รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ

Nano-Thin Film Coater by Vacuum Evaporation Technique

สุรสิงห์ ไชยคุณ

นิรันดร์ วิทิตอนันต์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 84981
สัญญาเลขที่ 48/2556

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ
Nano-Thin Film Coater by Vacuum Evaporation Technique

สุรสิงห์ ไชยคุณ
นิรันดร์ วิทิตอนันต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2558

ชื่อโครงการ: เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ
นักวิจัย: รศ.ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ
ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

เครื่องเคลือบระบบระเหยสารสำหรับฟิล์มบางนาโนถูกสร้างและทดสอบในโครงการวิจัยนี้ เครื่องเคลือบที่สร้างมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนสุญญากาศ (vacuum parts) ประกอบด้วยห้องเคลือบทรงกระบอกทำจากสเตนเลส ความสูงเท่ากับ 285 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 205 mm และ ระบบเครื่องสูบสุญญากาศใช้เครื่องสูบแพร่ไอซึ่งมีเครื่องสูบกลโรตารีเป็นเครื่องสูบท้าย พร้อมวาล์วและมาตรวัดความดัน (2) ส่วนการเคลือบ (coating parts) ประกอบด้วยตัวระเหยสารแบบลวดต้าน ภาคจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ-กระแสสูง และแท่นวางชิ้นงาน และ (3) ส่วนควบคุมการทำงาน (control parts) สำหรับคุมระบบสุญญากาศและการเคลือบ สำหรับผลการทดสอบเครื่องเคลือบใน 2 ด้านคือ (1) ด้านสุญญากาศ พบว่าเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันในห้องเคลือบจากความดันบรรยากาศ (10^{+3} mbar) ลงมาเท่ากับ 4.5×10^{-5} mbar ในเวลา 10 นาที และ (2) ด้านการเคลือบ พบว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเนียบเรียบและสม่ำเสมอดี

คำสำคัญ: เครื่องเคลือบในสุญญากาศ / ระบบระเหยสาร / ฟิล์มบางอะลูมิเนียม / ฟิล์มบางนาโน

Research Title: Nano-Thin Film Coater by Vacuum Evaporation Technique

Researcher: Assoc.Prof.Dr.Surasing Chaikun

Asst.Prof.Dr.Nirun Witit-anun

Department of Physics, Faculty of Sciences, Burapha University

Abstract

In this research project, the coating system for nano scale thin film by evaporation technique were constructed and tested. The coater has mainly 3 parts as (1) the vacuum part which composes of cylindrical stainless steel chamber with 285 mm of height, diameters of 205 mm. The vacuum pumping system consist of the oil diffusion pump back with the rotary pump, valves and pressure gauges, (2) the coating part composes of evapotator with wire resister type, low voltage-high current power supply and substrate holder, and (3) the control part for control vacuum and coating system. The coater system testing showed that (1) the vacuum test, the system can reduce pressure from atmospheric pressure (10^{+3} mbar) to order of $4.5x10^{-5}$ mbar in 10 minute and (2) the deposition test, showed the smooth and good uniform of Al thin film.

Keywords: vacuum coater / evaporation system / aluminium thin film/ nano-thin film

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ” (Nano-Thin Film Coater by Vacuum Evaporation Technique) เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2556 (สัญญาเลขที่: 48/2556 ; รหัสโครงการ: 84981 ; รหัสข้อเสนอการวิจัย: 2556A10802073)

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีโดยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูงได้แก่ มหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บุคลากรและเจ้าหน้าที่ของ งานส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับความช่วยเหลือติดต่อประสานงานตลอดการดำเนินงาน ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำปรึกษาที่มีคุณค่าแก่คณะผู้วิจัยจนเสร็จสิ้นโครงการ ท้ายที่สุดขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัยด้วยดีตลอดมา

คณะนักวิจัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		**i**
ABSTRACT		**ii**
กิตติกรรมประกาศ		**iii**
สารบัญ		**iv**
สารบัญภาพ		**vi**
บทที่ 1 บทนำ		**1**
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		**4**
2.1	การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	4
2.2	สภาวะสุญญากาศกับการเคลือบ	7
2.3	การก่อเกิดฟิล์มบาง	8
2.4	การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร	10
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง		**16**
3.1	การออกแบบสร้างเครื่องเคลือบ	16
3.2	ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	18
3.3	การสร้างภาวะสุญญากาศ	19
3.4	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง	21
3.5	แนวทางการศึกษา	21

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 4	**ผลและอภิปรายผล**	**22**
	4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ	22
	4.2 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	35
	4.3 การทดสอบการเคลือบฟิล์มของเครื่องเคลือบ	38
บทที่ 5	**สรุปผลและข้อเสนอแนะ**	**40**
	5.1 สรุปผล	40
	5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง		**42**
ภาคผนวก		**43**
	ภาคผนวก ประวัตินักวิจัย	44

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	5
2-2	ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร	6
2-3	ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง	6
2-4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย ความหนาแน่นของแก๊ส และเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุ ที่เป็นฟังก์ชั่นของความดันที่ อุณหภูมิ 25 °C	7
2-5	การก่อเกิดฟิล์มบาง	9
2-6	ตัวให้ความร้อนสำหรับการเคลือบแบบระเหยสารชนิดตัวต้านทาน	11
2-7	ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ	15
3-1	ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร	17
3-2	แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	18
3-3	ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	20
4-1	เครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารทั้งระบบที่ออกแบบสร้างในโครงการ	22
4-2	ด้านหน้าของเครื่องเคลือบ	23
4-3	ด้านหลังของเครื่องเคลือบ	23
4-4	ภาชนะสุญญากาศหรือห้องเคลือบของเครื่องเคลือบ	24
4-5	ชุดแผ่นฐานของเครื่องเคลือบฟิล์ม	25
4-6	เครื่องสูบกลโรตารี	27
4-7	เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน	27
4-8	ชุดทำน้ำเย็นสำหรับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน	28
4-9	ลักษณะการติดตั้งเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันและเครื่องสูบกลโรตารีของเครื่องเคลือบ	28
4-10	ระบบมาตรวัดความดันของเครื่องเคลือบ	29
4-11	ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความดันของเครื่องเคลือบ	29
4-12	วาล์วสูงสุญญากาศสูง แบบปีกผีเสื้อ	30
4-14	วาล์วหยาบและวาล์วท้าย แบบ right angle valve	30
4-14	วาล์วปล่อย แบบวาล์วเข็ม	30
4-15	ตำแหน่งการติดตั้งของวาล์วต่างๆ ของเครื่องเคลือบ	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-16	ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานของระบบเคลือบ	32
4-17	ขั้วไฟฟ้าสุญญากาศสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทาน	32
4-18	การติดตั้งชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานภายในห้องเคลือบ	32
4-19	ชุดวางชิ้นงานสำหรับเคลือบ	33
4-20	การติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทานของระบบเคลือบ	33
4-21	ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ	34
4-22	แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	35
4-23	ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี	36
4-24	ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน	37
4-25	ลักษณะของลวดต้านทานขณะเคลือบ	38
4-26	ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยด้วยอะลูมิเนียม	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปรับปรุงวัสดุเพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมตามที่ต้องการนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่กำลังได้รับความสนใจทั้งในด้านการวิจัยและประยุกต์ใช้เชิงอุตสาหกรรมคือ การเคลือบผิววัสดุด้วยฟิล์มบางนาโน เทคนิคนี้จะทำให้เกิดชั้นเคลือบที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางปิดผิวหน้าของวัสดุ โดยชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้พื้นผิวหรือผิวหน้าของวัสดุมีความแข็ง ทนการขัดสี หรือทนการกัดกร่อนของสารเคมีมากขึ้น ปัจจุบันการปรับปรุงผิววัสดุด้วยการเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในหลายวงการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรเพลตติง (electroplating) การเคลือบวิธีนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพราะค่าดำเนินการไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังสามารถเคลือบชิ้นงานจำนวนมากในแต่ละครั้ง แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อจำกัดสำคัญคือ จำเป็นต้องใช้สารละลายเคมีจำนวนมากในกระบวนการเคลือบ ซึ่งหลังการเคลือบมักมีสารละลายเคมีเหลือจำนวนมากที่ยากต่อการกำจัดอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ทำให้มีความพยายามในการพัฒนาเพื่อปรับเปลี่ยนเทคนิคกระบวนการเคลือบใหม่ โดยการเคลือบที่กำลังได้รับความสนใจคือ การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ หรือ การเคลือบด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) การเคลือบวิธีนี้เป็นกระบวนการเคลือบที่ไม่มีการใช้สารเคมีและเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศนั้นทำให้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังให้ชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูงกว่าการเคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรเพลตติงอีกด้วย

การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ หรือ การเคลือบด้วยไอกายภาพ มีหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีข้อดี-ข้อเสียต่างกันไปทั้งนี้วิธีหนึ่งที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ให้ฟิล์มบางหรือชั้นเคลือบที่มีคุณภาพดี อีกทั้งยังไม่ใช้งบประมาณในการดำเนินการสูงมากนั้น ได้แก่ การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ซึ่งปัจจุบันมีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมกระจกและการเคลือบสวยงาม สำหรับแนวคิดของการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารทำได้โดยการให้ความร้อนแก่สารเคลือบ (ในสุญญากาศ) ถ้าความร้อนมากพอสารเคลือบจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายภายในห้องเคลือบ เมื่อไอสารเคลือบกระทบวัสดุรองรับที่อุณหภูมิเหมาะสม จะเกิดการควบแน่นเปลี่ยนเป็นของแข็งเกาะติดอยู่บนวัสดุรองรับ ทั้งนี้การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้คือการให้ความร้อนแก่สารเคลือบจากตัวต้านทาน (Heater)

หากพิจารณาข้อจำกัดของการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารพบว่ามีเพียงบางประเด็นเท่านั้น คือ ปัญหาการยึดติดของฟิล์มเนื่องจากแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัตถุรองรับจะไม่สูงนักทำให้อาจหลุดลอกง่าย แต่ปัญหานี้ก็แก้ไขได้โดยอาศัยการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ อย่างไรก็ดีการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสารก็ยังคงได้รับความสนใจในการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีเคลือบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ที่สำคัญงบประมาณในการดำเนินงานยังไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับการเคลือบในสุญญากาศวิธีอื่น

อย่างไรก็ดีแม้การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมในประเทศ แต่กลับพบว่าการศึกษาวิจัยด้านการเคลือบในสุญญากาศของประเทศไทยมีน้อยมาก โดยการจัดหาเครื่องเคลือบในสุญญากาศทั้งด้านผลิตในภาคอุตสาหกรรมและด้านการศึกษาวิจัยในสถาบันการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการซื้อเครื่องเคลือบทั้งระบบจากต่างประเทศเข้ามาใช้งาน ซึ่งหากเครื่องเคลือบชำรุด เสียหายก็มักแก้ปัญหาไม่ได้ต้องรอช่างจากต่างประเทศ รวมถึงหากต้องการแก้ไข ดัดแปลง ปรับปรุง เครื่องเคลือบ ก็ทำได้ยากเนื่องจากไม่มีผู้รู้หรือเข้าใจการทำงานของเครื่องอย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อรองรับเทคโนโลยีนี้ในอนาคตจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยต้องเร่งพัฒนาและเตรียมความพร้อมในทุกด้าน

รายงานการวิจัยฉบับนี้ เป็นรายงานผลการออกแบบและสร้าง “เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ” (Nano-Thin Film Coater by Vacuum Evaporation Technique) ซึ่งประกอบด้วยผลการศึกษาด้านสุญญากาศและด้านการเคลือบฟิล์มบาง ของเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นโดยเน้นการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นเองจากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก ทำให้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนราคาของเครื่องเคลือบถูกกว่านำเข้าจากต่างประเทศ และง่ายต่อการซ่อมบำรุง ซึ่งนอกจากสามารถใช้ในงานวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในประกอบการเรียนการสอนและการศึกษาวิจัยของนักศึกษาด้านเทคโนโลยีฟิล์มบาง ซึ่งเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาบุคลากรและเทคโนโลยีด้านนี้ในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบด้วยวิธีระเหยสารสำหรับเคลือบฟิล์มบางนาโน
2. เพื่อศึกษาเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยวิธีระเหยสาร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบด้วยวิธีระเหยสารสำหรับเคลือบฟิล์มบางนาโน และ เพื่อศึกษาเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยวิธีระเหยสาร โดยเน้นการสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นเองจากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารที่สามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุที่มีพื้นผิวเรียบขนาด 10x10 cm^2 ได้

2. เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถทำความดันในห้องเคลือบได้อยู่ในช่วงประมาณ 10^{-5} mbar และสามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะได้

3. วัสดุรองรับที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ กระจกสไลด์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

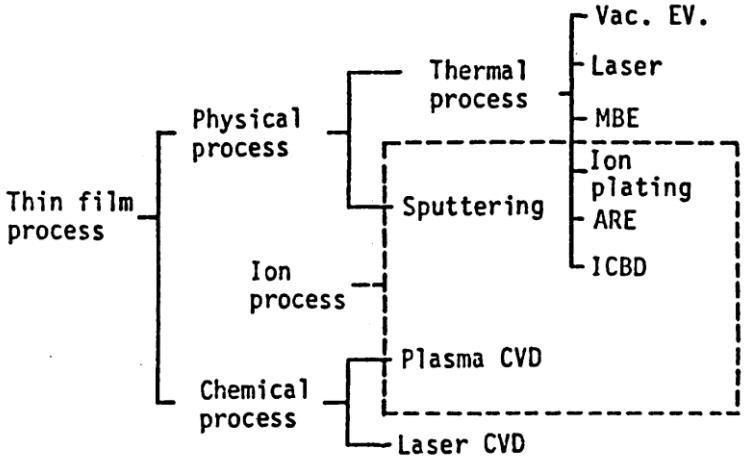
การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Deposition) คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่บางในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin Film) คือ ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ” การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (Surface Properties) เรียกว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกว่า “ฟิล์มหนา” จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็นทั้ง “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ (Bunshah, 1994)

