1.7×10^{-5}	1.2×10^{-5}	9.5×10^{-6}	1.1×10^{-5}
55	1.7×10^{-5}	1.1×10^{-5}	9.2×10^{-6}	1.0×10^{-5}
60	1.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	9.2×10^{-6}	9.9×10^{-6}
80	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}	7.9×10^{-6}	9.2×10^{-6}
100	1.1×10^{-5}	9.9×10^{-6}	7.8×10^{-6}	8.9×10^{-6}
120	1.1×10^{-5}	9.5×10^{-6}	7.5×10^{-6}	8.3×10^{-6}
140	1.0×10^{-5}	9.2×10^{-6}	7.2×10^{-6}	7.9×10^{-6}
160	9.5×10^{-6}	9.2×10^{-6}	6.7×10^{-6}	7.9×10^{-6}
180	9.2×10^{-6}	9.2×10^{-6}	6.7×10^{-6}	6.6×10^{-6}

ตารางที่ 3.1 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก ของการทดลองในช่วง 4 วันแรก

การทดลองครั้งที่ 2				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ			
เวลา (นาที) หลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
5	1.3×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.2×10^{-2}
10	2.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}
15	7.9×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.6×10^{-4}	1.2×10^{-3}
20	2.6×10^{-4}	6.8×10^{-4}	3.3×10^{-4}	7.1×10^{-4}
25	2.4×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.7×10^{-5}	2.0×10^{-5}
30	2.0×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.6×10^{-5}
35	1.7×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
40	1.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}
45	1.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}
50	1.3×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.6×10^{-6}	1.1×10^{-5}
55	1.3×10^{-5}	9.9×10^{-6}	9.3×10^{-6}	1.1×10^{-5}
60	1.3×10^{-5}	9.5×10^{-6}	9.2×10^{-6}	1.1×10^{-5}
80	1.2×10^{-5}	8.6×10^{-6}	8.6×10^{-6}	1.0×10^{-5}
100	1.1×10^{-5}	7.9×10^{-6}	7.9×10^{-6}	9.9×10^{-6}
120	9.9×10^{-6}	7.6×10^{-6}	7.9×10^{-6}	9.5×10^{-6}
140		7.6×10^{-6}	7.2×10^{-6}	
160		6.6×10^{-6}	7.1×10^{-6}	
180		6.6×10^{-6}	6.7×10^{-6}	

ตารางที่ 3.2 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก ของการทดลองในช่วง 4 วันที่สอง

การทดลองครั้งที่ 3				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ			
เวลา (นาที) หลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
5	2.6×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}
10	1.6×10^{-2}	9.2×10^{-3}	9.2×10^{-3}	1.1×10^{-2}
15	8.6×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.6×10^{-4}	1.3×10^{-3}
20	7.9×10^{-4}	5.9×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.9×10^{-4}
25	2.6×10^{-5}	3.9×10^{-5}	5.9×10^{-5}	2.6×10^{-5}
30	1.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.6×10^{-5}
35	1.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
40	1.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
45	1.3×10^{-5}	9.5×10^{-6}	1.1×10^{-5}	1.2×10^{-5}
50	1.3×10^{-5}	9.2×10^{-6}	1.0×10^{-5}	1.1×10^{-5}
55	1.3×10^{-5}	9.1×10^{-6}	9.6×10^{-6}	1.1×10^{-5}
60	1.2×10^{-5}	8.8×10^{-6}	9.2×10^{-6}	1.1×10^{-5}
80	1.1×10^{-5}	7.9×10^{-6}	8.6×10^{-6}	9.2×10^{-6}
100	1.0×10^{-5}	7.6×10^{-6}	7.9×10^{-6}	8.9×10^{-6}
120	1.0×10^{-5}	7.1×10^{-6}	7.9×10^{-6}	7.9×10^{-6}
140	9.7×10^{-6}	6.6×10^{-6}	7.8×10^{-6}	7.9×10^{-6}
160	9.5×10^{-6}	6.6×10^{-6}	7.5×10^{-6}	7.8×10^{-6}
180	9.5×10^{-6}	6.4×10^{-6}	6.6×10^{-6}	7.5×10^{-6}

ตารางที่ 3.3 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะที่กำลังสูบอากาศออก ของการทดลองในช่วง 4 วันที่สาม

การทดลองครั้งที่ 1				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง			
เวลา (นาที) หลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
1	1.3×10^{-3}	6.6×10^{-4}	9.2×10^{-4}	1.1×10^{-3}
2	7.9×10^{-3}	7.9×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}
3	1.1×10^{-2}	9.2×10^{-3}	6.6×10^{-3}	6.6×10^{-3}
4	1.3×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}
5	2.6×10^{-2}	2.6×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.3×10^{-2}

ตารางที่ 3.4 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วนของการทดลอง 4 วันแรก

การทดลองครั้งที่ 2				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง			
เวลา (นาที) หลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
1	7.9×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.1×10^{-3}
2	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.6×10^{-3}	3.9×10^{-3}
3	5.3×10^{-3}	1.1×10^{-2}	6.6×10^{-3}	7.9×10^{-3}
4	1.1×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.6×10^{-2}	5.3×10^{-3}
5	1.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.6×10^{-2}

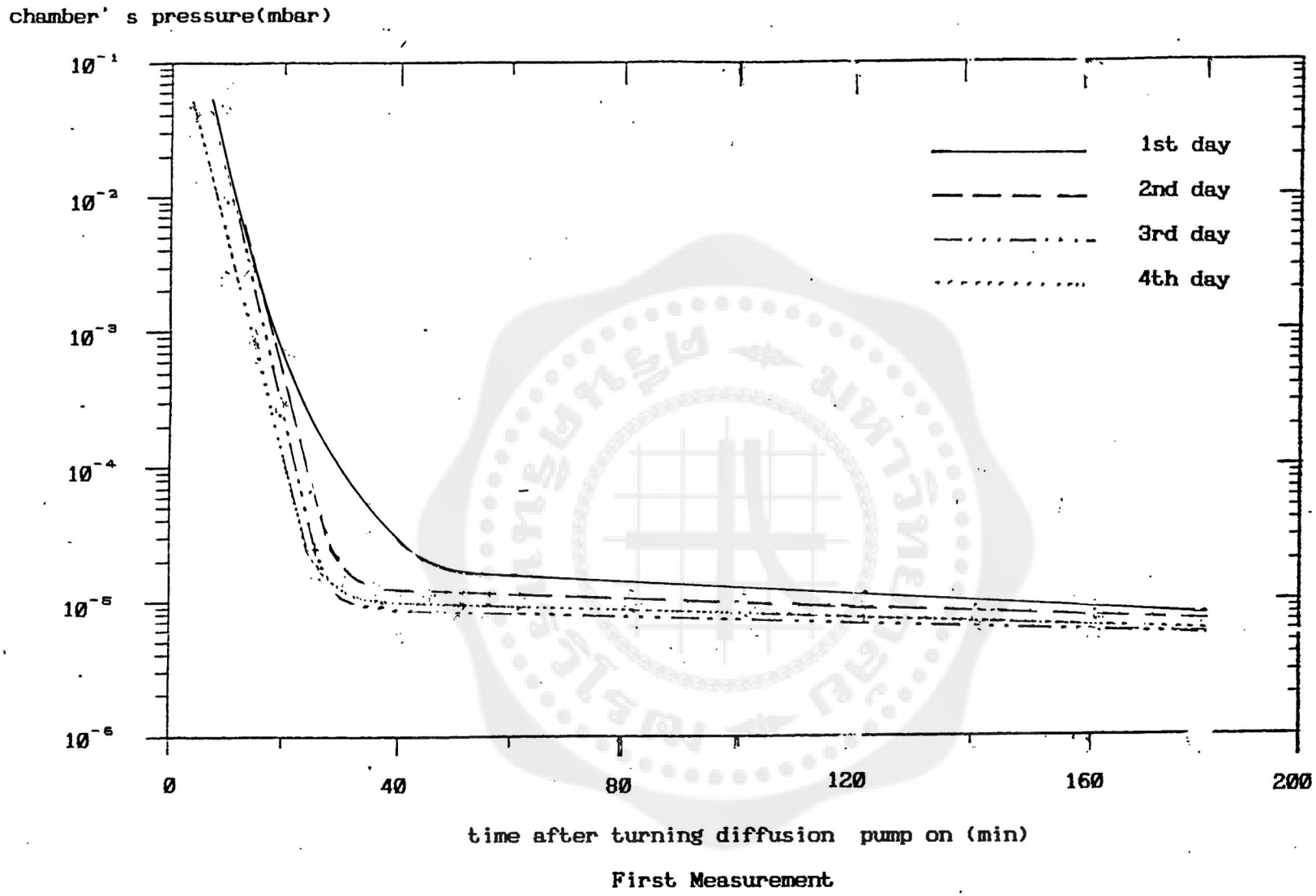
ตารางที่ 3.5 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วนของการทดลอง 4 วันที่ 2

