



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศเพื่อการศึกษาและฝึกอบรม
Research and Development Prototype of Vacuum Coating System for Education and
Training

โดย

นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์และคณะ

ธันวาคม 2546

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศเพื่อการศึกษาและฝึกอบรม
Research and Development Prototype of Vacuum Coating System for Education and
Training

โดย

นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ

นายสำเภา จงจิตต์

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

การปรับปรุงผิววัสดุให้มีความคงทน ถาวรและสวยงามนั้น ทำให้หลายวิธีและวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ “การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating)” แต่วิธีนี้มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาก ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาการเคลือบใหม่ขึ้นมาทดแทน คือ “การเคลือบในสุญญากาศ (vacuum deposition)” ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศเท่านั้น จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การเคลือบในสุญญากาศยังให้ผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูงกว่าการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าอีกด้วย ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการนำการเคลือบในสุญญากาศมาใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่จากการสำรวจของคณะผู้วิจัยพบว่า การศึกษา วิจัยและพัฒนา เกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศของประเทศไทยยังมีน้อยมาก คณะผู้วิจัยจึงเริ่มทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้โดยมีเป้าหมายหลักที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศนี้ขึ้นใช้เองภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้า

บริษัท เอสชอม จำกัด เป็นบริษัทผู้ผลิต จำหน่าย และนำเข้า อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการฝึกอบรมสำหรับอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษาต่างๆ ได้สนใจเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศ แต่จากประสบการณ์ของบริษัทพบว่าการนำเข้าเครื่องมือเหล่านี้ยังมีปัญหาหลายอย่าง ทั้งด้านราคา การซ่อมบำรุง และการถ่ายทอดเทคโนโลยี จากต่างประเทศทำให้บริษัทมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องมือตลอดจนพัฒนาความรู้ด้านนี้เพื่อทดแทน การนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดของคณะผู้วิจัย จึงได้มีการร่วมปรึกษาหารือ และร่วมศึกษาความเป็นไปได้ ตลอดจนแนวทางเบื้องต้นร่วมกับคณะผู้วิจัย

จากการร่วมงานอย่างใกล้ชิดของ คณะผู้วิจัย และ บริษัท เอสชอม จำกัด ทำให้คณะผู้วิจัยเสนอโครงการ “การวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศเพื่อการศึกษาและฝึกอบรม” ต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (ฝ่าย 5) โดยมีบริษัท เอสชอม จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย และได้รับการอนุมัติให้เริ่มดำเนินโครงการได้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2545 ตามสัญญาเลขที่ RDG4550046 ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน งบประมาณรวม 2,384,600 บาท แบ่งเป็นส่วนที่รับการสนับสนุนจาก สกว. จำนวน 1,884,600 บาท และสมทบจาก บริษัท เอสชอม จำกัด จำนวน 500,000 บาท วัตถุประสงค์หลักของโครงการคือเพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศ สำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรมโดยเน้นที่การใช้วัสดุในประเทศเป็นหลัก ซึ่งจะช่วยทดแทนการนำเข้าอุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านี้จากต่างประเทศ ตลอดจนการเป็นเจ้าของเทคโนโลยีเพื่อพึ่งพาตนเองในอนาคต

จากการศึกษา คณะผู้วิจัยสามารถสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารตลอดจนจัดทำเอกสารประกอบที่เกี่ยวข้องได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมีผลการศึกษาโดยสรุปดังนี้คือ ต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่สร้างในโครงการนี้ใช้เทคนิคการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ (3) ส่วนการเคลือบ และ (4) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ โดยภาชนะสุญญากาศ ทำจากสเตนเลสเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 310 mm. ความสูงประมาณ 370 mm. มีหน้าแปลนขนาดต่างๆ สำหรับติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม มีการระบายความร้อนด้วยน้ำรอบภาชนะสุญญากาศ สำหรับแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 390 mm มีช่องเปิดสำหรับต่อไปยังเครื่องสูบลแบบแปรไอ พร้อมหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 6 ช่อง แผ่นปิดบน (top plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 390 mm มีหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 5 ช่อง ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบลแบบโรตารี และเครื่องสูบลแบบแปรไอ ส่วนการเคลือบ ประกอบด้วย ลวดต้านทานสำหรับให้ความร้อน สารเคลือบ ขั้วไฟฟ้า ชุดวางสารเคลือบ ที่วางชิ้นงาน แหล่งจ่ายไฟฟ้า และชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบแบ่งเป็น ส่วนควบคุมระบบสุญญากาศ ส่วนควบคุมการเคลือบ และส่วนควบคุมหลัก เครื่องเคลือบต้นแบบ ที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด 9.0×10^{-6} mbar ในเวลา 60 นาที และสามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะได้ตามวัตถุประสงค์ ในโครงการนี้ยังได้จัดทำเอกสารที่เกี่ยวข้องได้แก่ (1) เอกสารเรื่อง “การเคลือบในสุญญากาศ” (2) คู่มือการทดลองการเคลือบในสุญญากาศ (3) รายละเอียดและคู่มือการใช้เครื่องเคลือบ และ (4) บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ฝึกรอบมระบบสุญญากาศ

Executive Summary

Surface improvement techniques have various methods. Many industries use electroplating technique to deposited thin film onto the surface in aqueous solution which it has some problem about environmental. So, the researchers have developed the new coating technique, which is “vacuum deposition”. The new technique has unique property, and also called “clean technology” because it processes were in the vacuum chamber only and it does not use any kind of chemical solutions, so it does not make or produced any problems to the environments and more over it also produces higher quality of thin film than one obtains from the electroplating technique. Nowadays, this technique is widely used in many industries around the world. Many industries in Thailand has import this equipment in widely use but form the survey of research team found that it has a few research and development projects about this technology. So, research team from Burapha University have decided to provided for this technology, mainly to reduce importing this technology from abroad.

ESSOM was founded in 1986 engaging mainly in trading. Technical training equipment manufacturing was later introduced as a supplementary activity. As time passed, training equipment proved to be more viable and challenging. More and more products have been developed and up-graded to include up-to-date technology. A quality management system was subsequently incorporated to ensure that the equipments are of high quality standards. Presently, technical training equipment has become ESSOM's main business. Vacuum deposition, is one of the new technologies which ESSOM has being interesting to make the market. Researcher from ESSOM and research staff has discussed and decided to develop a project together for research about this technology.

From the discussion of researcher staffs, we repurpose the research project “Research and Development Prototype of Vacuum Coating System for Education and Training” to the Thailand Research Fund (TRF) for the main funding. And we have co-funding from the ESSOM Co.Ltd.,. We have contract number RDG4550046 of the project for 18 months in 2,384,600 baths (from the TRF 1,884,600 baths and from the ESSOM 500,000 baths). The main objective of this research was to design and construct the prototype of the vacuum coating for education and training. In this project we will use the raw materials mainly in Thailand.

The results of this research are the prototype of the vacuum coating for education and training and the know-how of the processes to deposited thin films by evaporation technique that can summarize below. The prototype is made from material in Thailand that has 4 main parts are (1) vacuum vessel (2) vacuum pumping system (3) deposition parts and (4) control system unit. The vacuum vessel is made from cylindrical stainless steel that has 310.0 mm in diameter and 370.0 mm in height, and vessel cooling by water. Base plate of vessel has 390.0 mm in diameter and open port to connect to the vacuum system and accessory. The vacuum pumping system is composed of the oil diffusion pump backing by rotary pump. The deposition parts of this prototype composed of heat resistance for evaporated coating materials, electrical feed through, substrate holder, power supply. The control system unit is composed of vacuum control and coating control. The prototype can reduce the pressure within the vacuum vessel from atmosphere to 9.0×10^{-6} mbar in 60 minutes and can be deposited by evaporation technique for all kinds of metal films. In this project we have prepared some documents and computer programme, computer based training programme, to used with this prototype which is, (1) text “vacuum coating”, (2) laboratory direction and (3) manual of the vacuum coating system.

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศ สำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรมโดยเน้นที่การใช้วัสดุในประเทศเป็นหลัก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการนำเข้าอุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านี้จากต่างประเทศ ตลอดจนการเป็นเจ้าของเทคโนโลยีเพื่อพึ่งพาตนเองในอนาคตซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้ ต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่สร้างในโครงการนี้ใช้เทคนิคการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ (3) ส่วนการเคลือบ และ (4) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ โดยภาชนะสุญญากาศ ทำจากสเตนเลสเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 310 mm. ความสูงประมาณ 370 mm. มีหน้าแปลนขนาดต่างๆ สำหรับติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม มีการระบายความร้อนด้วยน้ำรอบภาชนะสุญญากาศ สำหรับแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 390 mm มีช่องเปิดสำหรับต่อไปยังเครื่องสูบลแบบแฟรไอ พร้อมหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 6 ช่อง แผ่นปิดบน (top plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 390 mm มีหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 5 ช่อง ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบลแบบโรตารี และเครื่องสูบลแบบแฟรไอ ส่วนการเคลือบ ประกอบด้วย ลวดต้านทานสำหรับให้ความร้อนสารเคลือบ ขั้วไฟฟ้า ชุดวางสารเคลือบ ที่วางชิ้นงาน แหล่งจ่ายไฟฟ้า และชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบแบ่งเป็น ส่วนควบคุมระบบสุญญากาศ ส่วนควบคุมการเคลือบ และส่วนควบคุมหลัก เครื่องเคลือบต้นแบบ ที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด 9.0×10^{-6} mbar ในเวลา 60 นาที และสามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะได้ตามวัตถุประสงค์ ในโครงการนี้ยังได้จัดทำเอกสารที่เกี่ยวข้องได้แก่ (1) เอกสารเรื่อง “การเคลือบในสุญญากาศ” (2) คู่มือการทดลองการเคลือบในสุญญากาศ (3) รายละเอียดและคู่มือการใช้เครื่องเคลือบ และ (4) บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

ABSTRACT

The main objective of this research was to design and construct the prototype of the vacuum coating for education and training. In this project we will use the raw materials mainly in Thailand. The results of this research are the prototype of the vacuum coating for education and training and the know-how of the processes to deposited thin films by evaporation technique that can summarize below. The prototype is made from material in Thailand that has 4 main parts are (1) vacuum vessel (2) vacuum pumping system (3) deposition parts and (4) control system unit. The vacuum vessel is made from cylindrical stainless steel that has 310.0 mm in diameter and 370.0 mm in height, and vessel cooling by water. Base plate of vessel has 390.0 mm in diameter and open port to connect to the vacuum system and accessory. The vacuum pumping system is composed of the oil diffusion pump backing by rotary pump. The deposition parts of this prototype composed of heat resistance for evaporated coating materials, electrical feed through, substrate holder, power supply. The control system unit is composed of vacuum control and coating control. The prototype can reduce the pressure within the vacuum vessel from atmosphere to 9.0×10^{-6} mibar in 60 minutes and can be deposited by evaporation technique for all kinds of metal films. In this project we have prepared some documents and computer programme, computer based training programme, to used with this prototype which is, (1) text “vacuum coating”, (2) laboratory direction and (3) manual of the vacuum coating system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ “การวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศเพื่อการศึกษาและฝึกอบรม : Research and Development Prototype of Vacuum Coating System for Education and Training” เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG4550046 ในชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอณูฉนวนและเครื่องประดับ โดยมี บริษัท เอสซอม จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย มีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน และมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศสำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรม โดยเน้นการใช้วัสดุภายในประเทศเป็นหลัก

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 2 ท่าน คือ รศ.ดร.ณสรณ์ ผลโภค ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ รศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สละเวลาในการตรวจเยี่ยมและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการแก่คณะผู้วิจัยตลอดโครงการ

โครงการนี้คงไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนด้านทุนการวิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ คุณสุนทร ศรีนิลทา บริษัท เอสซอม จำกัด ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้แก่คณะผู้วิจัย จนสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ทวีป ศิริวิศรี (ผู้ประสานงานชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอณูฉนวนและเครื่องประดับ) ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการประสานงานและคำแนะนำต่างๆ พร้อมกันนี้คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอณูฉนวนและเครื่องประดับทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาในการดำเนินโครงการ ทำให้สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ สำหรับการให้คำปรึกษา คำแนะนำด้านเทคนิคต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้วิจัยตลอดมา

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
Executive Summary	iii
บทคัดย่อ	v
ABSTRACT	vi
กิตติกรรมประกาศ	vii
สารบัญ	viii
สารบัญตาราง	xi
สารบัญรูป	xii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 แนวทางและวิธีดำเนินงานโดยย่อ	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 แก๊สและสมบัติของแก๊ส	5
2.1.1 ธรรมชาติของแก๊ส	5
2.1.2 แก๊สอุดมคติ	7
2.1.3 การกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์	9
2.1.4 ระยะปลอดการชนเฉลี่ย	10
2.2 สูญญากาศและสมบัติของระบบสุญญากาศ	11
2.2.1 ความหมายของสุญญากาศ	11
2.2.2 องศาความเป็นสุญญากาศ	12
2.2.3 หน่วยวัดความดัน	12
2.2.4 การคายแก๊ส	13
2.2.5 ปริมาณของแก๊สและแรงขับ	14
2.2.6 ต้นกำเนิดแก๊สตกค้างในภาชนะสุญญากาศ	15

2.2.7 ความดันสุตท้ายและอัตราสูบ	16
2.2.8 ช่วงเวลาการสูบ	17
2.2.9 อัตราการรั่ว	18
2.3 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ	19
2.4 เครื่องสูบลำสุญญากาศ	24
2.4.1 เครื่องสูบลำกลโรตารี	24
2.4.2 เครื่องสูบลำแบบเพอร์ไล	26
2.5 การวัดความดันในระบบสุญญากาศ	28
2.6 การเคลื่อนในสุญญากาศ	30
2.6.1 สภาวะสุญญากาศกับการเคลื่อน	30
2.6.2 กระบวนการเคลื่อนฟิล์มบาง	32
2.6.3 การก่อเกิดฟิล์มบาง	32
2.6.4 ประเภทของการเคลื่อนฟิล์มบางในสุญญากาศ	34
2.6.5 การเคลื่อนฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์	35
2.7 การเคลื่อนฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร	37
2.7.1 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลื่อนด้วยวิธีระเหยสาร	37
2.7.2 การระเหยสารในสุญญากาศ	39
2.7.3 ลักษณะของเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร	41
บทที่ 3 การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องเคลื่อน	43
3.1 แนวคิดเกี่ยวกับการออกแบบสร้างเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ	43
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลื่อน	45
3.2.1 ภาชนะสุญญากาศ	45
3.2.2 ระบบเครื่องสูบลำสุญญากาศ	48
3.2.3 ระบบเคลื่อน	51
3.2.4 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลื่อน	52
3.3 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลื่อน	53
3.3.1 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลื่อนเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลำกลโรตารี	54
3.3.2 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลื่อนเมื่อใช้เครื่องสูบลำแบบเพอร์ไล	55
3.4 การทดสอบการเคลื่อนฟิล์มบาง	56

บทที่ 4	การจัดทำเอกสารประกอบการใช้เครื่องเคลื่อน	57
4.1	เอกสารประกอบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ	57
4.2	บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	58
4.2.1	ลักษณะและแนวคิดของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	58
4.2.2	แนวทางการพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	60
4.2.3	ลักษณะของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	61
4.2.4	การทดสอบบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	64
4.2.5	ผลการทดสอบบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ	64
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	66
5.1	สรุปผลการศึกษา	66
5.1.1	การออกแบบและสร้างเครื่องเคลื่อนต้นแบบ	66
5.1.2	ผลการทดสอบเครื่องเคลื่อนต้นแบบ	67
5.1.3	เอกสารประกอบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ	67
5.2	ข้อเสนอแนะ	68
	เอกสารอ้างอิง	69
	ภาคผนวก	
ก	รายละเอียดของเครื่องเคลื่อน	70
ข	คู่มือการใช้เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ	73
ค	ขั้นตอนการเคลื่อนฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร	
ง	บทความสำหรับการเผยแพร่	77
จ	กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์	84
ฉ	เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนและกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	142
ช	ประวัตินักวิจัย	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของอากาศที่ระดับน้ำทะเล	5
2.2 การจำแนกองค์แห่งอุตุนิยมวิทยา ตามความดันภายในภาชนะปิด	12
4.1 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพหลังเรียนกับสัดส่วนของกลุ่มประชากร	65
4.2 คะแนนเฉลี่ยความคิดเห็นของผู้เรียนที่มีต่อบทเรียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบอุตุนิยมวิทยา	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด	6
2.2 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ	14
2.3 แก๊สที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ	15
2.4 แผนภาพส่วนประกอบของระบบสุญญากาศสูง	17
2.5 ความสัมพันธ์ของความดันกับเวลาของภาชนะสุญญากาศ	18
2.6 ลักษณะของภาชนะปิดของเครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบต่างๆ	19
2.7 เครื่องสูบลูกโรตารี	20
2.8 เครื่องสูบบแบบแพร์ไอ	20
2.9 มาตรวัดความดันแบบต่างๆ	22
2.10 ตัวอย่างท่อและวาล์วของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ	22
2.11 ระบบหล่อเย็น	22
2.12 ผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} mbar	24
2.13 เครื่องสูบลูกโรตารีชนิดน้ำมัน	25
2.14 การทำงานของเครื่องสูบลูกโรตารีชนิดน้ำมัน	25
2.15 โครงสร้างของเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ	27
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย (MFP) ความหนาแน่นของโมเลกุล และเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุ ที่เป็นฟังก์ชันของความดันที่ อุณหภูมิ 25 °C	31
2.17 การก่อเกิดฟิล์มบาง	33
2.18 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	35
2.19 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร	36
2.20 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง	36
2.21 ตัวให้ความร้อนสำหรับการเคลือบแบบระเหยสารชนิดตัวต้านทาน	38
2.22 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	42
3.1 ภาพร่างของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร	44
3.2 เครื่องเคลือบทั้งระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้	45
3.3 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	46
3.4 ลักษณะของแผ่นปิดบนของเครื่องเคลือบ	47

3.5	ลักษณะของแผ่นฐานของเครื่องเคลือบ	47
3.6	การต่ออุปกรณ์ประกอบด้านล่างของแผ่นฐาน	47
3.7	เครื่องสูบลมโรตารีของเครื่องเคลือบและการต่อกับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ	48
3.8	เครื่องสูบบแบบแพร่ไอของเครื่องเคลือบ	49
3.9	มาตรวัดความดันและการติดตั้งหัววัดความดันของเครื่องเคลือบ	49
3.10	วาล์วสุญญากาศสูงของเครื่องเคลือบแบบปีกผีเสื้อ	49
3.11	วาล์วท้ายและวาล์วหยาบของเครื่องเคลือบ	50
3.12	วาล์วล้อยอากาศเข้าภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	50
3.13	การติดตั้งระบบวาล์วท้ายและวาล์วหยาบของเครื่องเคลือบ	50
3.14	ลดต้านทานสำหรับให้ความร้อนแก่สารเคลือบชนิดต่างๆ	51
3.15	การติดตั้งขั้วไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับลดต้านทาน	51
3.16	การติดตั้งลดต้านทานกับขั้วไฟฟ้าสำหรับการระเหยสาร	52
3.17	แท่นวางชิ้นงานและการติดตั้งในภาชนะสุญญากาศ	52
3.18	ชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเคลือบ	52
3.19	แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	53
3.20	ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี	54
3.21	ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ	55
3.22	ตัวอย่างกระจกก่อนเคลือบและหลังเคลือบ ด้วยอะลูมิเนียม	56
4.1	หน้าแรกของโปรแกรมและเมนูหลัก	62
4.2	เมนูย่อยซึ่งจะแสดงจุดประสงค์ของบทเรียนด้านซ้าย	62
4.3	ส่วนของโปรแกรมที่แสดงเนื้อหาบทเรียนประกอบคำบรรยาย	62
4.4	ส่วนการฝึกอบรมซึ่งผู้เรียนจะได้ทดลองใช้หากฝึกฝนจะมีการเตือน	63
4.5	เมนูย่อยเลือกการทำงานเมื่อจบแต่ละหน่วยการเรียนรู้	63
4.6	ส่วนออกจากโปรแกรมจะมีการยืนยันการออกจากโปรแกรม	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

บริษัท เอสซอม จำกัด เป็นบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการฝึกอบรมทางเทคนิคต่างๆ สำหรับสถาบันการศึกษา ก่อตั้งโดยนักวิชาการและนักธุรกิจชาวไทยเมื่อปี พ.ศ.2529 ช่วงแรกเป็นการผลิตเพื่อจำหน่ายในประเทศเป็นหลัก ซึ่งต่อมาในปี พ.ศ.2534 ได้มีการขยายสำนักงานใหม่ รวมถึงการก่อสร้างโรงงานของบริษัทเองในปี พ.ศ.2535 เพื่อผลิตอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการฝึกอบรมต่างๆ เพื่อจำหน่ายโดยเฉพาะ และต่อมาในปี พ.ศ.2542 บริษัทยังได้รับเครื่องหมายมาตรฐานอุตสาหกรรม ISO9001 ด้วย ทำให้บริษัท เอสซอม จำกัด มีความพร้อมในทุกด้านทั้งสถานที่ติดต่อโรงงานผลิตอุปกรณ์และเครื่องมือฝึกอบรม ห้องแสดงสินค้า ห้องฝึกอบรม ตลอดจนทีมงานการวิจัยและพัฒนา ในส่วนการผลิตนั้นมีทั้งที่ผลิตขึ้นเองตามความก้าวหน้าของนวัตกรรมทางการศึกษาและความต้องการของตลาด นอกจากนี้ยังให้บริการผลิตเครื่องมือเฉพาะด้านตามความต้องการของลูกค้าอีกด้วย