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ



ภาพที่ 2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มได้ (Wasa & Hayakawa, 1992) (ภาพที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

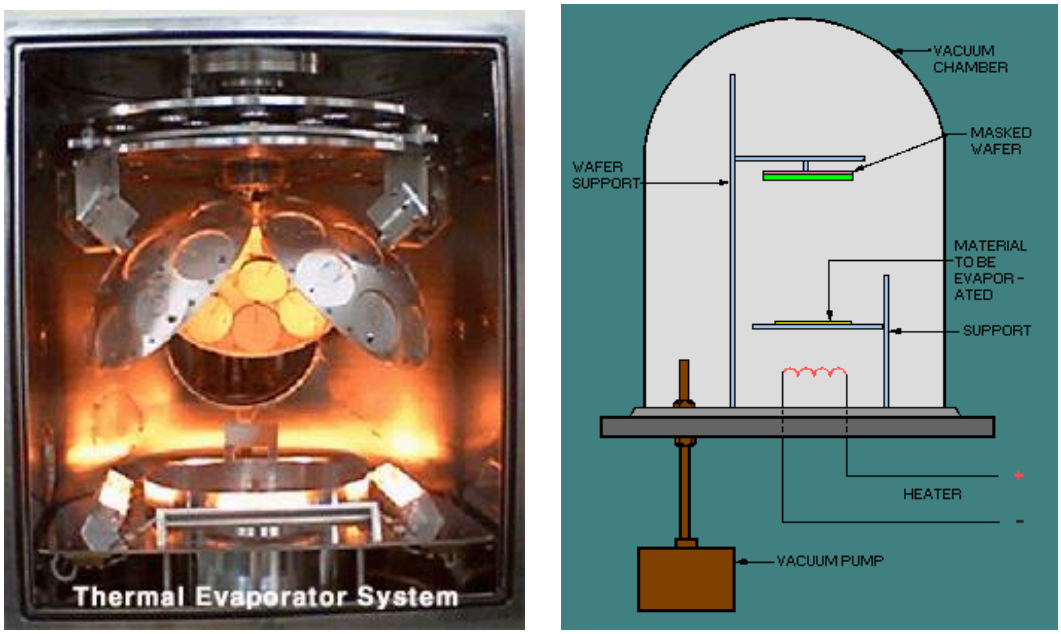
2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น

การเคลือบในสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ๆ (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณและธนัสถา รัตนะ, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992) คือ

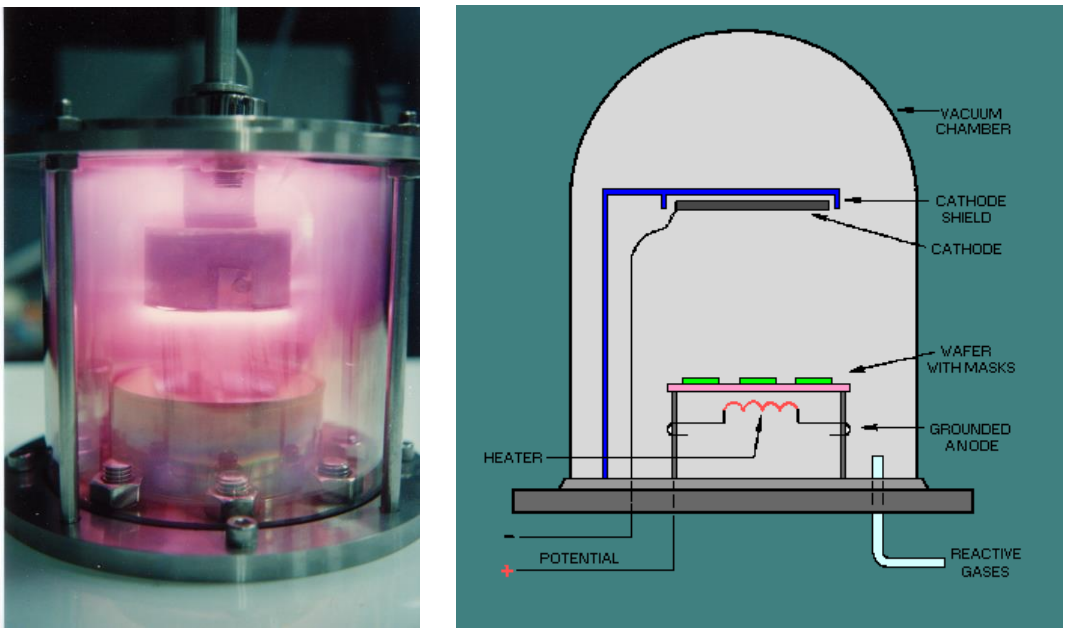
1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยในสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบาง การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (Resistive Heating) การระเหยแบบวาบแสง (Flash Evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser Evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (Arc Evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Heating)

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม

ระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัตถุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัตถุรองรับดีกว่า



ภาพที่ 2-2 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

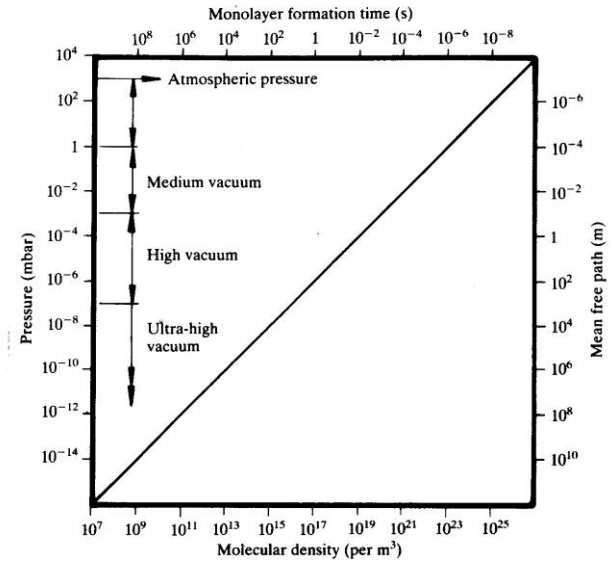


ภาพที่ 2-3 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

2.2 สภาวะสุญญากาศกับการเคลือบ

การเคลือบในสุญญากาศอะตอมของสารเคลือบในกระบวนการเคลือบอาจอยู่ในลักษณะของโมเลกุล อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของสารเคลือบจากวิธีต่างๆ เช่น การให้ความร้อน หรือ การถ่ายเทโมเมนตัม ทั้งนี้หากความดันในห้องเคลือบมีค่าสูง กรณีนี้ห้องเคลือบมีปริมาณอะตอมของแก๊สจำนวนมาก ทำให้เมื่อระเหยสารเคลือบภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปอาจเกิดการชนกับอะตอมของแก๊สที่มีอยู่จำนวนมาก ทั้งนี้จากการชนกันหลายๆ ครั้ง จะทำให้อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปสูญเสียพลังงานไปมาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบพลังงานลดลงก็จะควบแน่นเป็นอนุภาคของแข็ง ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุรองรับได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีลดปริมาณโมเลกุลของแก๊สที่มีอยู่โดยทำให้เป็นสุญญากาศ เนื่องจากในภาวะสุญญากาศปริมาณโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศจะลดลง อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปจึงมีโอกาสชนกับโมเลกุลของแก๊สมีน้อยลง ทำให้อะตอมของสารเคลือบสูญเสียพลังงานน้อยและสามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุต่างๆ ได้

ระยะทางเฉลี่ยของโมเลกุลที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ก่อนที่จะเกิดการชน ณ อุณหภูมิและความดันใดๆ เรียกว่า ระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path ; MFP) ดังภาพที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของ MFP กับ ความดันที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}$C ซึ่งเป็นเวลาก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (monolayer) บนผิววัสดุ เช่น ภาพที่ 2-4 ที่ความดัน 1x10^{-6} mbar โมเลกุลมีค่า MFP เท่ากับ 6.4x10^{3} cm และใช้เวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุประมาณ 1 วินาที จากภาพที่ 2-4 จะเห็นว่าความดันใช้งานที่ต่ำลงหรือมีความเป็นสุญญากาศมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่า MFP ของโมเลกุลแก๊สเพิ่งขึ้น ดังนั้นในงานเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศจึงจำเป็นต้องเคลือบภายในสภาวะความเป็นสุญญากาศมาก



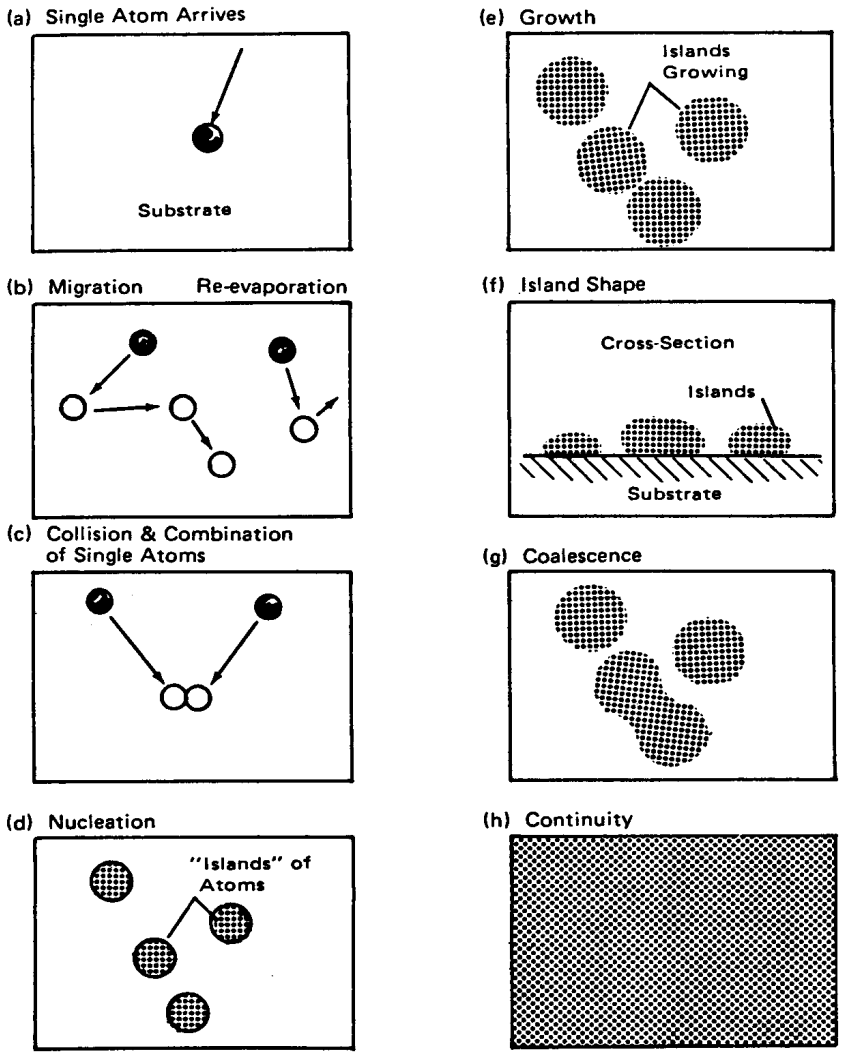
ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย ความหนาแน่นของแก๊ส และเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุ ที่เป็นฟังก์ชั่นของความดันที่ อุณหภูมิ 25 $^{\circ}$C

2.3 การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้ เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (ภาพที่ 2-5 (a)) โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดจับ (Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-5 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-5 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือ สี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-5 (d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-5 (e) และ 2-5 (f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescense) (ภาพที่ 2-5 (g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วย การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-5 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 0.04 - 0.05 μm ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินเขาและหุบเขา

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ ทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนี้การลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลงและได้ฟิล์มที่มีความหนามากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน



ภาพที่ 2-5 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบในสุญญาศทำได้หลายวิธี ซึ่งไม่ยุ่งยาก วิธีหนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีประสิทธิภาพคือการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ทำได้โดยให้ความร้อนกับสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าความร้อนที่ให้กับสารเคลือบมากพอ จะทำให้สารเคลือบนั้นเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อไอของสารเคลือบไปกระทบกับวัสดุรองรับที่อุณหภูมิเหมาะสมก็จะควบแน่นเป็นของแข็งจับเกาะติดอยู่บนวัสดุรองรับ การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) เป็นต้น การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการเคลือบสารไดอิเลคตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ ข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการยึดติดไม่สูงนักจึงต้องอาศัยการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

1. แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร พิจารณาได้ดังนี้ ถ้ามีสารชนิดหนึ่ง (สารเคลือบ) บรรจุอยู่ในภาชนะปิด ซึ่งสูบอากาศออกจนมีความดันต่ำมาก ถ้าเริ่มต้นทำให้สารมีอุณหภูมิต่ำค่าหนึ่ง ซึ่งความดันไอหรือความดันแก๊สต่ำกว่าที่มาตรวัดความดันจะวัดได้ ต่อมาถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิของภาชนะบรรจุสารให้สูงขึ้นและคงไว้ที่ระดับหนึ่งอะตอมของสารดังกล่าวจะเริ่มระเหิด หรือ ระเหย จาก ผิวของสารในภาชนะดังกล่าว ความดันในภาชนะจะเพิ่มขึ้นและสมดุลอยู่ที่ความดันหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารที่อยู่ในภาชนะบรรจุที่อุณหภูมินั้น ที่ความดันนี้อะตอมของแก๊สที่ชนผิวของสารแล้วเกิดการกลั่นตัวบนผิวของสารจะเท่ากับอะตอมที่ระเหยออกจากผิวของสาร ทำให้ความดันไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความดันสมดุลของแก๊ส (equilibrium gas pressure) ที่อุณหภูมิที่กำหนดนี้ ก็คือความดันไอของสาร (vapor pressure) ที่อุณหภูมินั้น

