บทที่ 4

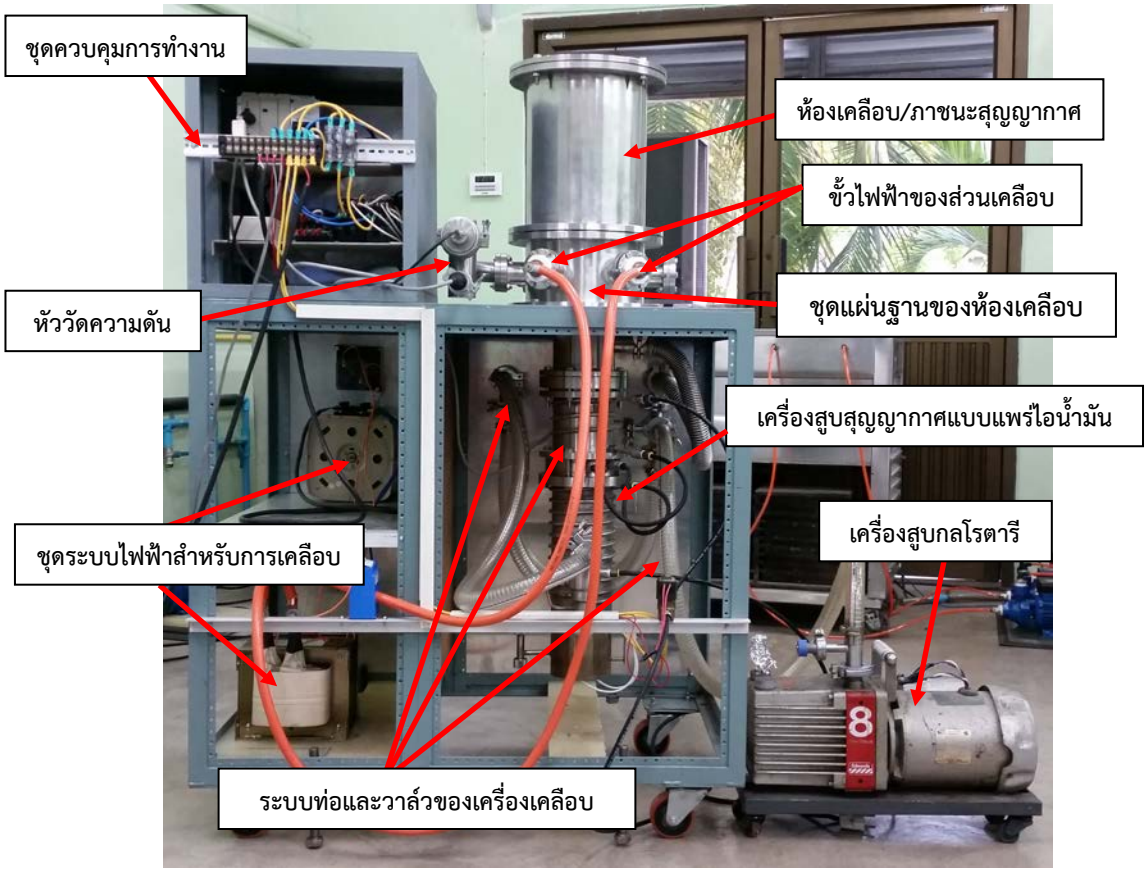
ผลและอภิปรายผล

4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ

เครื่องเคลือบด้วยวิธีระเหยสารที่สร้างขึ้นมีลักษณะโดยรวมดังแสดงในภาพที่ 4-1 ถึง ภาพที่ 4-3 ซึ่งมีส่วนสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ (1) ภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบ ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ ฝาปิดบน ชุดแผ่นฐาน ช่องเปิดและหน้าแปลนต่างๆ (2) ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ประกอบด้วย เครื่องสูบกลโรตารี เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน มาตรวัดความดัน วาวล์และข้อต่อ (3) ระบบเคลือบ ประกอบด้วยชุดระเหยสาร ชุดวางวัสดุรองรับ และ (4) ระบบควบคุมการทำงานหลักของเครื่องเคลือบ มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

ภาพที่ 4-1 เครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารทั้งระบบที่ออกแบบสร้างในโครงการ

ภาพที่ 4-2 ด้านหน้าของเครื่องเคลือบ



ภาพที่ 4-3 ด้านหลังของเครื่องเคลือบ

ทั้งนี้ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นมีรายละเอียดดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศหรือห้องเคลือบของเครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้นทำจากสเตนเลสหนา 10 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 205 mm มีความสูงขนาด 285 mm มีช่องเปิดสำหรับสังเกตุปรากฏการณ์ในภาชนะสุญญากาศขนาด 65 mm จำนวน 1 ช่อง (ภาพที่ 4-4) ด้านบนของห้องเคลือบมีแผ่นปิดบน (Top Plate) ติดถาวรขนาด 285 mm

สำหรับชุดแผ่นฐาน (Base Plate) ของภาชนะสุญญากาศทำจากสเตนเลสหนา 10 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 205 mm ความสูงเท่ากับ 135 mm มีช่องเปิดสำหรับต่อกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันพร้อมหน้าแปลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 70 mm สำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 6 ช่อง (ภาพที่ 4-5)

(a) (b)

ภาพที่ 4-4 ภาชนะสุญญากาศหรือห้องเคลือบของเครื่องเคลือบ
(a) ลักษณะของห้องเคลือบ
(b) การติดตั้งห้องเคลือบของเครื่องเคลือบบนแท่นเครื่อง

(a) (b)

ภาพที่ 4-5 ชุดแผ่นฐานของเครื่องเคลือบฟิล์ม
(a) ลักษณะของชุดแผ่นฐาน
(b) การติดตั้งชุดแผ่นฐานของเครื่องเคลือบบนแท่นเครื่อง