การทดลองครั้งที่ 3				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง			
เวลา (นาที) หลังปิดวาวล์สุญญากาศสูง	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
1	8.1×10^{-4}	9.2×10^{-4}	7.9×10^{-3}	9.2×10^{-4}
2	7.4×10^{-4}	7.9×10^{-3}	1.1×10^{-2}	7.9×10^{-3}
3	6.6×10^{-3}	9.2×10^{-3}	1.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}
4	9.2×10^{-3}	1.3×10^{-2}	2.2×10^{-2}	3.3×10^{-2}
5	2.6×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.6×10^{-2}	3.4×10^{-2}

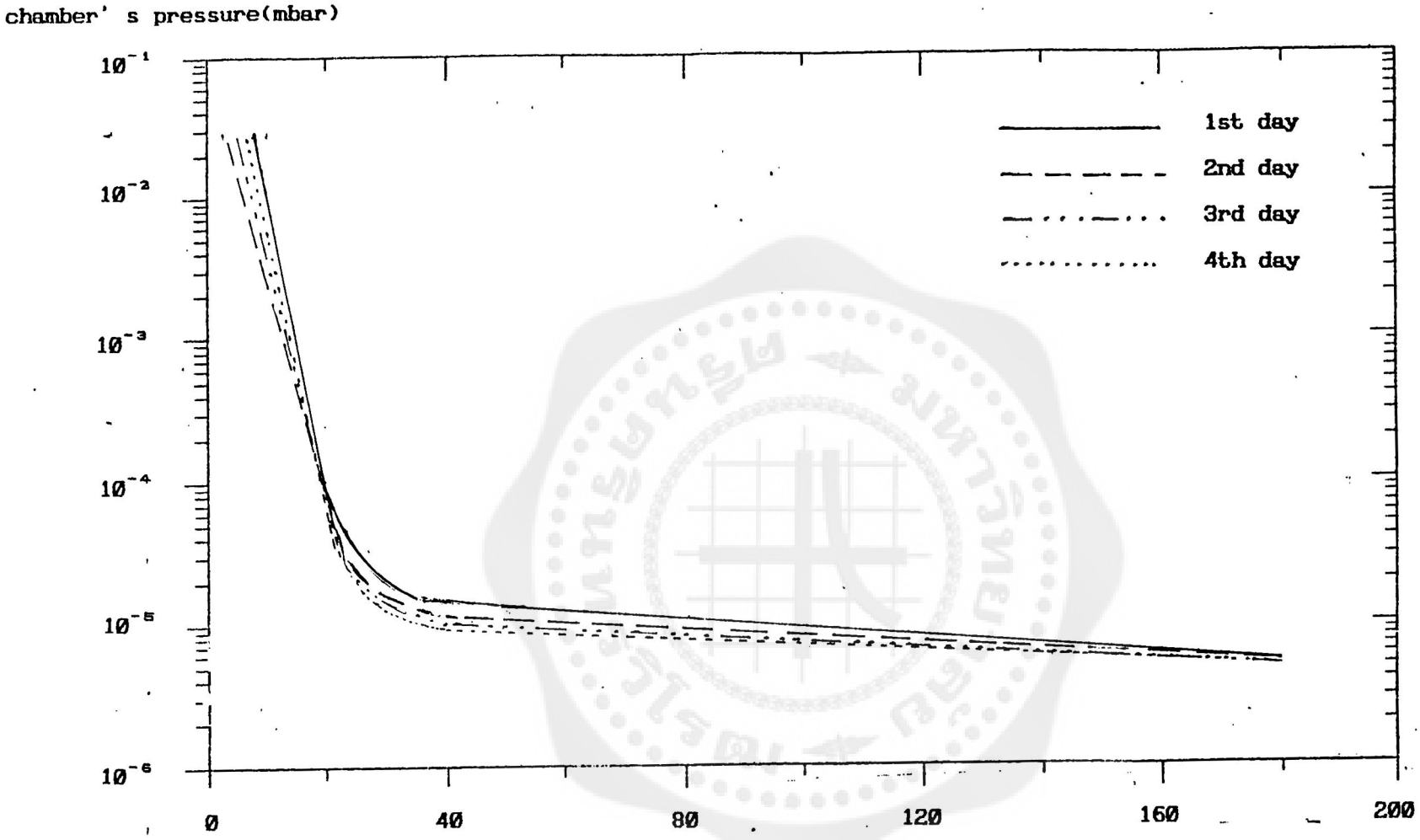
ตารางที่ 3.6 ความดันภายในภาชนะสุญญากาศหลังจากปิดวาล์วแยกส่วนของการทดลอง 4 วันที่ 3

ผลการทดลองเฉลี่ย				
	ความดัน (mbar) ภายในภาชนะสุญญากาศภายหลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ			
เวลา (นาที) หลังเปิดเครื่องสูบแบบแพร่ไอ	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
5	2.4×10^{-2}	2.1×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-2}
10	3.4×10^{-2}	2.0×10^{-2}	5.6×10^{-3}	1.0×10^{-2}
15	1.1×10^{-3}	6.3×10^{-4}	4.5×10^{-4}	7.7×10^{-3}
20	1.2×10^{-3}	6.5×10^{-4}	1.9×10^{-4}	6.5×10^{-4}
25	3.9×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.1×10^{-5}	2.2×10^{-5}
30	3.4×10^{-5}	1.4×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-5}
35	2.9×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.3×10^{-5}
40	1.9×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.2×10^{-5}
45	1.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.2×10^{-5}
50	1.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.7×10^{-6}	1.1×10^{-5}
55	1.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.4×10^{-6}	1.1×10^{-5}
60	1.4×10^{-5}	9.8×10^{-6}	9.2×10^{-6}	1.1×10^{-5}
80	1.2×10^{-5}	8.8×10^{-6}	8.4×10^{-6}	9.5×10^{-6}
100	1.1×10^{-5}	8.5×10^{-6}	7.9×10^{-6}	9.2×10^{-6}
120	1.0×10^{-5}	8.1×10^{-6}	7.8×10^{-6}	8.6×10^{-6}
140	9.9×10^{-6}	7.9×10^{-6}	7.4×10^{-6}	7.9×10^{-6}
160	9.5×10^{-6}	7.5×10^{-6}	7.1×10^{-6}	7.9×10^{-6}
180	9.4×10^{-6}	7.4×10^{-6}	6.7×10^{-6}	7.1×10^{-6}