ในช่วงปี พ.ศ.2542 บริษัท เอสซอม จำกัด เริ่มสนใจอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องมือทางด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ เนื่องจากเริ่มมีการนำเข้าเครื่องมือทางด้านเทคโนโลยีสุญญากาศมาใช้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษาต่างๆ ซึ่งการดำเนินงานในระยะแรกของบริษัทจะเป็นการนำเข้าสินค้าเหล่านี้จากต่างประเทศมาจำหน่ายทั้งหมด และล่าสุดบริษัทเป็นผู้ประมูลครุภัณฑ์ในโครงการเงินกู้ธนาคารโลก ในส่วนชุดเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Coating) ของมหาวิทยาลัยหลายแห่ง อย่างไรก็ตามบริษัท เอสซอม จำกัด พบว่าการนำเข้าเครื่องมือเหล่านี้ยังมีปัญหาบางอย่างเช่น เทคโนโลยีนี้มีราคาแพง ค่าดำเนินการอื่นๆ ค่อนข้างสูง ทั้งค่าจ้างผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ ค่าประกอบและติดตั้ง รวมถึงหากอุปกรณ์และเครื่องมือเสียหายหรือชำรุดอาจต้องเสียเวลารอชิ้นส่วนหรือผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศเพื่อแก้ปัญหา เป็นต้น

จากเหตุผลข้างต้น บริษัท เอสซอม จำกัด จึงมีแนวคิดที่จะทำการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ เหล่านี้ขึ้นใช้เองเพื่อทดแทนการนำเข้า ซึ่งบริษัท เอสซอม จำกัด ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์บางส่วน แต่พบว่ายังมีปัญหาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย จึงได้ประสานงานมายังคณะผู้วิจัย ซึ่งได้ทำงานวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบางมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2537 จนสามารถสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบในสุญญากาศ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านเทคโนโลยีสุญญากาศตลอดจนสามารถพัฒนาเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศขึ้นใช้เอง เพื่อขอคำแนะนำด้านเทคนิคต่างๆ และจากการร่วมมือในเบื้องต้นนี้ทำให้ บริษัท เอสซอม จำกัด และ คณะผู้วิจัย มีความสนใจ

ร่วมกันที่จะทำการวิจัยและพัฒนา เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศเพื่อใช้สำหรับการศึกษาและอบรมสำหรับหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีนี้ เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเพื่อใช้เองในประเทศและส่งออกเพื่อจำหน่ายในต่างประเทศ

สำหรับประเด็นปัญหาหลักของ บริษัท เอสซอม จำกัด ซึ่งนำมาพัฒนาต่อเป็นหัวข้อของโครงการวิจัยครั้งนี้ แบ่งได้เป็น 3 ประเด็น คือ

1. ปัญหาด้านราคา เนื่องจากค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้มีราคาสูงมาก เช่น ค่าเครื่องมือวัดอุปกรณ์ ค่าจ้างผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ ค่าประกอบและติดตั้ง ฯลฯ
2. ปัญหาด้านการซ่อมบำรุง เนื่องจากเป็นสินค้านำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นถ้าอุปกรณ์และเครื่องมือเสียหายหรือชำรุดต้องเสียเวลารอชิ้นส่วนหรือผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศเพื่อแก้ปัญหา
3. ปัญหาด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยี ผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศมักจะถ่ายทอดเทคโนโลยีในระดับหนึ่งเท่านั้น ทำให้ต้องพึ่งพาต่างประเทศตลอดเวลา

ซึ่งจากการวิเคราะห์ประเด็นปัญหาตลอดจนการศึกษาเบื้องต้นของ บริษัท เอสซอม จำกัด และคณะผู้วิจัย เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้นนั้น มีข้อสรุปถึงแนวทางดำเนินการในเบื้องต้นดังนี้คือ

1. นำเข้าอุปกรณ์และชิ้นส่วนของระบบสุญญากาศมาประกอบเพื่อให้ได้สินค้าตามต้องการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคโนโลยีต่างๆ ของต่างประเทศ
2. พัฒนาและสร้างชิ้นส่วนบางอย่างที่สามารถวิจัยและพัฒนาขึ้นเอง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดและทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ
3. พัฒนาและสร้างระบบสุญญากาศขึ้นใช้เองทั้งระบบ มีวัตถุประสงค์เพื่อการเป็นเจ้าของเทคโนโลยีซึ่งจะนำไปสู่การพึ่งพาตนเองของประเทศ

สำหรับประเด็นปัญหาหลักที่นำมาสู่โครงการวิจัยและพัฒนานี้คือ

1. การขาดแคลนบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญและชำนาญในเทคโนโลยีนี้ในทุกๆระดับ
2. การขาดแคลนความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีพื้นฐานของเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ

จากเหตุผลต่างๆ ข้างต้น บริษัท เอสซอม จำกัด และ คณะผู้วิจัยมีความสนใจร่วมกันที่จะขอเสนอโครงการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาต้นแบบต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศเพื่อการศึกษาและฝึกอบรม” ต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โดยโครงการนี้จะเน้นการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นเองจากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนราคาของเครื่องเคลื่อนนี้ถูกกว่าที่นำเข้าจากต่างประเทศ รวมถึงยังง่ายต่อการซ่อมบำรุงพัฒนา ซึ่งเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้ขึ้นใช้เองภายในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศสำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรม
2. เพื่อออกแบบและสร้างชิ้นส่วน อุปกรณ์พื้นฐานของระบบสุญญากาศ
3. เพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลื่อนในสุญญากาศ
4. เพื่อพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง

1.3 แนวทางและวิธีดำเนินงานโดยย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศสำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรม เพื่อออกแบบและสร้างชิ้นส่วน อุปกรณ์พื้นฐานของระบบสุญญากาศ เพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลื่อนในสุญญากาศ และเพื่อพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยลดการนำเข้าอุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านี้จากต่างประเทศแล้วยังเป็นจุดเริ่มของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแบบพึ่งตนเองซึ่งจะทำให้เราเป็นเจ้าของเทคโนโลยีในที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์หลักของโครงการ คณะผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานเป็น 3 ส่วนใหญ่ ดังนี้คือ (1) การออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศและส่วนการเคลื่อน (2) การประกอบ ติดตั้งและทดสอบเครื่องเคลื่อน และ (3) การจัดทำเอกสารประกอบสำหรับเครื่องเคลื่อน ซึ่งแต่ละส่วนสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศและส่วนการเคลื่อน ขั้นนี้จะเป็นการออกแบบส่วนต่างๆ ของเครื่องเคลื่อน ซึ่งประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ วาล์วชนิดต่างๆ ส่วนการเคลื่อนและระบบควบคุม โดยการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่จะนำมาออกแบบสร้างและประกอบเป็นเครื่องเคลื่อน โดยเน้นการใช้วัสดุที่มีในประเทศ ขั้นตอนนี้แบ่งเป็น

- 1.1 การออกแบบและสร้างภาชนะสุญญากาศ
- 1.2 การออกแบบและสร้างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ
- 1.3 การออกแบบและสร้างวาล์วต่างๆ
- 1.4 การออกแบบและสร้างส่วนการเคลื่อน
- 1.5 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ของเครื่องเคลื่อน

2. การประกอบ ติดตั้งและทดสอบเครื่องเคลื่อน การดำเนินงานในส่วนนี้เป็นการประกอบ และทดสอบการทำงานของเครื่องเคลื่อนที่สร้างขึ้นในโครงการ เนื่องจากเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศเป็น เครื่องมือเฉพาะทางที่มีรายละเอียดมากจำเป็นต้องมีทักษะในการประกอบ เพื่อไม่ให้มีปัญหาเกี่ยวกับ ระบบสุญญากาศของเครื่อง และเมื่อประกอบเครื่องเคลื่อนแล้วจำเป็นต้องทดสอบการทำงานของ เครื่องเคลื่อนในสองลักษณะคือ ความสามารถด้านสุญญากาศว่าสามารถสร้างภาวะสุญญากาศได้ตามที่ ต้องการหรือไม่ รวมถึงการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่สามารถเคลื่อนฟิล์มได้หรือไม่ การ ดำเนินงานในส่วนนี้แบ่งงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

2.1 การประกอบและติดตั้งเครื่องเคลื่อน

2.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องเคลื่อน ด้านสุญญากาศ

2.3 การทดสอบการทำงานของเครื่องเคลื่อน ด้านการเคลื่อน

3. การจัดทำเอกสารประกอบสำหรับเครื่องเคลื่อน การดำเนินงานในส่วนนี้เป็นการจัดทำ เอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คู่มือการใช้เครื่องเคลื่อน หนังสือเรื่อง การเคลื่อนในสุญญากาศ เอกสาร ประกอบการอบรมการใช้เครื่องเคลื่อน ชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการอบรม และการทดลองใช้ เอกสารประกอบ การดำเนินงานในส่วนนี้แบ่งงานออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

3.1 การจัดทำเอกสารประกอบสำหรับเครื่องเคลื่อน

3.2 การทดลองใช้เอกสารประกอบสำหรับเครื่องเคลื่อนที่จัดทำขึ้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

เมื่อโครงการวิจัยนี้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วคาดว่าจะได้รับสิ่งต่างๆ เหล่านี้คือ

1. ได้เครื่องต้นแบบของเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ สำหรับนำไปใช้เป็นต้นแบบในการ สร้างเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ เพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศต่อไป

2. ทำให้ทราบเทคนิค ขั้นตอน กระบวนการ และ know how ทั้งหมดของเครื่องเคลื่อนใน สุญญากาศและระบบสุญญากาศเนื่องจากการศึกษาในโครงการนี้จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีสุญญากาศ เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานอันเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมนี้ภายในประเทศ แบบพึ่งพาตนเอง

3. เป็นการพัฒนาบุคลากรของประเทศในสาขาเทคโนโลยีสุญญากาศและการเคลื่อนใน สุญญากาศ ซึ่งเป็นการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ อันทำให้เกิดการถ่ายทอดความรู้และขยายวงในการพัฒนา บุคลากรเพื่อรองรับการนำเทคโนโลยีการเคลื่อนฟิล์มบางสู่อุตสาหกรรมภายในประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ (1) แก๊สและสมบัติของแก๊ส (2) สูญญากาศและสมบัติของระบบสุญญากาศ (3) ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ (4) เครื่องสูบลสุญญากาศ (5) การวัดความดันในระบบสุญญากาศ (6) การเคลื่อนในสุญญากาศ และ (7) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหิดสาร ซึ่งรายละเอียดดังนี้

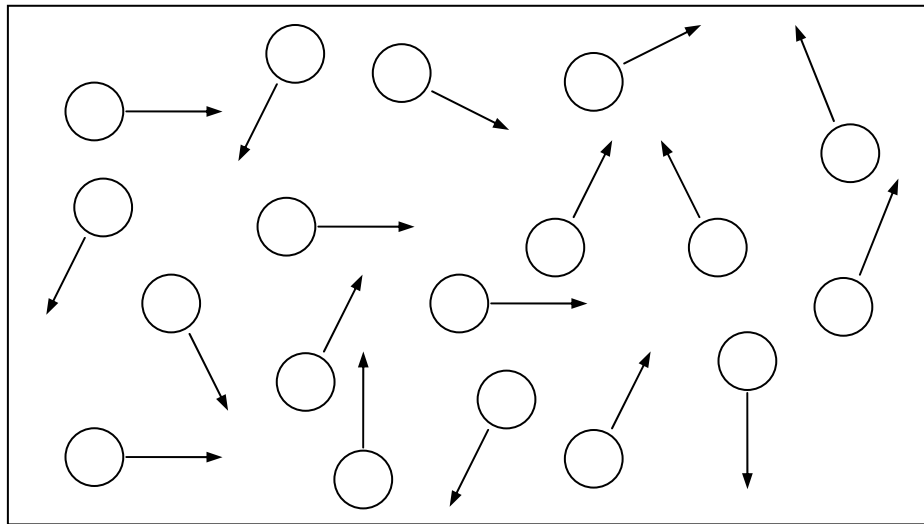
2.1 แก๊สและสมบัติของแก๊ส

2.1.1 ธรรมชาติของแก๊ส

“แก๊ส” ในสุญญากาศจะหมายถึง แก๊สที่ไม่กลั่นตัว (noncondensable gases) และไอ (vapors) ทุกชนิด โดย “แก๊สที่ไม่กลั่นตัว” หมายถึง แก๊สที่ไม่สามารถที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวหรืออัดตัวเป็นของแข็งได้ภายใต้สภาวะปกติ เช่น อากาศแห้งและไอน้ำก็เป็นตัวอย่างที่ดีของไอที่มีอยู่ในอากาศโดยทั่วไป ทั้งนี้โดยปกติแล้วอากาศจะประกอบด้วยแก๊สหลายชนิดแต่จะมีแก๊สในโตรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (ตารางที่ 2.1) สำหรับแก๊สที่บรรจุอยู่ในภาชนะปิดจะมีความดันอยู่ค่าหนึ่งเสมอ โดยความดันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแก๊สจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วในทุกทิศทุกทาง และอาจจะชนกันเอง หรือชนกับผนังของภาชนะแล้วสะท้อนกลับออกมา การชนผนังภาชนะของโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้เองที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความดันขึ้นที่ผนังภาชนะนั้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของอากาศที่ระดับน้ำทะเล

ชนิดของแก๊ส	ปริมาตร (ร้อยละ)
ไนโตรเจน	78.08
ออกซิเจน	20.95
อาร์กอน	0.93
คาร์บอนไดออกไซด์	0.03
นีออน	0.0018
ฮีเลียม	0.0005
มีเทน	0.0002
คริปทอน	0.0001
ไฮโดรเจน	0.00005



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด

ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละโมเลกุลอาจจะมีอัตราเร็วต่างกันไป อย่างไรก็ตามก็สามารถพิจารณาได้ว่าโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันเรียกอัตราเร็วนี้ว่า “อัตราเร็วเฉลี่ย” นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโดยเฉลี่ยแล้วยังถือได้ว่าจำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางเท่ากันอีกด้วย และเมื่อแก๊สในภาชนะได้รับความร้อนจากภายนอกอัตราเร็วเฉลี่ยนี้จะมีค่าสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอากาศ แก๊ส หรือไอของธาตุใดก็ตาม ระยะเวลาที่โมเลกุลจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลมากๆ และถ้ามีการสูบเอาแก๊สนั้นออกไปจากภาชนะปิดระยะเวลาที่โมเลกุลนี้จะมีค่ามากขึ้น

เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สจะวิ่งด้วยอัตราเร็วสูงในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งนอกจากจะทำให้โมเลกุลชนกันเองแล้ว ยังทำให้โมเลกุลเหล่านี้ชนผนังภาชนะด้วย เมื่อโมเลกุลชนผนังภาชนะจะสะท้อนกลับ โมเลกุลแก๊สจะถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่ผนังทำให้เกิดแรงกระทำต่อผนังภาชนะ แรงที่โมเลกุลแก๊สกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วย คือ ความดัน (pressure) ของแก๊สในภาชนะนั่นเอง ซึ่งความดันนี้เป็นปริมาณที่สำคัญมากในทางสุญญากาศ เมื่อมีการสูบเอาแก๊สออกจากภาชนะความดันก็จะลดลง เพราะจำนวนโมเลกุลที่ชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาลดลง เมื่อมีการให้ความร้อนแก่แก๊สอุณหภูมิของแก๊สก็จะสูงขึ้นทำให้อัตราเร็วของโมเลกุลภายในมากขึ้นไปด้วยจำนวนครั้งที่โมเลกุลชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาจึงเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น

2.1.2 แก๊สอุดมคติ

ถ้าโมเลกุลของแก๊สมีมวล m วิ่งเข้าชนกับพื้นผิวด้วยความเร็ว v และสะท้อนกลับด้วยอัตราเร็วเท่าเดิม โมเลกุลแก๊สจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับ $2mv$ ถ้าจำนวนโมเลกุลที่เข้าชนพื้นที่หนึ่งหน่วยในหนึ่งหน่วยเวลาเท่ากับ U อิมพัลส์รวมต่อหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หนึ่ง คือ $2mvU$ ซึ่งก็คือแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หนึ่งหน่วย หรือความดันบนพื้นผิว ดังนั้น ถ้าให้ p แทนความดันนี้

$$p = 2mvU \quad \text{..... (2.1)}$$

สมมติให้ความหนาแน่นโมเลกุล หรือจำนวนโมเลกุลในหนึ่งหน่วยปริมาตรเท่ากับ n ความดันตาม สมการ (1.1) จะเขียนในรูปของ n ได้เป็น

$$P = \frac{1}{3}mnv_{rms}^2 \quad \text{..... (2.2)}$$

พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลแก๊ส ตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส คือ

$$\frac{1}{2}mnv_{rms}^2 = \frac{3}{2}k_B T \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ k_B คือ ค่าคงที่โบลท์ซมานน์ มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิในหน่วย เคลวิน

จากสมการ (2.2) และ (2.3)

$$p = nk_B T \quad \text{..... (2.4)}$$

สมการที่ (2.4) เป็นสมการกฎของแก๊ส สมการนี้แสดงให้เห็นว่าสำหรับแก๊สที่มีปริมาตรเท่ากัน ที่อุณหภูมิและความดันหนึ่ง จะประกอบขึ้นด้วยจำนวน โมเลกุลที่เท่ากันซึ่งตรงกับกฎของอโวกาโดร (Avogadro) เมื่อคูณสมการ (2.4) ด้วยปริมาตร V ทั้งสองด้านของสมการ

$$pV = Nk_B T \quad \text{..... (2.5)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุลในปริมาตร V (มีค่าเท่ากับ nV)

จากสมการที่ (2.5) มีกฎสำคัญที่เกี่ยวข้อง 2 ข้อ คือ

1. กฎของบอยล์ (Boyle's Law) ซึ่งกล่าวว่า “เมื่ออุณหภูมิคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผกผันกับความดันของแก๊ส”

2. กฎของชาร์ล (Charles's Law) ซึ่งกล่าวว่า “เมื่อความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผันตรงกับความดันของแก๊สในหน่วยของสัจบูรณ์” (absolute temperature)

จะเห็นว่ากฎของบอยล์และกฎของชาร์ล ได้กล่าวถึงผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อปริมาตรของแก๊ส โดยเมื่อปริมาณหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอีกปริมาณหนึ่งต้องคงที่ แต่ในทางปฏิบัติ ทั้งอุณหภูมิและความดันอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้พร้อมๆ กัน การศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณทั้งสองนี้พร้อมๆ กันที่มีต่อแก๊สทำให้เกิด กฎของแก๊ส (Gas's Law) ขึ้นโดยกฎนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของแก๊สเมื่อความดัน อุณหภูมิ ตลอดจน จำนวน โมลของแก๊สเปลี่ยนไป จากสมการ (2.5) สามารถเขียนใหม่เป็นสมการ

$$pV = \frac{M_g}{M} RT \quad \text{..... (2.6)}$$

หรือ
$$pV = nRT \quad \text{..... (2.7)}$$

เมื่อ M_g คือ มวลในหน่วยกรัม

M คือ มวลของโมเลกุลหนึ่งโมล(กรัมต่อโมล)

R คือ ค่านิยของแก๊ส มีค่าเท่ากับ $8.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

N คือ จำนวนโมลของแก๊ส

จากกฎของแก๊สนี้เห็นว่า ถ้าจำนวน โมลของแก๊สคงที่ ผลคูณระหว่างความดันและปริมาตรหารด้วยอุณหภูมิในหน่วยของสัจบูรณ์ของแก๊สก่อนหนึ่งๆ จะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ก็คือค่านิยของแก๊สนั่นเอง

2.1.3 การกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์

กฎการกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's distribution law) เป็นกฎที่เกิดจากการใช้หลักการทางทางสถิติประกอบกับกฎทางฟิสิกส์ เพื่ออธิบายการกระจายของพลังงานหรือความเร็วของอนุภาคในระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคความเร็วต่าง ๆ กฎนี้ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับความเร็วของโมเลกุลแก๊ส สามปริมาณคือ

ความเร็วที่น่าจะเป็นสูงสุด (most probable speed) $v_{\max}$

$$v_{\max} = \left(\frac{2k_B T}{m} \right)^{1/2} \quad \dots (2.8)$$

ความเร็วเฉลี่ย (average speed)

$$\bar{v} = \left(\frac{8k_B T}{\pi m} \right)^{1/2} \quad \dots (2.9)$$

ความเร็วรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square speed)

$$v_{\text{rms}} = \left(\frac{3k_B T}{m} \right)^{1/2} \quad \dots (2.10)$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ k_B เป็นค่าคงที่ โบลท์ซมานน์
 m เป็นมวลของโมเลกุลแก๊ส

ความเร็วที่น่าจะเป็นสูงสุดคือ ความเร็วของโมเลกุลแก๊สส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิ T ความเร็วเฉลี่ยคือความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลแก๊ส และความเร็วรากที่สองความเร็วกกำลังสองเฉลี่ย คือการนำค่าความเร็วของโมเลกุลแต่ละตัวยกกำลังสอง แล้วเฉลี่ยและนำค่าเฉลี่ยมาหาค่ารากที่สอง