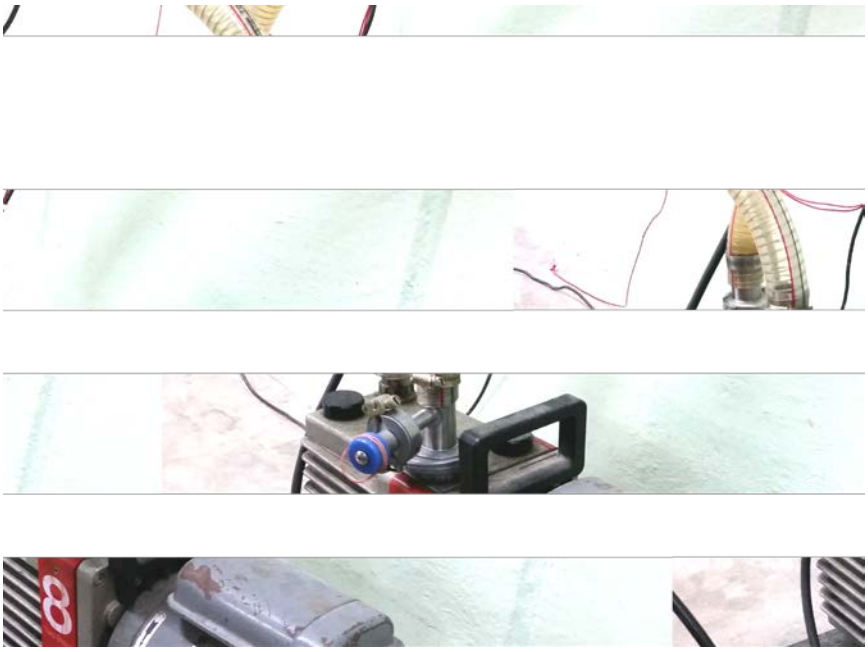
2. ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ เป็นระบบเครื่องสูบสำหรับลดความดันในห้องเคลือบที่สร้างในโครงการวิจัย ประกอบด้วย เครื่องสูบสุญญากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบกลแบบโรตารี และ เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน พร้อมมาตรวัดความดัน วาล์วและข้อต่อต่างๆ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.1 เครื่องสูบกลแบบโรตารี เป็นเครื่องสูบของ Edwards รุ่น E2M8 แบบ 2 สถานะ อัตราสูบประมาณ 8 m^3/hr. (ภาพที่ 4-6) ทำหน้าที่สร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้น (ลดความดันจากบรรยากาศประมาณ 10^{+3} mbar ลงมาเป็น $8.0x10^{-2}$ mbar) และทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบหนุนหลังให้กับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

2.2 เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน ทำหน้าที่สร้างภาวะสุญญากาศสูง (ความดันระดับ10^{-5} mbar) ซึ่งเป็นการลดความดันต่อจากภาวะสุญญากาศขั้นต้น เครื่องสูบนี้เป็นชุดที่สร้างขึ้นในโครงการ มีอัตราสูบประมาณ 200 l/sec ช่วงความดันทำงานมีค่าประมาณ 10^{-2}-10^{-6} mbar ใช้ไฟฟ้าขนาด 220 V/50 Hz 700 W โดยใช้น้ำมัน Silicone DC704 (Tetraphenyl Tetramethyl Trisiloxane) (ภาพที่ 4-7) ระบายความร้อนด้วยน้ำ จากเครื่องทำน้ำเย็น (ภาพที่ 4-8) โดยลักษณะการติดตั้งเครื่องสูบกลโรตารีและเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันกับห้องเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 4-9

2.3 ระบบวัดความดัน ประกอบด้วยมาตรวัดความดัน Balzers รุ่น TPG 300 เป็นหน่วยควบคุมและแสดงผล ซึ่งมีหัววัด 2 แบบ ได้แก่ (1) หัววัดแบบพิรานีของ Balzers รุ่น TPR010 สำหรับวัดความดันในช่วงระหว่าง $1x10^{+3}$ - $6x10^{-4}$ mabr และ (2) หัววัดแบบเพนนิงของ Balzers รุ่น IKR050 สำหรับวัดความดันในช่วงระหว่าง $5x10^{-3}$ - $2x10^{-9}$ mbar (ภาพที่ 4-10) โดยเครื่องเคลือบที่สร้างในโครงการนี้ใช้หัววัดแบบพิรานีและเพนนิงสำหรับวัดความดันภายในห้องเคลือบ (ภาพที่ 4-10(a)) และใช้หัววัดแบบพิรานีสำหรับวัดความดันในท่อท้าย (ภาพที่ 4-10(b))

2.4 วาล์วและข้อต่อ สำหรับเครื่องเคลือบนี้สร้างใหม่ทั้งหมดได้แก่ วาล์วสุญญากาศสูง (High Vacuum Valves) เป็นแบบวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) (ภาพที่ 4-12) ส่วนวาล์วสำหรับต่อระหว่างเครื่องสูบกลแบบโรตารีกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน (Backing/Roughing Valve) ใช้วาล์วแบบ Right-Angle Valve (ภาพที่ 4-13) ส่วน วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (Air Admittance Valves หรือ Release Valves) เป็นแบบวาล์วเข็ม (ภาพที่ 4-14) ส่วนภาพที่ 4-15 แสดงตำแหน่งของวาล์วแบบต่างๆ ของเครื่องเคลือบ



ภาพที่ 4-6 เครื่องสูบกลโรตารี

(a) (b)

ภาพที่ 4-7 เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน
(a) ชุดฉีดไอน้ำมันภายในเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน
(b) ตัวถังของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

ภาพที่ 4-8 ชุดทำน้ำเย็นสำหรับเครื่องสูบแบบแพรไอน้ำมัน

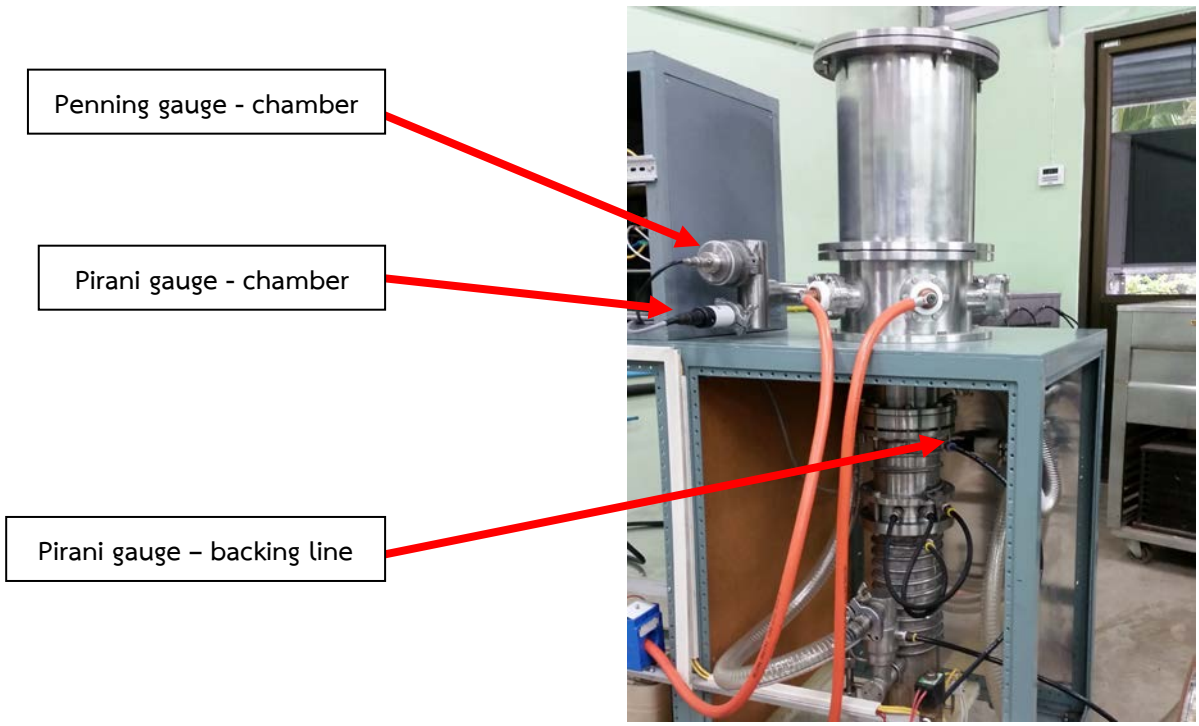
ภาพที่ 4-9 ลักษณะการติดตั้งเครื่องสูบแบบแพรไอน้ำมันและเครื่องสูบกลโรตารีของเครื่องเคลือบ