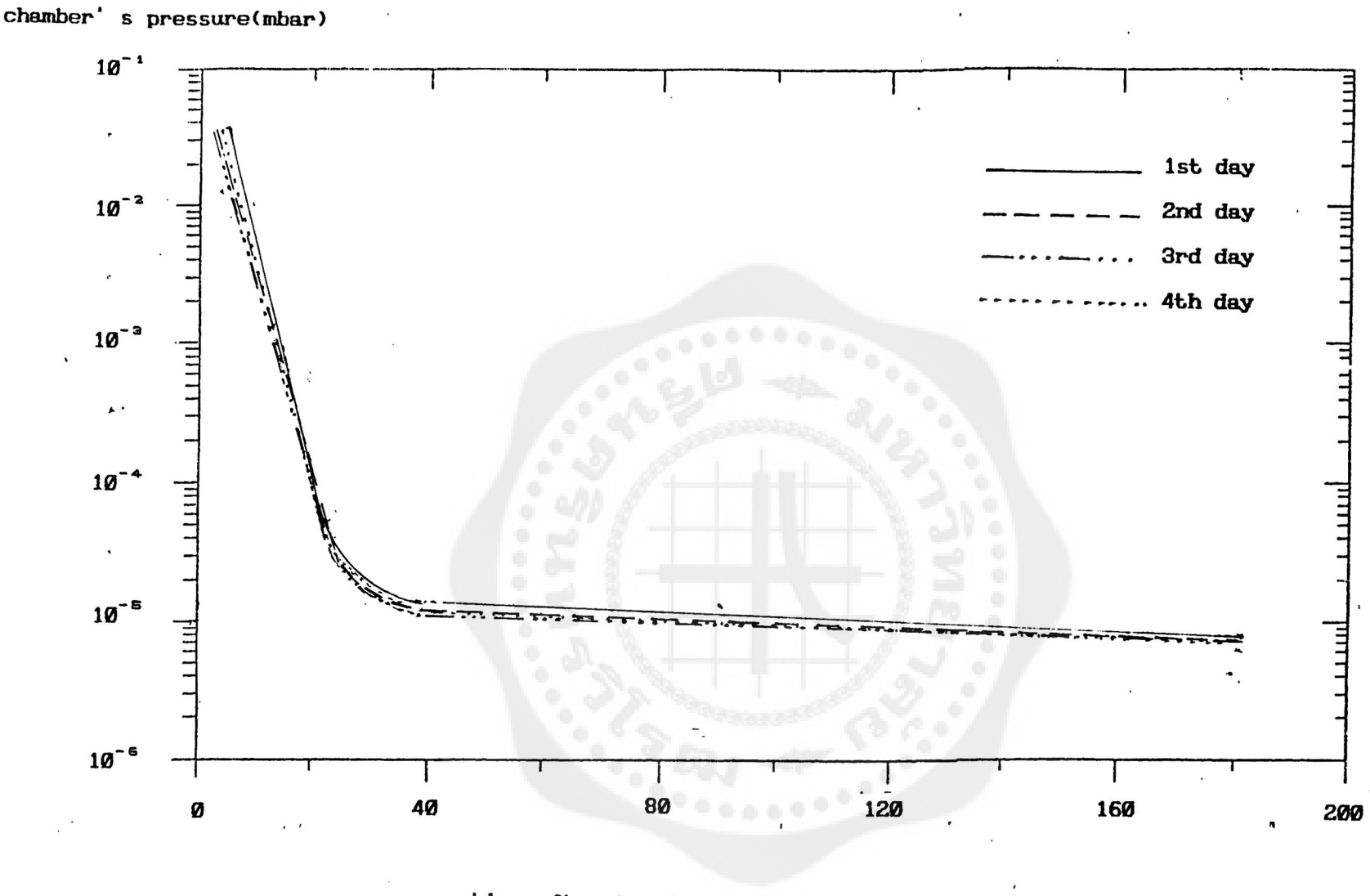
ตารางที่ 3.7 ความดันเฉลี่ยภายในภาชนะสุญญากาศจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง



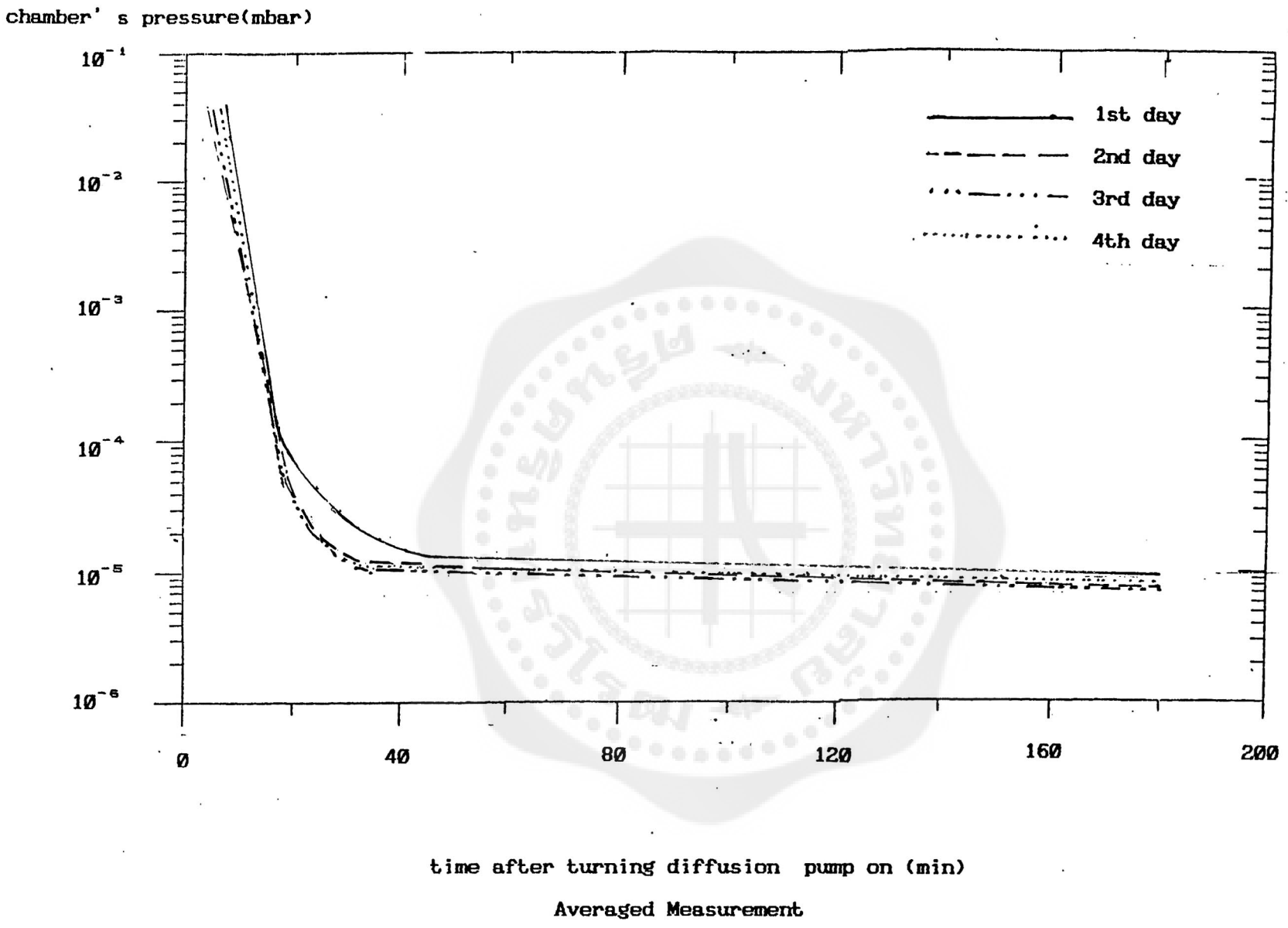
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสูญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิดเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสูญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิดเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสูญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิดเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในภาชนะสูญญากาศกับเวลานับตั้งแต่เปิดเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันของผลการทดลองเฉลี่ย

จากผลการทดลองเฉลี่ย เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (12) ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นสมการการคำนวณอัตราสูบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน จะทำให้คำนวณหาอัตราการสูบเฉลี่ยของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันตรงภาชนะสุญญากาศที่ความดันต่าง ๆ ซึ่งผลการคำนวณแสดงอยู่ในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.5

เปิดเครื่องสูบอากาศเป็นวันที่							
วันที่ 1		วันที่ 2		วันที่ 3		วันที่ 4	
ความดัน mbar	อัตราสูบ ลิตร/นาที	ความดัน mbar	อัตราสูบ ลิตร/นาที	ความดัน mbar	อัตราสูบ ลิตร/นาที	ความดัน mbar	อัตราสูบ ลิตร/นาที
1.8×10^{-2}	19.4	1.0×10^{-2}	19.6	6.2×10^{-3}	9.3	5.4×10^{-3}	14.5
6.1×10^{-4}	12.9	3.3×10^{-4}	9.8	2.4×10^{-4}	9.8	4.0×10^{-4}	11.1
5.3×10^{-5}	7.4	2.2×10^{-5}	4.1	1.6×10^{-5}	2.4	1.9×10^{-5}	2.9
2.9×10^{-5}	2.1	1.1×10^{-5}	0.8	1.0×10^{-5}	1.0	1.5×10^{-5}	2.3
1.7×10^{-5}	2.1	9.3×10^{-6}	0.5	8.9×10^{-6}	0.6	1.2×10^{-5}	1.1
1.2×10^{-5}	0.8			7.9×10^{-6}	0.7	1.1×10^{-5}	0.5
1.0×10^{-5}	0.3					8.7×10^{-6}	0.4

ตารางที่ 3.8 อัตราการสูบของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่ความดันต่าง ๆ

บทที่ 4
สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 ข้อสรุป

เครื่องเคลือบสารระบบสูญญากาศที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนต่างดังนี้คือ เครื่องสูบอากาศแบบโรตารี เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ฐานติดตั้งระบบระเหยสารและวาล์วแยกส่วน ภาชนะสูญญากาศ ระบบวาล์ว ระบบวัดความดัน อุปกรณ์ระเหยสาร ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบระบายความร้อน แผงติดสวิทช์ควบคุม ข้อต่อสูญญากาศ

เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้น ได้รับการออกแบบให้มีช่องทางเข้าเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร เครื่องสูบนี้สามารถทำให้ความดันในภาชนะสูญญากาศสเตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร ลดลงมาจากค่าประมาณ 1.2×10^{-2} มิลลิบาร์เป็นประมาณ 8×10^{-6} มิลลิบาร์ได้ในเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงกับ 20 นาที และที่ภาชนะสูญญากาศนี้พบว่า อัตราเร็วในการสูบสูงสุดของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันมีค่าประมาณ 20** ลิตร/นาที ที่ความดันประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์

สำหรับความดันต่ำสุดที่ระบบสูบสามารถสูบออกจากภาชนะสูญญากาศได้ มีค่าประมาณ 7×10^{-6} ถึง 8×10^{-6} มิลลิบาร์ โดยความดันวิกฤตของเครื่องมีค่าประมาณ 1.5×10^{-1} มิลลิบาร์

ในการทดลองเคลือบสารได้ใช้อลูมิเนียมและเงินเป็นสารเคลือบ โดยทำการเคลือบบนแผ่นแก้วขนาด 6x2.5 เซนติเมตร ซึ่งวางห่างจากโบ๊ตเป็นระยะ 19 เซนติเมตร และผลึกสำหรับวัดความหนาวางอยู่ที่ระยะ 15 เซนติเมตร โดยเริ่มทำการเคลือบเมื่อความดันภายในภาชนะสูญญากาศมีค่าเป็น 1.5×10^{-5} มิลลิบาร์ ผลการเคลือบพบว่าสารเคลือบมีความราบเรียบ ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยวิธีการแทรกสอดของแสง

การวัดความหนาของฟิล์มบางใช้วิธีเปลี่ยนความถี่ของผลึกเมื่อมีสารมาเกาะที่ผิวผลึก โดยความถี่ที่เปลี่ยนไป 1 Hz เทียบได้กับความหนาของฟิล์มที่เกาะที่ผลึก 0.4544 อังสตรอม ผลของการวัดความหนาของอลูมิเนียม 4 ครั้งที่ความหนาต่าง ๆ กันพบว่า อัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มที่แผ่นรองรับต่อความหนาของฟิล์มที่ผลึกเป็น 0.702

** อัตราเร็วในการสูบสูงสุดที่วัดได้นี้เป็นการวัดในขณะที่เครื่องสูบต่อกับภาชนะสุญญากาศและมีอุปกรณ์ระเหยสารติดตั้งอยู่ในระบบครบชุด ทำให้ค่าอัตราเร็วในการสูบมีประสิทธิภาพน้อยกว่ามาตรฐานของเครื่องโดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณของอากาศซึมผ่านรอยต่อต่างๆซึ่งซีลด้วยโอริงที่มีขายทั่วไป ประกอบกับการกลิ้งรอยต่อโอริงไม่เรียบพอ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อไว้มีการขับก๊าซออกมาจากเนื้อวัสดุ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้อัตราเร็วในการสูบมีค่าน้อย การรั่วซึมของก๊าซแสดงตามตารางที่ 3.4,3.5,3.6 โดยความดันเพิ่มจาก 10^{-5} mbar เป็น 10^{-2} mbar ในเวลา 5 นาที ในการออกแบบได้ติดตั้งหัววัดความดันเพนนิ่งไว้บนแผ่นฐานรองรับจึงมีความยุ่งยากมากที่จะนำไปติดตั้งในส่วนล่างของวาล์วแยกส่วนเพื่อที่จะวัดอัตราเร็วในการสูบโดยไม่มีโลดต่อกับระบบ

ผลการสร้างนี้ทำให้ ได้เครื่องเคลือบสารระบบสูญญากาศที่มีประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในระดับที่เป็นน่าพอใจ โดยมีขีดความสามารถเทียบเคียงกับเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ นอกจากนี้บุคคลากรที่เกี่ยวข้องกับการสร้างทุกคนยังได้รับความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับ เทคโนโลยีระบบสูญญากาศเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการงานวิจัยทุกประการ

4.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างเครื่องเคลือบสารระบบสูญญากาศนี้ ได้พยายามใช้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จัดหาได้ภายในประเทศโดยพยายามสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ขึ้นเองให้มากที่สุด จากประสบการณ์ที่ได้รับจากการสร้างในครั้งนี้ ทำให้มีข้อเสนอแนะดังนี้