2.1.4 ระยะปลอดการชนเฉลี่ย

โมเลกุลแก๊สในภาชนะปิดมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงและอาจชนกันเองก่อนชนผนังภาชนะ ถ้าพิจารณาโมเลกุลเฉพาะตัวโมเลกุลหนึ่งให้เป็นโมเลกุล A ระยะทางที่โมเลกุล A เคลื่อนที่ได้หลังการชนกับโมเลกุลอื่นแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาโมเลกุล B อีกตัวหนึ่งก็จะพบว่าระยะระหว่างการชนของ B ไม่เท่ากับของ A อย่างไรก็ตามเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างการชนของแต่ละโมเลกุลของแก๊สได้ เรียกระยะเฉลี่ยนี้ว่า “ระยะปลอดการชนเฉลี่ย” หรือ “ระยะปลอดการชน”

ค่าของระยะปลอดการชนขึ้นกับความดัน กล่าวคือแก๊สที่มีความดันมากจะมีระยะปลอดการชนสั้น เพราะที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แก๊สที่มีความดันมากจะมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงกว่าแก๊สที่มีความดันต่ำ สำหรับภาชนะปิดอันหนึ่งๆ ถ้าความดันของแก๊สในภาชนะปิดนั้นต่ำพอโมเลกุลของแก๊สก็จะสามารถเคลื่อนที่จากผนังด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งได้โดยไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่น เรียกความดันในสภาวะนี้ว่า “ช่วงความดันของโมเลกุลอิสระ (free molecule pressure region)” ซึ่งในสภาวะนี้ระยะปลอดการชนจะมีค่ายาวมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะที่ใส่แก๊ส ในทางกลับกันก็มีช่วงของความดันที่ระยะปลอดการชนมีค่าน้อยกว่าขนาดของภาชนะมาก กรณีเช่นนี้เมื่อโมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งโมเลกุลนั้นจะชนกับโมเลกุลอื่นหลายครั้ง หากแก๊สในสภาวะนี้กำลังไหลอยู่ในท่อ การไหลจะมีลักษณะเหมือนการไหลของของเหลวที่มีความหนืดสูงจึงเรียกความดันในช่วงที่มีระยะปลอดการชนสั้นๆ นี้ว่า “ช่วงหนืด (viscous region)” อย่างไรก็ตามค่าของระยะปลอดการชนของแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าแก๊สที่มีโมเลกุลเล็กกว่า แก๊สต่างชนิดที่มีความดันและอุณหภูมิเดียวกัน จะมีระยะปลอดการชนไม่เท่ากัน แก๊สที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีระยะปลอดการชนที่สั้นกว่าแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เพราะแก๊สขนาดใหญ่ทำให้พื้นที่ว่างลดน้อยลง

การคำนวณระยะปลอดการชนโดยสมมติว่าโมเลกุลของแก๊สมีการกระจายความเร็วแบบแมกซ์เวลล์ ให้ระยะปลอดการชนตามสมการ

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} \quad \dots (2.11)$$

เมื่อ λ คือ ระยะปลอดการชน

n คือความหนาแน่นโมเลกุล

σ คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุล

สำหรับอากาศซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแก๊สหลายชนิด จะสามารถคำนวณระยะอิสระเฉลี่ยจากสมการ

$$\lambda = \frac{6.6}{p} \quad \dots (2.12)$$

เมื่อ p เป็นความดันมีหน่วยเป็น Pa

λ มีหน่วยเป็น mm

2.2 สุญญากาศและสมบัติของระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะต่างกันไปขึ้นกับการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน โดยพื้นฐานระบบสุญญากาศจะมีส่วนประกอบหลัก คือ ภาชนะสุญญากาศ เครื่องสูบลสุญญากาศ มาตรวัดความดัน และท่อและวาล์ว ระบบหล่อเย็น ความจำเป็นของอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นกับการออกแบบและการใช้งาน

2.2.1 ความหมายของสุญญากาศ

“สุญญากาศ” หรือ “vacuum” เป็นคำในภาษากรีก หมายถึง “ที่ว่าง” ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วถ้ามีภาชนะปิดอันหนึ่งแล้วสูบ อากาศ แก๊ส และไอของสารต่างๆ ในภาชนะนั้นออกก็จะเรียกสภาวะในภาชนะหลังการสูบว่า “สุญญากาศ” ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความเป็นสุญญากาศของภาชนะหนึ่งๆ นั้นจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับการสูบลอากาศออกจากภาชนะนั้นว่าได้มากน้อยเพียงใด หากสูบลอากาศออกจากภาชนะได้มากความเป็นสุญญากาศของภาชนะนั้นก็ยิ่งมาก แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีระบบใดหรือภาชนะใดที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์ เพราะไม่มีเครื่องมือใดสามารถสูบลอากาศ แก๊ส และไอนชนิดอื่นๆ ออกจากระบบหรือภาชนะได้หมด

การสร้างสุญญากาศในภาชนะปิด ทำได้ด้วยการลดโมเมนตัมของแก๊สในภาชนะทำได้สองวิธีคือ โดยการถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับแก๊สที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในภาชนะสุญญากาศเพื่อให้แก๊สเคลื่อนที่ออกจากภาชนะ หรืออีกวิธีหนึ่งคือการจับแก๊สไว้ที่พื้นผิวหนึ่ง ทำให้แก๊สในภาชนะลดลง

วิธีแรกเป็นการเคลื่อนย้ายแก๊ส โดยแก๊สจะรับแรงกระทำจากวัสดุหรือสารที่เคลื่อนที่ได้แก่การเคลื่อนที่ของลูกสูบและใบพัดในเครื่องสูบล หรือการเคลื่อนที่ของไอของสารเหลวในเครื่องสูบลแพร่ไอ ส่วนวิธีที่สองเป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจับแก๊สของสารบางชนิด ซึ่งอาจทำได้ด้วยวิธีการทางเคมี (chemisorption) เช่นการระเหยไททาเนียมให้เคลือบบนพื้นผิวหนึ่งภายในภาชนะซึ่งฟิล์มของไททาเนียมนี้จะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สหลายชนิด ทำให้แก๊สจับติดกับผิวของไททาเนียม เป็นการลดปริมาณแก๊สที่มีอยู่ในระบบ หรือวิธีการทางฟิสิกส์ (physisorption) เช่นการใช้ความเย็นที่ผิวหนึ่งทำให้แก๊สเกิดการกลั่นตัว

2.2.2 องศาความเป็นสุญญากาศ

เมื่อสูบอากาศหรือแก๊สออกจากภาชนะปิด ปริมาณแก๊สและความดันภายในภาชนะปิดจะลดลง กล่าวได้ว่าภายในภาชนะปิดมีความเป็นสุญญากาศ ทั้งนี้ระดับความเป็นสุญญากาศจะมาก หรือน้อย แสดงด้วย “องศาความเป็นสุญญากาศ (degrees of vacuum)” จำแนกด้วยช่วงความดัน 6 ช่วง

ตารางที่ 2.2 การจำแนกองศาความเป็นสุญญากาศ ตามความดันภายในภาชนะปิด

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

2.2.3 หน่วยวัดความดัน

หน่วยของความดัน เป็น หน่วยของ “แรง/พื้นที่” ในระบบ SI คือ N/m^2 หรือ Pa มีการกำหนดค่าความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลเมื่ออุณหภูมิ 0°C เท่ากับ ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งความดันนี้มีค่าประมาณ 10^5 N/m^2 ซึ่งความดันขนาดนี้สามารถดันปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้สูง 760 mm และจากการที่ความดันอากาศสามารถดันให้ปรอทขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้นี้เอง จึงมีการประยุกต์ปรากฏการณ์นี้มาใช้เป็นหน่วยวัดความดันอีกหน่วยหนึ่ง โดยให้ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 10^5 N/m^2 มีค่าเท่ากับ 760 mm Hg นอกจากหน่วยวัดดังกล่าวแล้วยังมีการใช้หน่วยอื่นๆ ในการวัดความดันอีก เช่น

นอกจากหน่วยวัดดังกล่าวแล้วยังมีการใช้หน่วยอื่นๆ ในการวัดความดันอีก เช่น

หน่วย ทอร์รี่ (torr)	โดย 1 torr	เท่ากับ 1 mm Hg
หน่วย บาร์ (bar)	โดย 1 bar	เท่ากับ 750.06 mm Hg
หน่วย ไมครอน (micron)	โดย 1μ	เท่ากับ 10^{-3} torr

ในทางเทคนิคเกี่ยวกับสุญญากาศมักใช้หน่วย mm Hg หรือ torr หรือ bar ในการวัดความดัน มากกว่าหน่วย N/m^2 สำหรับปริมาณที่แสดงว่าระบบปิดหนึ่งๆ นั้นมีความเป็นสุญญากาศมากน้อยเพียงใดนั้นสามารถบอกได้ด้วยองศาแห่งสุญญากาศ ซึ่งสามารถจำแนกได้โดยการใช้ความดันภายในระบบนั้นๆ เป็นเกณฑ์

2.2.4 การคายแก๊ส

วัสดุต่างๆ โดยธรรมชาติจะจับแก๊สไว้ในเนื้อของวัสดุ หรือตามผิวของวัสดุ การจับแก๊สอาจเป็นในลักษณะการซึมซับทางฟิสิกส์ หรืออาจเป็นการซึมซับทางเคมี

การซึมซับทางฟิสิกส์ คือ การจับแก๊สของผิววัตถุด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการเคลื่อนไหวย่างไร้ระเบียบของไดโพล ปริมาณพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอะตอมแก๊สจับผิววัตถุจะใกล้เคียงกับพลังงานความร้อนแฝงในการกลั่นตัวของแก๊ส ส่วนการซึมซับทางเคมีแก๊สจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวภาชนะแล้วเกิดเป็นสารประกอบ

เมื่อนำวัสดุมาใช้เป็นส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ เมื่อสูบลูกสูบแก๊สออกจากระบบทำให้ความดันภายในระบบลดลง แก๊สที่ซึมซับอยู่ในเนื้อหรือผิวของวัสดุจะเริ่มหลุดออก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การคายแก๊ส (outgassing)” แก๊สที่เกิดจากการคายแก๊ส ทำให้ความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึงความดันสุดท้ายช้าลง การแก้ไขวิธีหนึ่ง คือ การอบภาชนะในขณะที่สูบลูกสูบแก๊สออก สำหรับระบบที่เป็นโลหะสเตนเลส การอบที่อุณหภูมิ 120-200 °C สามารถทำให้น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอน โมโนออกไซด์ และไฮโดรเจนหลุดออก โดยน้ำและไฮโดรเจน จะเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สที่ขับออก สำหรับระบบที่เป็นแก้ว การอบจะต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่าสเตนเลส คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 450 °C เนื่องจากน้ำสามารถขับออกจากเนื้อแก้วได้ยากกว่า

แก๊สที่คายออกมาจากผิวของภาชนะสุญญากาศนอกเหนือจากแก๊สที่เกิดจากการซึมซับของผนังดังกล่าวข้างต้น ยังประกอบด้วยแก๊สที่แพร่ผ่านจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านในของภาชนะ (diffusion) และแก๊สที่ผ่านจากผิวด้านนอกสู่ด้านในด้วยกระบวนการซึมผ่าน (permeation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เริ่มจากผนังด้านนอกซึมซับแก๊สต่อจากนั้นแก๊สที่ซึมซับไว้เกิดการซึมผ่านมาเป็นแก๊สที่ซึมซับอยู่ทางผนังด้านในแล้วจึงคายออกในภาชนะที่เป็นสุญญากาศ

2.2.5 ปริมาณของแก๊สและแรงขับ

ปริมาณของแก๊ส (quantity of gas) เป็นผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของแก๊สที่ปรากฏที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบนิยามของปริมาณแก๊สนี้กับกฎแก๊สจะเห็นได้ว่าค่าของปริมาณแก๊สนี้แปรผันโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของแก๊ส

นอกจากปริมาณของแก๊สแล้วยังมีการกำหนดปริมาณที่เรียกว่า “แรงขับ (throughput)” ขึ้น เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยกำหนดว่า ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แรงขับ ก็คือปริมาณของแก๊สที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของส่วนของระบบสุญญากาศในหนึ่งหน่วยเวลา



รูปที่ 2.2 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ

ในรูปที่ 2.2 แก๊สจะไหลจากซ้ายไปขวาได้ ความดันทางซ้ายจะต้องมากกว่าความดันทางขวา ถ้าสามารถวัดปริมาณแก๊สที่ผ่านระนาบ A ได้โดยตรงว่ามีค่าเท่าใดในช่วงเวลาหนึ่งๆ ก็สามารถจะคำนวณค่าแรงขับได้ โดยนำจำนวนของแก๊สนั้นหารด้วยช่วงเวลาที่ใช้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดปริมาณของแก๊สได้โดยตรง ปริมาณที่สามารถวัดได้คือความดันที่จุด A และปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \frac{PV}{t} \quad \text{..... (2.13)}$$

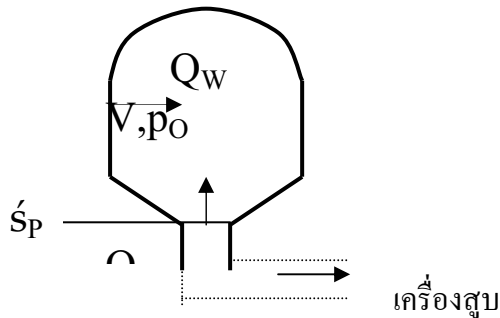
เมื่อ P เป็นความดันที่จุด A

V เป็นปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในเวลา t วินาที

Q เป็นแรงขับ มีหน่วยเป็น $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

2.2.6 ต้นกำเนิดแก๊สตกค้างในภาชนะสุญญากาศ

เมื่อสูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ความดันแก๊สในภาชนะจะลดลงจนถึงระดับหนึ่งซึ่งจะไม่ลดลงต่อไปอีก สาเหตุที่ความดันในภาชนะไม่สามารถลดลงอีกเพราะภายในภาชนะมีแก๊สส่วนหนึ่งย้อนกลับเข้าสู่ภาชนะตลอดเวลา ต้นกำเนิดของแก๊สอาจแบ่งเป็นสามชนิด คือ (รูปที่ 2.3) แก๊สที่ไหลย้อนกลับจากเครื่องสูบ (Q_B) แก๊สที่คายออกจากผนัง (Q_W) และแก๊สที่เกิดจากการรั่วไหล (Q_L) แก๊สที่เกิดจากการรั่วไหลนี้หมายความว่ารวมถึงแก๊สที่ซึมผ่านผนัง



รูปที่ 2.3 แก๊สที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

สมมติว่าการไหลของแก๊สเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ซึ่งจากกฎของบอยล์ผลคูณ pV จะคงที่เมื่ออุณหภูมิคงที่ ดังนั้น

$$\frac{d(pV)}{dt} = 0 \quad \text{..... (2.14)}$$

$$p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{..... (2.15)}$$

แทนค่านิยามของ S_p' ลงในสมการ จะได้

$$pS_p' dt = Vdp \quad \text{..... (2.16)}$$

สำหรับระบบตามรูปที่ 2.3 เราจะเพิ่มแรงขับของแก๊สที่ไหลเข้าระบบ รวมกับเทอมของ pS_p' ซึ่งเป็นแรงขับแก๊สออกนอกระบบ ทำให้สมการ 2.14 เปลี่ยนเป็น

$$-Vdp = dt(S_p'p - Q_w - Q_L - Q_B) \quad \text{..... (2.17)}$$

2.2.7 ความดันสุดท้ายและอัตราสูบ

การสูบลมออกจากกระบอกสูบในที่สุดความดันจะลดลงถึง ความดันสุดท้าย p_U (ultimate pressure) ที่ความดันสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงของความดันในระบบเท่ากับศูนย์ $dp/dt = 0$ ทำให้ได้

$$P_u S'_p = Q_w + Q_L + Q_B \quad \text{..... (2.18)}$$

ถ้าให้ Q_T เท่ากับผลรวมของ Q_w , Q_L และ Q_B

$$S'_p = \frac{Q_T}{P_U} \quad \text{..... (2.19)}$$

ถ้าเรากำหนดให้ S_e เป็นอัตราสูบที่เป็นผลรวมของแก๊ส จากต้นกำเนิดต่างๆ ที่เข้าสู่ระบบกับแก๊สที่ไหลออกด้วยอัตราสูบของเครื่องสูบ ซึ่งเราจะเรียกว่าปริมาณนี้ว่า อัตราการระบายออก (speed of exhaust) ดังนั้น S_p จะเป็นแรงขับยังผลซึ่งเท่ากับผลต่างของแรงขับในการสูบแก๊สและแรงขับแก๊สที่เข้าสู่ระบบ หรือ

$$S_e p = S'_p p - Q_T = S'_p (p - p_u) \quad \text{..... (2.20)}$$

และ

$$S_e = S'_p \left(1 - \frac{P_U}{P} \right) \quad \text{..... (2.21)}$$

ควรตั้งข้อสังเกตว่า S_e ขึ้นกับความดันและมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ความดันสุดท้าย โดยทั่วไปปริมาณ Q_L และ Q_w เป็นปริมาณที่สามารถควบคุมได้ด้วยการออกแบบระบบที่เหมาะสม ดังนั้นความดันสุดท้ายจึงขึ้นกับ Q_B จะเห็นว่าปริมาณ Q_L เป็นปริมาณที่ค่อนข้างที่ ไม่ว่าจะเกิดขึ้นจากการรั่วหรือจากการซึมของแก๊ส ส่วน Q_B และ Q_w จะเปลี่ยนแปลงช้าๆ ตามเวลา จึงอาจสมมติว่าปริมาณเหล่านี้เป็นค่าคงที่ และจากการที่อัตราสูบ S'_p คงที่ เมื่อ อินทิเกรตสมการ 2.17 จะได้

$$p - p_u = (p_0 - p_u) \exp \left(\frac{-S'_p}{V} \right) \quad \text{..... (2.22)}$$

เมื่อ p_0 คือ ความดันที่เวลา $t = 0$

เนื่องจากว่า ความดัน p_0 มีค่ามากกว่า p_U มากดังนั้นจึงเขียนสมการ (2.22) เป็น

$$p = p_0 \exp \left(\frac{-S'_p}{V} \right) + p_U \quad \text{..... (2.23)}$$

ปริมาณ V/S'_p ในสมการที่ 2.23 เป็นหน่วยของเวลา เรียกว่าเวลาคงที่ของระบบ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ τ เวลาคงที่เป็นปริมาณที่ควรจะต้องทราบของระบบสุญญากาศ ซึ่งบางครั้งเราใช้เป็นตัวบ่งชี้การกระทำการของระบบ

2.2.8 ช่วงเวลาการสูบ

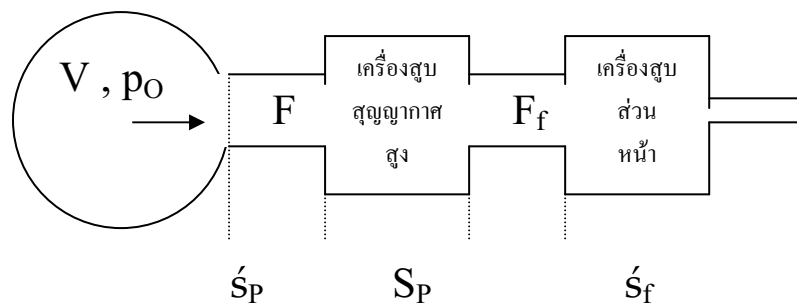
ถ้าต้องการคำนวณเวลาที่ใช้ในการสูบน้ำอากาศ เพื่อให้ความดันลดลงจากความดันหนึ่ง ไปสู่อีกความดันหนึ่ง จะทำได้โดยการอินทิเกรตสมการ 2.5 ซึ่งจะได้ช่วงเวลาในการสูบน้ำอากาศคือ

$$t_2 - t_1 = \frac{V}{S_p'} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad \text{..... (2.24)}$$

โดย p_1 เป็นความดันเริ่มต้นที่เวลา t_1 และ p_2 เป็นความดันหลังจากสูบน้ำอากาศแล้วที่เวลา t_2 ส่วน S_p' เป็นอัตราสูบที่ช่องทางออกของภาชนะสุญญากาศ สมมติว่าคงที่สำหรับระบบสุญญากาศสูง ระบบจะประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำอากาศไม่น้อยกว่าสองเครื่อง เวลาในการลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะเปลี่ยนไป

$$t_2 - t_1 = V \left[\frac{1}{S_p'} \ln \left(\frac{p_f}{p_2} \right) + \frac{1}{S_f'} \ln \left(\frac{p_1}{p_f} \right) \right] \quad \text{..... (2.25)}$$

เมื่อ P_f คือความดันระดับกลางที่เกิดจากการใช้เครื่องสูบน้ำส่วนหน้าเพียงตัวเดียว และ S_f' เป็นอัตราสูบของเครื่องสูบน้ำที่บริเวณปลายท่อทางเข้าของเครื่องสูบน้ำส่วนหน้าหรือตรงทางออกของเครื่องสูบน้ำสุญญากาศสูง



รูปที่ 2.4 แผนภาพส่วนประกอบของระบบสุญญากาศสูง

2.2.9 อัตราการรั่ว

ระบบสุญญากาศที่ดีนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถรักษาสภาวะสุญญากาศให้ได้ นานที่สุด แต่ในทางปฏิบัติพบว่าภาชนะสุญญากาศของระบบสุญญากาศทั่วไปนั้น ไม่ว่าจะออกแบบให้ สมบูรณ์อย่างไรก็ตามมักพบว่าไม่สามารถรักษาสภาวะสุญญากาศไว้ให้คงที่ได้ ทั้งนี้เมื่อเวลาผ่านไป พบว่าความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดการรั่ว (leak) ขึ้น ภายในระบบสุญญากาศนั้น