(a)

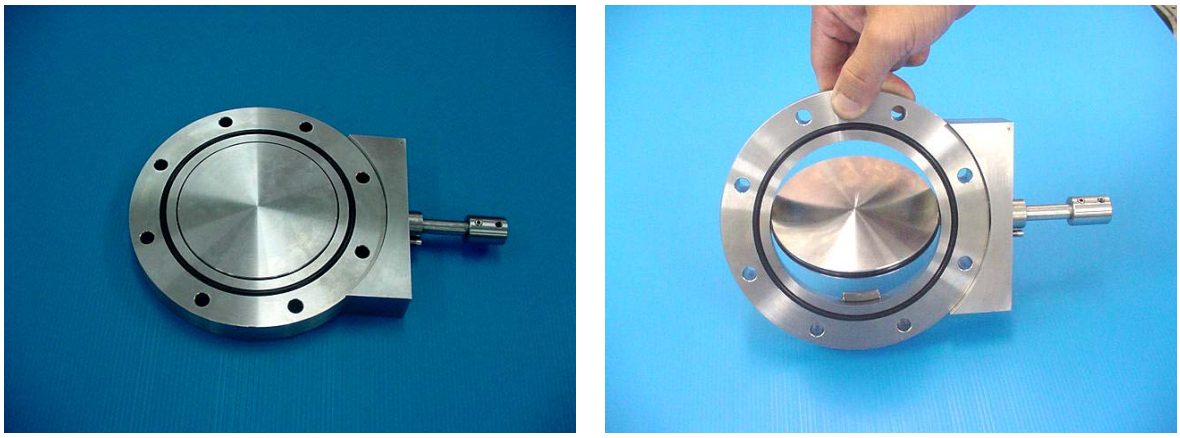
(b)

(c)

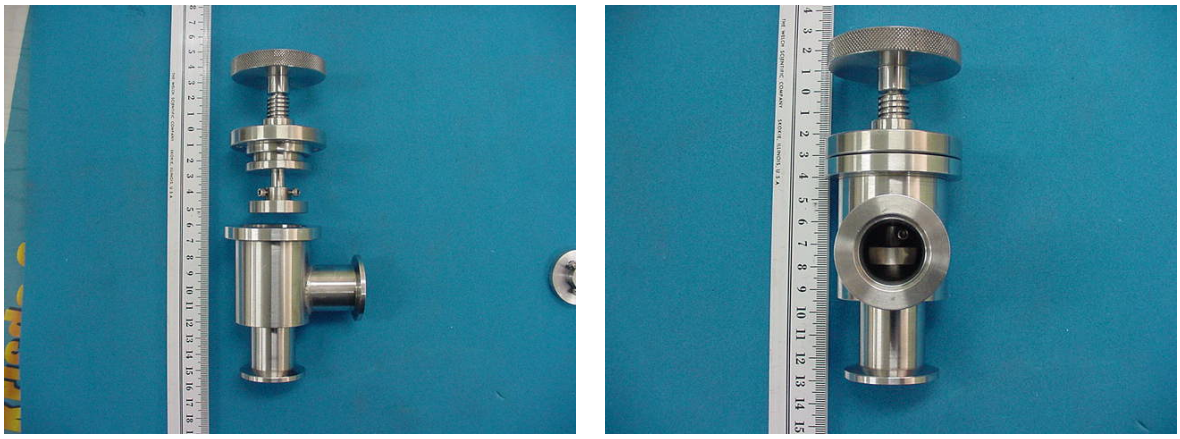
ภาพที่ 4-10 ระบบมาตรวัดความดันของเครื่องเคลือบ
(a) หัววัดแบบเพนนิงและแบบพิรานี สำหรับวัดความดันภายในห้องเคลือบ
(b) หัววัดแบบพิรานี สำหรับวัดความดันท้าย
(c) ชุดแสดงผลการวัดความดัน



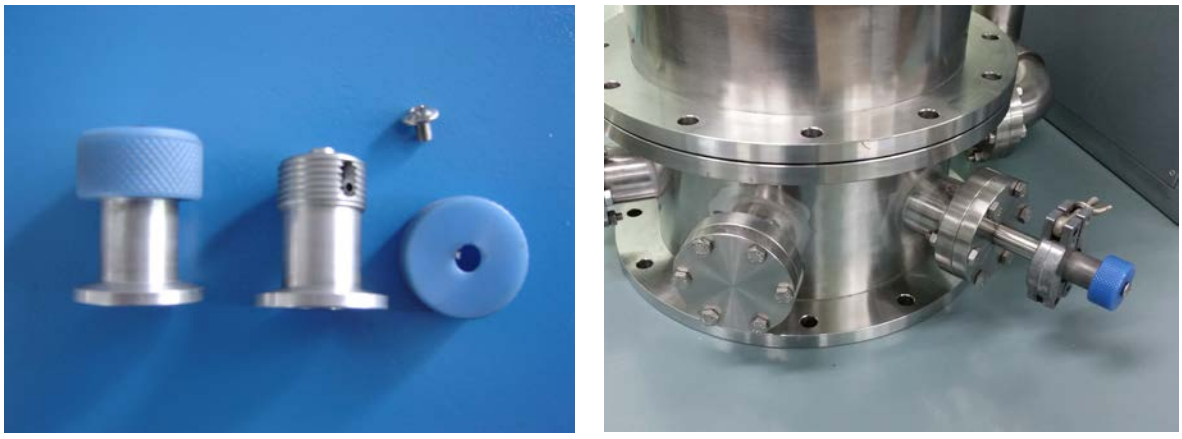
ภาพที่ 4-11 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความดันของเครื่องเคลือบ