ในการสร้างระบบสูญญากาศนี้ ไม่สามารถจัดหาวาล์วโซลีนอยด์ที่สามารถกักความดันได้ต่ำกว่า 10^{-6} มิลลิบาร์ได้ในประเทศ หากวาล์วโซลีนอยด์มีคุณสมบัติดีกว่าที่ใช้ก็อาจจะทำให้ความดันภายในระบบสูญญากาศต่ำกว่าที่ทำได้

ตรงบริเวณต่าง ๆ ที่ป้องกันการรั่วซึมด้วยยางกลม ควรทำให้ผิวสัมผัสเรียบและช่องยางกลมควรมีความลึกสม่ำเสมอ ซึ่งอาจจะทำได้โดยใช้เครื่องกลึงที่มีขีดความสามารถสูง

ควรลดการเชื่อมต่อด้วยยางกลม และลดช่องเชื่อมต่ออุปกรณ์ให้น้อยที่สุด เช่นหากภาชนะสูญญากาศเป็นครอบแก้วก็จะทำให้การรั่วซึมน้อยลงเพราะไม่มีการเชื่อมต่อเลย นอกจากนี้ครอบแก้วยังมีอัตราขับก๊าซต่ำอีกด้วย อย่างไรก็ดีครอบแก้วที่มีขนาดใหญ่มีราคาแพงและง่ายแก่การแตกร้าวมากกว่าสเตนเลส

การเชื่อมต่อชิ้นส่วนสเตนเลสต้องเป็นแบบ TIG

หากเครื่องเคลือบมีโบ๊ตมากกว่า 1 อัน ก็จะสามารถทำการเคลือบสารมากกว่า 1 ชั้นได้โดยไม่ต้องเปิดภาชนะสูญญากาศเพื่อทำการเปลี่ยนสารเคลือบ

สามารถพัฒนาเครื่องวัดความหนาให้สะดวกขึ้น โดยการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ให้เป็นระบบอัตโนมัติ โดยเมื่อความหนาของฟิล์มบนสารรองรับมีค่าเท่าที่ต้องการ ระบบก็จะปิดชัตเตอร์เองโดยทันที

ในการใช้เครื่องพบว่า หากอุณหภูมิของน้ำในระบบระบายความร้อนต่ำก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูบอากาศสูงขึ้น

หลังจากการใช้งาน ควรสูบอากาศออกจากระบบให้มีความดันต่ำเพื่อลดการซึมของอากาศเข้าสู่ผนังส่วนต่าง ๆ ของระบบสูญญากาศ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการสูบอากาศในการเคลือบครั้งต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. A. Guthrie Vacuum Technology Wiley, New York, 1963
2. Handbook of Chemistry and Physics, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio, 43rd ed., 1961
3. ชัยวิทย์ ศิลาวัชนาไนย ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 2526
4. Balzers Vacuum Components Edition 86/88 Page E1
5. ธรรมนูญ สมานพันธ์ เครื่องทำแผ่นฟิล์มบางโดยการระเหย วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2524
6. C.M. Van Atta Vacuum Science and Engineering McGRAW-HILL Toronto 1965
7. K.L. Chopra Thin Film Phenomena McGraw-Hill New York 1969
8. J.C. Anderson The Use of Thin Film in Physical Investigations Academic Press New York 1966
9. L.Holland Vacuum Deposition of Thin Film John Willy New York 1956
10. R.S.Longhurst Geometrical and Physical Optics Longman London 1957
11. F.A.Jenkins and H.E.White Fundamentals of Optics 4th edition McGraw-Hill Tokyo 1976
12. F.L.Pedrotti and L.S.Pedrotti Introduction to Optics Prentice-Hall London 1987
13. F.P.Phelps Frequency Control Proc. 11th Ann.Symp. P.256 MOnmouth N.J. 1957
14. W.P.Mason Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics D.Van Nostrand Princeton 1956
15. A.W.Warner and C.D.Stockbridge J.Appl.Phys., 34:437 1963
16. Edwards Catalog 1980
17. H. Wurzburg Voltage Regulator Handbook Motorola 1976

ภาคผนวก 1
การเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

การเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. การเปิด และ/หรือ ปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

ก่อนเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ต้องมีการเปิด และ/หรือ ปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

-เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องทำความเย็น และเครื่องสูบน้ำ

-ปรับเทอร์มอคัปเปิลให้ตัดระบบจ่ายไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อนของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

-บิดสวิทช์ เปิด-ปิด ของเครื่องวัดแบบเพนนิ่งไปยังตำแหน่งเปิด (ON) แล้วหมุนสวิทช์เลือกช่วงความดันของเครื่องวัดไปที่ตำแหน่งของช่วงที่ 1 (RANGE 1)

-บิดวิทช์เลือกช่วงความดันของเครื่องวัดแบบพิรานีไปอยู่ที่ตำแหน่งของช่วงที่ 1

-บิดสวิทช์ เปิด-ปิด ของเครื่องสูบกลโรตารีให้อยู่ในตำแหน่งเปิด (ON)

2. การเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

หลังจากที่ได้เปิด และ/หรือ ปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้ว ก็สามารถเดินเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันได้ ซึ่งการเดินเครื่องมีขั้นตอนดังนี้

2.1 เปิดสวิทช์ที่เขียนไว้ว่า SYSTEM เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ การเปิดสวิทช์นี้จะมีผลทำให้วาล์วปล่อยอากาศเข้าระบบส่วนหน้าซึ่งเป็นวาล์วโซลีนอยด์ชนิดปกติปิด เปลี่ยนเป็นเปิดโดยอัตโนมัติ วาล์วตัวนี้มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันจากเครื่องสูบกลโรตารีไหลเข้าสู่ระบบสุญญากาศเมื่อหยุดเดินเครื่องสูบโรตารี

2.2 เปิดสวิทช์ที่เขียนไว้ว่า ROTARY การเปิดสวิทช์นี้ทำให้เครื่องสูบกลโรตารีทำงาน ซึ่งการทำงานของเครื่องสูบกลโรตารีในขณะนี้เป็นทำในหน้าที่ของเครื่องสูบหยาบ นอกจากจะทำให้เครื่องสูบกลโรตารีทำงานแล้ว การเปิดสวิทช์นี้ยังเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบอื่น ๆ อีกด้วย ระบบเหล่านี้ได้แก่ ระบบระเหยสาร เครื่องวัดความดัน ยิ่งไปกว่านั้นการเปิดสวิทช์นี้ยังทำให้มีไฟฟ้าไปจ่ายให้แก่วาล์วโซลีนอยด์ท่อส่วนหน้าและวาล์วท่อหยาบ และตัดไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โซลีนอยด์วาล์วเปิดอากาศเข้าระบบส่วนหลังทำให้วาล์วอยู่ในตำแหน่งปิด

2.3 บิดสวิทช์เลือกโซลีนอยด์วาล์วไปยังตำแหน่งที่เรียกว่า BACKING ซึ่งมีผลทำให้วาล์วท่อส่วนหน้าเปิดและปิดวาล์วท่อหยาบ ทั้งนี้เพื่อสูบอากาศออกจากตัวเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน ทำให้