การรั่วในสุญญากาศนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

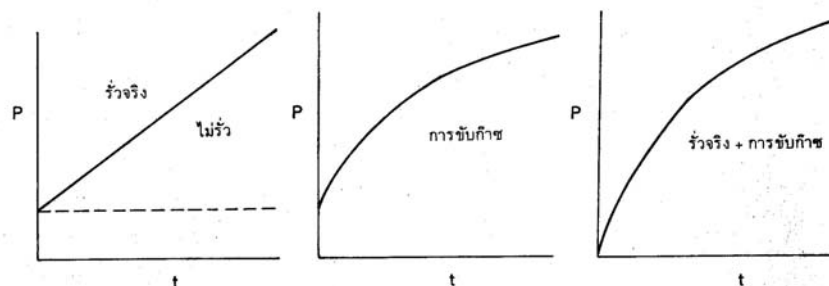
1. การรั่วจริง (real leak) หมายถึง การที่มีอากาศจากภายนอกภาชนะสุญญากาศไหล เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ซึ่งอาจเกิดจากการมีรูรั่ว หรือ ช่องเล็กๆ บริเวณรอยเชื่อม ทำให้มีอากาศจาก ภายนอกไหลเข้าสู่ภาชนะได้

2. การรั่วเสมือน (virtual leak) หมายถึง การที่แก๊สภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งอาจจะ ยึดติดที่ผนังหรือฝังอยู่ในเนื้อของภาชนะสุญญากาศ เกิดการหลุดออกจากผนังหรือเนื้อของภาชนะ สุญญากาศ

ถ้าภาชนะสุญญากาศมีปริมาตร V (หน่วยเป็น l) ที่ความดัน P (หน่วยเป็น μ) อัตรา ความเร็วเครื่องสูบทั้งหมดจะมีค่าเป็น S (หน่วยเป็น $l \cdot s^{-1}$) ถ้าตัดภาชนะสุญญากาศออกจากเครื่องสูบ สุญญากาศ (ด้วยวาล์วแยกส่วน) พบว่าความดันภายในภาชนะจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีการรั่วจากภายนอก โดยอัตราการเพิ่มความดันภายในภาชนะจะไม่สูงไปกว่า $S \cdot P / V$ (หน่วยเป็น $\mu \cdot s^{-1}$)

ถ้าภาชนะสุญญากาศมีปริมาตร 100 l และความดันเพิ่มขึ้นในอัตรา $10^{-3} \mu \cdot s^{-1}$ อัตราการ รั่วของแก๊สเข้าสู่ภาชนะจะมีค่าเท่ากับ $10^{-1} l \cdot \mu \cdot s^{-1}$ ถ้าอัตราการเพิ่มความดันของอีกภาชนะหนึ่งซึ่งมี ปริมาตร 100 cm^3 เท่ากับกรณีแรก อัตราการรั่วของแก๊สเข้าภาชนะจะมีค่าเพียง $10^{-4} l \cdot \mu \cdot s^{-1}$ จะเห็นได้ว่าใน กรณีที่อัตราการเพิ่มความดันคงที่นั้น ขนาดของรอยรั่วจะน้อยในปริมาณเล็กมากกว่าภาชนะที่มีปริมาตร ใหญ่กว่า ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ “อัตราการไหลรั่วของมวล (mass flow leak rate)” เพราะค่านี้จะไม่ ขึ้นอยู่กับปริมาตรของภาชนะสุญญากาศ

สำหรับหน่วยวัด $l \cdot \mu \cdot s^{-1}$ นิยามว่า เป็นความรั่วที่ทำให้ปริมาตร 1 ลิตร (l) มีความดัน เพิ่มขึ้น 1μ ในเวลา 1 วินาที (s)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความดันกับเวลาของภาชนะสุญญากาศ

2.3 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศอาจมีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ขึ้นกับการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน แต่โดยพื้นฐานแล้วระบบสุญญากาศจะมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ ภาชนะสุญญากาศ ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ระบบท่อเชื่อมต่อและอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น วาล์ว (valve) ที่ดักไอ (trap) ฯลฯ ความจำเป็นและความต้องการอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นกับการออกแบบและการใช้งาน ซึ่งแต่ละส่วนมีลักษณะดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ (chamber) เป็นภาชนะที่ต้องการสร้างภาวะสุญญากาศ ปกติแล้วภาชนะสุญญากาศจะประกอบด้วย ตัวถัง (body) รูปร่างต่างๆ กันตามต้องการ เช่น ทรงกระบอก ทรงเหลี่ยม ฯลฯ แผ่นฐาน (base plate) แผ่นปิดบน (top plate) หน้าแปลนแบบและขนาดต่างๆ ตามต้องการ เช่น หน้าแปลนสำหรับติดตั้งมาตรวัดความดัน หน้าแปลนสำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้า หน้าแปลนสำหรับติดกระจกเพื่อสังเกตปรากฏการณ์ในภาชนะสุญญากาศ ฯลฯ



รูปที่ 2.6 ลักษณะของภาชนะปิดของเครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบต่างๆ

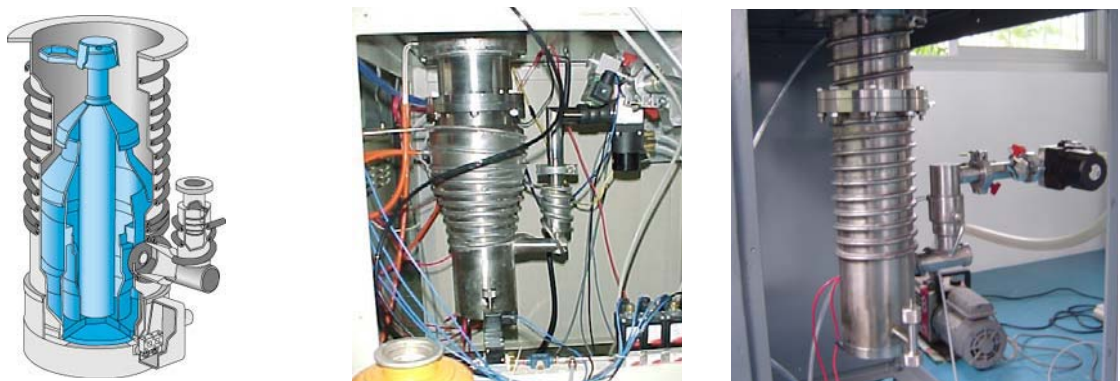
2. เครื่องสูบลูญญากาศ (vacuum pump) สำหรับสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศมีหลายแบบสำหรับระบบพื้นฐานที่ต้องการความดันในช่วง 10^{-7} - 10^{-5} mbar นั้นจะประกอบด้วยเครื่องสูบลูญอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่

2.1 เครื่องสูบลูญกลโรตารี (rotary mechanical pump) เป็นเครื่องสูบลูญที่อาศัยหลักการทํางานเชิงกล ที่สามารถลดความดันจากบรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar ปกติใช้เพื่อสำหรับสร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้นให้กับภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ยังใช้เป็นเครื่องสูบลูญท้าย (backing pump) ให้กับเครื่องสูบลูญแบบแพร่ไอด้วย

2.2 เครื่องสูบลูญแบบแพร่ไอ (diffusion pump) เป็นเครื่องสูบลูญที่อาศัยหลักการแพร่ของไอ เครื่องสูบลูญนี้ไม่สามารถทํางานที่ความดันบรรยากาศได้ ดังนั้นก่อนที่เครื่องสูบลูญจะทํางานได้ต้องใช้เครื่องสูบลูญกลโรตารีลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจนมีความดันประมาณ 10^{-2} mbar ก่อน (เรียกว่าการสูบลูญแบบหยาบ) เครื่องสูบลูญนี้จะทํางานได้ในความดันช่วง 10^{-2} - 10^{-7} mbar



รูปที่ 2.7 เครื่องสูบลูญกลโรตารี



รูปที่ 2.8 เครื่องสูบลูญแบบแพร่ไอ

3. มาตรวัดความดัน (pressure gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ มาตรวัดความดันจะมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะอาศัยหลักการในการวัดความดันต่างกัน โดยพื้นฐานแล้ว ระบบสุญญากาศจะประกอบด้วยมาตรวัดความดัน 2 ชนิด ได้แก่

3.1 มาตรวัดความดันต่ำ วัดความดันได้ในช่วง บรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึง ความดันประมาณ 10^{-3} mbar เช่น มาตรวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) อาศัยหลักการพาความร้อนของแก๊ส โดยถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) ก็จะสามารถพาความร้อนได้ดี แต่ถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การพาความร้อนก็จะไม่ดี

3.2 มาตรวัดความดันสูง วัดความดันน้อยกว่า 10^{-2} mbar เช่น มาตรวัดแบบเพนนิ่ง (Penning gauge) อาศัยการนำไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวของแก๊ส ถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) จะเกิดการแตกตัวของแก๊สมากทำให้น้ำไฟฟ้าได้ดี ในทางกลับกันถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การแตกตัวของแก๊สก็จะน้อยทำให้น้ำไฟฟ้าไม่ดี

4. ท่อและวาล์ว (pipe and valves) ท่อจะทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์แต่ละส่วนเข้าของระบบ ด้วยกัน ส่วนวาล์วจะทำหน้าที่ปิด/ตัด/แยกส่วนการทำงาน ทั้งนี้โดยพื้นฐานท่อและวาล์วแต่ละส่วนจะมี ลักษณะคล้ายกัน แต่จะมีชื่อเรียกต่างกันตามหน้าที่ของอุปกรณ์นั้น ได้แก่

4.1 ท่อหยาบ (roughing valve) และวาล์วท้าย (backing valve) อุปกรณ์ชุดนี้จะเป็นท่อ และวาล์ว ชุดที่ต่อจากภาชนะสุญญากาศมายังเครื่องสูบลมโรตารี เพื่อทำหน้าที่ในการนำแก๊สที่เครื่องสูบลมโรตารีสูบลมออกในช่วงแรก (ที่ความดันบรรยากาศ) เพื่อให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดลง

4.2 ท่อท้าย (backing line) และ วาล์วท้าย (backing valve) อุปกรณ์นี้เป็นท่อและวาล์ว ที่ต่อจากเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอมายังเครื่องสูบลมโรตารี ทำหน้าที่ในการนำแก๊สที่เครื่องสูบลมแบบแพร่ไอ สูบลมออกจากภาชนะสุญญากาศแล้วส่งต่อไปยังเครื่องสูบลมโรตารีเพื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศเพื่อให้ ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดลงตามต้องการ

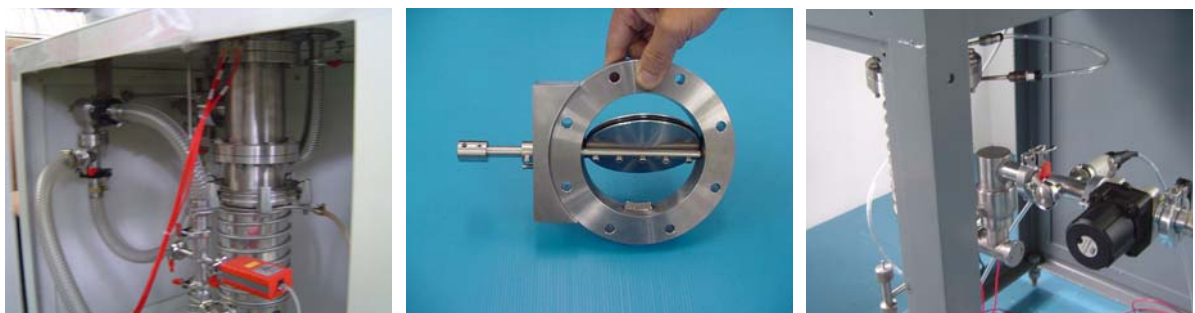
4.3 วาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) หรือ วาล์วแยกส่วน (isolation valve) เป็น วาล์วที่ทำหน้าที่ในการแยกส่วนของบริเวณสุญญากาศสูงและเครื่องสูบลมสุญญากาศออกจากกัน

4.4 วาล์วปล่อย (release valve) เป็นวาล์วที่ทำหน้าที่สำหรับปล่อยอากาศจากภายนอก เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (เป็นการเพิ่มความดันภายในภาชนะสุญญากาศ) ทำให้ความดันภายในภาชนะ สุญญากาศเท่ากับภายนอก เพื่อเปิดภาชนะสุญญากาศ

5. ระบบหล่อเย็น (cooling system) ใช้ระบายความร้อนของเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอและทำ ความเย็นบริเวณปากเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำมันของเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอมีการ ย้อนกลับเข้าไปยังภาชนะสุญญากาศ ปกติจะใช้น้ำเย็นเป็นตัวระบายความร้อน



รูปที่ 2.9 มาตรวัดความดันแบบต่างๆ



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างท่อและวาล์วของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ

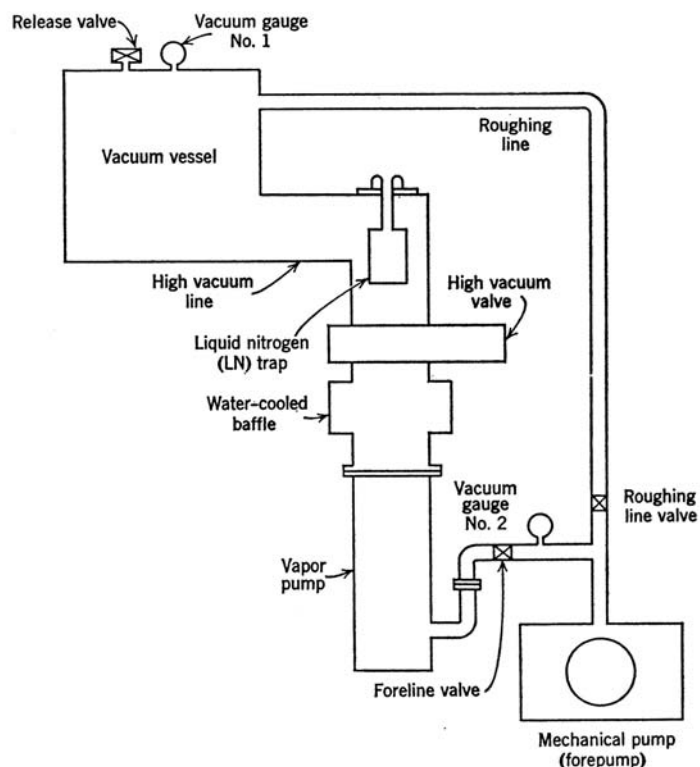


รูปที่ 2.11 ระบบหล่อเย็น

ตัวอย่างของระบบสุญญากาศในระดับเบื้องต้นอาจแยกพิจารณาได้ตามช่วงของความดันในการทำงาน กล่าวคือ ถ้าต้องการความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-1} mbar ทำได้โดยต่อระบบกับเครื่องสูบลมโรตารี (รูปที่ 2.12) แต่ถ้าต้องการความดันต่ำกว่านั้นในช่วง 10^{-7} - 10^{-5} mbar ต้องใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอร่วมกับเครื่องสูบลมโรตารี (รูปที่ 2.12) จุดแตกต่างของระบบสุญญากาศทั้งสองคืออุปกรณ์ที่ใช้ ระบบที่ต้องการความดันต่ำมากๆ (หรือมีความเป็นสุญญากาศสูง) จะมีท่อและวาล์วมากกว่า รูปที่ 2.12 แสดงผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่ให้ความดันต่ำกว่า 10^{-5} mbar ท่อหยابในระบบเป็นท่อที่ต่อเชื่อมระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบลมโรตารีโดยตรง โดยก่อนที่จะใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอต้องใช้เครื่องสูบลมโรตารีจนความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 10^{-3} mbar ก่อน เหตุนี้จึงเรียกเครื่องสูบลมโรตารีในระบบนี้ว่า “เครื่องสูบบหยاب (roughing pump)”

ขณะที่เครื่องสูบลมโรตารีทำงานต้องเปิดวาล์วหยابและปิดวาล์วท้าย จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 10^{-2} - 10^{-3} mbar ก่อนจึงสูบบอากาศด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ขณะนี้ต้องปิดวาล์วหยاب แต่เปิดวาล์วท้ายและวาล์วสุญญากาศสูง (หรือวาล์วแยกส่วน เพราะวาล์วนี้อาจแยกภาชนะสุญญากาศออกจากส่วนที่เหลือของระบบ) อากาศที่เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบบออกจากภาชนะจะไปรวมกันอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ซึ่งจะถูกสูบบออกไปโดยเครื่องสูบลมโรตารีอีกต่อหนึ่ง จึงเรียกเครื่องสูบลมโรตารีที่ทำหน้าที่นี้ว่า เครื่องสูบบท้าย (backing pump) และเรียกท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอกับเครื่องสูบบท้ายว่า ท่อท้าย เรียกวาล์วปิด-เปิดท่อท้ายว่า วาล์วท้ายระบบสุญญากาศ บางระบบจะแยกเครื่องสูบลมโรตารีที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบบหยابและเครื่องสูบบท้ายออกจากกัน แต่บางระบบก็ใช้เครื่องสูบบเพียงตัวเดียวในการทำหน้าที่ทั้งสอง ระบบ วาล์วปล่อย ในที่รูป 2.13 ทำหน้าที่ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะทำให้ความดันภายในภาชนะเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยจะเปิดวาล์วปล่อยนี้เมื่อไม่ต้องการให้สภาพภายในภาชนะไม่เป็นสุญญากาศ

สำหรับเครื่องมือวัดความดันในภาชนะสุญญากาศเรียกว่าเกจสุญญากาศ (vacuum gauge) ซึ่งระบบสุญญากาศในรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยเครื่องวัด 2 ตัว คือ ตัวที่หนึ่งต้องมีความสามารถวัดความดันต่ำได้ เพราะเครื่องวัดนี้ต้องวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} mbar ส่วนเกจตัวที่สองจะทำหน้าที่วัดความดันในท่อส่วนหน้าซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอกับเครื่องสูบลมโรตารี



รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} mbar

2.4 เครื่องสูบลสุญญากาศ

เครื่องสูบลสุญญากาศอาจจำแนกตามช่วงความดันในการทำงานเป็นสองกลุ่มด้วยกัน คือ (1) เครื่องสูบที่สามารถสูบอากาศที่ความดันบรรยากาศได้ เช่น เครื่องสูบลโรตารี เครื่องสูบซึมซับ เครื่องสูบลสุคแอนด์คลอว์ เป็นต้น (2) เครื่องสูบที่เริ่มทำงานที่ความดันต่ำกว่าความดันของบรรยากาศ เช่น เครื่องสูบลแบบแพรว์ไอ เครื่องสูบลรูท และเครื่องสูบลเทอร์โบโมเลกูลาร์ เป็นต้น เครื่องสูบลกลุ่มนี้จึงไม่สามารถทำงานตามลำพังได้จะต้องใช้ร่วมกับเครื่องสูบลในกลุ่มที่หนึ่ง โดยใช้เครื่องสูบลในกลุ่มหนึ่งสูบลอากาศออกก่อนจนความดันลดลงอยู่ในระดับที่เหมาะสม ส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องสูบลโรตารี และเครื่องสูบลแบบแพรว์ไอเท่านั้น

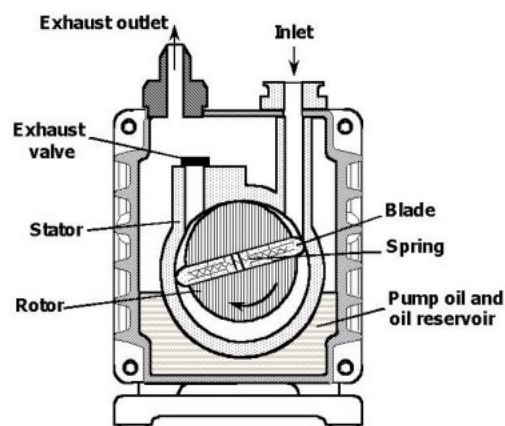
2.4.1 เครื่องสูบลโรตารี

บุคคลสำคัญที่ได้คิดค้นและพัฒนาเทคนิคทางด้านเครื่องสูบลสุญญากาศคือ โวล์ฟแกง เกเด (Wolfgang Gaede) เขาได้คิดค้นประดิษฐ์ เครื่องสูบลโรตารีชนิดซิลนํ้ามันในปี คศ 1907 ประดิษฐ์ เครื่องสูบลลากเชิงโมเลกุล (molecular drag) ในปี คศ 1912 และเครื่องสูบลที่เขาได้ออกแบบประดิษฐ์ ขึ้นยังคงมีความสำคัญอย่างยิ่งทางด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ ยกเว้นเครื่องสูบลลากเชิงโมเลกุล ซึ่งได้พัฒนาไปเป็นเครื่องสูบลเทอร์โบโมเลกูลาร์

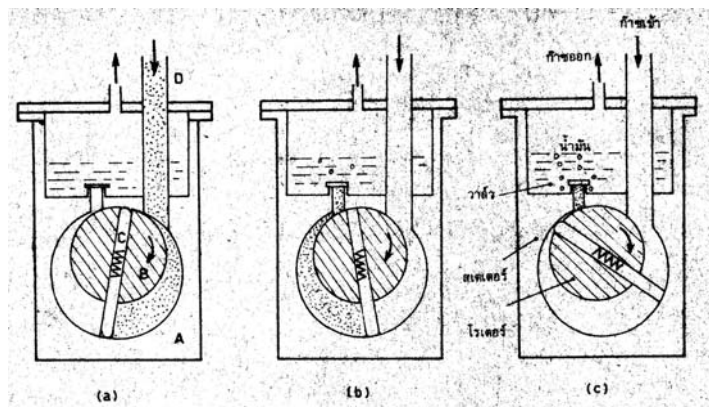
เครื่องสูบน้ำชนิดน้ำมันที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นเครื่องสูบน้ำที่ได้มีการปรับปรุงจากเครื่องสูบน้ำที่ เกเด ได้คิดสร้างขึ้นในปี คศ 1905 รูปที่ 2.13 เป็นภาพตัดขวางของเครื่องสูบน้ำชนิดน้ำมันภายในเครื่องประกอบด้วยโลหะทรงกระบอก B ซึ่งเรียกโรเตอร์ ซึ่งจะหมุนอยู่ในช่องทรงกระบอก A ซึ่งเรียกสเตเตอร์ โดยแกนหมุนของ B จะเยื้องแกนกลางทรงกระบอก A ทำให้ผิวด้านหนึ่งของโรเตอร์เกือบชิดกับผิวของสเตเตอร์