การทำให้สาร (สารเคลือบ) เกิดการระเหยในสุญญากาศ จะมีภาชนะที่ใช้บรรจุสารซึ่งภาชนะนี้จะสามารถให้ความร้อนกับสารจนถึงอุณหภูมิที่สารมีความดันไอเท่ากับความดันในสุญญากาศที่สารนั้นอยู่ เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในสารที่ใช้สำหรับการเคลือบ ภาชนะที่รองรับจะต้องสะอาดและไม่เกิดการระเหยที่อุณหภูมิใช้งาน ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะรองรับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่จะทำการระเหย นอกจากนี้รูปทรงของภาชนะที่ใช้บรรจุสารจะมีลักษณะขึ้นกับสารที่ใช้

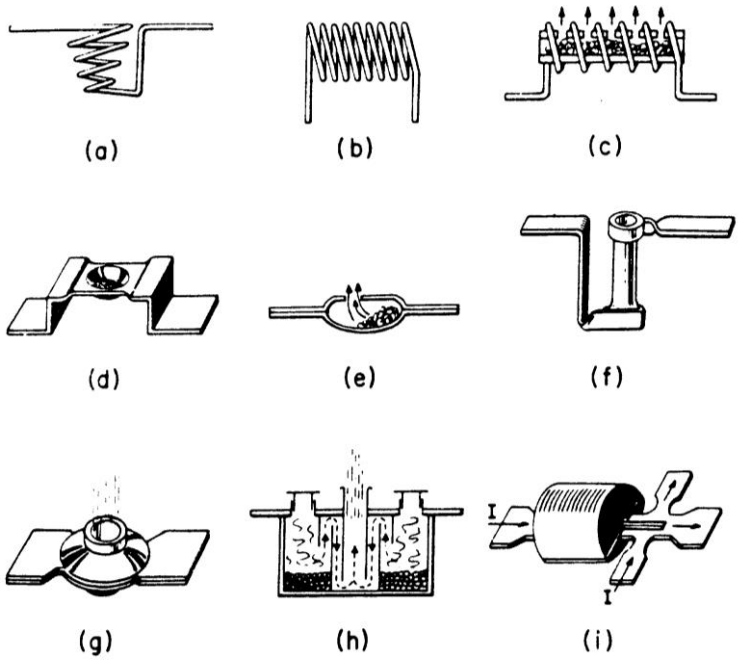
การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารเป็นเทคนิคการเคลือบในสภาวะสุญญากาศเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้งาน เนื่องจากทำได้ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยาก แนวคิดการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนแก่สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ หลุดขึ้นไปเกาะตัวกันเป็นฟิล์มบางบนผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (วัสดุรองรับ ที่เรียกว่า substrate) อย่างไรก็ดีการเคลือบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้กับสารที่มีจุดหลอดเหลวสูงมากๆ เช่น ทังสเตน เป็นต้น

สำหรับวิธีการเคลือบในสุญญากาศโดยการระเหยสารนี้สามารถแบ่งได้ตามชนิดของแหล่งให้พลังงานความร้อนที่เป็นตัวทำให้สารเคลือบเปลี่ยนสภาวะจากของแข็งเป็นไอ ได้แก่

1. การระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (resistance heated sources) ใช้วิธีการจ่ายไฟฟ้ากำลังสูงเข้าไปยังขดลวดหรือแผ่นโลหะที่ใช้เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถ่ายเทไปยังสารเคลือบแล้วทำให้สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ

2. การระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ (induction heated sources) เป็นการนำขดลวดมาพันรอบถ้วยใส่สาร (crucible) แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นภายในเนื้อสารเคลือบ จนสารเคลือบเปลี่ยนสภาวะกลายเป็นไอ

3. การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam heated sources) เป็นการรวมพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจำนวนมากเป็นจุดเล็กๆ ลงไปยังเนื้อสารเคลือบ เพื่อทำให้สารเคลือบเกิดความร้อนและระเหย กลายเป็นไอ สารเคลือบที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีนี้จะถูกบรรจุอยู่ในถ้วยใส่สารซึ่งมักทำจากอลูมินา (alumina) หรือ ทองแดง โดยถ้วยใส่สารดังกล่าวนี้จะต้องมีการหล่อยเย็นอยู่ตลอดเวลาที่ยิงลำอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันไม่ให้ถ้วยถูกหลอมไปด้วย



ภาพที่ 2-6 ตัวให้ความร้อนสำหรับการเคลือบแบบระเหยสารชนิดตัวต้านทาน

2. การระเหยสารในสุญญากาศ

การก่อตัวของชั้นเคลือบของสารที่ได้จากการระเหยในสุญญากาศ ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนคือ การให้ความร้อนกับสารที่มีเป็นของแข็ง ในสภาวะสุญญากาศ ทั้งนี้ถ้าความร้อนที่ให้มากพอก็จะทำให้สารเคลือบนั้นระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งเมื่อไอของสารเคลือบเคลื่อนที่ไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ทั้งนี้สารหลายชนิดสามารถระเหยได้ในสุญญากาศและกลั่นตัวเป็นฟิล์มที่มีสถานะเป็นของแข็ง บนวัสดุรองรับซึ่งมีหลายชนิด ทั้งนี้วัสดุรองรับจะต้องได้รับการควบคุมให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของฟิล์มแต่ละชนิดที่ต้องการ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารเคลือบจากของแข็งให้กลายเป็นไอจะต่ำกว่าเมื่ออยู่ในความดันบรรยากาศปกติ โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในการระเหยสารในสภาวะสุญญากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar ที่ความดันนี้การเคลื่อนตัวของไอสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดไปยังวัสดุรองรับที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะประมาณ 10-50 cm จะอยู่ในแนวเส้นตรง ทั้งนี้การระเหยของสารเคลือบสามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการระเหยของสารมากที่สุดจากผิวที่มีพื้นที่ A_e หาได้จากสมการของ Knudsen

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (2\pi mKT)^{-1/2} P_e \qquad \text{..... (2-1)}$$

เมื่อ dN_e คือ จำนวนโมเลกุลมากที่สุดที่ระเหยออกจากผิวในช่วงเวลา dt

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)

m คือ มวลของโมเลกุล

สำหรับอัตราการระเหยของมวล m_e จากผิวหนึ่งหน่วยในสุญญากาศ จะเป็นไปตามสมการ Langmuir คือ

$$m_e = 5.83 \times 10^{-2} P_e \left(\frac{M}{T}\right)^{1/2} \qquad \text{..... (2-2)}$$

หรือ

$$N_e = 3.513 \times 10^{22} P_e \left(\frac{1}{MT}\right)^{1/2} \qquad \text{..... (2-3)}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นไอ

P_e คือ ความดัน

ในกรณีที่การเกิดฟิล์มของสารเคลือบบนวัสดุรองรับที่เกิดจากการระเหยของสารต้นกำเนิดที่มีขนาดเล็กจนถือว่าเป็นจุด สะอาด และอัตราการระเหยเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อัตราการเกิดฟิล์มบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นราบจะเป็นไปตาม Knudsen's cosine law คือแปรผันตาม $\cos\theta/r2$ เมื่อ r เป็นระยะจากแผ่นรองรับถึงต้นกำเนิดไอ และ θ เป็นมุมที่ r ทำกับแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ ถ้าให้ do เป็นความหนาของการเกิดฟิล์มที่กึ่งกลางแนวตั้งเหลือจุดที่เป็นต้นกำเนิดเป็นระยะทาง h และ d เป็นความหนาของฟิล์มที่ระยะ l จากแนวกึ่งกลาง จะได้ความสัมพันธ์ของ d/do ตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1+\left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \qquad \text{..... (2-4)}$$

ถ้าต้นกำเนิดไอเป็นพื้นที่เล็กๆ การกระจายความหนาจะเป็นตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1+\left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^{2}} \qquad \text{..... (2-5)}$$

ปกติแล้วการเคลือบฟิล์มบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ นอกจากอะตอมของสารเคลือบจะตกเคลือบบนแผ่นรองรับแล้ว ยังมีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นๆ ที่หลงเหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศที่กระทบกับวัสดุรองรับ แก๊สที่เหลืออยู่นี้จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์ม เนื่องจากแก๊สเหล่านี้สามารถชนกับอะตอมของไอสารเคลือบที่ระเหยจากต้นกำเนิดที่อยู่ระหว่างต้นกำเนิดกับวัสดุรองรับ โดยจำนวนครั้งของการชนจะขึ้นอยู่กับระยะปลอดการชนเฉลี่ย หรือ MFP

ทั้งนี้ถ้าให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง l โดยปราศจากการชนกับอะตอมอื่น จะพบว่า

$$N = N_0 \exp\left(\frac{-l}{\lambda}\right) \qquad \text{..... (2-6)}$$

โดยที่ λ เป็นค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ยของแก๊สที่เหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศ ทั้งนี้การชนกันของโมเลกุลแก๊สนี้ จะน้อยลงเมื่อความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าลดลง ซึ่งพบว่าที่ความดันต่ำระดับ 10^{-5} mbar การชนกันจะมีน้อยมากและโมเลกุลของไอสารเคลือบจะมีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

แก๊สที่หลงเหลืออยู่ภายในภาชนะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับมีการปนเปื้อน โมเลกุลของแก๊สที่เหลืออยู่จะชนกับวัสดุรองรับ ขณะที่เกิดการก่อตัวของฟิล์ม อัตราการชนของโมเลกุลแก๊สกับวัสดุรองรับนี้จะเป็นไปตามสมการ

$$N_g = 3.513 \times 10^{22} \frac{P_g}{(M_g T_g)^{1/2}} \qquad \text{..... (2-7)}$$

เมื่อ P_g คือ ความดันสมดุลของแก๊สที่อุณหภูมิ T_g

3. ลักษณะของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

เครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบวิธีระเหยสารโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน ดังนี้

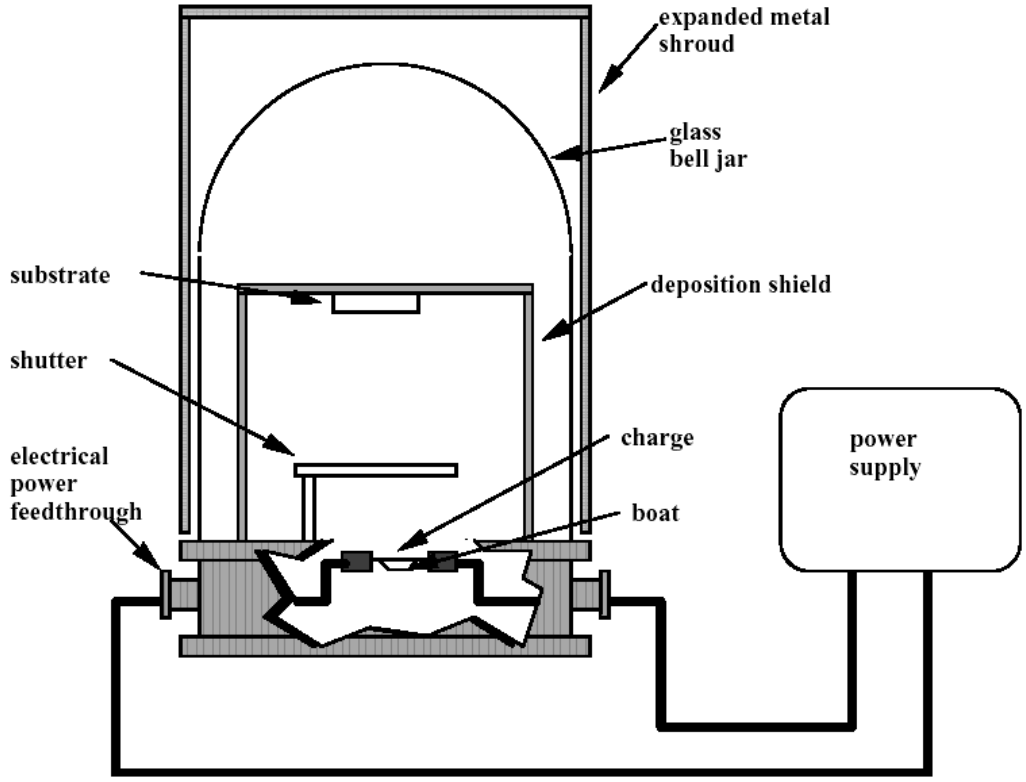
1. ภาชนะสุญญากาศ หรือ ห้องเคลือบสุญญากาศ (vacuum chamber) ทำจากสเตนเลส เนื่องจากมีความทนทาน แข็ง ไม่เป็นสนิม ดูแลรักษาง่าย ที่สำคัญสเตนเลส มีปริมาณแก๊สสะสมในเนื้อน้อย ทำให้ง่ายต่อการสร้างสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากไม่เกิดการคายแก๊ส

2. เครื่องสูบสุญญากาศ (vacuum pump) สำหรับสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศมีหลายแบบสำหรับระบบพื้นฐานที่ต้องการความดันในช่วง 10^{-7}-10^{-5} mbar นั้นจะประกอบด้วยเครื่องสูบอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องสูบกลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันจากบรรยากาศ (ประมาณ 10^{3} mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar จากนั้นจึงใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอ ลดความดนต่อจนถึงความดันที่ต้องการ

3. มาตรวัดความดัน (pressure gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ มาตรวัดความดันจะมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะอาศัยหลักการในการวัดความดันต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วระบบสุญญากาศจะประกอบด้วยมาตรวัดความดัน 2 ชนิด ได้แก่ มาตรวัดความดันต่ำ วัดความดันได้ในช่วงบรรยากาศ (ประมาณ 10^{3} mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar เช่น มาตรวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) อาศัยหลักการพาความร้อนของแก๊ส โดยถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) ก็จะสามารถพาความร้อนได้ดี แต่ถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การพาความร้อนก็จะไม่ดี และ มาตรวัดความดันสูง วัดความดันน้อยกว่า 10^{-2} mbar เช่น มาตรวัดแบบเพนนิง (Penning gauge) อาศัยการนำไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวของแก๊ส ถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) จะเกิดการแตกตัวของแก๊สมากทำให้นำไฟฟ้าได้ดี ในทางกลับกันถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การแตกตัวของแก๊สก็จะน้อยทำให้นำไฟฟ้าไม่ดี

4. อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (heater) เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติตามที่ต้องการ รวมถึงเพื่อเพิ่มแรงยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับ ในการเคลือบบางครั้งจำเป็นต้องใช้ความร้อนร่วมในการเคลือบทำให้ต้องมีชุดให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ซึ่งอาจเป็นแบบแท่งความร้อน หรือ อินฟราเรด

5. แหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยสารเคลือบ ส่วนนี้เป็นการให้ความร้อนแก่สารเคลือบเพื่อให้สารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง กลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายไปทั่วภาชนะสุญญากาศไปกระทบกับวัสดุรองรับซึ่งติดตั้งด้านบน



ภาพที่ 2-7 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบสร้างเครื่องเคลือบ

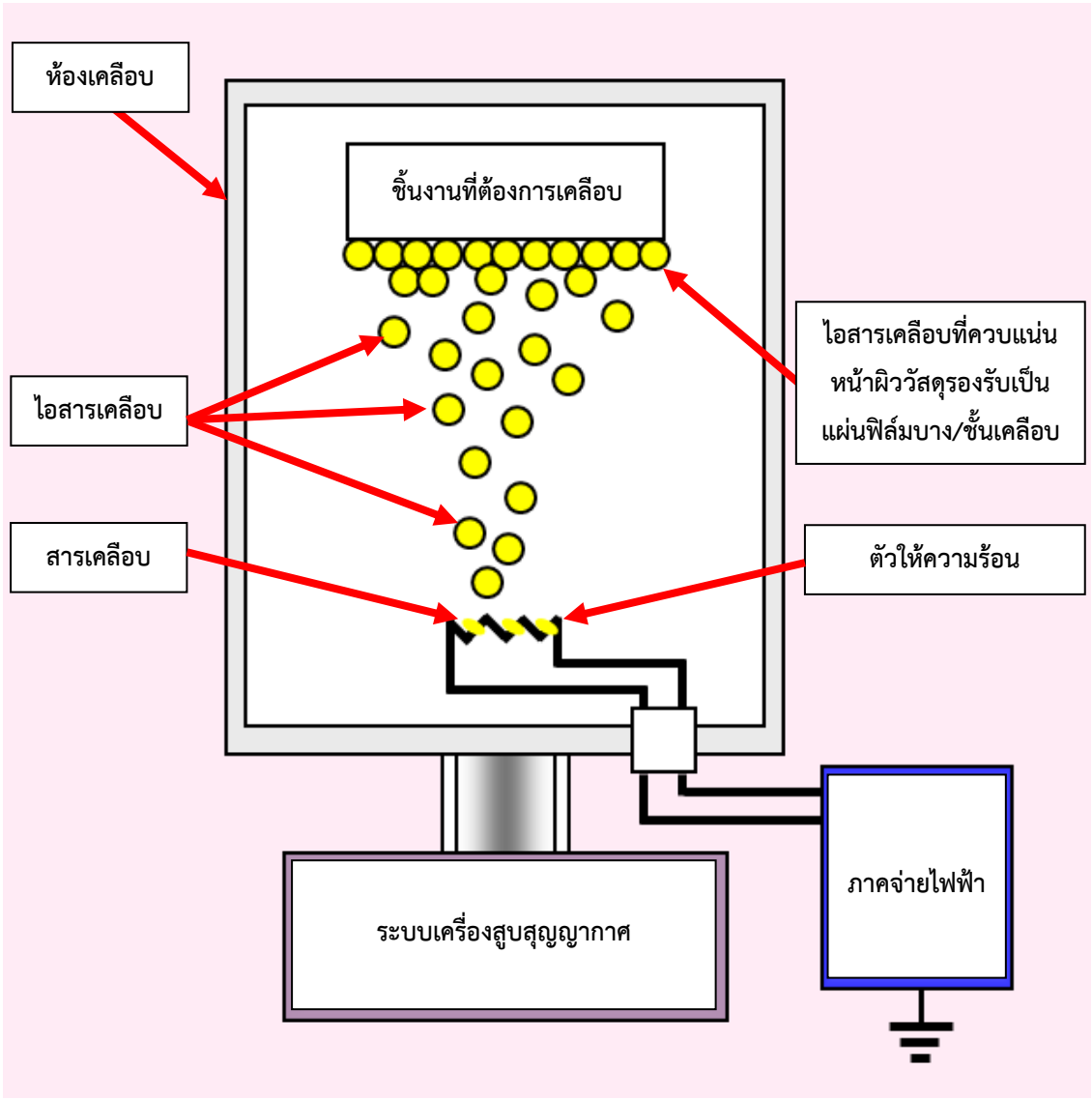
เครื่องเคลือบในสุญญากาศที่จะสร้างขึ้นในโครงการนี้เป็นระบบระเหยสาร ทั้งนี้โดยพื้นฐานแล้วเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสารประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้คือ

1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber) หรือ ห้องเคลือบ เป็นบริเวณที่ว่างสำหรับสร้างสุญญากาศและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ห้องเคลือบอาจมีหลายรูปแบบ ในโครงการนี้กำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอก และมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้ ห้องเคลือบทรงกระบอก ฝาปิดบน แผ่นฐาน ช่องเปิดและหน้าแปลนต่างๆ โดยภาชนะสุญญากาศ คือ ต้องสามารถลดความดันให้อยู่ในระดับ $\leq 10^{-5}$ mbar ได้

2. ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ (Vacuum Pump System) ทำหน้าที่ลดความดันหรือสร้างภาวะสุญญากาศในห้องเคลือบ โดยทั่วไประบบสุญญากาศนี้มีหลายแบบ โดยระบบที่เหมาะสมโครงการนี้ประกอบด้วย เครื่องสูบสุญญากาศ 2 ชนิดคือ (1) เครื่องสูบกลโรตารี สำหรับสร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้น ($\sim 10^{-2}$ mbar) และทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบหนุนหลัง (Backing Pump) ของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน และ (2) เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศสูง ($\sim 10^{-5}$ mbar) รวมถึง มาตรวัดความดัน ท่อ วาวล์และข้อต่อต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3. ระบบเคลือบ (Coating System) ทำหน้าที่ในการสร้างสารเคลือบ แนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร คือการทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอโดยการให้ความร้อนแก่สารเคลือบ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น ความร้อนจากลวดต้านทาน ความร้อนจากการอาร์ค ความร้อนจากเลเซอร์ เป็นต้น สำหรับระบบเคลือบของเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่สร้างในโครงการนี้ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขั้วไฟฟ้า ลวดต้านทานสำหรับให้ความร้อน ที่วางชิ้นงาน

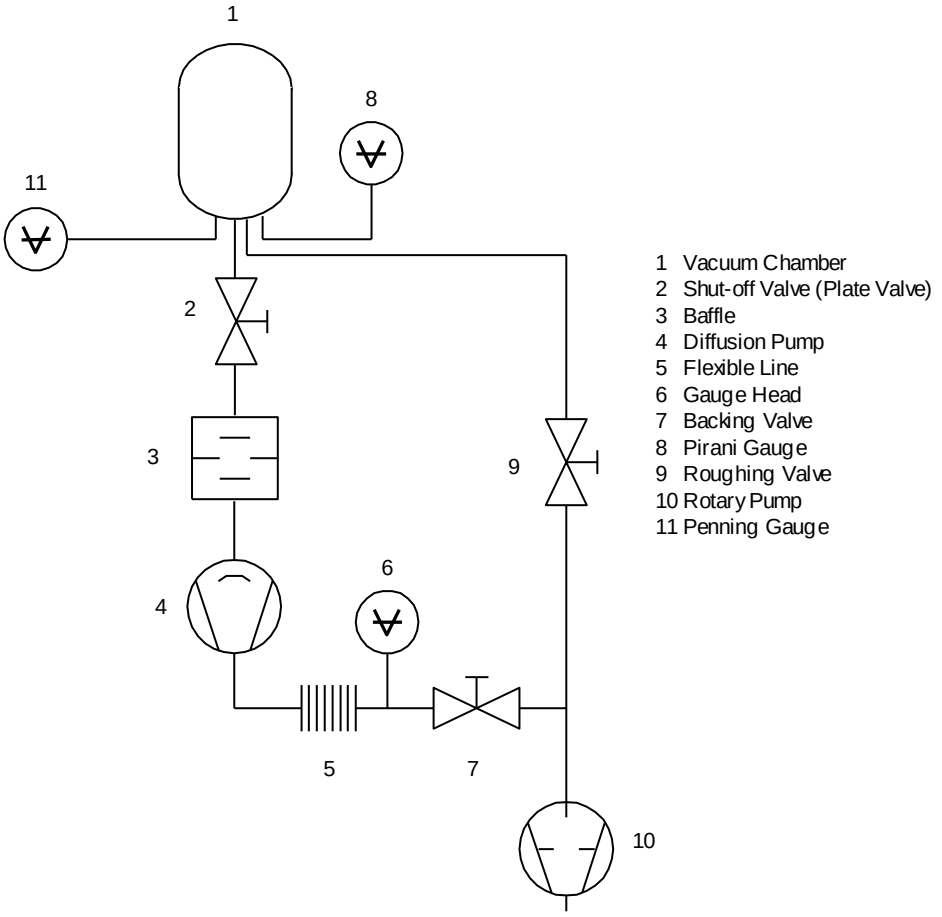
4. ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง (Control System) ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องเคลือบซึ่งประกอบด้วย ชุดควบคุมระบบสุญญากาศ และ ชุดควบคุมระบบเคลือบ



ภาพที่ 3-1 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

3.2 ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในโครงการนี้ ประกอบด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ 2 ชนิด คือ (1) เครื่องสูบกลแบบโรตารี และ (2) เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน โดยต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศตามแผนภาพระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบดังแสดงในภาพที่ 3-2 โดยเครื่องสูบกลโรตารีที่ใช้สามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศลงมามีค่าประมาณ 10^{-2} mbar ซึ่งสามารถอ่านความดันได้จากหัววัดแบบพิรานี ส่วนเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันสามารถลดความดันได้ 10^{-3} - 10^{-5} mbar และอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบเพนนิง



ภาพที่ 3-2 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

3.3 การสร้างภาวะสุญญากาศ

เครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร ในโครงการนี้ต้องลดความดันในห้องเคลือบให้อยู่ในภาวะสุญญากาศสูง (High Vacuum) ความดันประมาณ 10^{-5} mbar เพื่อลดการปนเปื้อนของฟิล์มที่เคลือบได้จากแก๊สคงค้าง (Residual Gas) ในห้องเคลือบ การสร้างภาวะสุญญากาศของเครื่องเคลือบในโครงการนี้ใช้ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion Pump; DP) หนุนหลังด้วยเครื่องสูบกลโรตารี (Rotary Pump; RP) ภาพที่ 3-3 แสดงรายละเอียดของระบบสุญญากาศซึ่งมีลำดับขั้นตอนการสร้างสุญญากาศดังนี้

1. ตรวจเช็ควาล์วหยาบ (หมายเลข 9) วาล์วท้าย (หมายเลข 11) และวาล์วสุญญากาศสูง (หมายเลข 10) ให้อยู่ในสภาพปิดทั้งหมด

2. เปิดสวิทช์หลัก เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบต่าง ๆ ของเครื่อง เช่น ระบบวัดความดันและระบบควบคุมการทำงานของระบบเครื่องสูบสุญญากาศ เป็นต้น หลังจากนั้นเปิดสวิทช์ Rotary เพื่อให้เครื่องสูบกลโรตารี (RP) (หมายเลข 7) ทำงาน

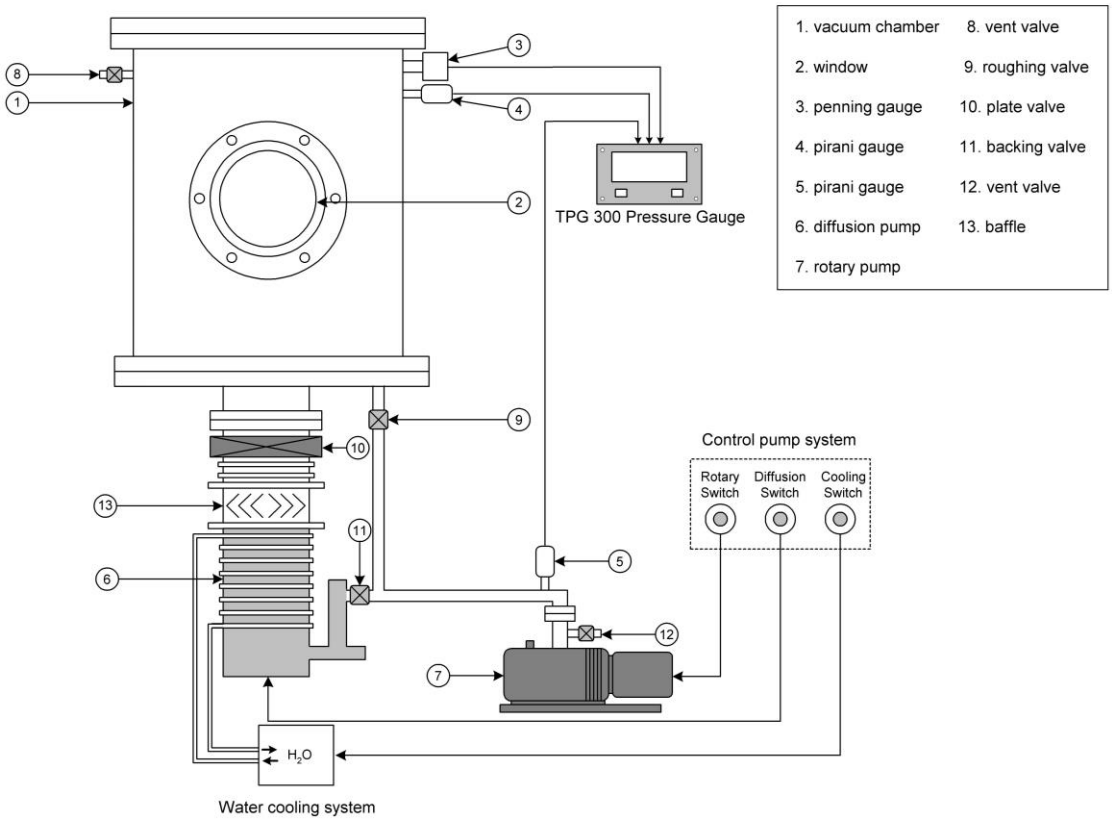
3. สูบอากาศออกจากเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน (DP) ด้วยเครื่องสูบกลโรตารี (RP) โดยเปิดวาล์วท้าย (BV) เพื่อให้เครื่องสูบกลโรตารีสูบอากาศออกจากเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำ (หมายเลข 6) จนความดันในเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน เมื่ออ่านจากพิรานีเกจ (หมายเลข 4) มีค่าน้อยกว่า 10^{-2} mbar ซึ่งเป็นความดันที่เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน สามารถทำงานได้ พร้อมทั้งเปิดสวิทช์ Diffusion เพื่อให้ตัวทำความร้อนของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันทำงานเป็นการเริ่มต้มน้ำมัน ใช้ประมาณ 20 นาที