ความดันภายในระบบสุญญากาศลดลงต่ำที่สุด

2.4 เปิดสวิทช์ที่เขียนไว้ว่า POWER ที่เครื่องวัดความดันพิรานีแล้วบิดสวิทช์เลือกไปที่ตำแหน่งที่เขียนว่า HEAD 2 เพื่อวัดความดันในท่อส่วนหน้าและรอจนความดันลดลงประมาณ 10^{-1} มิลลิบาร์ แล้วจึงบิดสวิทช์มาที่ตำแหน่ง RANGE 2 รอจนความดันลดลงประมาณ 3 X 10^{-2} มิลลิบาร์

2.5 บิดสวิทช์เลือกวาล์วโซรีนอยไปยังตำแหน่งที่เขียนไว้ว่า ROUGHING เพื่อปิดวาล์วท่อส่วนหน้าและเปิดวาล์วท่อหยาบ โดยในขณะนี้จะทำการสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ จากนั้นจึงบิดสวิทช์เลือกอ่านสเกลของเครื่องวัดพิรานีไปที่ตำแหน่งที่เขียนว่า RANG 1 และบิดสวิทช์เลือกหัววัดไปที่ตำแหน่งที่เขียนว่า HEAD 2 และรอจนความดันลดลงประมาณ 10^{-1} แล้วจึงบิดสวิทช์เลือกช่วงอ่านสเกลมาที่ตำแหน่ง RANGE 2 แล้วจนความดันลดลง ประมาณ 3 X 10^{-2} มิลลิบาร์

2.6 บิดสวิทช์เลือกวาล์วโซรีนอยไปยังตำแหน่งที่เขียนว่า BACKING เพื่อปิดวาล์วท่อหยาบและเปิดวาล์วท่อส่วนหน้า โดยในขณะนี้จะทำการสูบอากาศออกจากตัวเครื่องสูบแบบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมันอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ความดันท้ายมีค่าเท่ากับความดันวิกฤต หลังจากที่บิดสวิทช์เลือกวาล์วโซลีนอยด์และ ก็บิดสวิทช์เลือกหัวของเครื่องวัดความดันไปที่ตำแหน่ง HEAD 2 เพื่อวัดความดันที่ในท่อส่วนหน้า แล้วรอจนความดันลดลงเหลือประมาณ 1.5 X 10^{-2} มิลลิบาร์

2.7 ในกรณีที่ต้องการทำโกลว์ดิสชาร์จ ให้เปิดสวิทช์ที่เขียนว่า High Voltage ของชุดจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงประมาณ 5 นาทีจึงปิดสวิทช์จ่ายไฟ

2.8 เปิดสวิทช์ที่เขียนว่า DIFFUSION เพื่อจ่ายไฟให้แก่ลวดความร้อนของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน รอให้น้ำมันเดือดประมาณ 20 นาที

2.9 ค่อย ๆ เปิดวาล์วแยกส่วน โดยหมุนคันหมุนที่ด้านหน้าของตัวถังตามเข็มนาฬิกาทีละน้อย ขณะเปิดต้องคอยสังเกตความดันในท่อส่วนหน้าไม่ให้สูงเกิน 1.5 X 10^{-2} มิลลิบาร์ ถ้าความดันสูงค่าที่กำหนดนี้ ต้องค่อย ๆ หมุนวาล์วแยกส่วนกลับจนความดันมีค่าต่ำกว่า 10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดใหม่จนสุด

2.10 ขณะที่ความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 8 X 10^{-3} มิลลิบาร์ วงจรควบคุมอัตโนมัติจะจ่ายไฟให้กับเครื่องวัดความดันแบบเพนนิ่งทำให้เครื่องวัดเพนนิ่งเริ่มทำงาน ซึ่งวงจรควบคุมอัตโนมัตินี้มีหัววัดพิรานีเป็นตัวรับรู้ (sensor) เมื่อความดันลดต่ำลงจนเกือบสุดสเกลของ RANGE 1 ให้หมุนสวิทช์เลือกช่วงความดันไปที่ตำแหน่ง RANGE 2

2.11 ในกรณีที่ต้องการเปิดภาชนะสุญญากาศเพื่อนำชิ้นงานออก แล้วใส่ชิ้นงานใหม่เพื่อทำการเคลือบอย่างต่อเนื่อง ให้หมุนสวิทช์เลือกช่วงความดันของเครื่องวัดแบบเพนนิ่งมาที่ตำแหน่งRANGE 1 (เมื่อความดันในภาชนะสุญญากาศเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 8 X 10^{-3} มิลลิบาร์ วงจรอัตโนมัติในเครื่องวัดแบบพิรานีจะงดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง) จากนั้นให้ค่อย ๆ ปิดวาล์วแยกส่วนโดยหมุนคันหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจนสุด ซึ่งจะทำให้สวิทช์ที่จ่ายกระแสให้แก่วาล์วโซลีนอยด์ปิดพร้อมกันนั้นให้เปิดสวิทช์ที่เขียนว่า AIR ADN เพื่อเปิดวาล์วปล่อยให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

ผ่านท่อยาง

2.11.1 ยกภาชนะสุญญากาศขึ้นเพื่อ เปลี่ยนชิ้นงาน เปลี่ยนสารเคลือบ ฯลฯ

2.11.2 ปิดสวิทช์วาล์ว AIR ADM ตั้งภาชนะสุญญากาศลง

2.11.3 สูบอากาศออกภาชนะสุญญากาศจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยบิดสวิทช์เลือกโซรีนอยวาล์วไปยังตำแหน่งที่เขียนว่า ROUGHING แล้วบิดสวิทช์เลือกสเกลของเครื่องวัดความดันไปที่ตำแหน่ง RANGE 1 พร้อมกับบิดสวิทช์เลือกไปที่ตำแหน่ง HEAD 2 เพื่อวัดความดันในภาชนะสุญญากาศ รอจนความดันลดลงเหลือประมาณ 10^{-1} มิลลิบาร์ จึงบิดสวิทช์มาที่ตำแหน่ง RANGE 2 จนความดันลดลงเหลือประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์

2.11.4 บิดสวิทช์เลือกโซรีนอยวาล์วไปยังตำแหน่ง BACKING แล้วบิดสวิทช์เลือกของเครื่องวัดความดันไปที่ ตำแหน่ง HEAD 2 เพื่อวัดความดันที่ตำแหน่งส่วนหน้า

2.11.5 จากนี้ให้ดำเนินการตามวิธีในข้อ 2.9 ถึงข้อ 2.10

3. การปิดระบบเครื่องทำสุญญากาศ (เลิกการทำงาน)

3.1 หมุนสวิทช์เลือกช่วงความดันของเครื่องวัดแบบเพนนิ่งมาที่ตำแหน่ง RANGE 1 (เมื่อความดันในภาชนะสุญญากาศเพิ่มประมาณ 8×10^{-3} มิลลิบาร์ วงจรของเครื่องวัดแบบพิรานีจะตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง) ค่อย ๆ ปิดวาล์วแยกส่วนโดยหมุนคันหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจนสุด

3.2 ปิดสวิทช์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อนของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

3.3 รอให้น้ำมันของเครื่องสูบแบบแพร่ไอเย็นลง (ประมาณ 30 นาที)

3.4 บิดสวิทช์เลือกโซรีนอยวาล์วไปยังตำแหน่ง OFF (ปิดวาล์วท่อท่อส่วนหน้า)

3.5 ปิดสวิทช์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เครื่องสูบกลกลโรตารี ซึ่งจะทำให้วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ระบบส่วนหน้าเปิดโดยอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันจากเครื่องสูบกลโรตารีเข้าสู่ระบบ