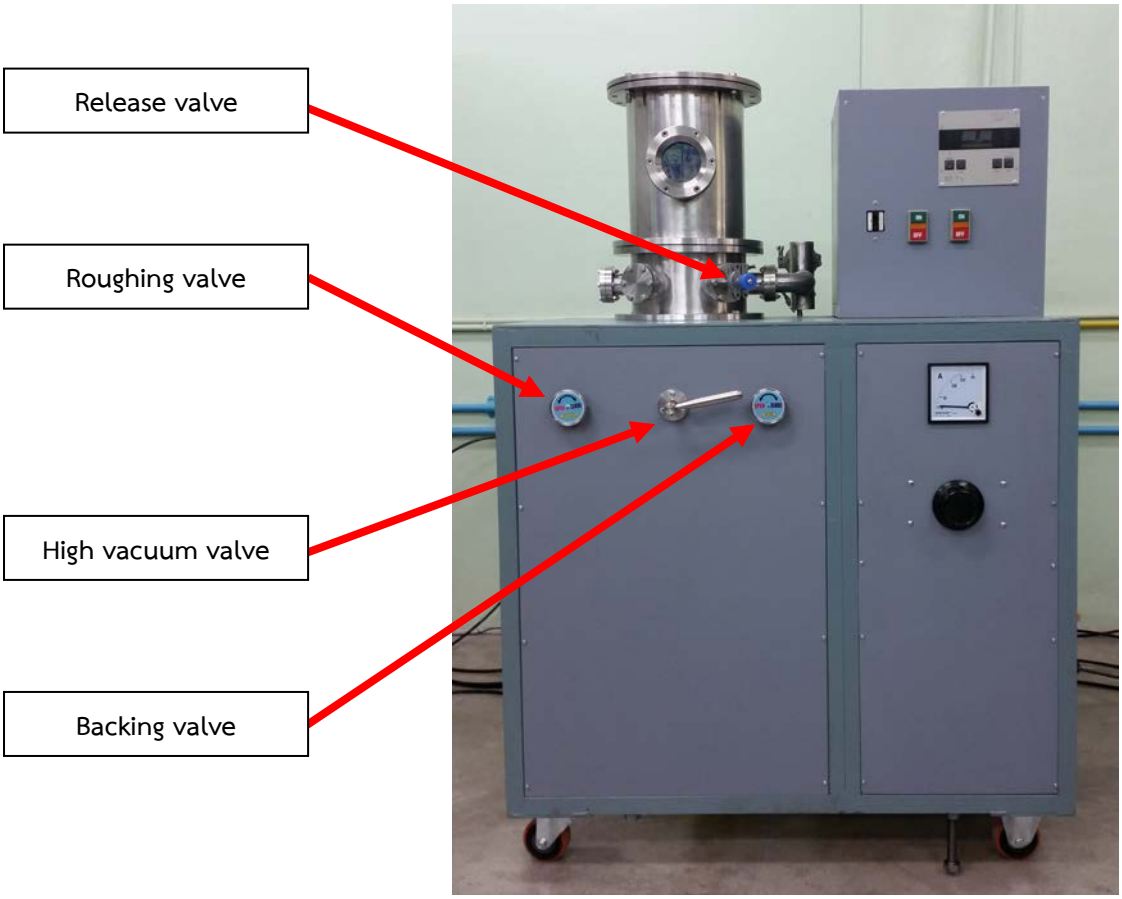
ภาพที่ 4-12 วาล์วสูงสุญญากาศสูง แบบปีกผีเสื้อ



ภาพที่ 4-13 วาล์วหยาบและวาล์วท้าย แบบ right angle valve

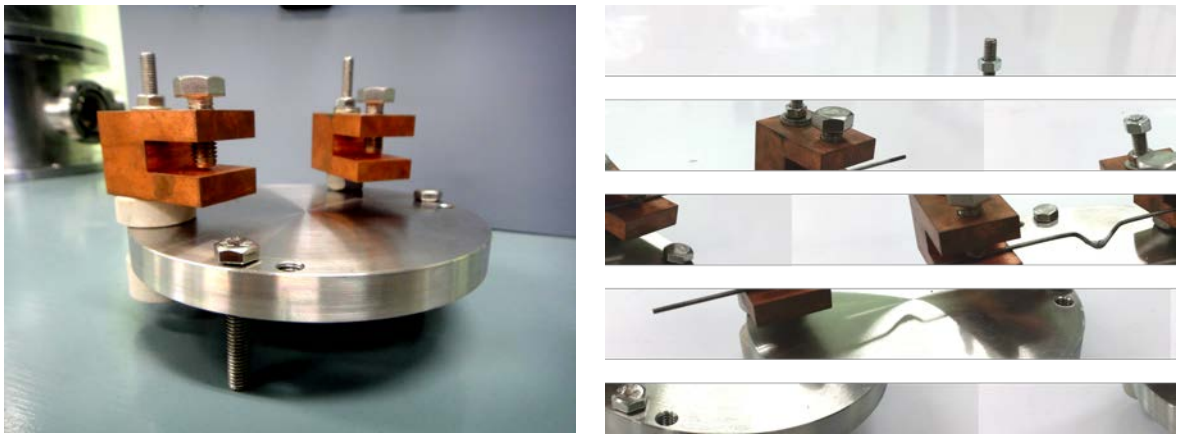


ภาพที่ 4-14 วาล์วปล่อย แบบวาล์วเข็ม



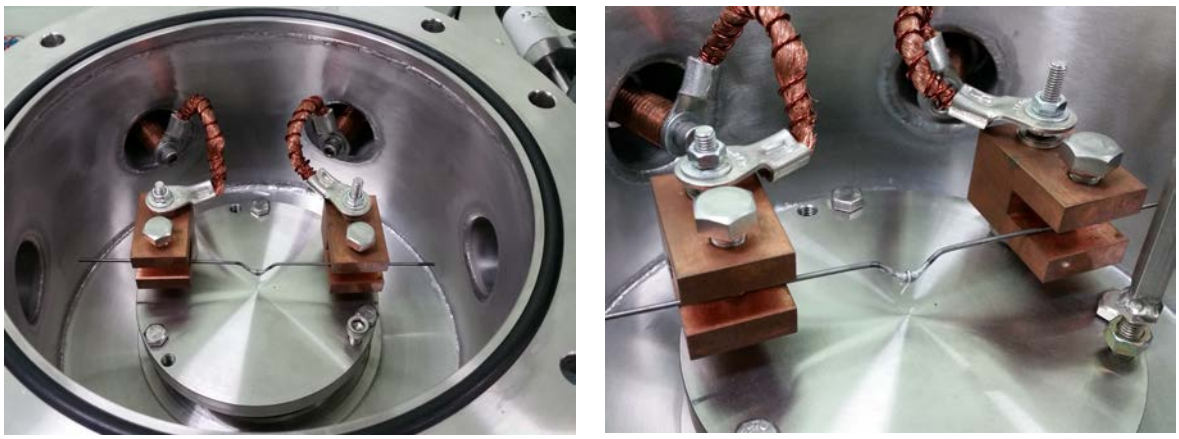
ภาพที่ 4-15 ตำแหน่งการติดตั้งของวาล์วต่างๆ ของเครื่องเคลือบ