4. ระหว่างการต้มน้ำมันนำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบวางในห้องเคลือบ โดยต้องเช็คความดันในห้องเคลือบว่าอยู่ในภาวะเป็นสุญญากาศหรือไม่ ถ้าเป็นสุญญากาศให้เปิดวาล์วปล่อย (VV) เพื่อให้อากาศเข้าสู่ห้องเคลือบ จนความดันในห้องเคลือบเท่ากับความดันบรรยากาศ หลังจากนั้นทำการเปิดห้องเคลือบแล้วนำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบไปติดตั้งที่ชุดจับชิ้นงาน จากนั้นปิดห้องเคลือบและปิดวาล์วปล่อย (VV)

5. สร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้นในห้องเคลือบด้วยเครื่องสูบกลโรตารี โดยการปิดวาล์วท้าย (BV) แล้วเปิดวาล์วหยาบ (RV) เพื่อให้เครื่องสูบกลโรตารีสูบอากาศออกจากห้องเคลือบ จนความดันมีค่าประมาณ 10^{-2} mbar

6. เมื่อต้มน้ำมันครบ 20 นาที จึงสร้างภาวะสุญญากาศสูงด้วยเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน โดยเริ่มจากปิดวาล์วหยาบ (RV) แล้วเปิดวาล์วท้าย (BV) จากนั้นเปิดวาล์วสุญญากาศสูง (HV) เพื่อให้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันสูบอากาศออกจากห้องเคลือบเพื่อลดความดันในห้องเคลือบให้อยู่ในระดับภาวะสุญญากาศสูง ความดันประมาณ 10^{-5} mbar

7. จับเวลาและรอจนความดันในห้องเคลือบ มีค่าประมาณ 5×10^{-5} mbar ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความดันพื้น (P_b) ก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต่อไป



ภาพที่ 3-3 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)
2. หน้าต่าง (Window)
3. มาตรวัดความดันแบบเพนนิ่ง (Penning Gauge)
4. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani Gauge)
5. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani Gauge)
6. เครื่องสูบแบบแพร่ไอ (Diffusion Pump; DP)
7. เครื่องสูบกลโรตารี (Rotary Pump; RP)
8. วาล์วปล่อย (Vent Valve; VV)
9. วาล์วหยาบ (Roughing Valve; RV)
10. วาล์วสุญญากาศสูง (High Vacuum Valve; HV)
11. วาล์วท้าย (Backing Valve; BV)
12. วาล์วปล่อย (Vent Valve; VV)
13. แบฟเฟิล (Baffle)

3.4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร มีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมชิ้นงานและสารเคลือบ : เริ่มจากนำวัสดุรองรับ (substrate) ที่ต้องการเคลือบเข้าห้องเคลือบ โดยวางบนแท่นวางชิ้นงานซึ่งปรับระยะห่างของวัสดุรองรับให้ห่างจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบ (d_{s-t}) ตามต้องการ นำสารเคลือบติดกับลวดต้านทาน จากนั้นติดลวดต้านทานเข้ากับขั้วไฟฟ้า แล้วปิดห้องเคลือบ

2. การสร้างสุญญากาศ : ขั้นนี้เป็นการสร้างสุญญากาศในห้องเคลือบ เริ่มจากใช้เครื่องสูบกลโรตารีลดความดันในห้องเคลือบจนมีค่าประมาณ 10^{-2} mbar จากนั้นใช้เครื่องสูบแบบแพรไอน้ำมันลดความดันในห้องเคลือบจนมีค่าประมาณ $5x10^{-5}$ mbar กำหนดให้เป็นค่าความดันพื้น (P_b)

3. การเคลือบฟิล์มบาง : ขั้นนี้เป็นการเคลือบฟิล์ม เมื่อลดความดันภายในห้องเคลือบจนมีค่าเท่ากับความดันพื้นตามต้องการแล้ว ให้จ่ายไฟฟ้าแก่ลวดต้านทาน (Heater) เพื่อให้ลวดต้านทานเกิดความร้อนแล้วส่งผ่านไปยังสารเคลือบซึ่งติดอยู่กับลวดต้านทานจน สารเคลือบร้อน (ช่วงนี้ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 50-70 A นาน 2-3 นาที : ขึ้นกับชนิดของสารเคลือบ กรณีนี้เป็นอะลูมิเนียม) จากนั้นเป็นช่วงสารเคลือบหลอม/ไหล (ในช่วงนี้ให้เพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 90-100 A : ขึ้นกับชนิดของสารเคลือบ กรณีนี้เป็นอะลูมิเนียม) เมื่อสารเคลือบร้อนจนหลอมไหลมารวมกัน ต่อมาเป็นช่วงที่สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอฟุ้งกระจายไปทั่วทั้งห้องเคลือบซึ่งส่วนหนึ่งกระจายไปติดที่ผิวหน้าของชิ้นงานและควบแน่นเป็นชั้นเคลือบ/ฟิล์มบางเกาะติดที่ผิวของชิ้นงาน (ในช่วงนี้ให้คงค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 100-120 A : ขึ้นกับชนิดของสารเคลือบ กรณีนี้เป็นอะลูมิเนียม) เมื่อครบกำหนดเวลาให้ปิดภาคจ่ายไฟฟ้า แล้วปล่อยอากาศเข้าห้องเคลือบผ่านวาล์วปล่อย เพื่อนำชิ้นงานออกจากห้องเคลือบ ในขั้นนี้อาจมีการอบชิ้นงานหลังการเคลือบเพื่อให้ฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกหรือมีการยึดติดดีขึ้น

4. การวิเคราะห์ฟิล์มบางเบื้องต้น : ขั้นนี้เป็นการตรวจเช็คสภาพของฟิล์มด้วยสายตา เพื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ เช่น สี การกระจายตัวของสารเคลือบ ฯลฯ ก่อนส่งไปวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะเฉพาะด้านอื่นๆ ต่อไป

3.5 แนวทางการศึกษา

แนวทางการศึกษาในโครงการนี้แบ่งเป็น 2 ตอนดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เพื่อสร้างส่วนต่างๆ ของเครื่องเคลือบตามแบบที่กำหนดไว้ โดยเน้นการสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นเองจากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก

2. การทดสอบเครื่องเคลือบ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเคลือบใน 2 ด้านหลักคือ (1) ด้านสุญญากาศ ห้องเคลือบของเครื่องเคลือบต้องสามารถลดความดันให้อยู่ในระดับ $\leq 10^{-5}$ mbar ได้ และ (2) ด้านการเคลือบ เครื่องเคลือบต้องสามารถเคลือบฟิล์มโลหะบนกระจกสไลด์ได้

บทที่ 4

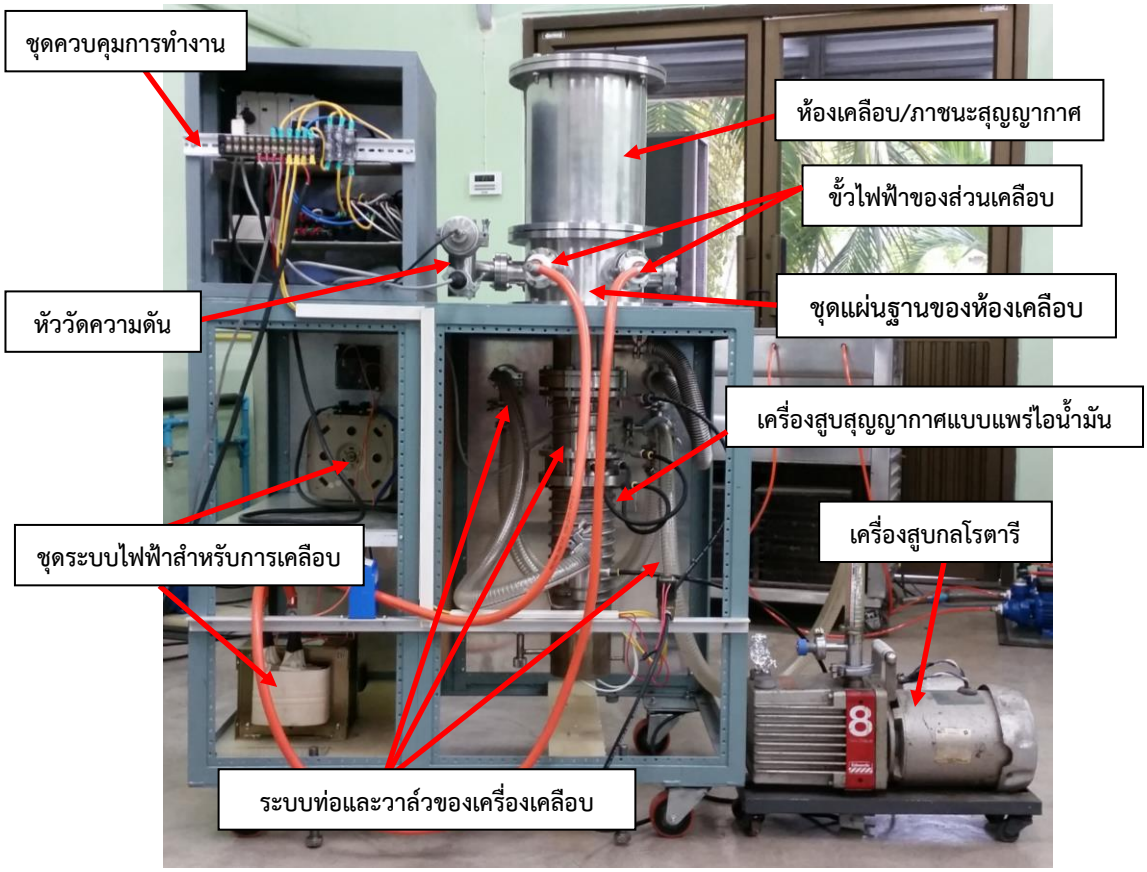
ผลและอภิปรายผล

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

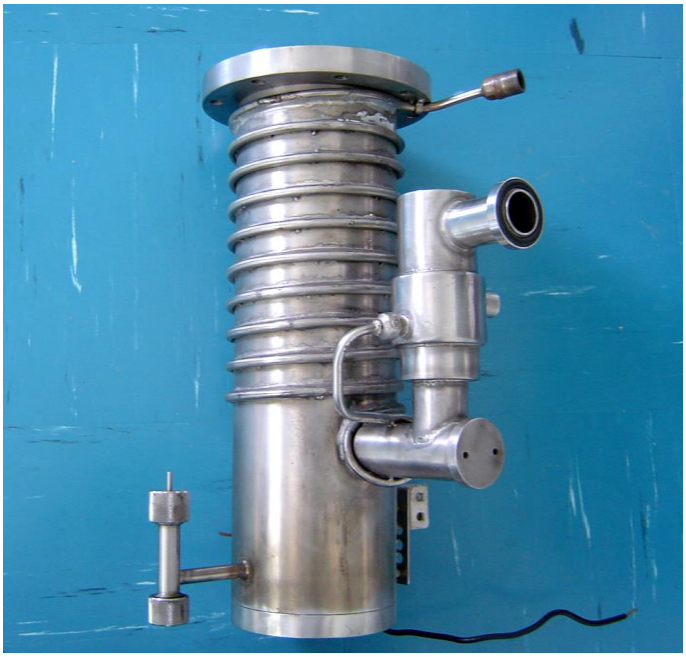
2.2 เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน ทำหน้าที่สร้างภาวะสุญญากาศสูง (ความดันระดับ10^{-5} mbar) ซึ่งเป็นการลดความดันต่อจากภาวะสุญญากาศขั้นต้น เครื่องสูบนี้เป็นชุดที่สร้างขึ้นในโครงการ มีอัตราสูบประมาณ 200 l/sec ช่วงความดันทำงานมีค่าประมาณ 10^{-2}-10^{-6} mbar ใช้ไฟฟ้าขนาด 220 V/50 Hz 700 W โดยใช้น้ำมัน Silicone 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)



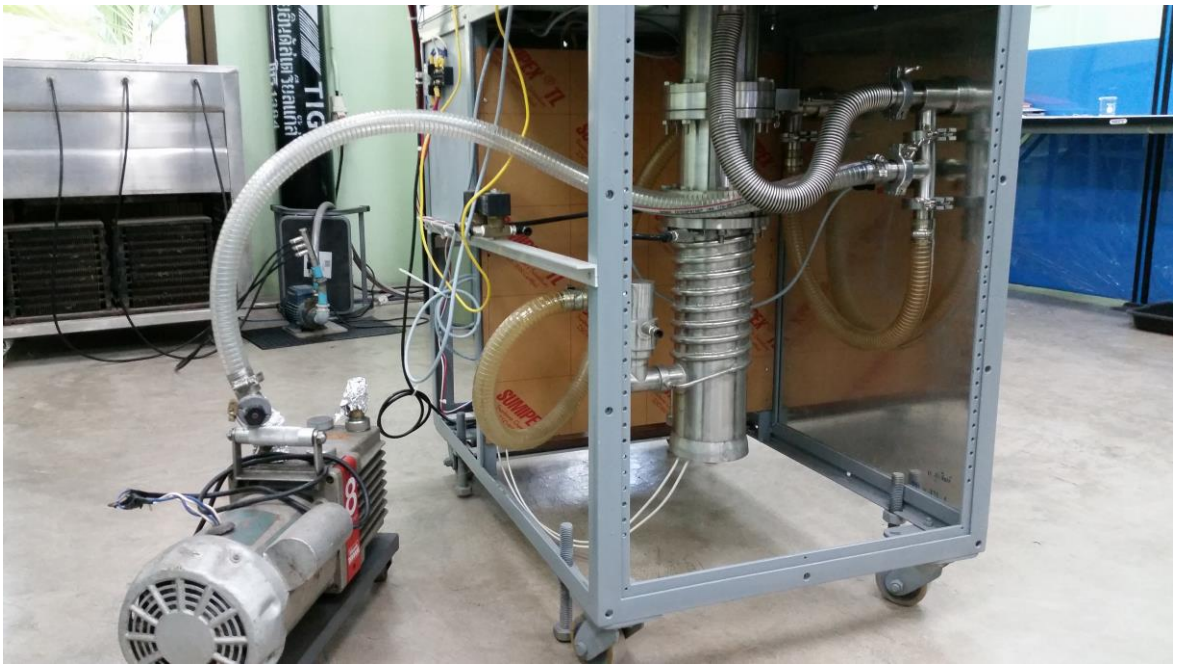
(b)