3.6 ปิดสวิทช์ SYSTEM

ภาคผนวก 2
วิธีการเคลือบสาร

การเคลือบสารมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1. ทำความสอาดแผ่นกระจกรองรับด้วยกรดกัดแก้วแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำแผ่นกระจกไปอบให้แห้ง แล้วนำไปวางที่แผ่นวางชิ้นงานในภาชนะสุญญากาศ

2. ใส่สารเคลือบลงในโบ๊ต

3. ปรับตำแหน่งผลึกในระบบวัดความหนาให้ห่างจากโบ๊ตเป็นระยะ 15 เซนติเมตร โดยต้องใช้ระยะนี้เป็นหลักในการวัดความหนาทุกครั้งตามเงื่อนไขในบทที่ 2

4. เดินเครื่องระบบสูบอากาศตามภาคผนวก 1 จนความดันในภาชนะสุญญากาศเป็นประมาณ 1.5×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยในระหว่างเดินเครื่องสูบอากาศหากต้องการอบชิ้นงานเพื่อไล่ความชื้นและก๊าซ ก็สามารถทำได้โดยเปิดสวิทช์ที่เขียนไว้ว่า BAKING

5. เดินเครื่องสูบสำหรับระบบทำความเย็นของผลึกในระบบวัดความหนา

6. เปิดเครื่องวัดความหนา พร้อมกับบันทึกความถี่เริ่มต้นของผลึก และคำนวณความถี่สุดท้ายที่สอดคล้องกับความหนาที่ต้องการ

7. เปิดสวิทช์ระบบเคลือบสาร แล้วค่อย ๆ เพิ่มกระแสที่จ่ายให้แก่โบ๊ตโดยค่อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์ของหม้อแปลงที่ปรับค่าได้

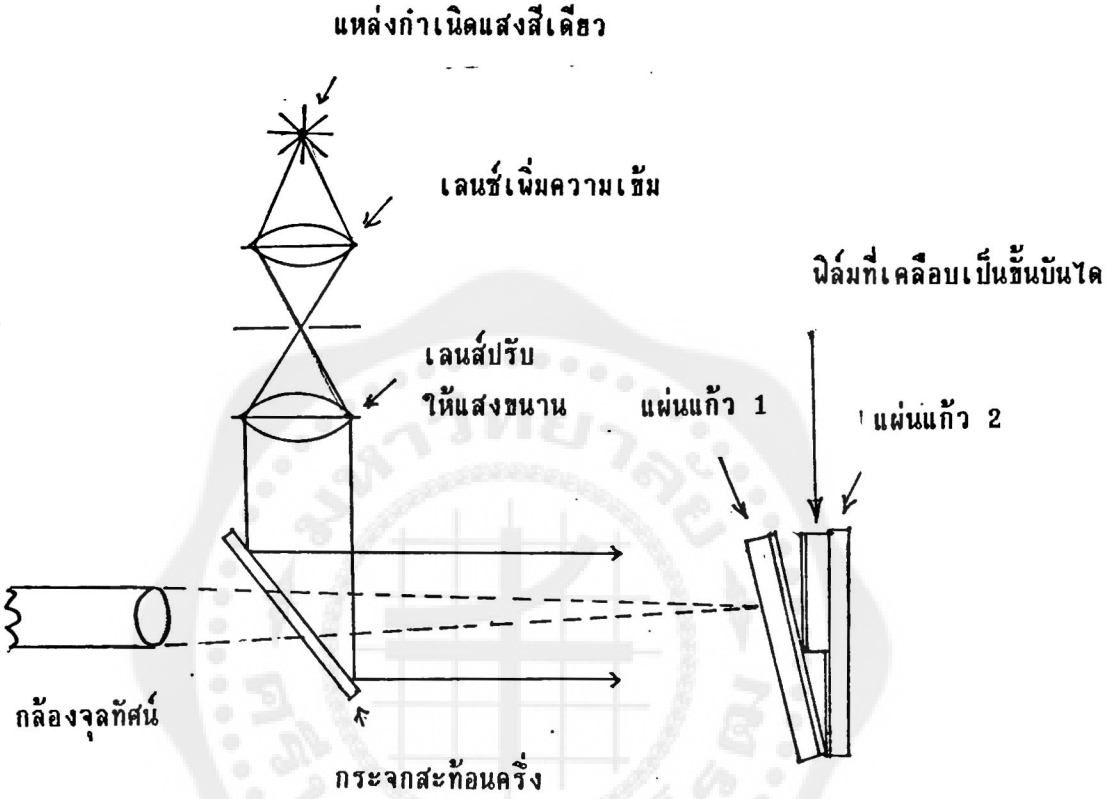
8. สังเกตสารเคลือบจากช่องมองของภาชนะสุญญากาศ เมื่อสารเริ่มเดือดและระเหยให้เปิดฉากกั้นการระเหย

9. อ่านความถี่ที่ลดลง และปิดฉากกั้นการระเหยเมื่อค่าความถี่ตรงกับค่าที่คำนวณไว้

10. ปิดสวิทช์ที่จ่ายกระแสให้แก่โบ๊ต รอจนโบ๊ตเย็นลง แล้วเปิดภาชนะสุญญากาศตามขั้นตอนในภาคผนวก 1 เพื่อนำชิ้นงานออก

ภาคผนวก 3
การวัดความหนาของฟิล์มด้วยวิธีแทรกสอด

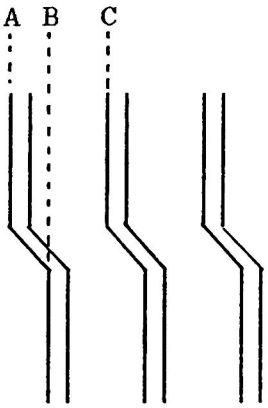
รูปที่ ผ3.1 แสดงการจัดเครื่องมือในการวัดวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการแทรกสอดของแสง



รูปที่ ผ3.1 การจัดวางเครื่องมือการวัดความหนาของฟิล์มด้วยวิธีแทรกสอดของแสง

จากรูปฟิล์มบางของสารเคลือบ ซึ่งได้รับการเคลือบแบบขั้นบันไดเกาะอยู่บนแผ่นแก้วแผ่น 2 โดยแผ่นแก้วทั้ง 2 ในรูปก่อให้เกิดฟิล์มอากาศที่มีลักษณะเป็นลิ่ม โดยแผ่นแก้วแผ่นที่ 1 มีฟิล์มเงินเคลือบอยู่ด้านในเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงที่แผ่น 1 นี้

เมื่อแสงตกกระทบในแนวตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มของสารเคลือบบนแผ่นแก้วที่ 2 จะเกิดการสะท้อนกลับไปมาของแสงขึ้นระหว่างแผ่นแก้วทั้งสอง เนื่องจากฟิล์มที่เกาะอยู่บนแผ่นที่ 2 มีลักษณะเป็นขั้นบันได การแทรกสอดที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะดังรูปที่ ผ3.2



รูปที่ ผ3.2 ริ้วมืด-สว่างที่เกิดจากการเคลือบฟิล์มแบบขั้นบันได

การเหลื่อมของริ้วมืดเกิดขึ้นในแนวของรอยต่อของขั้นบันได จากค่าอัตราส่วนระหว่างระยะ AB ต่อระยะ AC (ซึ่งกำหนดในรูปที่ ผ3.2) ทำให้สามารถคำนวณความหนาของฟิล์มบาง (หรือความสูงของขั้นบันได) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นแก้วแผ่นที่ 2 ได้ ดังทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 1