3. ระบบเคลือบ ส่วนการเคลือบของเครื่องเคลือบที่สร้างในโครงการนี้เป็นแบบการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารโดยใช้ลวดต้านทานในการให้ความร้อนแก่สารเคลือบ (ภาพที่ 4-16) มีขั้วไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แบบความต่างศักย์ต่ำ กระแสสูง ให้กับลวดต้านทาน (ภาพที่ 4-17) โดยภาพที่ 4-18 แสดงการติดตั้งชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานภายในห้องเคลือบ สำหรับชุดวางชิ้นงานของเครื่องเคลือบทำจากสเตนเลสสามารถปรับระดับความสูงได้ (ภาพที่ 4-19) ส่วน ภาพที่ 4-20 แสดงลักษณะการติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าเข้ากับลวดต้านทานของระบบเคลือบ

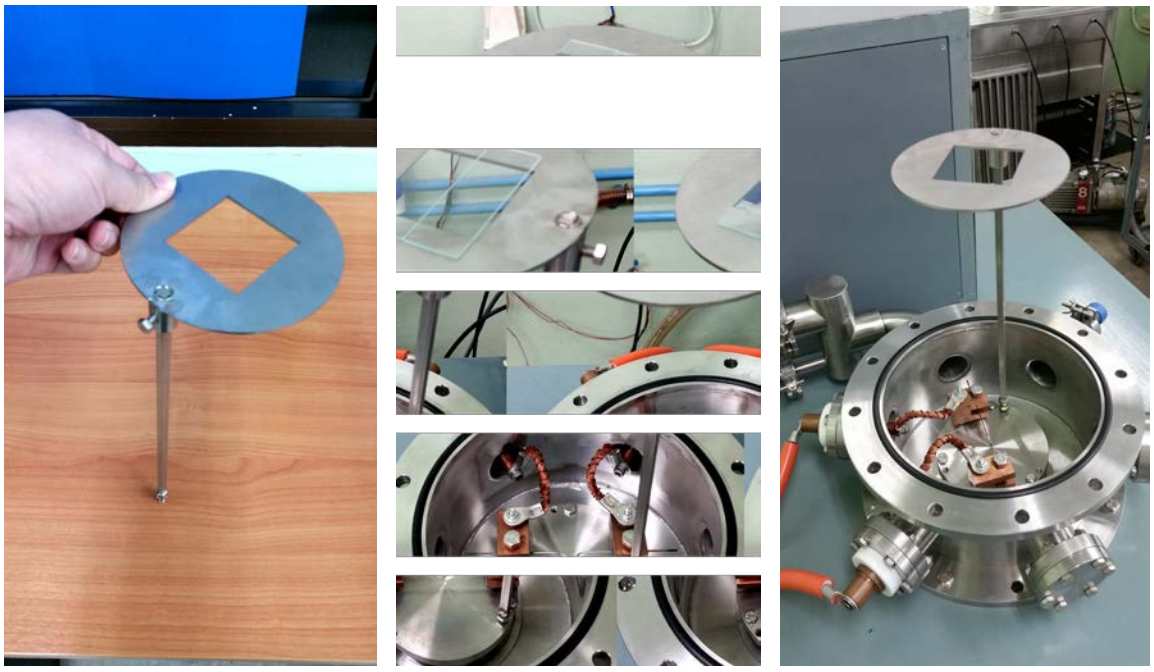


ภาพที่ 4-16 ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานของระบบเคลือบ

ภาพที่ 4-17 ขั้วไฟฟ้าสุญญากาศสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทาน

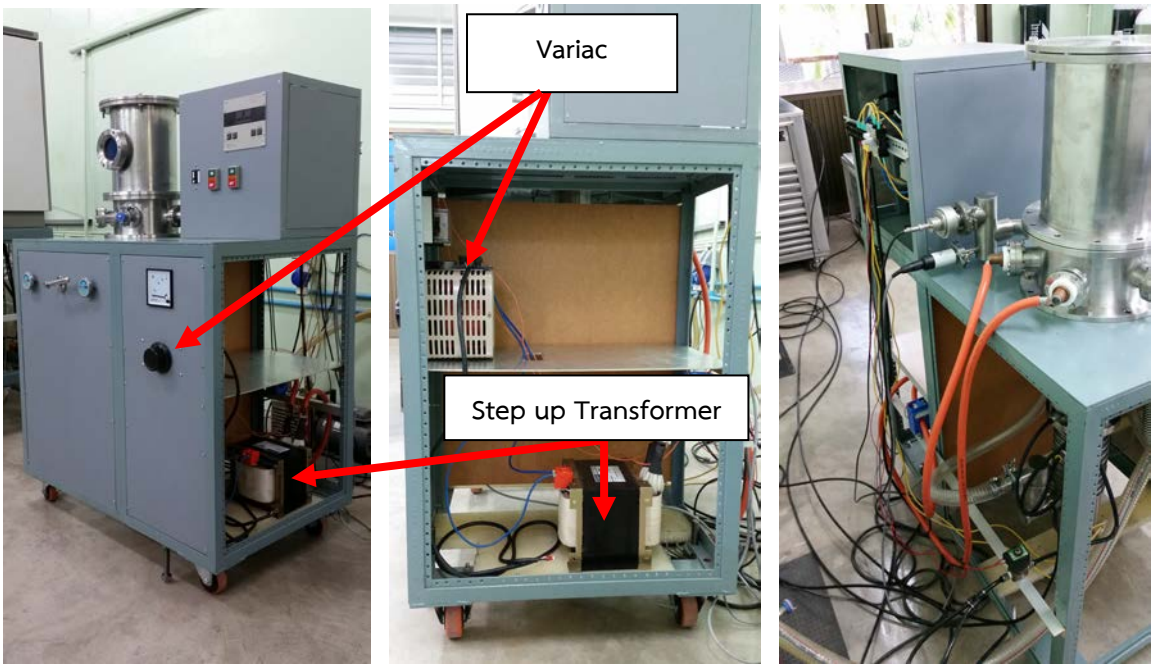


ภาพที่ 4-18 การติดตั้งชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานภายในห้องเคลือบ