ภาพที่ 4-7 เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

(a) ชุดฉีดไอน้ำมันภายในเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

(b) ตัวถังของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

ภาพที่ 4-8 ชุดทำน้ำเย็นสำหรับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน



ภาพที่ 4-9 ลักษณะการติดตั้งเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันและเครื่องสูบกลโรตารีของเครื่องเคลือบ

(a)

(b)

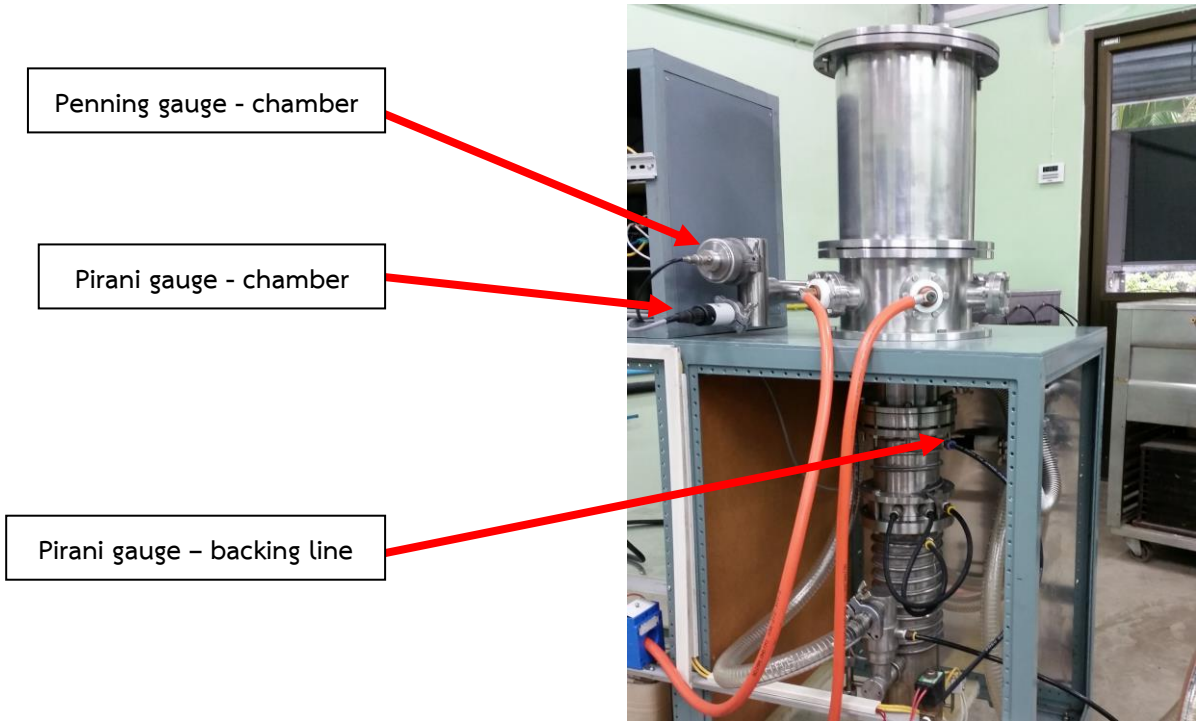
(c)

ภาพที่ 4-10 ระบบมาตรวัดความดันของเครื่องเคลือบ

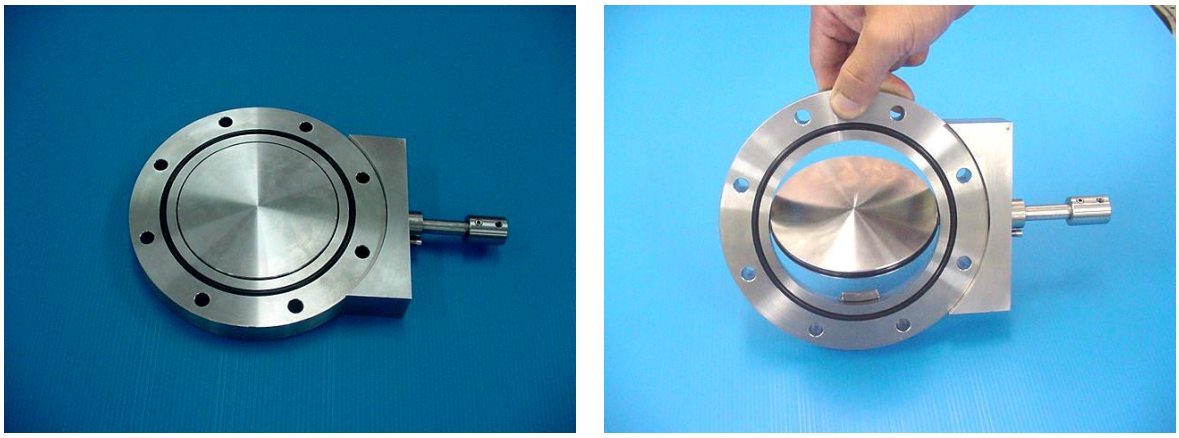
(a) หัววัดแบบเพนนิงและแบบพิรานี สำหรับวัดความดันภายในห้องเคลือบ

(b) หัววัดแบบพิรานี สำหรับวัดความดันท้าย

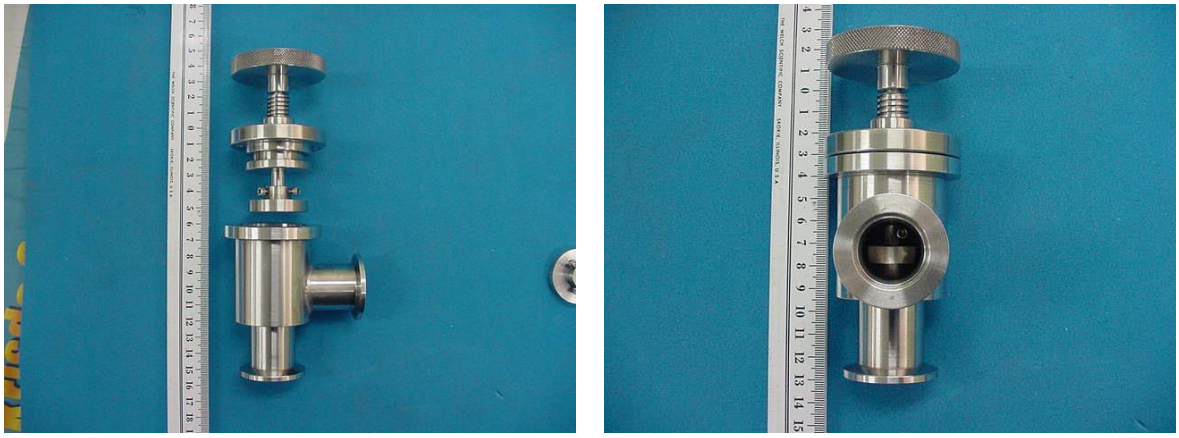
(c) ชุดแสดงผลการวัดความดัน



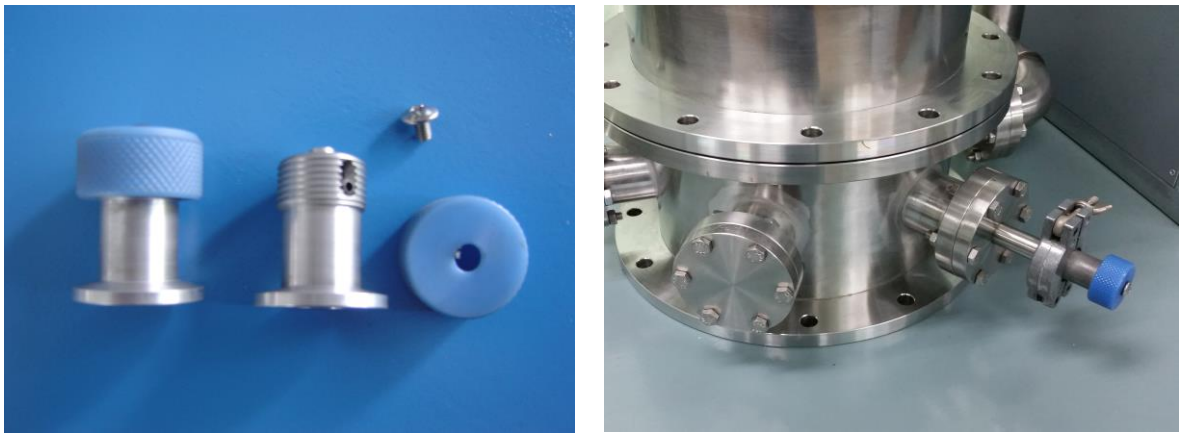
ภาพที่ 4-11 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดความดันของเครื่องเคลือบ



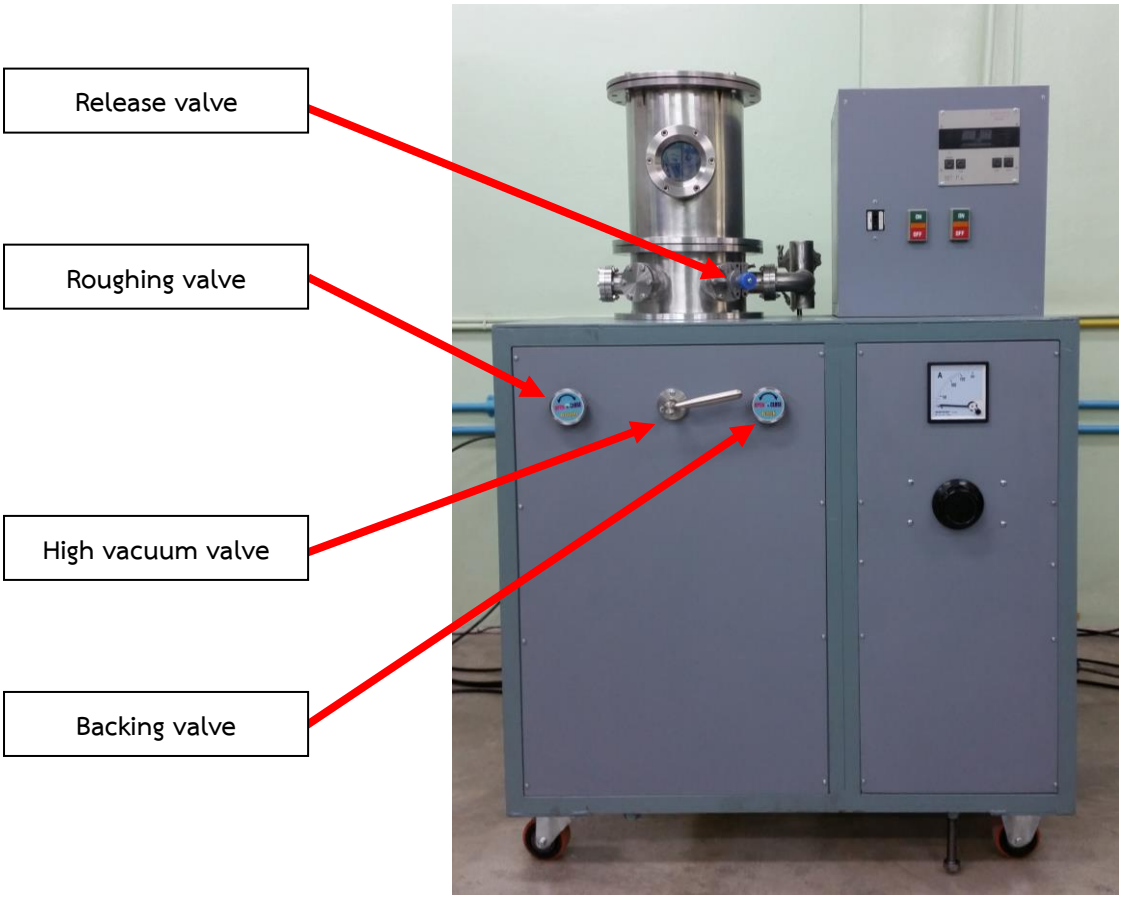
ภาพที่ 4-12 วาล์วสูงสุญญากาศสูง แบบปีกผีเสื้อ



ภาพที่ 4-13 วาล์วหยาบและวาล์วท้าย แบบ right angle valve

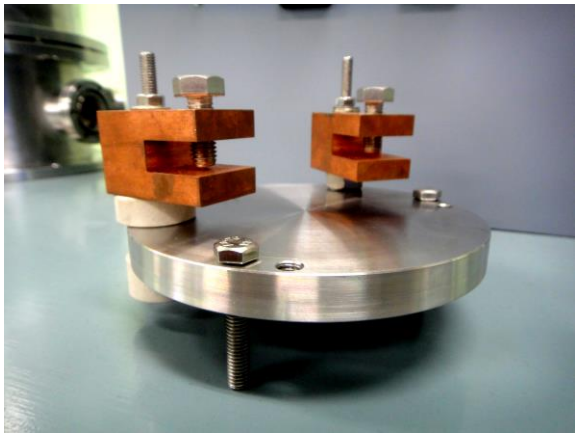
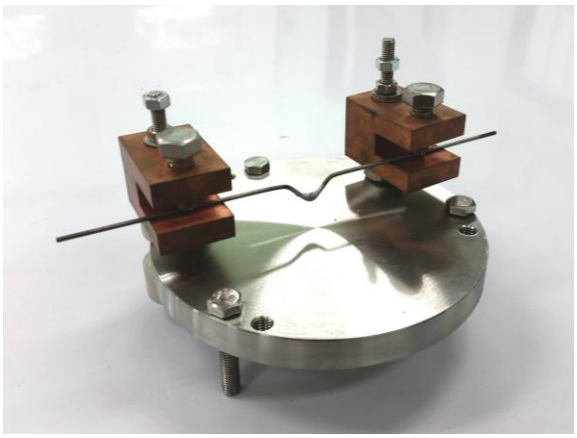