โรเตอร์จะมีช่องในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งสอดใบพัดสำหรับกวาดสองอัน โดยมีสปริงอยู่ตรงกลางระหว่างใบพัดทั้งสอง สปริงจะดันใบพัดให้ชิดกับผนังของสเตเตอร์ตลอดเวลา ผนังสเตเตอร์นี้จะจมในน้ำมัน ซึ่งน้ำมันจะทำหน้าที่เป็นซีลและเป็นสารหล่อลื่นไปในตัว

เมื่อโรเตอร์หมุน อากาศจะเข้าที่ช่องทางเข้า และถูกอัดด้วยใบพัดที่ติดกับโรเตอร์ในแต่ละรอบการหมุนของโรเตอร์ จะเกิดการอัดอากาศสองครั้ง ความดันทางด้านใต้ของวาล์วช่องทางออกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความดันนี้สูงกว่าความดันของบรรยากาศอากาศจะดันผ่านวาล์วทางออก และน้ำมันออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2.13 เครื่องสูบน้ำชนิดน้ำมัน



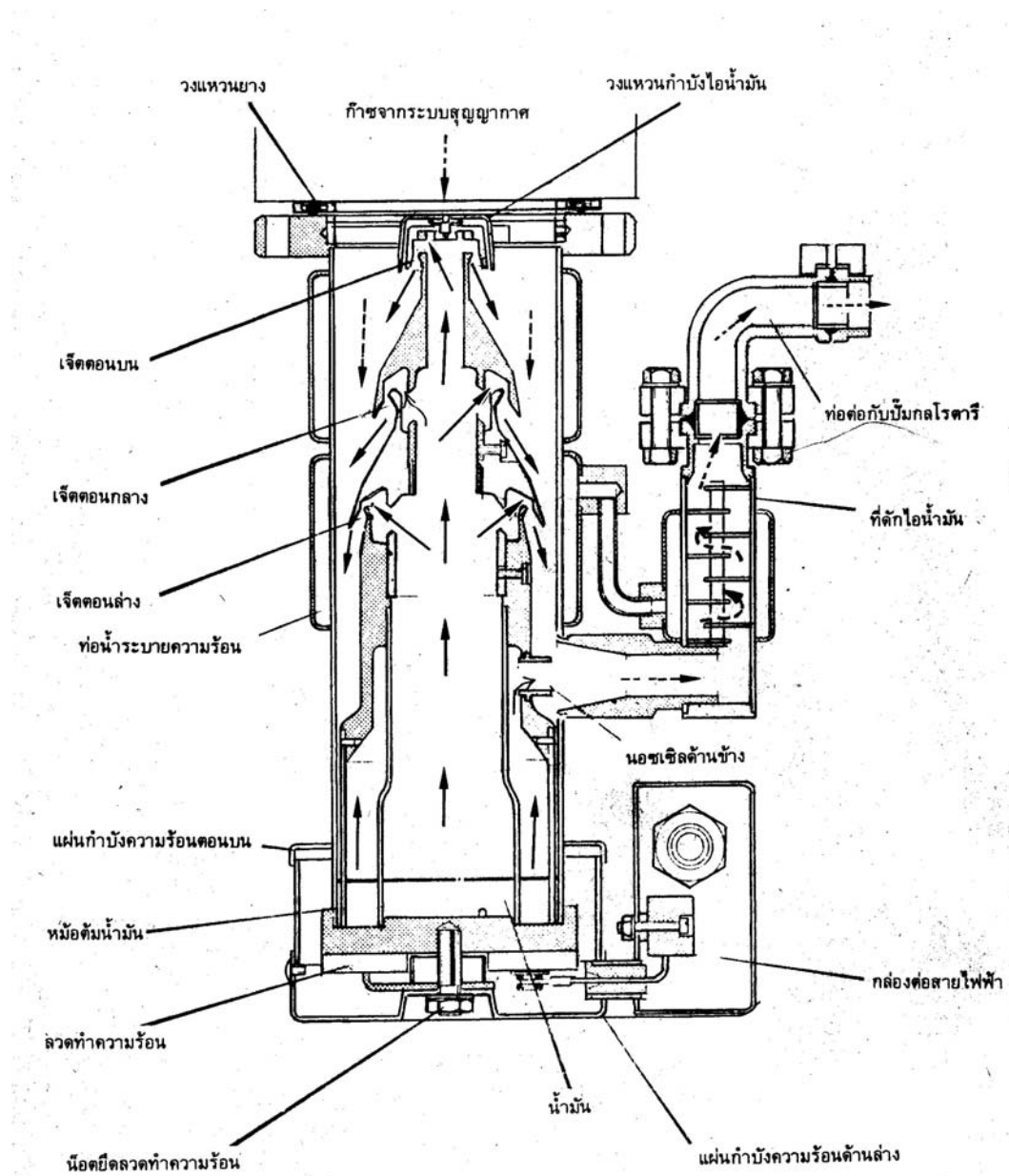
รูปที่ 2.14 การทำงานของเครื่องสูบน้ำชนิดน้ำมัน

2.4.2 เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นโดย เกเคและแลงมัวร์ (I.Langmuir) ในเวลาที่ใกล้เคียงกันคือเกเค คิดที่เยอรมันในปี คศ 1915 และแลงมัวร์คิดที่อเมริกาในปี คศ 1916 เครื่องสูบบชนิดนี้เป็นเครื่องสูบบที่ใช้สูบบอากาศหรือแก๊สที่ความดันหนุนหลังประมาณ 10^{-2} mbar เครื่องสูบบนี้ประกอบด้วย ส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.15 ตัวเครื่องสูบบจะมีท่อสำหรับให้น้ำเย็นไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน ด้านใต้เครื่องสูบบเป็นรูปทรงกระบอก ด้านบนเป็นช่องเปิดซึ่งเป็นทางเข้าของเครื่องสูบบที่ผนังของตัวเครื่องสูบบจะมีท่อสำหรับให้น้ำเย็นไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน ด้านใต้เครื่องสูบบจะมีลวดความร้อนไฟฟ้า ภายในเครื่องสูบบนี้จะมีท่อเป็นปล่องเพื่อนำไอของเหลวสู่ช่องด้านข้างซึ่งมีลักษณะเป็นช่องวงแหวน ซึ่งเราจะเรียกว่าหัวฉีด ปล่องและหัวฉีดอาจมีได้หลายชั้น หรือหลายตอน เช่นเครื่องสูบบที่มีปล่องสามชั้นตามรูปเรียกเครื่องสูบบสามตอน

หลักการทำงานของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ คือ น้ำมันของเครื่องสูบบซึ่งอยู่ที่ก้นท่อเหล็กรูปทรงกระบอก จะถูกเผาให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าจนเดือด น้ำมันจะระเหยกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องท่อกลวง ไอน้ำมันจะปะทะกับช่องเจ็ตที่ระดับต่างๆ กัน ซึ่งจะทำให้ไอ น้ำมันเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ และพุ่งออกมาด้วยความเร็วเหนือเสียง โดยโมเลกุลของไอ น้ำมันจะชนและพาโมเลกุลแก๊สที่อยู่บริเวณข้างเคียงเจ็ตไปด้วย โมเลกุลเหล่านี้จะมีความเร็วในทิศทางลงสู่ด้านล่างของเครื่องสูบบ ประกอบกับส่วนบนของท่อทรงกระบอกถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อไอ น้ำมันสูญเสียพลังงานความร้อนทำให้พลังงานจลน์ลดลง มันจะตกลงมาเกิดการปะทะกับโมเลกุลของแก๊สที่บริเวณตอนบน ทำให้โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง จึงดูเหมือนว่าหยดไอ น้ำมันปริมาณมากกว่าโมเลกุลของแก๊สลงมาเป็นจังหวะพร้อมๆ กัน โมเลกุลของแก๊สที่มาออกอยู่ข้างล่างจะทำให้ความดันของแก๊สส่วนล่างมากกว่าส่วนบน จากนั้นเครื่องสูบบกลโรตารีจะสูบบแก๊สเหล่านี้ออกจากเครื่องสูบบแบบแพร่ไออีกต่อหนึ่ง

เครื่องสูบบแบบแพร่ไอในรูปที่ 2.15 เป็นเครื่องสูบบที่มีช่องเจ็ต 3 ชั้น (3 stages) ด้านบนต่ออยู่กับภาชนะสุญญากาศโดยมีจาน (guard ring) ทำหน้าที่กำบังมิให้ไอ น้ำมันเคลื่อนที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ หรือที่เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ไหลย้อนกลับ (back streaming) จึงต้องมีแผ่นตะแกรง (baffle) สำหรับคอยดักไอ น้ำมันไว้ แก๊สจะถูกสูบบออกทางข้อต่อท้าย (backing line) ซึ่งต่อกับเครื่องสูบบกลโรตารี



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

2.5 การวัดความดันในระบบสุญญากาศ

ความดันในระบบสุญญากาศแบ่งออกเป็นระดับองศาแห่งสุญญากาศหลายระดับ การที่จะทราบความดันในระบบสุญญากาศ จะต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดความดัน คือ มาตรวัดความดัน ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมในการใช้งานกับช่วงความดันและชนิดของแก๊สที่แตกต่างกัน ทั้งนี้มาตรวัดความดันอาจจำแนกออกได้เป็นสองกลุ่มกลุ่มคือ (1) มาตรวัดความดันรวม เป็นมาตรที่ใช้วัดความดันที่เกิดจากแก๊สโดยรวม เช่น ความดันอากาศ และ (2) มาตรวัดความดันส่วนย่อย เป็นมาตรที่ใช้วัดความดันที่เกิดจากส่วนผสมใดส่วนผสมหนึ่งในแก๊ส เช่น ความดันส่วนย่อยของออกซิเจนในอากาศ เครื่องมือที่ใช้วัดความดันส่วนย่อยจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ส่วนผสมของแก๊สตัวอย่างของเครื่องมือนี้คือ แมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) สำหรับในบทนี้เราจะกล่าวถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วัดความดันรวม มาตรวัดความดันจะมีอยู่หลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบมีความเหมาะสมที่จะวัดค่าความดันในช่วงที่ต่างกัน โดยทั่วไปการวัดความดันที่มีค่าสูงๆ จะใช้หลักการที่ทำให้ความต่างศักย์ของแก๊สกระทำต่อเครื่องวัดโดยตรง แล้วนำมาแปลงผลเป็นความดัน ส่วนการวัดความดันที่มีค่าต่ำๆ จะใช้สมบัติบางประการของแก๊สและไอ เช่นการนำความร้อนมาเป็นหลักในการวัด

การวัดความดันในระบบสุญญากาศความดันต่ำ โดยทั่วไปจะต้องใช้มาตรวัดความดันสองตัว สำหรับการวัดความดันให้ครอบคลุมช่วงความดันของระบบ มาตรวัดความดันที่ใช้หลักการอ่านความแตกต่างระดับของเหลวเช่น น้ำมันหรือปรอท มีขอบเขตค่อนข้างจำกัดในการใช้กับระบบสุญญากาศเนื่องจากระดับความแตกต่างของความดันเทียบกับระดับความสูงของเหลวเป็นมิลลิเมตรสามารถอ่านได้ยาก การใช้มาตรชนิดต่างๆ สำหรับวัดความดัน อาจพบปัญหาบ้าง เช่น (1) ไม่สามารถติดตั้งในภาชนะสุญญากาศตรงตำแหน่งที่จะวัดความดัน (2) การปรับเทียบมาตรจะขึ้นกับส่วนผสมของแก๊ส ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่ทราบ และ (3) ตัวมาตรวัดเองอาจส่งผลกระทบต่อความดันตรงตำแหน่งที่ทำการวัดความดันจากการคายแก๊สหรือซึมซับแก๊สของตัวมาตรวัดความดัน

มาตรวัดความดันแทบทุกชนิดจะต้องมีการปรับเทียบความดันให้เหมาะสมขึ้นกับธรรมชาติของแก๊ส อย่างไรก็ตามเราอาจปรับเทียบความดันกับมาตรมาตรฐาน ในการปรับเทียบความดันที่ความดันสูงกว่า 1 mbar จะใช้มาโนมิเตอร์ชนิดน้ำมันหรือปรอทเป็นมาตรฐาน และที่ความดันต่ำกว่า 1 mbar ใช้มาตรแม็คคลาวด์ เป็นมาตรฐาน ซึ่งมาตรแม็คคลาวด์เป็นมาตรที่ใช้วิธีการอัดแก๊สให้มีปริมาตรเล็กน้อยแล้วจึงวัดความดันแก๊สที่อัดด้วยมาโนมิเตอร์ ซึ่งด้วยวิธีนี้ทำให้มาตรแม็คคลาวด์ สามารถวัดความดันได้ต่ำถึง 10^{-6} mbar ความดันที่อ่านจากมาตรแม็คคลาวด์ จะมีความแม่นยำในช่วง $\pm 10\%$ ที่ความดัน 10^{-4} mbar และความแม่นยำนี้จะลดลงที่ความต่ำกว่านี้

มาตรวัดความดันอาจแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. มาตรวัดแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic gauge) เป็นเครื่องวัดความดันที่ใช้แรงดันจริงของแก๊สเป็นตัวหลักในการวัด เช่น มาโนมิเตอร์ (manometer) มาตรแม็คคลาว์ด์ (McLeod gauge) มาตรบัวร์ดอง (bourdon gauge) เป็นต้น

2. มาตรวัดแบบการนำความร้อน (thermal conductivity gauge) หลักการทำงานของเครื่องวัดชนิดนี้มาจากความจริงที่ว่า ค่าการนำความร้อนของแก๊สขึ้นกับค่าความดัน ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) เครื่องวัดแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple gauge) เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้สามารถวัดความดันได้ในช่วง $760\text{-}10^{-3}$ mbar

3. มาตรวัดแบบความหนืด (viscosity gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ใช้หลักการที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันจะทำให้ความหนืดของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดแบบความหนืดแลงมัวร์ (Langmuir viscosity gauge)

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

5. มาตรวัดแบบไอออไนเซชัน (ionization gauge) เครื่องวัดชนิดนี้จะวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สแล้วแปลงเป็นความดันเช่น เครื่องวัดเทอร์โมอิเล็กทริกไอออไนเซชัน (thermionic ionization gauge) เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง (penning gauge) หรือ เครื่องวัดแบบฟิลลิป (philips gauge) หรือ เครื่องวัดแบบคาโทดเย็น (cold cathode gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ใช้สำหรับการวัดความดันต่ำ เช่น เครื่องวัดแบบเพนนิ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-6} mbar ส่วนเครื่องวัดแบบเทอร์โมอิเล็กทริกไอออไนเซชันวัดความดันได้ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-6} mbar

6. มาตรวัดแบบหลอดดิสชาร์จ (discharge tube gauge) เครื่องวัดชนิดนี้มีหลักในการทำงานว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มากพอเข้าไปในแก๊สความดันต่างๆ แก๊สจะสามารถเรืองแสงได้ โดยสีของแสงที่ได้ขึ้นกับค่าความดันของแก๊ส เครื่องวัดชนิดนี้วัดความดันได้ในช่วง 5 ถึง 0.10 mbar และมักจะใช้เครื่องวัดชนิดนี้ในการตรวจสอบรอยรั่วของระบบสุญญากาศ

2.6 การเคลือบในสุญญากาศ

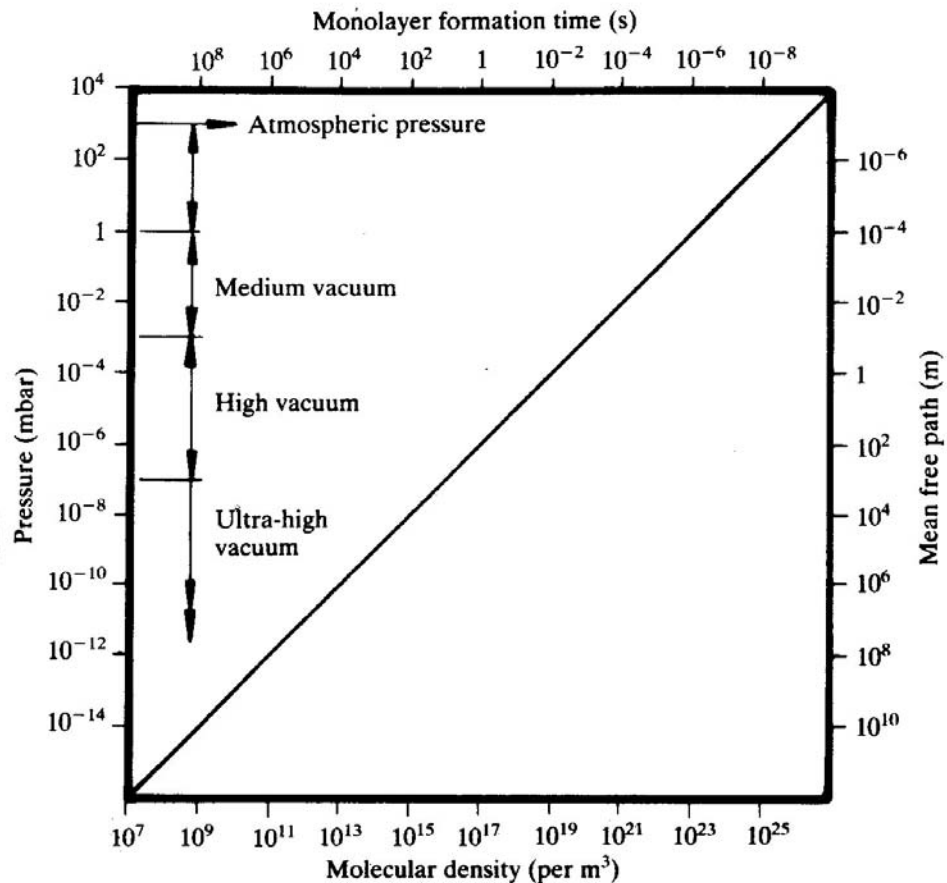
โดยพื้นฐานแล้วการเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (fabricated) โดยการตกเคลือบ (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก (ระดับไมครอน) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางนี้ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็น ฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม

2.6.1 สภาวะสุญญากาศกับการเคลือบ

ในสภาวะเคลือบที่ความดันบรรยากาศนั้นจะมีปริมาณโมเลกุลของแก๊สอยู่มาก เมื่อระเหยสารเคลือบภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ โมเลกุลของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปจะชนกับโมเลกุลของแก๊สที่มีอยู่จำนวนมาก จากการชนกันหลายๆ ครั้ง จะทำให้โมเลกุลของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปสูญเสียพลังงานไปมาก เมื่อโมเลกุลของสารเคลือบมีพลังงานลดลงก็จะควบแน่นกลายเป็นอนุภาคของแข็ง ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุต่างๆ ได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเพื่อลดปริมาณโมเลกุลของแก๊สที่มีอยู่ โดยการทำให้มีสภาวะเป็นสุญญากาศ เนื่องจากในสภาวะสุญญากาศ ปริมาณโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศจะลดลง โมเลกุลของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปจะมีโอกาสชนกับโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศจะมีน้อยลง ทำให้โมเลกุลของสารเคลือบสูญเสียพลังงานน้อยและสามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุต่างๆ ได้

ระยะทางเฉลี่ยของโมเลกุลที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ก่อนที่จะเกิดการชน ณ อุณหภูมิและความดันใดๆ เรียกว่า ระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path ; MFP) พิจารณาจากรูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MFP กับ ความดันที่อุณหภูมิ 25 °C และยังอธิบายถึงเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (monolayer) บนผิววัสดุ ซึ่งจะช่วยบอกระดับสภาวะความเป็นสุญญากาศที่จะนำไปใช้งาน เช่น ในรูปที่ 2.16 ที่ความดัน 1×10^{-6} mbar โมเลกุลจะมีค่า MFP เท่ากับ 6.4×10^3 cm และใช้เวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุประมาณ 1 วินาที ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะปลอดการชนเฉลี่ย (MFP) กับ ความดัน (P) ที่อุณหภูมิห้อง แสดงได้ดังสมการ

$$MFP = \frac{6.4 \times 10^{-3}}{P} \quad \text{..... (2.26)}$$



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย (MFP) ความหนาแน่นของโมเลกุล และเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุ ที่เป็นฟังก์ชันของความดันที่ อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 2.16 และสมการที่ (2.26) จะเห็นว่าความดันใช้งานที่ต่ำลงหรือมีความเป็นสุญญากาศมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่า MFP ของโมเลกุลแก๊สเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศจึงจำเป็นต้องเคลือบภายในสภาวะความเป็นสุญญากาศมาก ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีสุญญากาศมีการพัฒนาไปมากกว่าในอดีต ทำให้การเตรียมฟิล์มบาง หรือ การเคลือบในสุญญากาศสามารถเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติด้านต่างๆ ดีขึ้นด้วย