ตารางที่ ผ3.1 ถึง ผ3.4 แสดงข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีความหนาของฟิล์มของสารเคลือบที่ต่างกัน การวัดทั้ง 4 ครั้งได้ใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแสงที่ได้จากเลเซอร์ของฮีเลียม-นีออน

ตำแหน่งของริ้ว (mm)			ระยะระหว่างริ้ว (mm)		ความหนาของฟิล์ม (nm)
A	B	C	AB	AC	
0.183	0.220	0.385	0.037	0.202	57.95
0.180	0.212	0.380	0.032	0.200	50.62
0.200	0.222	0.400	0.022	0.200	34.80
0.200	0.230	0.410	0.030	0.210	45.20
0.210	0.235	0.410	0.025	0.175	45.20
0.210	0.237	0.412	0.027	0.175	48.82
0.210	0.230	0.412	0.020	0.192	32.96
0.220	0.242	0.412	0.022	0.192	36.25
0.210	0.245	0.415	0.035	0.205	54.02
0.213	0.235	0.410	0.022	0.197	35.33
0.210	0.242	0.420	0.032	0.210	48.21
0.213	0.247	0.425	0.034	0.212	50.74
0.160	0.185	0.350	0.025	0.190	41.63
0.153	0.187	0.358	0.034	0.205	52.48
0.144	0.180	0.355	0.036	0.211	53.98
0.153	0.190	0.350	0.037	0.197	59.43
0.153	0.182	0.350	0.029	0.197	46.58
0.170	0.200	0.368	0.030	0.198	47.94

ค่าเฉลี่ยความหนาของฟิล์ม 46.78 nm ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน 7.92

สรุปได้ว่า ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 47 ± 8 nm

ตารางที่ ผ3.1 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 1

ตำแหน่งของริ้ว (mm)			ระยะระหว่างริ้ว (mm)		ความหนาของฟิล์ม (nm)
A	B	C	AB	AC	
0.132	0.180	0.332	0.048	0.200	75.94
0.130	0.168	0.325	0.038	0.195	61.66
0.130	0.170	0.332	0.040	0.202	62.65
0.130	0.173	0.332	0.043	0.202	67.35
0.152	0.190	0.350	0.038	0.198	60.72
0.145	0.190	0.347	0.045	0.202	70.49
0.132	0.185	0.337	0.053	0.205	81.80
0.140	0.183	0.338	0.043	0.198	68.71
0.138	0.180	0.342	0.042	0.204	65.14
0.145	0.178	0.350	0.033	0.205	50.93
0.135	0.190	0.345	0.055	0.210	82.86
0.128	0.165	0.345	0.037	0.217	53.94
0.132	0.180	0.332	0.048	0.200	75.94
0.145	0.195	0.347	0.050	0.202	78.32
0.142	0.181	0.362	0.039	0.220	56.09
0.155	0.188	0.357	0.033	0.202	51.69
0.152	0.186	0.358	0.034	0.206	52.22
0.148	0.183	0.348	0.035	0.200	55.37
0.152	0.193	0.345	0.041	0.193	67.21
0.140	0.190	0.350	0.050	0.210	75.30
0.155	0.192	0.348	0.037	0.193	60.66

ค่าเฉลี่ยความหนาของฟิล์ม 65.47 nm ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน 9.90

สรุปได้ว่า ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 65 ± 10 nm

ตารางที่ ผ3.2 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 2

ตำแหน่งของริ้ว (mm)			ระยะระหว่างริ้ว (mm)		ความหนาของฟิล์ม (nm)
A	B	C	AB	AC	
0.085	0.155	0.221	0.070	0.136	162.85
0.089	0.152	0.225	0.063	0.136	146.56
0.084	0.155	0.223	0.071	0.139	161.60
0.086	0.156	0.221	0.070	0.135	164.06
0.082	0.156	0.223	0.074	0.141	166.05
0.079	0.158	0.223	0.079	0.144	173.58
0.082	0.153	0.224	0.071	0.142	158.20
0.077	0.150	0.226	0.073	0.149	155.01
0.082	0.165	0.228	0.083	0.146	179.87
0.085	0.158	0.220	0.073	0.135	171.09
0.088	0.150	0.224	0.062	0.136	144.24
0.082	0.159	0.227	0.077	0.145	168.02
0.082	0.155	0.231	0.073	0.149	155.01
0.085	0.157	0.228	0.072	0.143	159.30
0.079	0.155	0.220	0.076	0.141	170.54
0.078	0.140	0.215	0.062	0.137	143.18
0.081	0.156	0.217	0.075	0.136	174.48
0.082	0.158	0.227	0.076	0.145	165.84
0.070	0.150	0.231	0.080	0.161	157.22
0.082	0.166	0.233	0.084	0.151	176.01
0.082	0.155	0.230	0.073	0.148	156.06

ค่าเฉลี่ยความหนาของฟิล์ม 162.29 nm ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน 10.00

สรุปได้ว่า ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 162 ± 10 nm

ตารางที่ ผ3.3 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 3

ตำแหน่งของริ้ว (mm)			ระยะระหว่างริ้ว (mm)		ความหนาของฟิล์ม (nm)
A	B	C	AB	AC	
0.345	0.248	0.188	0.097	0.157	195.48
0.344	0.244	0.188	0.100	0.156	202.82
0.347	0.249	0.180	0.098	0.167	185.67
0.345	0.251	0.187	0.094	0.158	188.24
0.342	0.247	0.183	0.095	0.159	189.04
0.337	0.247	0.187	0.090	0.150	189.84
0.347	0.245	0.180	0.102	0.167	193.25
0.347	0.248	0.185	0.099	0.162	193.35
0.336	0.250	0.188	0.086	0.148	183.90
0.347	0.249	0.187	0.098	0.160	193.79
0.347	0.252	0.200	0.095	0.147	204.47
0.345	0.249	0.192	0.096	0.153	198.53
0.347	0.249	0.194	0.098	0.153	202.66
0.349	0.247	0.188	0.102	0.161	200.45
0.345	0.245	0.188	0.100	0.157	201.53
0.345	0.248	0.180	0.097	0.165	186.00
0.349	0.252	0.195	0.097	0.154	199.29
0.353	0.252	0.192	0.101	0.161	198.49
0.354	0.249	0.188	0.105	0.166	200.13

ค่าเฉลี่ยความหนาของฟิล์ม 195.10 nm ส่วนเบี่ยงเบนมาตราฐาน 6.31

สรุปได้ว่า ความหนาของฟิล์มเท่ากับ 195$\pm$ 6 nm

ตารางที่ ผ3.4 ข้อมูลในการวัดตำแหน่งของแถบมืดของตัวอย่างที่ 4

Diffusion Pump

Technical Data

1. Pumping Speed (air, system)	20 liters/min
2. Recommened Pump Fluids	Silicon 704
3. Fluid Charge	250 ml
4. Minimum backing pump displacement for maximum through put	12 $m^3 h^{-1}$
5. Recommened backing Pump	E2M12 (Edwards)
6. Backing Pressure	1.5 X 10^{-1}
7. Inlet Flange Size	160 mm
8. Inlet Flange Seal	O-ring-Seal
9. Backing/Roughing Valves	solenoid valves 25 mm
10. High Vaccuum Isolate Valve	Mechanical valve
11. Connecting Pipe work	34 mm (diameter)
12. Cooling Weter Connection	12 mm
13. Minimum cooling water flow at 20 C	50 liters hr^{-1}
14.Heater Loading (220V)	1.3 kW