ภาพที่ 4-14 วาล์วปล่อย แบบวาล์วเข็ม



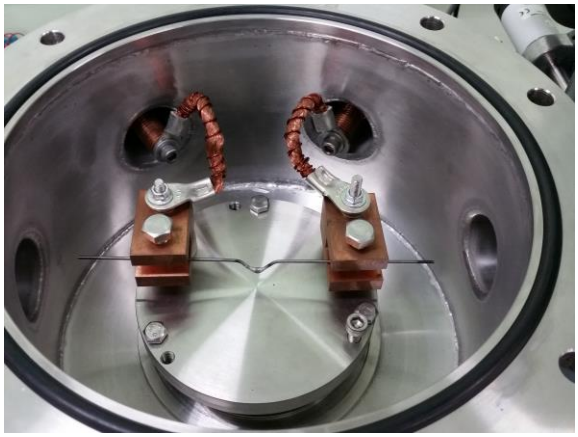
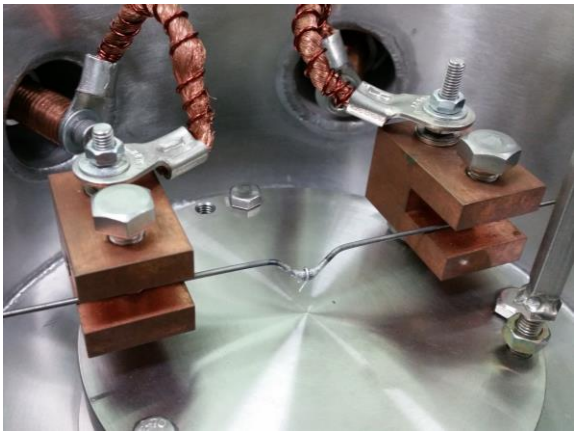
ภาพที่ 4-15 ตำแหน่งการติดตั้งของวาล์วต่างๆ ของเครื่องเคลือบ

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

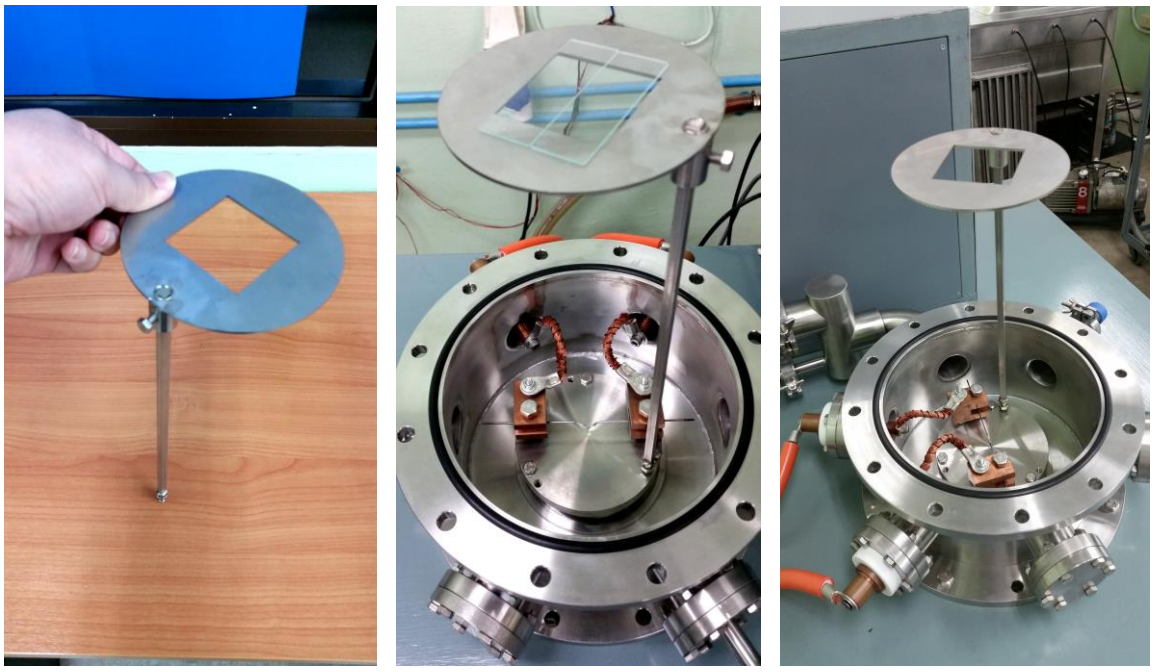



ภาพที่ 4-16 ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานของระบบเคลือบ

ภาพที่ 4-17 ขั้วไฟฟ้าสุญญากาศสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้ชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทาน

ภาพที่ 4-18 การติดตั้งชุดให้ความร้อนแบบลวดต้านทานภายในห้องเคลือบ

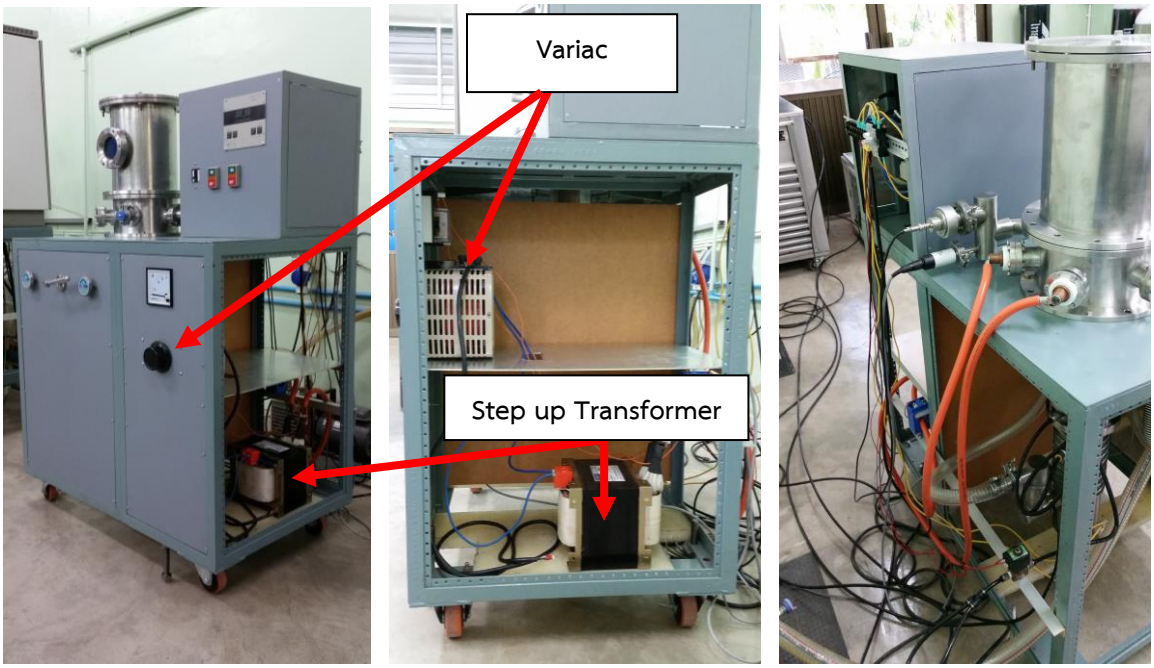


(a) (b)

ภาพที่ 4-19 ชุดวางชิ้นงานสำหรับเคลือบ

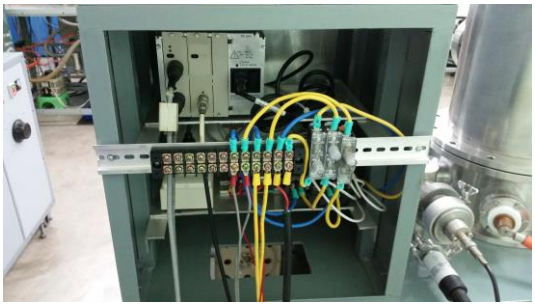
(a) ลักษณะของแท่นวางชิ้นงานที่ปรับระยะได้

(b) การติดตั้งชุดวางชิ้นงานในห้องเคลือบ



ภาพที่ 4-20 การติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทานของระบบเคลือบ

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



(a)

(b)

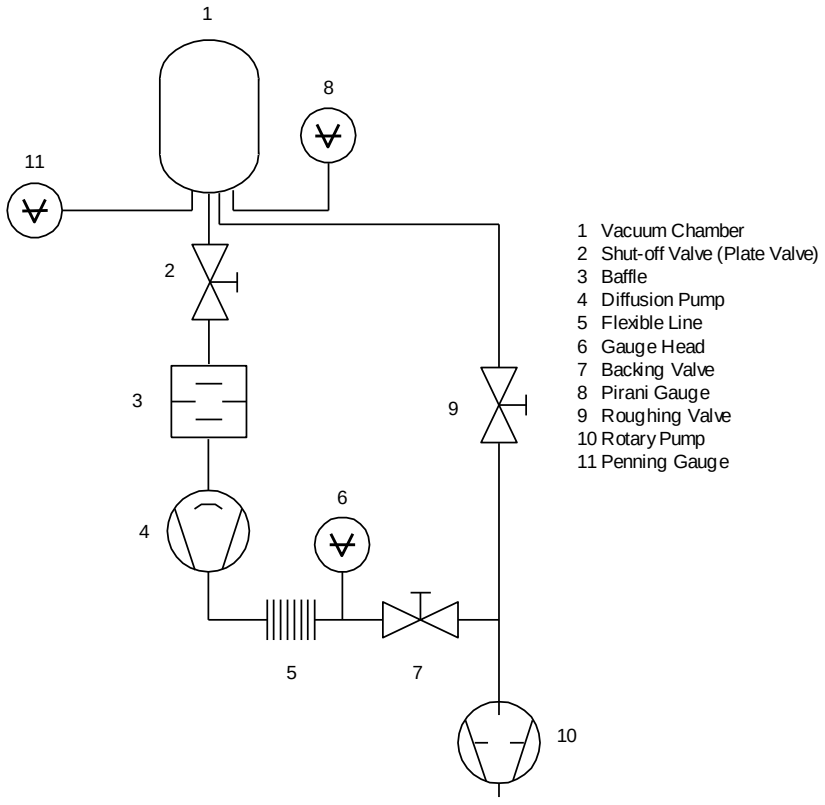
(c)

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

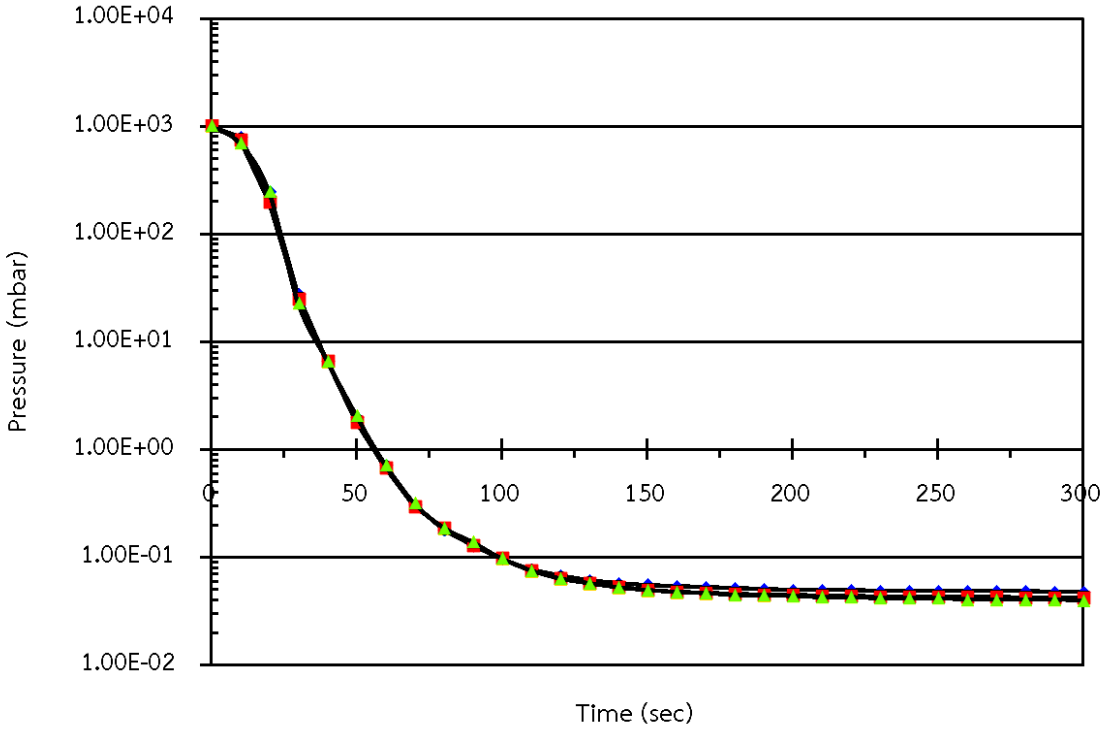
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการสร้างภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบโดยใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันที่สร้างขึ้น ซึ่งมีอัตราการสูบประมาณ 200 l/s ใช้ร่วมกับเครื่องสูบกลโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) มีอัตราการสูบประมาณ 8 m^3/hr แบ่งการทดสอบเป็น 2 ตอนคือ การสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี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