2.6.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

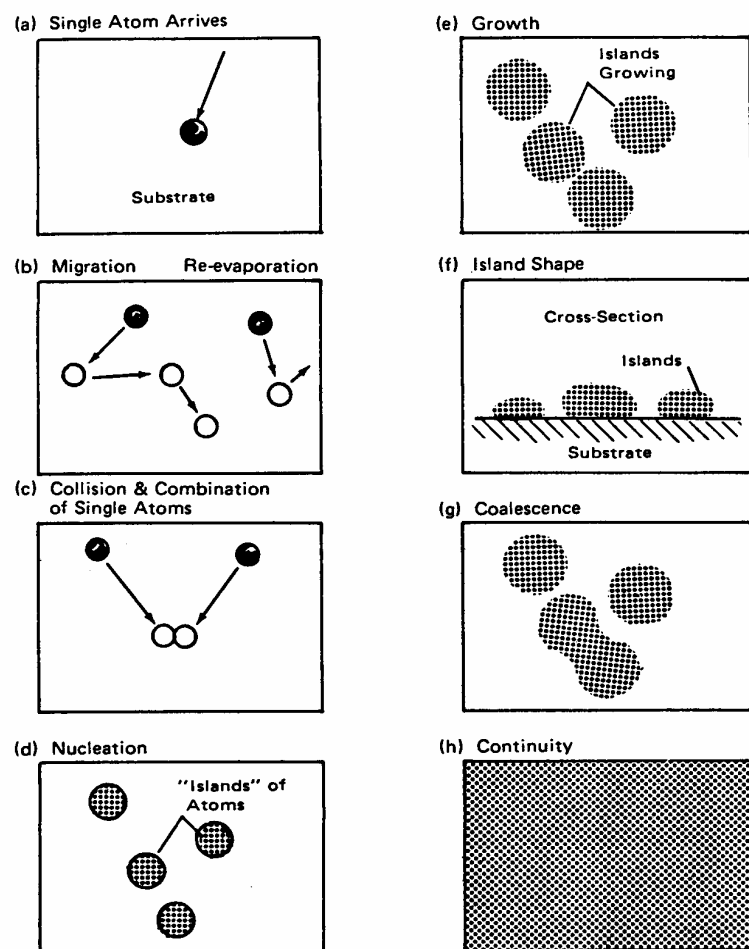
การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ เริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ ซึ่งสุดท้ายสารเคลือบจะมีการควบแน่นและเกิดกระบวนการพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ

หากพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่าสารเคลือบอาจอยู่ในของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊สก็ได้ โดยสารเคลือบนี้จะต้องทำให้อยู่ในรูปของไอระเหย ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง บางครั้งสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลว ต่อมาเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบ (transport) โดยอาจเกิดขึ้นในสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหลซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นในภาชนะสุญญากาศบ้างนอกจากนี้ยังอาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของพลาสมาเนื่องจากพลาสมานั้นจะมีอนุภาคที่มีพลังงานสูงอยู่มาก ซึ่งที่สำคัญในการพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายสารเคลือบคือต้องให้ไอระเหยของสารเคลือบมีความสม่ำเสมอเพื่อที่จะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ สุดท้ายเป็นกระบวนการพอกพูนซึ่งจะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการปฏิบัติกริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานในการเคลือบ

2.6.3 การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (รูปที่ 2.17(a)) โดยพลังงานพันธะ (bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (adsorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (รูปที่ 2.17(b)) ในเวลาชั่วครู่อะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่

เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (รูปที่ 2.17(c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (deposition rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (triplets) หรือสี่อะตอม (quadruplets) หรืออื่นๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สถานะการเกิดนิวเคลียส (รูปที่ 2.17(d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (quasi-stable islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (island growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 2.17(e) และ 2.17(f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (agglomeration หรือ coalescence) (รูปที่ 2.17(g))



รูปที่ 2.17 การก่อเกิดฟิล์มบาง

จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (liquid-like behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (crystallographic orientation) ด้วยการรวมกันเข้าเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.17(h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 0.04-0.05 μm ลักษณะผิวทั่วไปของฟิล์มขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินและหุบเขา

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรืออาจประกอบด้วยผลึกจำนวน 2-3 ผลึก ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้ตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้ตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุรองรับที่ตกเคลือบ ซึ่งจะได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกกระบวนการนี้ว่าเอพิแทกซี (epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวมีพลังงานเพียงพอจะทำให้มันสามารถเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น ทั้งนี้การลดอัตราเคลือบสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการโตนานพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีเกรนขนาดใหญ่ มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยและได้ฟิล์มที่หนามากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

2.6.4 ประเภทของการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

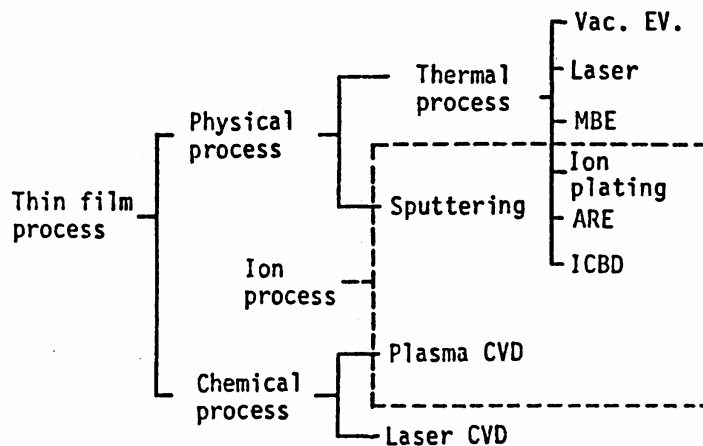
การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 2.18) ได้แก่ การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) และการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process)

1) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี

เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (new species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น

2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์

เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจาย หรือ วิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (sputtering) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

2.6.5 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์

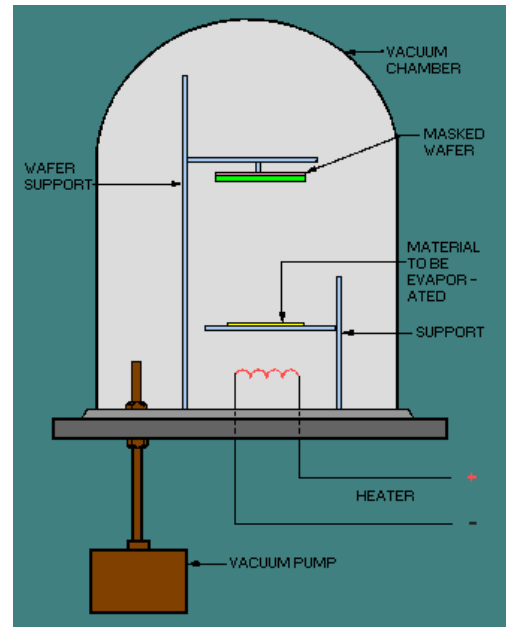
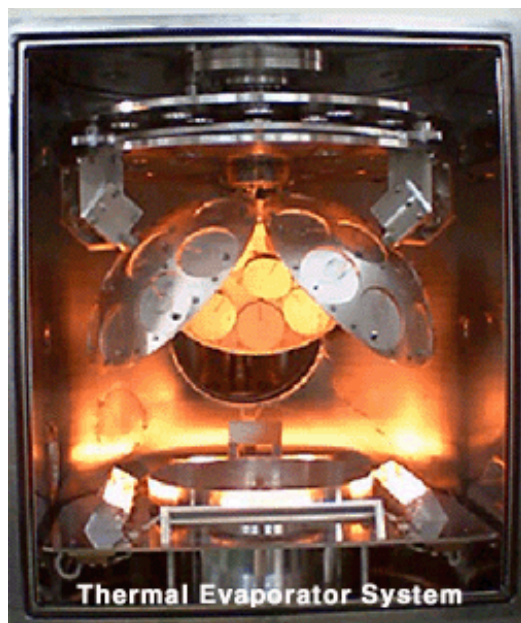
การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์อาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วพุ่งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1) การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร

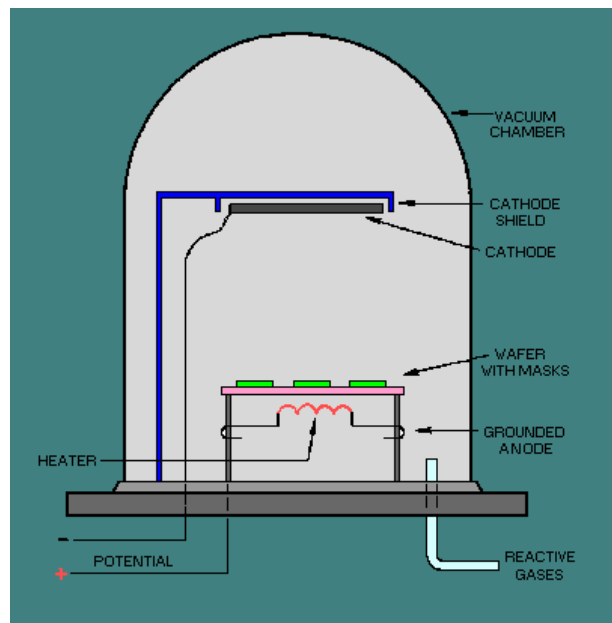
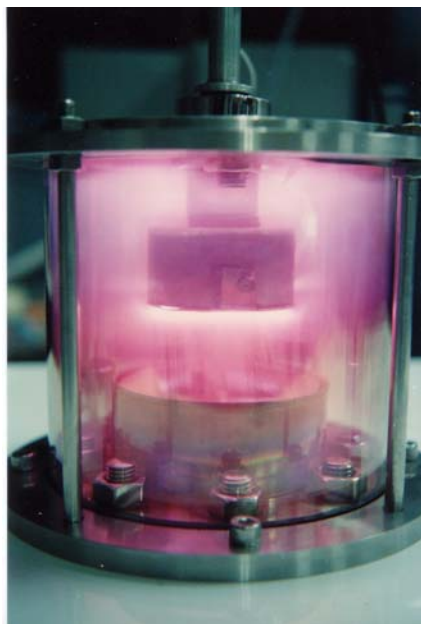
เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2) การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง

เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า



รูปที่ 2.19 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร



รูปที่ 2.20 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์

2.7 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบในสุญญากาศสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีนี้ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน แต่ให้คุณภาพของชั้นเคลือบที่ดี และนิยมใช้วิธีหนึ่งคือ การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ซึ่งทำได้โดยการให้ความร้อนกับสารเคลือบซึ่งปกติจะอยู่ในสถานะของแข็ง ในสภาวะสุญญากาศ ถ้าความร้อนที่ให้กับสารเคลือบมากพอ ก็จะทำให้สารเคลือบนั้นเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ ซึ่งจะฟุ้งกระจายอยู่ในภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อไอของสารเคลือบไปกระทบกับวัสดุรองรับที่อุณหภูมิเหมาะสมก็จะกลั่นตัวเป็นของแข็ง จับเกาะติดอยู่บนวัสดุรองรับ การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยแบบวาบ (flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการเคลือบสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2.7.1 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร อาจพิจารณาได้จากแนวคิดดังต่อไปนี้ ถ้ามีสารชนิดหนึ่ง (สารเคลือบ) บรรจุอยู่ในภาชนะปิด ซึ่งสูบบากาศออกจนมีความดันต่ำมาก ถ้าเริ่มต้นทำให้สารมีอุณหภูมิตำ่ระดับหนึ่ง ซึ่งความดันไอหรือความดันแก๊สต่ำเกินกว่าที่มาตรวัดความดันจะวัดได้ ต่อมาถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิของภาชนะบรรจุสารให้สูงขึ้นและคงไว้ที่ระดับหนึ่งอะตอมของสารดังกล่าวจะเริ่มระเหิด หรือระเหย จาก ผิวของสารในภาชนะดังกล่าว ความดันในภาชนะจะเพิ่มขึ้นและสมดุลอยู่ที่ความดันหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารที่อยู่ในภาชนะบรรจุที่อุณหภูมินั้น ที่ความดันนี้อะตอมของแก๊สที่ชนผิวของสารแล้วเกิดการกลั่นตัวบนผิวของสารจะเท่ากับอะตอมที่ระเหยออกจากผิวของสาร ทำให้ความดันไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความดันสมดุลของแก๊ส (equilibrium gas pressure) ที่อุณหภูมิกำหนดนี้ ก็คือความดันไอของสาร (vapor pressure) ที่อุณหภูมินั้น

ในการทำให้อายุ (สารเคลือบ) เกิดการระเหยในสุญญากาศ จะมีภาชนะที่ใช้บรรจุสาร ซึ่งภาชนะนี้จะสามารถให้ความร้อนกับสารจนถึงอุณหภูมิที่สารมีความดันไอเท่ากับความดันในสุญญากาศที่สารนั้นอยู่ เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในสารที่ใช้สำหรับการเคลือบ ภาชนะที่รองรับจะต้องสะอาดและไม่เกิดการระเหยที่อุณหภูมิใช้งาน ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะรองรับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่จะทำการระเหย นอกจากนี้รูปทรงของภาชนะที่ใช้บรรจุสารจะมีลักษณะขึ้นกับสารที่ใช้

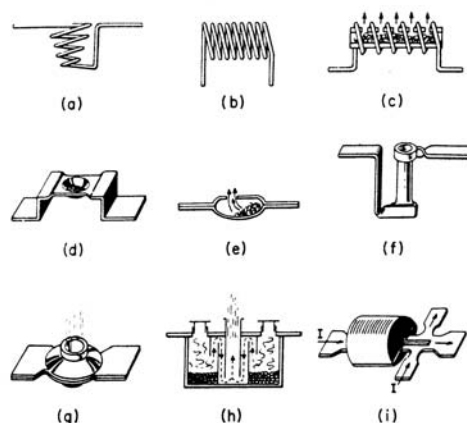
การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารเป็นเทคนิคการเคลือบในสภาวะสุญญากาศเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้งานเนื่องจากทำได้ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยาก แนวคิดการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนแก่สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ หลุดขึ้นไปเกาะตัวกันเป็นฟิล์มบางบนผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (วัสดุรองรับ ที่เรียกว่า substrate) อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้กับสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงมากๆ เช่น ทังสเตน เป็นต้น

สำหรับวิธีการเคลือบในสุญญากาศโดยการระเหยสารนี้สามารถแบ่งได้ตามชนิดของแหล่งให้พลังงานความร้อนที่เป็นตัวทำให้อายุเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอ ได้แก่

1. การระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (resistance heated sources) ใช้วิธีการจ่ายไฟฟ้ากำลังสูงเข้าไปยังขดลวดหรือแผ่นโลหะที่ใช้เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถ่ายเทไปยังสารเคลือบแล้วทำให้อายุเคลือบระเหยกลายเป็นไอ

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

3. การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam heated sources) เป็นการรวมพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจำนวนมากเป็นจุดเล็กๆ ลงไปยังเนื้อสารเคลือบ เพื่อทำให้อายุเคลือบเกิดความร้อนและระเหย กลายเป็นไอ สารเคลือบที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีนี้จะถูกบรรจุอยู่ในถ้วยใส่สารซึ่งมักทำจากอลูมินา (alumina) หรือ ทองแดง โดยถ้วยใส่สารดังกล่าวนี้จะต้องมีการหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลาที่ยังลำอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันไม่ให้ถ้วยถูกหลอมไปด้วย



รูปที่ 2.21 ตัวให้ความร้อนสำหรับการเคลือบแบบระเหยสารชนิดตัวต้านทาน

2.7.2 การระเหยสารในสุญญากาศ

การก่อดั้วของชั้นเคลือบของสารที่ได้จากการระเหยในสุญญากาศ ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนคือ การให้ความร้อนกับสารที่เป็นของแข็ง ในสภาวะสุญญากาศ ทั้งนี้ถ้าความร้อนที่ให้มากพอก็จะทำให้สารเคลือบนั้นระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งเมื่อไอของสารเคลือบเคลื่อนที่ไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ทั้งนี้สารหลายชนิดสามารถระเหยได้ในสุญญากาศและกลั่นตัวเป็นฟิล์มที่มีสถานะเป็นของแข็ง บนวัสดุรองรับซึ่งมีหลายชนิด ทั้งนี้วัสดุรองรับจะต้องได้รับการควบคุมให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของฟิล์มแต่ละชนิดที่ต้องการ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารเคลือบจากของแข็งให้กลายเป็นไอจะต่ำกว่าเมื่ออยู่ในความดันบรรยากาศปกติ โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในการระเหยสารในสภาวะสุญญากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar ที่ความดันนี้การเคลื่อนตัวของไอสารเคลือบจากแหล่งกำเนิด ไปยังวัสดุรองรับที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะประมาณ 10-50 cm จะอยู่ในแนวเส้นตรง ทั้งนี้การระเหยของสารเคลือบสามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการระเหยของสารมากที่สุดจากผิวที่มีพื้นที่ A_e หาได้จากสมการของ Knudsen

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (2\pi mKT)^{-1/2} P_e \quad \text{..... (2.27)}$$

เมื่อ dN_e คือ จำนวนโมเลกุลมากที่สุดที่ระเหยออกจากผิวในช่วงเวลา dt

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)

m คือ มวลของโมเลกุล

สำหรับอัตราการระเหยของมวล m_e จากผิวหนึ่งหน่วยในสุญญากาศ จะเป็นไปตามสมการ Langmuir คือ

$$m_e = 5.83 \times 10^{-2} P_e \left(\frac{M}{T} \right)^{1/2} \quad \text{..... (2.28)}$$

หรือ

$$N_e = 3.513 \times 10^{22} P_e \left(\frac{1}{MT} \right)^{1/2} \quad \text{..... (2.29)}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นไอ

P_e คือ ความดัน

ในกรณีที่การเกิดฟิล์มของสารเคลือบบนวัสดุรองรับที่เกิดจากการระเหยของสารต้นกำเนิดที่มีขนาดเล็กจนถือว่าเป็นจุด สะอาด และอัตราการระเหยเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อัตราการเกิดฟิล์มบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นราบจะเป็นไปตาม Knudsen's cosine law คือแปรผันตาม $\cos\theta/r^2$ เมื่อ r เป็นระยะจากแผ่นรองรับถึงต้นกำเนิดไอ และ θ เป็นมุมที่ r ทำกับแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ ถ้าให้ d_o เป็นความหนาของการเกิดฟิล์มที่กึ่งกลางแนวตั้งเหลือจุดที่เป็นต้นกำเนิดเป็นระยะทาง h และ d เป็นความหนาของฟิล์มที่ระยะ l จากแนวกึ่งกลาง จะได้ความสัมพันธ์ของ d/d_o ตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \quad \text{..... (2.30)}$$

ถ้าต้นกำเนิดไอเป็นพื้นที่เล็กๆ การกระจายความหนาจะเป็นตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^2} \quad \text{..... (2.31)}$$

ปกติแล้วการเคลือบฟิล์มบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ นอกจากอะตอมของสารเคลือบจะตกเคลือบบนแผ่นรองรับแล้ว ยังมีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นๆ ที่หลงเหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศที่กระทบกับวัสดุรองรับ แก๊สที่เหลืออยู่นี้จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์มเนื่องจากแก๊สเหล่านี้สามารถชนกับอะตอมของไอสารเคลือบที่ระเหยจากต้นกำเนิดที่อยู่ระหว่างต้นกำเนิดกับวัสดุรองรับ โดยจำนวนครั้งของการชนจะขึ้นอยู่กับระยะปลอดการชนเฉลี่ย หรือ MFP

ทั้งนี้ถ้าให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง l โดยปราศจากการชนกับอะตอมอื่น จะพบว่า

$$N = N_0 \exp\left(\frac{-l}{\lambda}\right) \quad \text{..... (2.32)}$$

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

แก๊สที่หลงเหลืออยู่ภายในภาชนะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับมีการปนเปื้อน โมเลกุลของแก๊สที่เหลืออยู่จะชนกับวัสดุรองรับ ขณะที่เกิดการก่อตัวของฟิล์ม อัตราการชนของโมเลกุลแก๊สกับวัสดุรองรับนี้จะขึ้นอยู่กับสมการ

$$N_g = 3.513 \times 10^{22} \frac{P_g}{(M_g T_g)^{1/2}} \quad \dots\dots (2.33)$$

เมื่อ P_g คือ ความดันสมดุลของแก๊สที่อุณหภูมิ T_g

2.7.3 ลักษณะของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

เครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบวิธีระเหยสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญพื้นฐานคล้ายๆ กัน ดังนี้

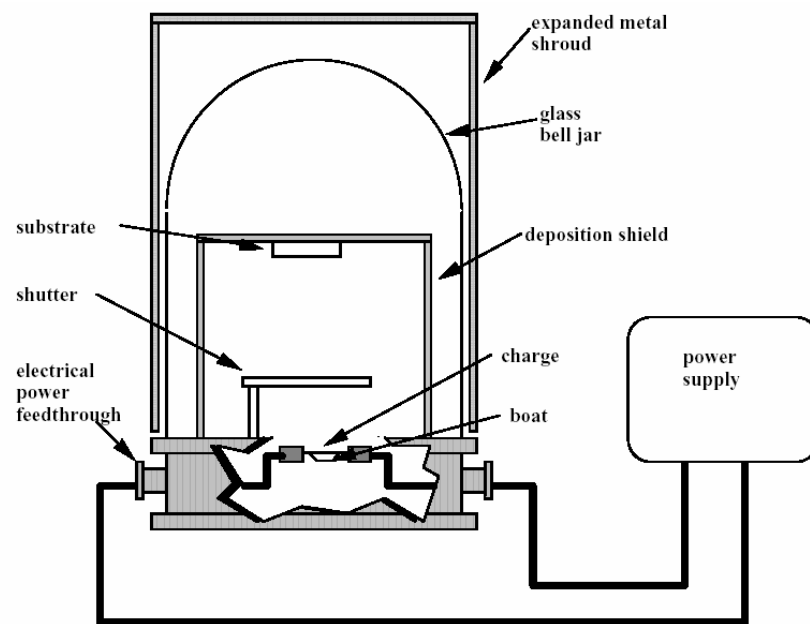
1. ภาชนะสุญญากาศ หรือ ห้องเคลือบสุญญากาศ (vacuum chamber) ส่วนใหญ่จะทำจากสเตนเลสในการสร้าง เนื่องจากมีความทนทาน แข็ง ไม่เป็นสนิม ดูแลรักษาง่าย ที่สำคัญสเตนเลส จะมีปริมาณแก๊สที่สะสมในเนื้อน้อย ทำให้ง่ายต่อการสร้างสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากไม่เกิดการคายแก๊ส