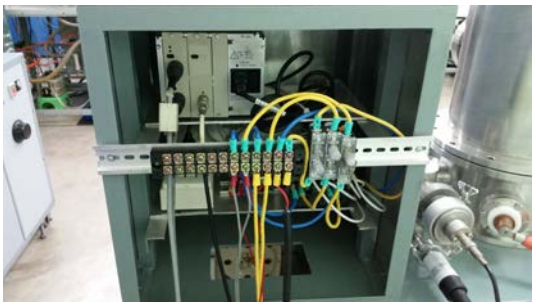
(a) (b)

ภาพที่ 4-19 ชุดวางชิ้นงานสำหรับเคลือบ
(a) ลักษณะของแท่นวางชิ้นงานที่ปรับระยะได้
(b) การติดตั้งชุดวางชิ้นงานในห้องเคลือบ



ภาพที่ 4-20 การติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทานของระบบเคลือบ

4. ระบบควบคุมการทำงานหลักของเครื่องเคลือบ ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับติดตั้ง สวิทช์ควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบทั้งหมด ซึ่งแบ่งเป็นการควบคุมระบบสุญญากาศและระบบการเคลือบ (ภาพที่ 4-21)



(a)

(b)

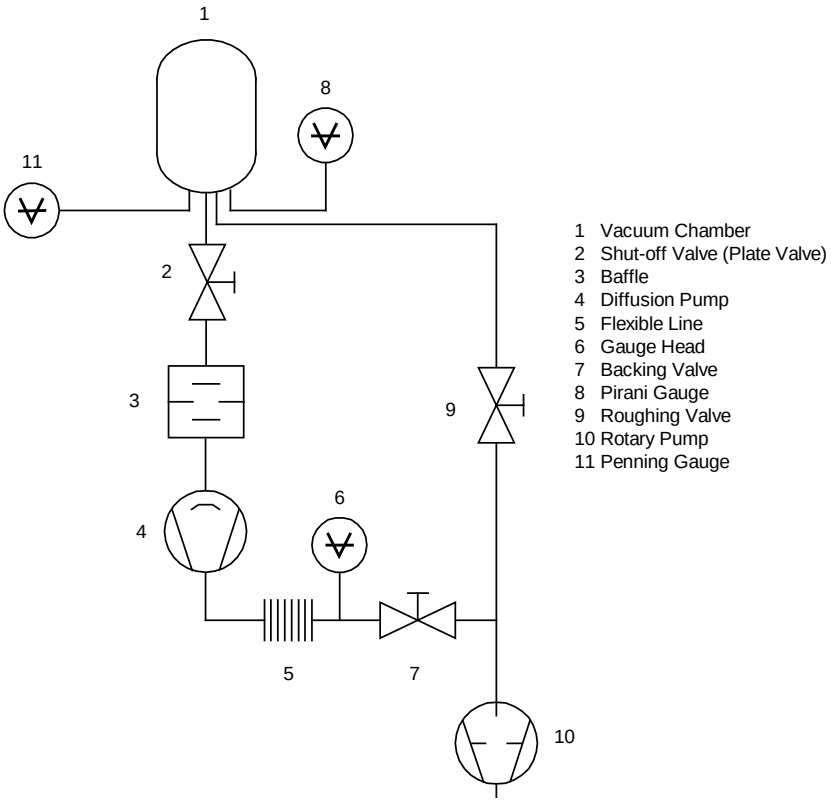
(c)

ภาพที่ 4-21 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ
(a) ด้านหลังของกล่องควบคุม
(b) ด้านข้างของกล่องควบคุม
(c) กล่องควบคุมของเครื่องเคลือบบนแท่นเครื่อง

4.2 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

ทั้งนี้เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นต้องสร้างภาวะสุญญากาศสูง (ความดันประมาณ 5.0×10^{-5} mbar) ซึ่งเป็นระดับความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบ ทั้งนี้ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในโครงการนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบกลแบบโรตารี และ เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันต่อกับภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบตามแผนภาพระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบดังแสดงในภาพที่ 4-22 โดยเครื่องสูบกลโรตารีจะลดความดันในภาชนะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศลงมาเท่ากับ 10^{-3} mbar ซึ่งอ่านความดันจากหัววัดแบบพิรานี ส่วนเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันจะลดความดันต่อจนมีความดันมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar โดยอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบเพนนิง

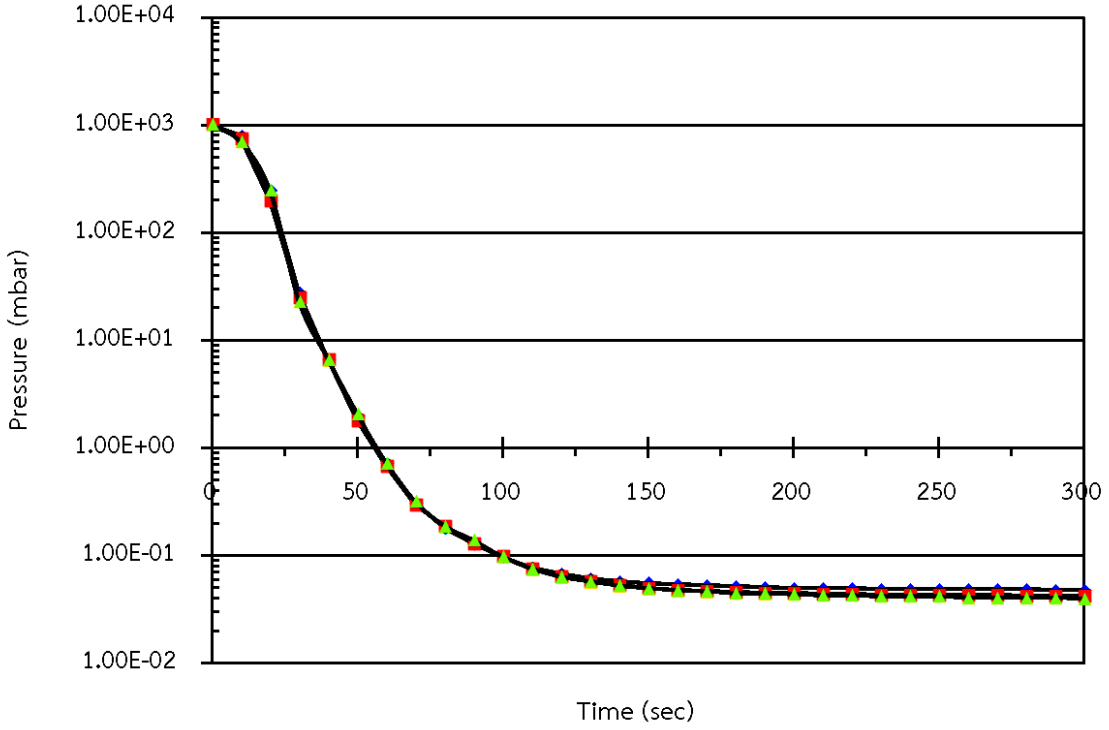
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการสร้างภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบโดยใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้น ซึ่งมีอัตราการสูบประมาณ 200 l/s ใช้ร่วมกับเครื่องสูบกลโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) มีอัตราการสูบประมาณ 8 m^3/hr แบ่งการทดสอบเป็น 2 ตอนคือ การสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี และ การสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน ซึ่งมีผลดังนี้คือ