ภาพที่ 4-22 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

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

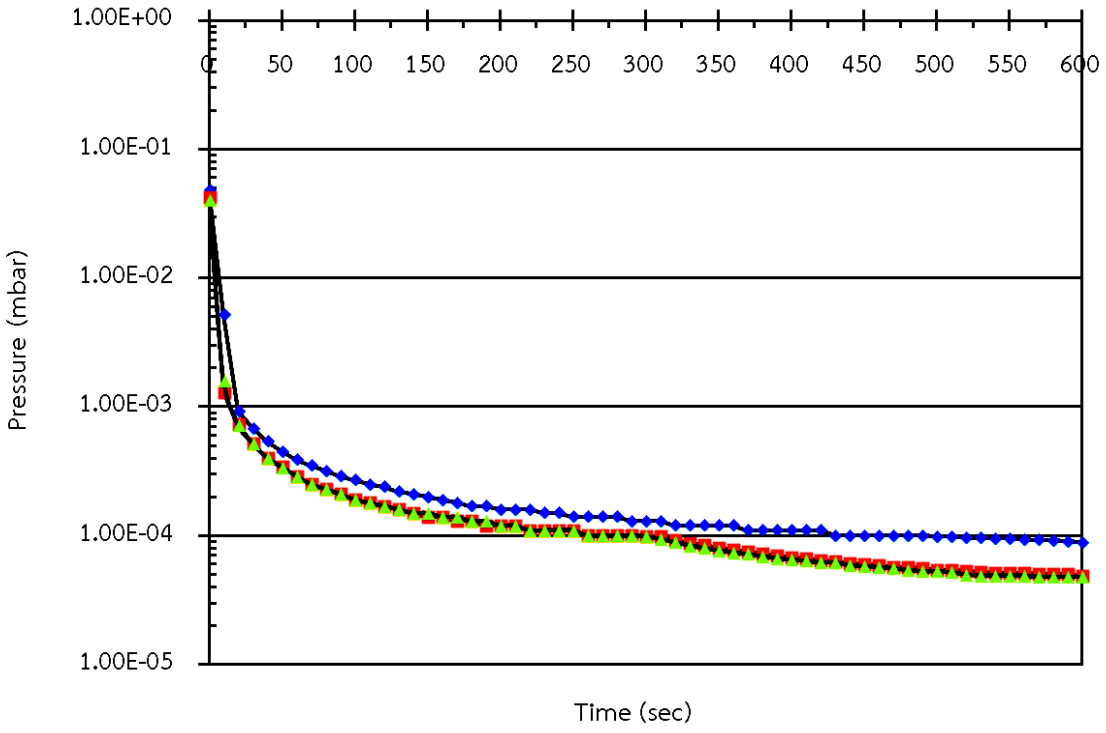
ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบกลโรตารี พบว่าเมื่อใช้เครื่องสูบกลโรตารีสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบ ที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจาก $1.2x10^{+3}$ mbar เป็น $7.2x10^{-1}$ mbar ในเวลาประมาณ 1 นาที และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ประมาณ $5.2x10^{-2}$ mbar ในเวลาประมาณ 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

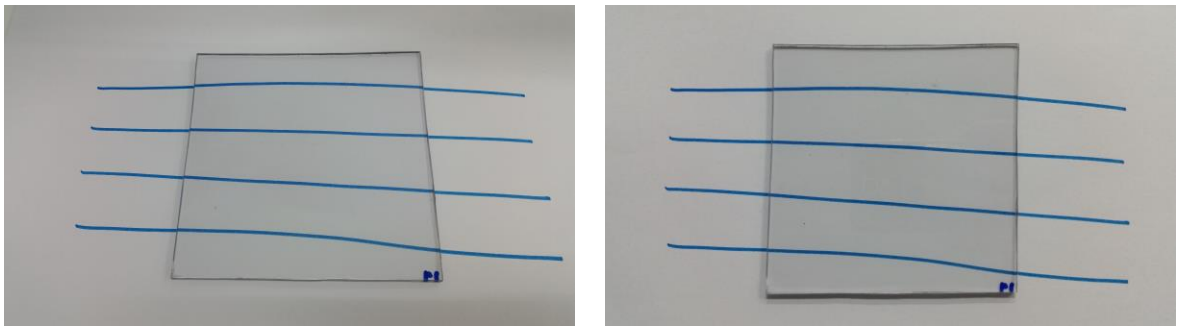
(a) (b) (c)

ภาพที่ 4-25 ลักษณะของลวดต้านทานขณะเคลือบ

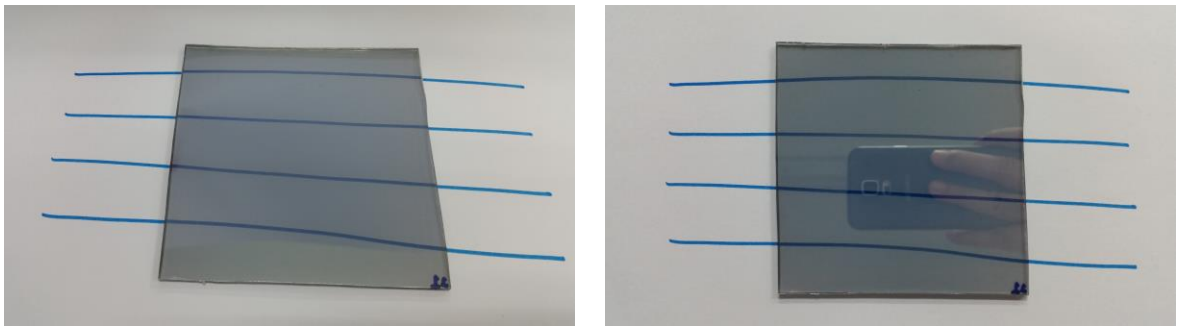
(a) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงหลอม

(b) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงไหล

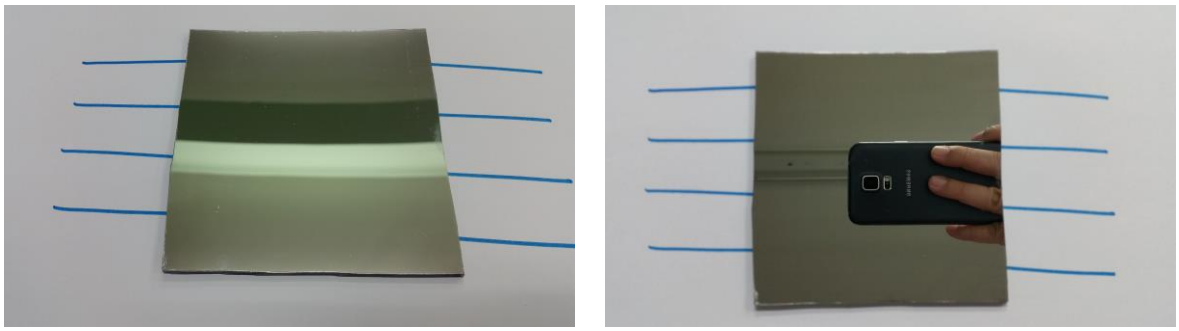
(c) ลวดต้านทานขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงช่วงระเหย



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4-26 ตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยด้วยอะลูมิเนียม

(a) ชิ้นงานที่ไม่เคลือบ

(b) ชิ้นงานเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมนาน 2 นาที: สะท้อนแสงเป็นสีเทา ส่งผ่านแสง

(c) ชิ้นงานเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมนาน 4 นาที: สะท้อนแสงเป็นสีเงิน ทึบแสง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ มี 3 ส่วน ได้แก่ การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ และ การทดสอบการเคลือบฟิล์มของเครื่องเคลือบ ซึ่งมีผลสรุปดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ

เครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบระเหยสารที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบ ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ ฝาปิดบน ชุดแผ่นฐาน ช่องเปิดและหน้าแปลนต่างๆ (2) ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ประกอบด้วย เครื่องสูบกลโรตารี เครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน มาตรวัดความดัน วาวล์และข้อต่อ (3) ระบบเคลือบ ประกอบด้วย ชุดระเหยสาร ชุดวางวัสดุรองรับ และ (4) ระบบควบคุมการทำงานหลักของเครื่องเคลือบ โดยแต่ละส่วนสรุปได้ดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ ทำจากสเตนเลสเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 205 mm ความสูงขนาด 285 mm มีช่องเปิดสำหรับสังเกตุปรากฏการณ์ในภาชนะสุญญากาศขนาด 65 mm จำนวน 1 ช่อง ด้านบนของห้องเคลือบมีแผ่นปิดขนาด 285 mm ชุดแผ่นฐานทำจากสเตนเลสหนา 10 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 205 mm ความสูงเท่ากับ 135 mm มีช่องเปิดสำหรับต่อกับเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันพร้อมหน้าแปลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 70 mm สำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 6 ช่อง

2. ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ เพื่อสร้างสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ (ระดับ 10^{-5} mbar) ประกอบด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ 2 ชนิดคือ (1) เครื่องสูบกลแบบโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 และ (2) เครื่องสูบแบบแพร่ไอ อัตราสูบ (N2) ประมาณ 200 l/s พิสัยทำงาน 10^{-2}-10^{-6} mbar ชุดวัดความดันเป็นของ Balzers TPG300 ใช้มาตรแบบเพนนิงคือรุ่น IKR050 และมาตรแบบพิรานีคือรุ่น TPR010 สำหรับวาวล์และข้อต่อทั้งหมดทำจากสเตนเลส

3. ระบบเคลือบ ประกอบด้วย ลวดต้านทานสำหรับระเหยสาร ขั้วไฟฟ้า ชุดวางชิ้นงาน แหล่งจ่ายไฟฟ้า ระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเคลือบเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบความต่างศักย์ต่ำ กระแสสูง โดยโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะปรับความต่างศักย์ได้ในช่วง 0-70 V

4. ระบบควบคุมการทำงานหลักของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบแบ่งเป็น ส่วนควบคุมระบบสุญญากาศ ส่วนควบคุมการเคลือบ และส่วนควบคุมหลัก

2. การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

1. เมื่อใช้เครื่องสูบกลโรตารี พบว่าสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบจาก $1.2x10^{+3}$ mbar เป็น $7.2x10^{-1}$ mbar ในเวลาประมาณ 1 นาที และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ประมาณ $5.2x10^{-2}$ mbar ในเวลาประมาณ 3 นาที และเมื่อใช้เครื่องสูบกลโรตารีสูบทำงานต่อเนื่องนาน 5 นาที พบว่า ภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุดเท่ากับ $4.0x10^{-2}$ mbar

2. เมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอ พบว่าสามารถลดความดันในภาชนะสุญญากาศ/ห้องเคลือบจาก $5.0x10^{-2}$ mbar เป็น $9.9x10^{-5}$ mbar ในเวลาประมาณ 2 นาที (ตั้งแต่เปิดเพลตวาวล์ว) และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ถึง $4.5x10^{-5}$ mbar ในเวลาประมาณ 10 นาที

3. การทดสอบการเคลือบฟิล์มของเครื่องเคลือบ

ฟิล์มที่ได้เมื่อใช้เวลาเคลือบนาน 2 นาที ฟิล์มที่ได้สะท้อนแสงสีเทา มีการส่งผ่านแสงดี และเมื่อใช้เวลาเคลือบนาน 4 นาที ฟิล์มที่ได้มีลักษณะทึบแสงและสะท้อนแสงเป็นสีเงินของสารเคลือบ เมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือ พบว่ามีฟิล์มหลุดลอกบางส่วนเนื่องจากพลังงานของอะตอมสารเคลือบจากการระเหยสารไม่มากพอทำให้ การยึดติดกับชิ้นงานไม่ดี และเมื่อปล่อยฟิล์มที่ได้ในบรรยากาศปกติพบว่าฟิล์มที่ได้คงสภาพเหมือนเดิม จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงในส่วนของที่จับชิ้นงานให้มีหลายแบบ เช่น สำหรับกระจกแผ่นเล็ก หรือ มีลักษณะโค้งเพื่อให้การวัสดุรองรับทุกชิ้นมีความหนาเท่ากัน

2. ควรพัฒนาส่วนตรวจวัดความหนา (thickness monitor) เพื่อช่วยให้สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ดีขึ้น

3. การเปิดห้องเคลือบของเครื่องที่สร้างในโครงการนี้ยังใช้วิธีการยก ซึ่งอาจไม่สะดวกและเหมาะสม ส่วนที่ควรพัฒนาต่อคือการออกแบบส่วนการยกห้องเคลือบให้อัตโนมัติหรือสะดวกมากขึ้น

4. ควรพัฒนาส่วนประกอบอื่นๆ ของเครื่องเคลือบเพิ่มเติม เช่น ระบบ load lock ซึ่งเป็นระบบส่งชิ้นงานเข้าห้องเคลือบแบบสุญญากาศ กรณีนี้จะทำให้เครื่องเคลือบไม่จำเป็นต้องเปิดออกซึ่งจะช่วยทำให้ระบบสุญญากาศของห้องเคลือบสะอาดตลอดเวลา

5. ควรมีการทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุชิ้นต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปัตเตอริง ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 *รายงานการวิจัยประจำปี 2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม* (หน้า 163-166). กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Bunshah, R. F. (1994). *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (2nd ed.). New Jersey: Noyes.

Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.

Smith, D. L. (1995). *Thin-Film Deposition : Principle And Practice.* New York: McGraw-Hill.

Wasa, K., & Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications (pp. 19-29).* New Jersey: Noyes.

ภาคผนวก

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ

หัวหน้าโครงการวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
ตำแหน่งทางวิชาการ	รองศาสตราจารย์
ที่ทำงาน	ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร	(038) 745-900 ต่อ 3084
E-mail	s-chaikhun@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2552	ฟิสิกส์
วท.ม.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2528	ฟิสิกส์
กศ.บ.	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน	2525	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, อิเล็กทรอนิกส์, แหล่งกำเนิดไอออน

****

ประวัตินักวิจัย

นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์
ตำแหน่งทางวิชาการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ที่ทำงาน	ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร	(038) 745-900 ต่อ 3084
E-mail	nirun@buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2543	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2535	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
กศ.บ.(เกียรตินิยม)	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร	2532	วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, สวนศาสตร์, ฟิสิกส์สิ่งแวดล้อม, คอมพิวเตอร์ช่วยสอน

****