2. เครื่องสูบลสุญญากาศ (vacuum pump) สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศมีหลายแบบสำหรับระบบพื้นฐานที่ต้องการความดันในช่วง 10^{-7} - 10^{-5} mbar นั้นจะประกอบด้วยเครื่องสูบลอย่างง่าย 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องสูบลกลโรตารี ทำหน้าที่ในการลดความดันจากบรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar จากนั้นจึงใช้เครื่องสูบลแบบแพร่ไอลดความดันต่อจนถึงความดันที่ต้องการ

3. มาตรวัดความดัน (pressure gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ มาตรวัดความดันจะมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะอาศัยหลักการในการวัดความดันต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วระบบสุญญากาศจะประกอบด้วยมาตรวัดความดัน 2 ชนิด ได้แก่ มาตรวัดความดันต่ำ วัดความดันได้ในช่วง บรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar เช่น มาตรวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) อาศัยหลักการพาความร้อนของแก๊ส โดยถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) ก็จะสามารพาความร้อนได้ดี แต่ถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การพาความร้อนก็จะไม่ดี และมาตรวัดความดันสูง วัดความดันน้อยกว่า 10^{-2} mbar เช่น มาตรวัดแบบเพนนิ่ง (Penning gauge) อาศัยการนำไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวของแก๊ส ถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) จะเกิดการแตกตัวของแก๊สมากทำให้นำไฟฟ้าได้ดี ในทางกลับกันถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การแตกตัวของแก๊สก็จะน้อยทำให้นำไฟฟ้าไม่ดี

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

5. แหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยสารเคลือบ ส่วนนี้เป็นการให้ความร้อนแก่สารเคลือบเพื่อให้สารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง กลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายไปทั่วภาชนะสุญญากาศไปกระทบกับวัสดุรองรับซึ่งติดตั้งด้านบน



รูปที่ 2.22 ลักษณะของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ

บทที่ 3

การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องเคลื่อน

บทนี้กล่าวถึงผลการออกแบบสร้างและทดสอบการทำงานของต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แนวคิดเกี่ยวกับการออกแบบสร้างเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ

แนวคิดหลักของการสร้างต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศของโครงการนี้ คือ เครื่องเคลื่อนที่จะสร้างขึ้นในโครงการนี้จะใช้วัสดุหลักที่มีอยู่ในประเทศไทยให้มากที่สุด เพื่อใช้เป็นต้นแบบสำหรับสร้างระบบสุญญากาศพื้นฐานและระบบเคลื่อนในสุญญากาศสำหรับใช้ในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นกิจกรรมหลักของโครงการนี้คือ การศึกษาลักษณะและรายละเอียดตลอดจนการทำงานของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ เพื่อนำมาดัดแปลงแก้ไขให้เหมาะกับวัสดุและช่างฝีมือในประเทศไทย

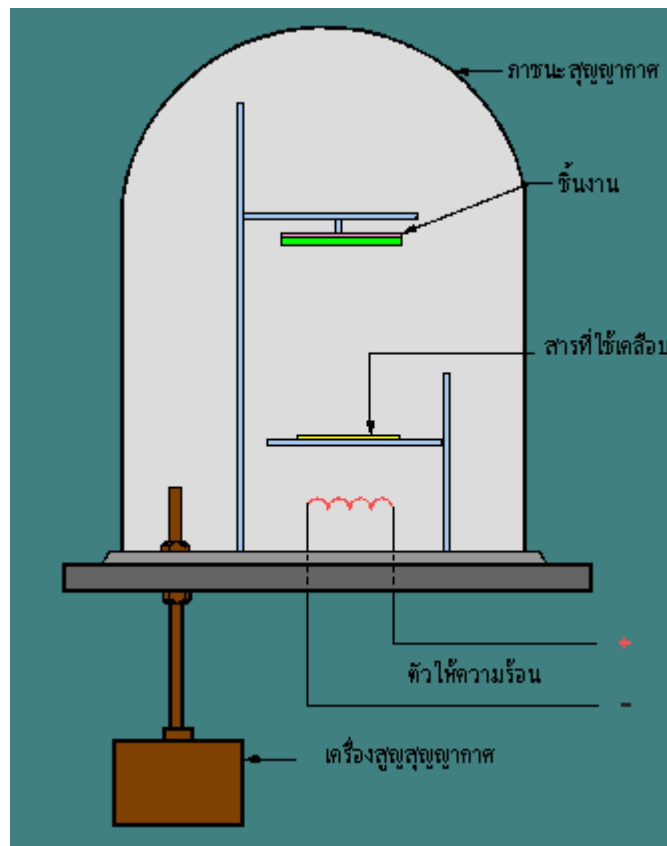
เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศที่จะสร้างขึ้นในโครงการนี้จะเป็ระบบระเหยสาร ทั้งนี้โดยพื้นฐานแล้วเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสารจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้คือ

1. ภาชนะสุญญากาศ เป็นส่วนที่ทำการเคลื่อนซึ่งอาจมีหลายรูปแบบ ในโครงการนี้กำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอก และมีส่วนประกอบอื่นดังนี้ ภาชนะสุญญากาศทรงกระบอก ฝาปิดบน พื้นฐานช่องเปิดและหน้าแปลนต่างๆ ที่จำเป็น จุดสำคัญของภาชนะสุญญากาศ คือ ต้องสามารถลดความดันภายในอยู่ในระดับ $\leq 10^{-5}$ mbar ได้และสามารถรักษาความดันในช่วง 0 mbar ได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

2. ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ทำหน้าที่ในการสร้างสภาวะสุญญากาศให้กับภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีหลายระบบ แต่ระบบที่เหมาะสมทั้งการทำงานและราคา สำหรับโครงการนี้จะประกอบด้วย เครื่องสูบลสุญญากาศ 2 ชนิดคือ (1) เครื่องสูบลโรตารี สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้น ($\sim 10^{-2}$ mbar) และทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบลหนุนหลัง (backing pump) สำหรับเครื่องสูบลแบบแพร่ไอน้ำมันด้วย และ (2) เครื่องสูบลแบบแพร่ไอน้ำมัน สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศสูง ($\sim 10^{-6}$ mbar) นอกจากนี้ในระบบเครื่องสูบลสุญญากาศของเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศยังประกอบด้วย มาตรวัดความดัน วาล์วและข้อต่อต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3. ระบบเคลือบ ทำหน้าที่ในการสร้างสารเคลือบ แนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร คือการทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอโดยการให้ความร้อนแก่สารเคลือบ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น ความร้อนจากหลอดต้านทาน ความร้อนจากการอาร์ค ความร้อนจากเลเซอร์ เป็นต้น สำหรับระบบเคลือบของเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่จะสร้างในโครงการนี้ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกระแสสูง ขั้วไฟฟ้า หลอดต้านทานสำหรับให้ความร้อน ที่วางชิ้นงาน

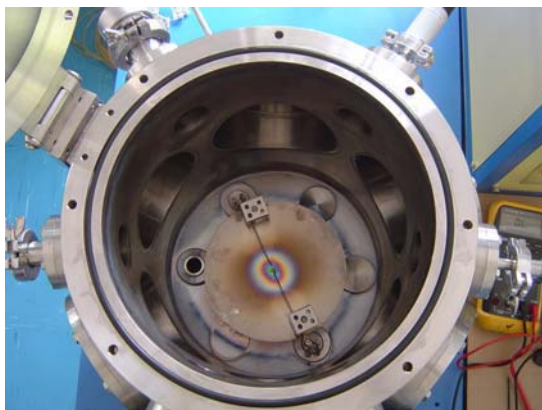
4. ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องเคลือบซึ่งประกอบด้วย ชุดควบคุมระบบสุญญากาศ และ ชุดควบคุมระบบเคลือบ



รูปที่ 3.1 ภาพร่างของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ

โดยพื้นฐานเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสารจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ ฝาปิดบน แผ่นฐาน ช่องเปิดและหน้าต่างแปลนต่างๆ ที่จำเป็น (2) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ประกอบด้วย เครื่องสูบลโรตารี เครื่องสูบบางแพร่ ไอน้ำมัน มาตรวัดความดัน วาวล์และข้อต่อ (3) ระบบเคลือบ ประกอบด้วย ชุดระเหยสาร ชุดจับวัสดุรองรับ และ (4) ระบบควบคุมการทำงาน สำหรับเครื่องเคลือบในสุญญากาศของโครงการแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีส่วนประกอบและรายละเอียดต่างๆ ดังนี้



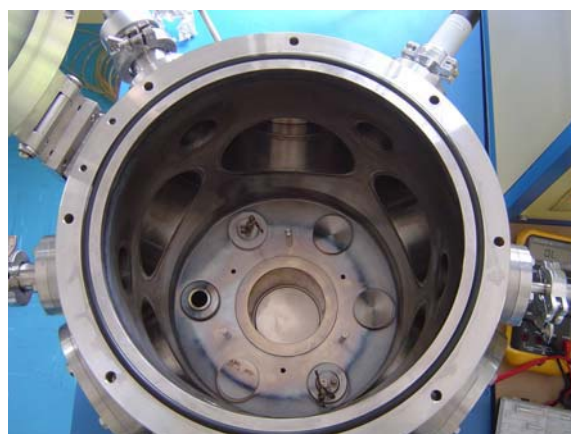
รูปที่ 3.2 เครื่องเคลือบทั้งระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้

3.2.1 ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 310 mm มีความสูงขนาด 370 mm และเนื่องจากการออกแบบภาชนะสุญญากาศนี้ต้องการให้มีหน้าแปลนหรือช่องเปิด สำหรับต่อหรือติดตั้งอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ให้มากที่สุดจึงได้ออกแบบให้มีหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ ขนาด 129.5 mm จำนวน 4 ช่อง และหน้าแปลนใหญ่ขนาด 157 mm จำนวน 1 ช่อง มีช่องเปิดสำหรับสังเกตปรากฏการณ์ในภาชนะสุญญากาศขนาด 91.3 mm จำนวน 1 ช่อง พร้อมกันนี้เพื่อรองรับการติดตั้งอุปกรณ์ประกอบอื่นเช่น มาตรวัดความดัน จึงได้ออกแบบให้มีหน้าแปลนขนาด 42.8 mm จำนวน 6 ช่อง รอบภาชนะสุญญากาศ สำหรับติดตั้งหัววัดความดันแบบเพนนิ่งและแบบพิราโนอย่างละ 1 ชุด นอกจากนี้เพื่อระบายความร้อนที่อาจเกิดขึ้นจึงกำหนดให้มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำทำจากท่ออะลูมิเนียมติดตั้งไว้รอบภาชนะสุญญากาศด้วย

แผ่นปิดบน (top plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 390 mm มีหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 5 ช่อง

แผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 30 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 390 mm มีช่องเปิดสำหรับต่อไปยังเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ พร้อมหน้าแปลนสำหรับต่ออุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 6 ช่อง เช่น roughing line, ขั้วไฟฟ้า เป็นต้น



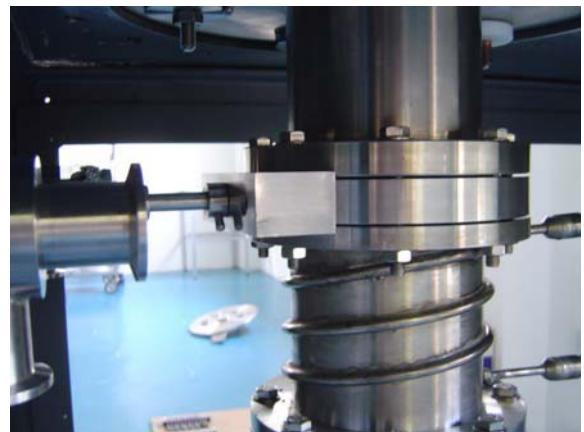
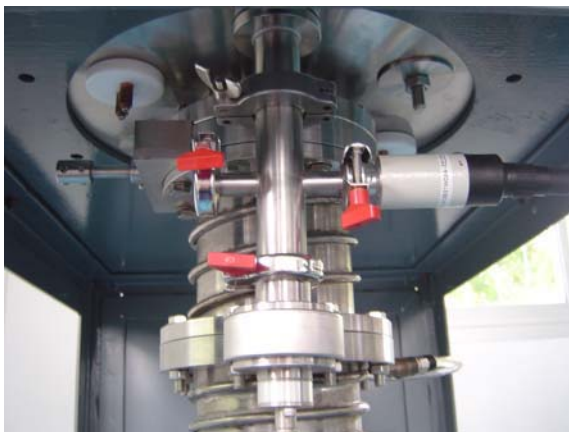
รูปที่ 3.3 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.4 ลักษณะของแผ่นปิดบนของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.5 ลักษณะของแผ่นฐานของเครื่องเคลือบ

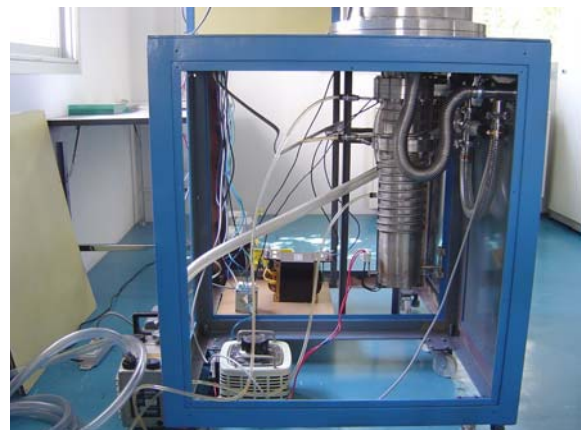
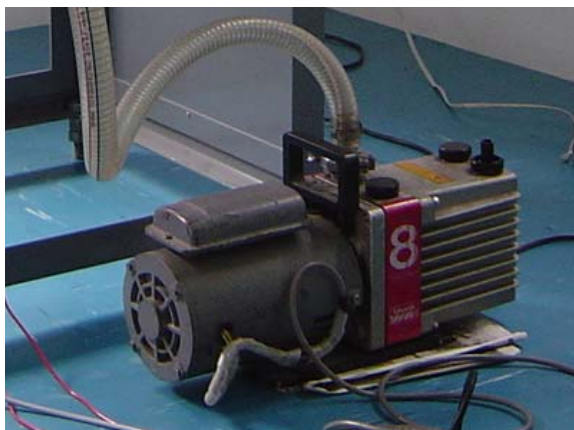


รูปที่ 3.6 การต่ออุปกรณ์ประกอบด้านล่างของแผ่นฐาน

3.2.2 ระบบเครื่องสูบลูญากาศ

ระบบสุญญากาศสำหรับลดความดันในภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบที่สร้างในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบเพรื่อ เครื่องสูบลแบบโรตารี มาตรการความดัน อุปกรณ์วาล์วและข้อต่อต่างๆ โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้สามารถทำ ความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 9.0×10^{-6} mbar โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

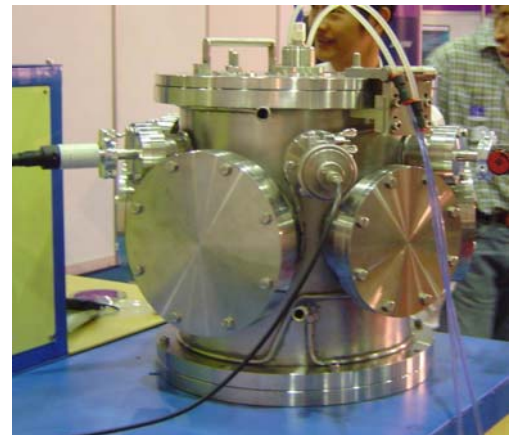
1. เครื่องสูบลแบบโรตารี ใช้ของ Edwards รุ่น E2M8 แบบ 2 สถานะ อัตราการสูบประมาณ $8 \text{ m}^3/\text{hr}$. (รูปที่ 3.7) ซึ่งเป็นของเดิมที่นำมาปรับปรุงใช้ใหม่ ทำหน้าที่ในการสร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้น และเป็นเครื่องสูบลหลักให้กับเครื่องสูบบแบบเพรื่อ
2. เครื่องสูบบแบบเพรื่อ เป็นเครื่องที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ มีอัตราการสูบ (N_2) ประมาณ 200 l/sec พิสัยการทำงาน 10^{-2} - 10^{-6} mbar ใช้ไฟฟ้าขนาด $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ 700 W โดยใช้ น้ำมัน Silicone DC704 (Tetraphenyl Tetramethyl Trisiloxane) (รูปที่ 3.8)
3. ระบบวัดความดัน ประกอบด้วยมาตรการความดัน Balzers รุ่น TPG 300 เป็นหน่วยควบคุมและแสดงผล ซึ่งมีหัววัด 2 แบบ คือ หัววัดแบบพิราณีของ Balzers รุ่น TPR010 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 1×10^{-3} - 6×10^{-4} mbar และ หัววัดแบบเพนนิ่งของ Balzers รุ่น IKR050 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 5×10^{-3} - 2×10^{-9} mbar
4. วาล์วและข้อต่อ สำหรับเครื่องเคลือบนี้สร้างขึ้นใหม่หมดได้แก่ วาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valves) เป็นวาล์วที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่เป็นแบบวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) (รูป 3.10) ส่วนวาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบลแบบโรตารีกับเครื่องสูบบแบบเพรื่อ วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (air admittance valves) ท่อสุญญากาศส่วนท้าย (backing line) ท่อสุญญากาศหยาบ (roughing line) ยกเว้นวาล์วส่วนท้ายและวาล์วหยาบ เป็นของ Edwards BRV 25 PK และวาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (venting valve) ใช้ของ Edwards รุ่น IPVA 10 EK



รูปที่ 3.7 เครื่องสูบลโรตารีของเครื่องเคลือบและการต่อกับเครื่องสูบบแบบเพรื่อ



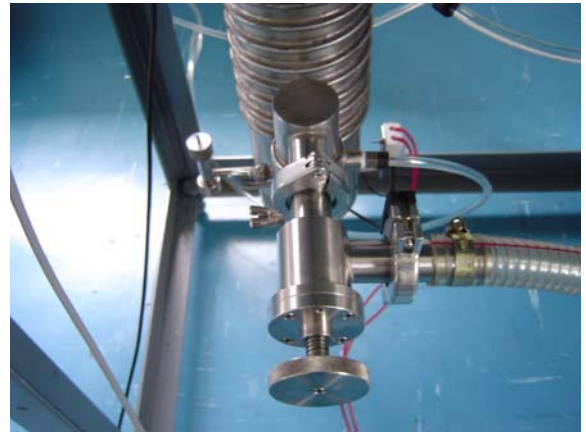
รูปที่ 3.8 เครื่องสูบบแบบเพร็โไอของเครื่องเคลือบ



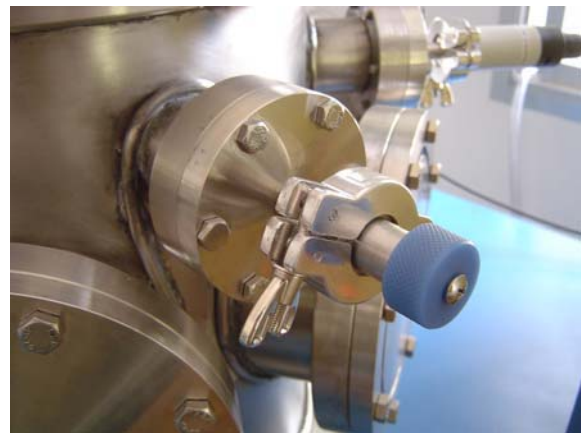
รูปที่ 3.9 มาตรการวัดความดันและการติดตั้งหัววัดความดันของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.10 วาล์วสุญญากาศสูงของเครื่องเคลือบแบบปีกผีเสื้อ



รูปที่ 3.11 วาล์วท้ายและวาล์วหยาบของเครื่องเคลื่อน



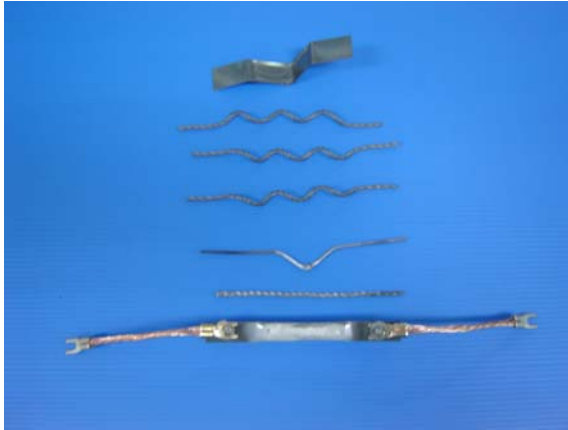
รูปที่ 3.12 วาล์วปล่อยอากาศเข้าภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลื่อน