ภาพที่ 4-22 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

1. ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี การทดสอบเริ่มจากปิดวาล์วทุกตัวจากนั้นเปิดเครื่องสูบกลโรตารี เปิดวาล์วหยาบ (ปิดวาล์ท้าย) เพื่อสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าคงที่

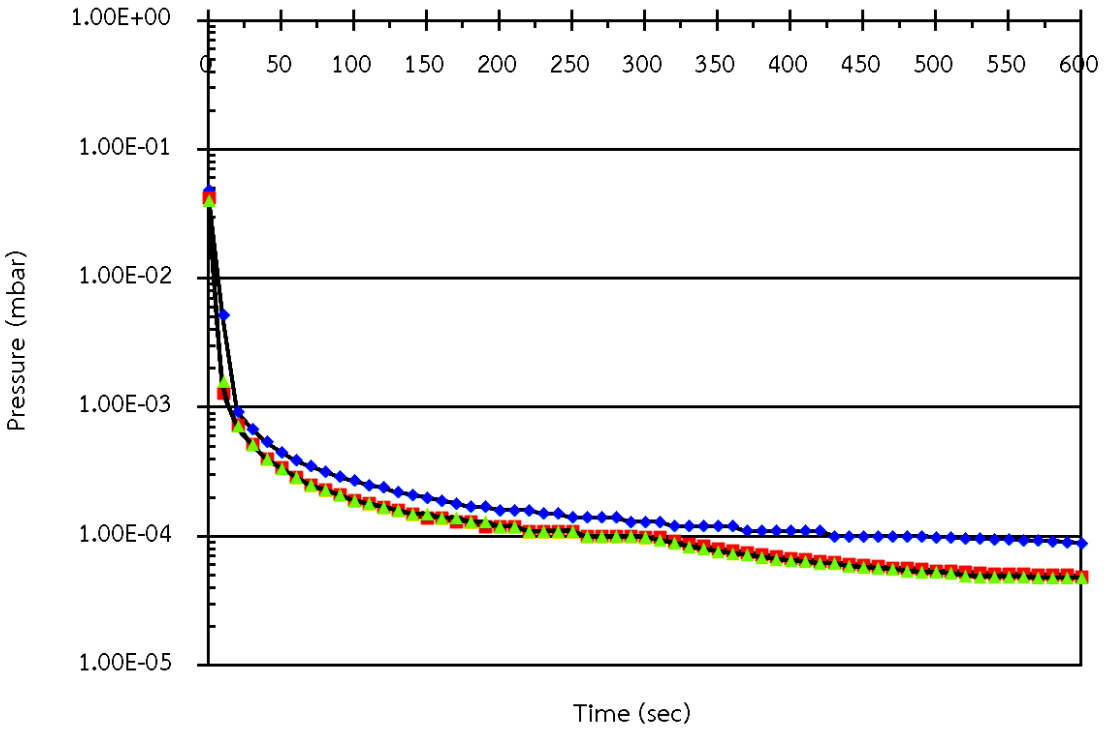
ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี พบว่าเมื่อใช้เครื่องสูบกลโรตารีสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบ ที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจาก $1.2x10^{+3}$ mbar เป็น $7.2x10^{-1}$ mbar ในเวลาประมาณ 1 นาที และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ประมาณ $5.2x10^{-2}$ mbar ในเวลาประมาณ 3 นาที และเมื่อใช้เครื่องสูบกลโรตารีสูบทำงานต่อเนื่องนาน 5 นาที พบว่า ภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบมีความดันต่ำสุดเท่ากับ $4.0x10^{-2}$ mbar ดังแสดงในภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-23 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี

2. ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน เริ่มทดสอบโดยปิดวาล์วทุกตัวจากนั้นเปิดเครื่องสูบกลโรตารี เพื่อสร้างสุญญากาศขั้นต้น (ความดันประมาณ 10^{-2} mbar) เปิดเพลตวาล์ว เพื่อให้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าคงที่

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน พบว่าสามารถลดความดันในภาชนะสุญญากาศจาก 5.0×10^{-2} mbar เป็น 9.9×10^{-5} mbar ในเวลาประมาณ 5 นาที (ตั้งแต่เปิดเพลตวาวล์ว) และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ถึง 4.5×10^{-5} mbar ในเวลาประมาณ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4-24



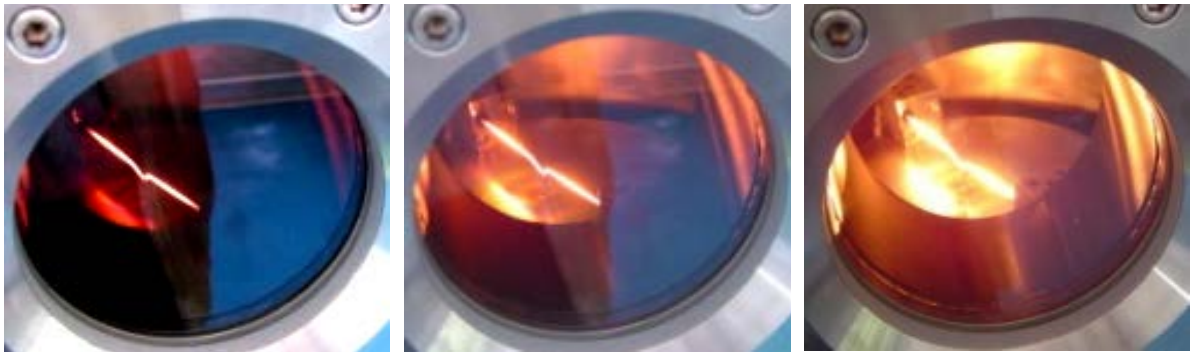
ภาพที่ 4-24 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

4.3 การทดสอบการเคลือบฟิล์มของเครื่องเคลือบ

เมื่อประกอบเครื่องเคลือบตามที่ได้ออกแบบแล้ว นอกจากการทดสอบด้านระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบแล้ว ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นคือ เครื่องเคลือบนี้สามารถเคลือบฟิล์มได้ตามต้องการหรือไม่ การศึกษาส่วนนี้เป็นการทดสอบว่าเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานหรือไม่ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

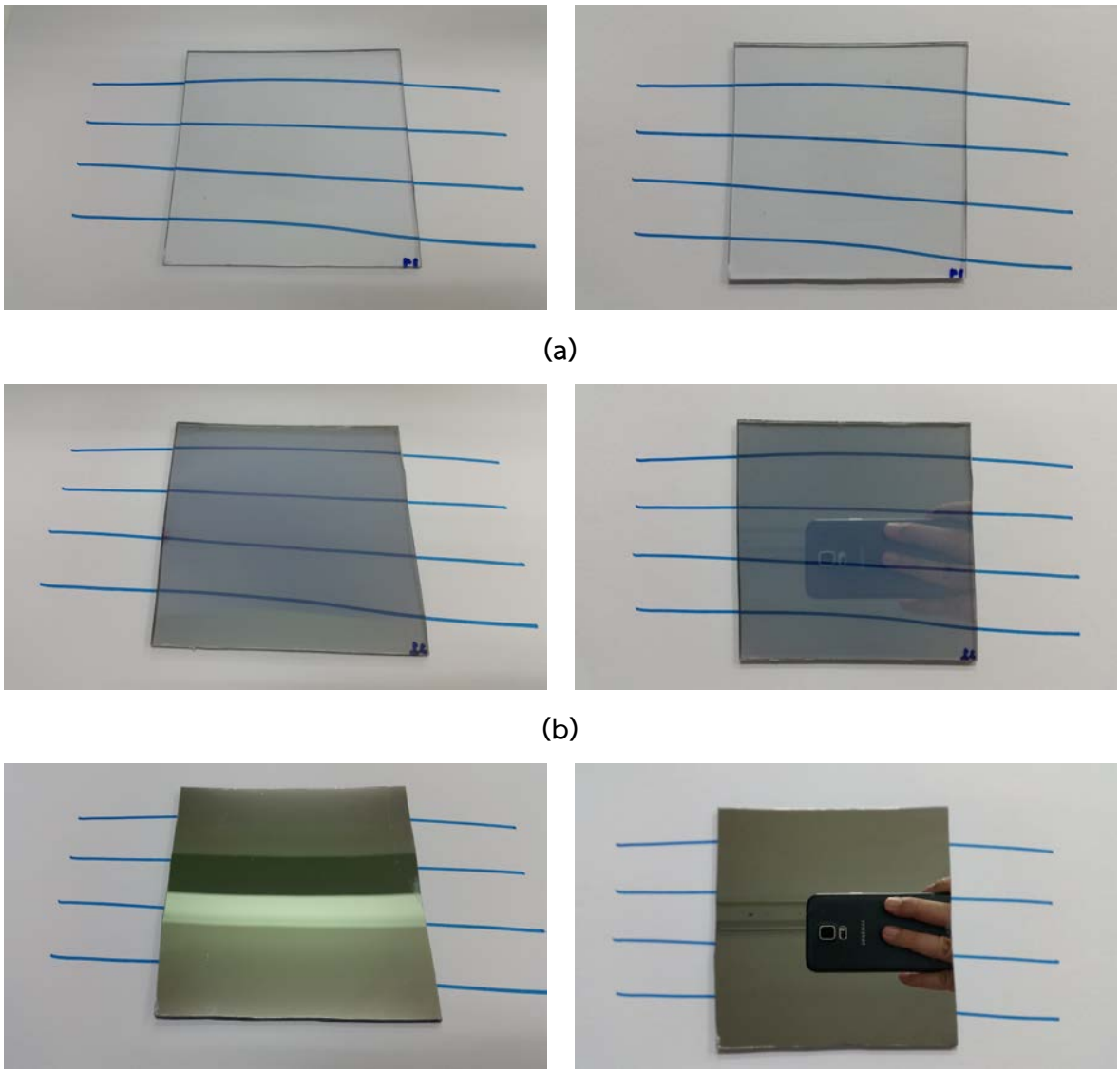
การทดลองเริ่มจาก ติดตั้งสารเคลือบ (อะลูมิเนียม) ที่ลวดต้านทาน ปรับแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากลวดต้านทาน 10 cm นำกระจกวางบนแท่นวางชิ้นงานในห้องเคลือบ จากนั้นสร้างภาวะสุญญากาศให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ 5.0×10^{-5} mbar (กำหนดให้เป็นความดันพื้น) เริ่มเคลือบโดยเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทาน โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 10 Amp ต่อเนื่องกัน สังเกตลวดต้านทานจนเกิดแสงสว่าง ช่วงนี้อะลูมิเนียมหลอมตัว (เรียก ขั้นหลอม) แล้วไหลมารวมเป็นจุดเดียวกัน (เรียก ขั้นไหล) จากนั้นจึงเกิดการระเหย (เรียก ขั้นระเหย) กลายเป็นไอของอะลูมิเนียมไปจับตัวบนกระจก (ภาพที่ 2-25) ขั้นระเหยใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 120 Amp หลังการเคลือบนำฟิล์มที่ได้ออกจากห้องเคลือบสังเกตลักษณะกายภาพและทดสอบการยึดติดโดยการเช็ดถูด้วยมือ

จากผลศึกษาพบว่าขณะเคลือบ เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทานจนร้อนจะให้แสงสว่างสีส้มแดง อะลูมิเนียมจะค่อยๆ หลอมและไหลมารวมกัน (ภาพที่ 2-25) แล้วระเหยเป็นไอไปจับบนกระจกเป็นชั้นฟิล์ม ผลการเคลือบฟิล์ม พบว่าเมื่อใช้เวลาเคลือบนาน 2 นาที ฟิล์มที่ได้สะท้อนแสงสีเทา มีการส่งผ่านแสงดี (ภาพที่ 4-26 (b)) เมื่อใช้เวลาเคลือบนาน 4 นาที ฟิล์มที่ได้มีลักษณะทึบแสงและสะท้อนแสงเป็นสีเงินของสารเคลือบ (ภาพที่ 4-26 (c)) เมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือ พบว่ามีฟิล์มหลุดลอกบางส่วนเนื่องจากพลังงานของอะตอมสารเคลือบจากการระเหยสารไม่มากพอทำให้การยึดติดกับชิ้นงานไม่ดี เมื่อปล่อยฟิล์มที่ได้ในบรรยากาศปกติพบว่าฟิล์มที่ได้คงสภาพเหมือนเดิม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางได้



(a) (b) (c)

ภาพที่ 4-25 ลักษณะของลวดต้านทานขณะเคลือบ
(a) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงหลอม
(b) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงไหล
(c) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงระเหย



ภาพที่ 4-26 ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยด้วยอะลูมิเนียม
(a) ชิ้นงานที่ไม่เคลือบ
(b) ชิ้นงานเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมนาน 2 นาที: สะท้อนแสงเป็นสีเทา ส่งผ่านแสง
(c) ชิ้นงานเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมนาน 4 นาที: สะท้อนแสงเป็นสีเงิน ทึบแสง