รูปที่ 3.13 การติดตั้งระบบวาล์วท้ายและวาล์วหยาบของเครื่องเคลื่อน

3.2.3 ระบบเคลือบ

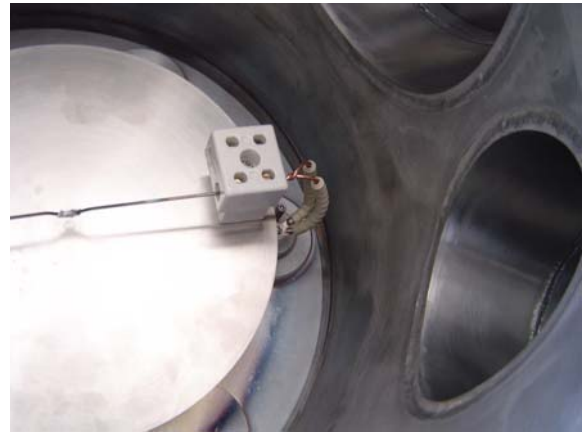
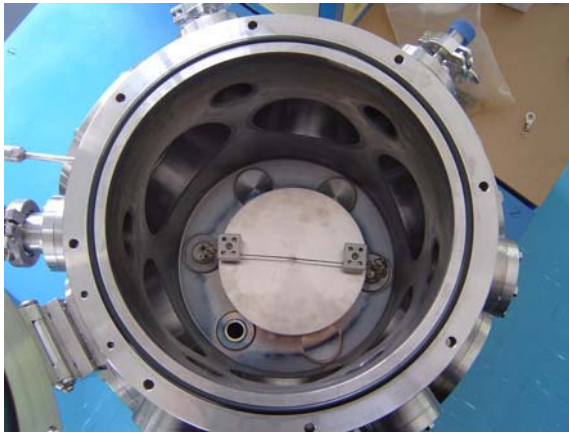
ส่วนการเคลือบของเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่สร้างในโครงการนี้เป็นแบบการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารโดยใช้ลวดต้านทานในการให้ความร้อน มีขั้วไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แบบความต่างศักย์ต่ำ กระแสสูง ให้กับลวดต้านทาน มีชุดวางชิ้นงานทำจากสแตนเลส



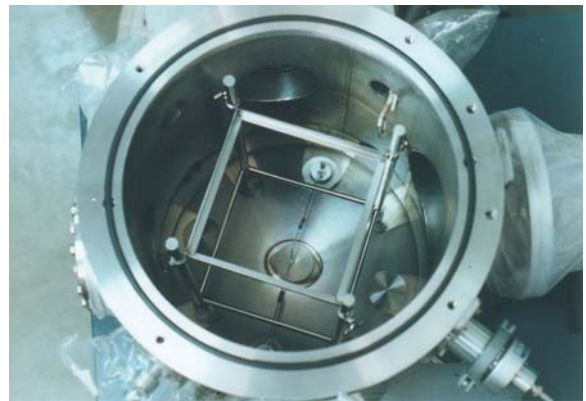
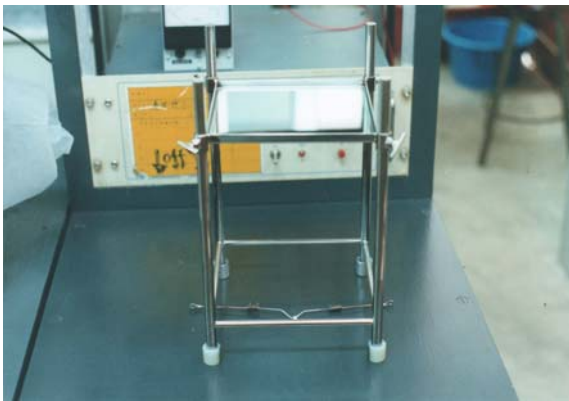
รูปที่ 3.14 ลวดต้านทานสำหรับให้ความร้อนแก่สารเคลือบชนิดที่ดัดแปลงขึ้นใช้ในโครงการ



รูปที่ 3.15 การติดตั้งขั้วไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดต้านทาน



รูปที่ 3.16 การติดตั้งลวดต้านทานกับขั้วไฟฟ้าสำหรับการระเหยสาร



รูปที่ 3.17 แท่นวางชิ้นงานและการติดตั้งในภาชนะสุญญากาศ

3.2.4 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ

ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับติดตั้ง สวิตช์ควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบทั้งหมด ซึ่งแบ่งเป็นการควบคุมระบบสุญญากาศ และระบบการเคลือบ



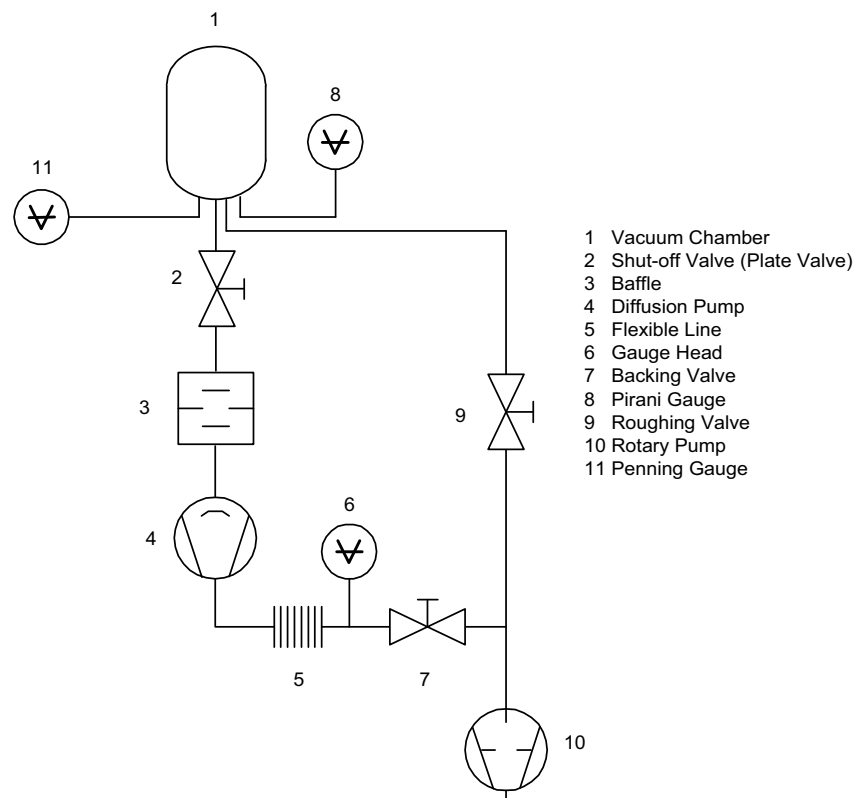
รูปที่ 3.18 ชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเคลือบ

3.3 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

เมื่อประกอบเครื่องเคลือบเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องทดสอบความสามารถด้านสุญญากาศของเครื่องเคลือบก่อน ซึ่งจะทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบเคลือบก่อนทำการเคลือบเพื่อดูความสามารถของเครื่องเคลือบด้านสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในโครงการนี้ ประกอบด้วยเครื่องสูบลสุญญากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบลแบบโรตารี และ เครื่องสูบลแบบแพรว์ไอ โดยต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศตามแผนภาพ ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยเครื่องสูบลโรตารีที่ใช้จะสามารถทำให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดจากความดันปกติเป็นความดันต่ำถึง 10^{-3} mbar ซึ่งสามารถอ่านความดันได้จากหัววัดแบบพิรานี ส่วนเครื่องสูบลแบบแพรว์ไอจะสามารถลดความดันได้ $10^{-3} - 10^{-6}$ mbar และสามารถอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบเพนนิ่ง

การทดสอบนี้ได้ทดสอบการสร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบลแบบแพรว์ไอที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งมีอัตราการสูบลประมาณ 200 l/s ใช้ร่วมกับเครื่องสูบลโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) มีอัตราการสูบลประมาณ 8 m³/hr แบ่งการทดสอบเป็น 2 ตอนคือ การสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลโรตารี และ การสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เครื่องสูบลแบบแพรว์ไอ ซึ่งมีผลดังนี้คือ



รูปที่ 3.19 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

3.3.1 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

2) วิธีทดลอง

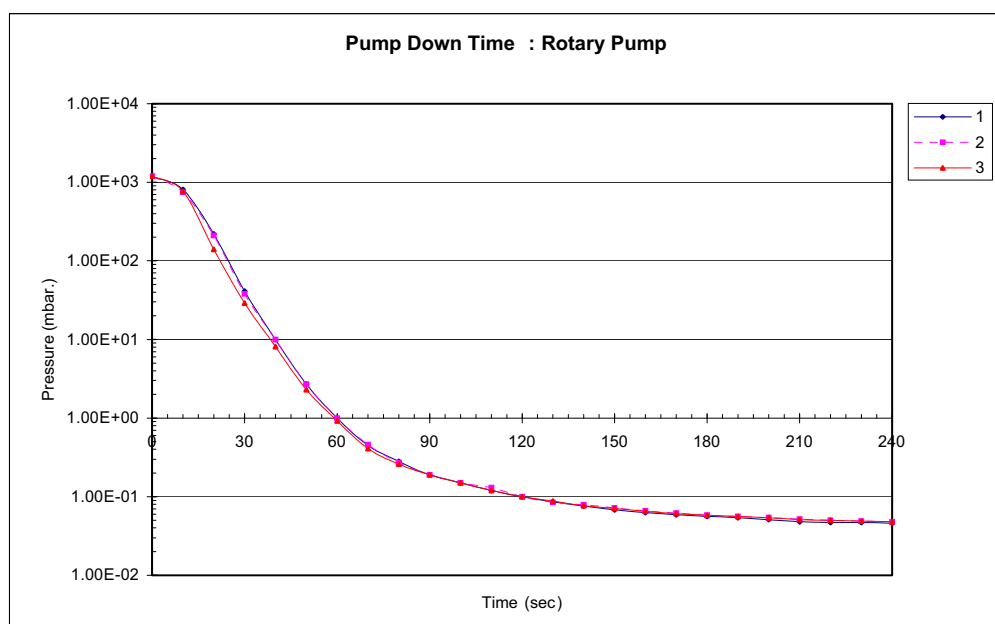
1. เริ่มจากการตรวจสอบเครื่องเคลือบ ฝาปิดและว่าล้นว่าปิดเรียบร้อยหรือไม่ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศก่อนทดลองเป็นค่าเริ่มต้น

2. เปิดเครื่องสูบลมโรตารี เปิดวาล์วหยาบ (ปีดวาล์วท้าย) เพื่อสูบลมจากภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าคงที่

3. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความดันกับเวลา

3) ผลและอภิปรายผล

เมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี พบว่าเมื่อใช้เครื่องสูบลมโรตารีสูบลมออกจากภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจาก 1.2×10^{-3} mbar เป็น 1.0×10^{-0} mbar ในเวลาประมาณ 1 นาที และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ประมาณ 5.7×10^{-2} mbar ในเวลาประมาณ 3 นาที



รูปที่ 3.20 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

3.3.2 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

1) วัตถุประสงค์

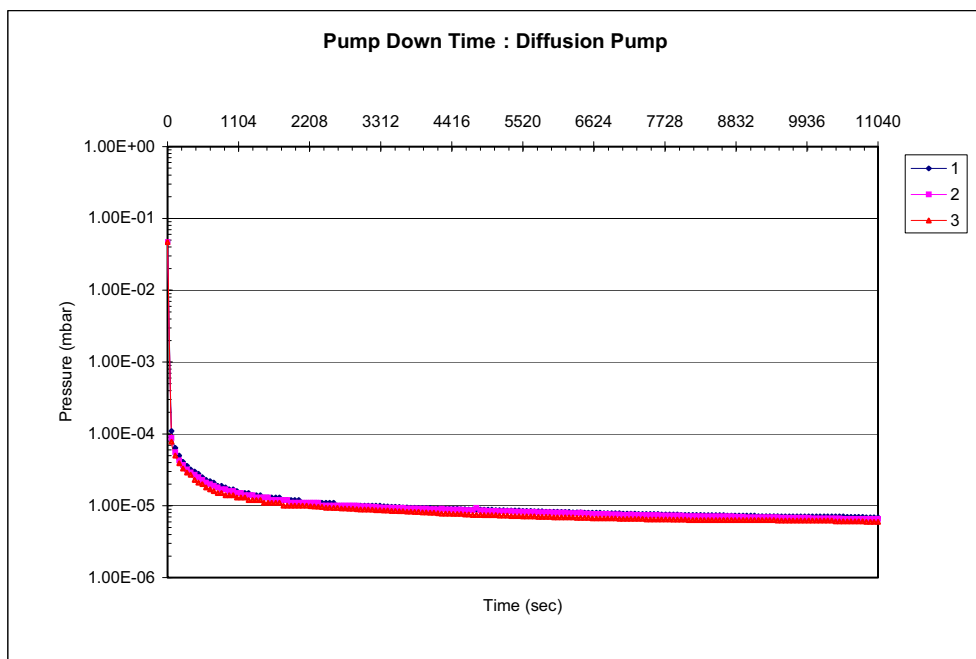
เพื่อหาความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

2) วิธีทดลอง

1. ตรวจสอบเครื่องเคลือบ ฝาปิดและวาล์วว่าปิดเรียบร้อยแล้วหรือไม่
2. ต้มน้ำมันของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ
3. เปิดเครื่องสูบบกลโรตารีเพื่อสร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้น รอจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศต่ำถึงประมาณ 10^{-2} mbar จึงปิดวาล์วหยาบบันทึกความดันขณะนั้นเป็นค่าเริ่มต้น
4. เปิดวาล์วท้าย เพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอทำงานต่อเนื่องกับเครื่องสูบบกลโรตารี เปิดเพลดวาล์ว เพื่อลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศคงที่
5. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความดันกับเวลา

3) ผลและอภิปรายผล

เมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ พบว่าระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันในภาชนะสุญญากาศจาก 4.7×10^{-2} mbar เป็น 1.5×10^{-5} mbar ในเวลาประมาณ 13 นาที (ตั้งแต่เปิดเพลดวาล์ว) และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ถึง 9.0×10^{-6} mbar ในเวลาประมาณ 48 นาที และถ้าสูบบอากาศต่อไปจะสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศลงไปได้ถึง 6.0×10^{-6} mbar ในเวลา 3 ชั่วโมง (180 นาที) เมื่อใช้น้ำมัน Silicone DC704EU



รูปที่ 3.21 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

3.4 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

เมื่อประกอบเครื่องเคลือบแล้ว นอกจากการทดสอบด้านสุญญากาศของเครื่องเคลือบแล้ว ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งที่จำเป็นคือ เครื่องเคลือบนี้สามารถเคลือบฟิล์มได้ตามต้องการหรือไม่ การศึกษาส่วนนี้เป็นการทดสอบว่าเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานหรือไม่ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบว่าเครื่องเคลือบสร้างขึ้นสามารถเคลือบฟิล์มได้หรือไม่

2) วิธีทดลอง

1. ติดตั้งสารเคลือบ (อะลูมิเนียม) ที่ลวดด้านทาน ปรับแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากลวดด้านทาน 10 cm นำกระจกแผ่นเรียบวางไว้ในสถานะสุญญากาศปิดฝาภาชนะสุญญากาศ
2. สร้างภาวะสุญญากาศให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ 5.0×10^{-5} mbar
3. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า ให้กับลวดด้านทาน โดยเพิ่มความต่างศักย์ทีละน้อย อะลูมิเนียมจะหลอมมารวมกันแล้วจะค่อยๆ ระบายไปจับบนแผ่นกระจกเรียบ ทำการเคลือบ เป็นเวลา 5 นาที
4. ทดสอบฟิล์มบางที่ได้โดยการเช็ดถูและขีดด้วยเล็บ

3) ผลและอภิปรายผล

จากผลศึกษาพบว่าขณะเคลือบ เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับลวดด้านทานจนร้อนเป็นสีแดง อะลูมิเนียมจะค่อยๆ หลอมมารวมกัน แล้วจึงระบายไปจับบนกระจกแผ่นเรียบเกิดเป็นฟิล์มผลการเคลือบฟิล์มบางเป็นที่น่าพอใจ เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีสีที่แวววาว ซึ่งเป็นสีของสารเคลือบ ไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มบาง และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือและขีดด้วยเล็บ พบว่าทั้งการเช็ดถูและขีดด้วยเล็บไม่สามารถทำให้ฟิล์มที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ในอากาศพบว่าฟิล์มที่ได้จะยังคงสภาพเหมือนเดิม จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางได้



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างกระจกก่อนเคลือบและหลังเคลือบ ด้วยอะลูมิเนียม

บทที่ 4

การจัดทำเอกสารประกอบการใช้เครื่องเคลื่อน

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลื่อนในสุญญากาศสำหรับใช้ในการศึกษาและฝึกอบรม คณะผู้วิจัยกำหนดให้มีการจัดทำเอกสารประกอบการใช้เครื่องเคลื่อน เนื้อหาประกอบด้วย (1) ภาคนทฤษฎีเกี่ยวกับสุญญากาศและการเคลื่อนในสุญญากาศ (2) ภาคนปฏิบัติเป็นขั้นตอนการทดลองด้านสุญญากาศและการเคลื่อนในสุญญากาศ (3) รายละเอียดและคู่มือการใช้เครื่องเคลื่อน และ (4) บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ โดยเอกสารที่เป็นรูปเล่มจะจัดทำแยกออกต่างหากจากรายงานนี้ ในส่วนนี้จะกล่าวสรุปในภาพรวมและรายละเอียดของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ ซึ่งมีผลการดำเนินงานดังนี้

4.1 เอกสารประกอบการใช้เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ

เอกสารประกอบการใช้เครื่องเคลื่อนที่จัดทำมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นรูปเล่มเอกสาร และส่วนที่เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในส่วนที่เป็นรูปเล่มเอกสารจะประกอบด้วย (1) ภาคนทฤษฎีเกี่ยวกับสุญญากาศและการเคลื่อนในสุญญากาศ (2) ภาคนปฏิบัติเป็นขั้นตอนการทดลองด้านสุญญากาศและการเคลื่อนในสุญญากาศ (3) รายละเอียดและคู่มือการใช้เครื่องเคลื่อน ส่วนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเป็นบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ โดยเอกสารนี้ได้จัดทำแยกออกจากรายงานการวิจัยนี้เป็นรูปเล่มต่างหาก

สำหรับเนื้อหาของรูปเล่มเอกสารจะประกอบด้วย ในส่วนของภาคนทฤษฎีจะเป็นการอธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับเทคโนโลยีสุญญากาศที่จำเป็นสำหรับการใช้เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ และในส่วนของภาคนปฏิบัติจะเป็นคู่มือสำหรับใช้ในการอบรมการใช้เครื่องเคลื่อนในสุญญากาศ ซึ่งมีลักษณะเป็นคู่มือทำการทดลอง ส่วนสุดท้ายจึงเป็นรายละเอียดของเครื่องและคู่มือการใช้เครื่องเคลื่อนเบื้องต้น

สำหรับบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนานั้นมีลักษณะเป็น บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรม เนื้อหานั้นเฉพาะที่เกี่ยวกับระบบสุญญากาศพื้นฐาน ที่มีช่วงความดันที่ $10^3 - 10^{-2}$ mbar โดยในส่วนเนื้อหาของบทเรียนจะมีทั้งในส่วนของหลักการและทฤษฎี รวมถึงการฝึกปฏิบัติสร้างภาวะสุญญากาศด้วยตนเองในรูปแบบของ Simulation

4.2 บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

ในส่วนนี้เป็นบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ประกอบการฝึกอบรม เนื่องจากการเคลื่อนในสุญญากาศนั้น สิ่งหนึ่งที่ผู้ใช้งานจำเป็นต้องรู้และเข้าใจคือระบบสุญญากาศเนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญ และมีความละเอียดอ่อนในการทำงาน บทเรียนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะเป็นส่วนเสริมให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงขั้นตอนที่จำเป็นในการใช้ระบบสุญญากาศ

สำหรับการศึกษานี้ส่วนนี้ คณะผู้วิจัยได้รับ นายอุทสัน พิทักษ์สายชล นิสิตบัณฑิตศึกษา วิชาเอกเทคโนโลยีทางการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มาเป็นผู้ช่วยวิจัยในส่วนนี้ (และเป็นวิทยานิพนธ์ของนิสิตด้วย) สำหรับเนื้อหารายละเอียดการดำเนินงานในส่วนนี้จะอยู่ในวิทยานิพนธ์ของ นายอุทสัน พิทักษ์สายชล แยกต่างหากจากรายงานนี้ ดังนั้นในส่วนนี้จะนำเสนอผลสรุปของงานในส่วนนี้ไว้ดังนี้

4.2.1 ลักษณะและแนวคิดของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีลักษณะเป็น บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรม (Computer Based Training ; CBT) เนื้อหาเน้นเฉพาะในเรื่องที่เกี่ยวกับระบบสุญญากาศพื้นฐาน ที่มีช่วงความดันที่ $10^3 - 10^{-2}$ mbar โดยในส่วนเนื้อหาของบทเรียนจะมีทั้งในส่วนหลักการและทฤษฎี รวมถึงการฝึกปฏิบัติสร้างภาวะสุญญากาศด้วยตนเองในรูปแบบของ Simulation

โดยภาพรวมบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะดังนี้ บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศจะนำเสนอเนื้อหาทางด้านทฤษฎี หลักการ และวิธีการสร้างภาวะสุญญากาศ ในรูปแบบของการจำลองแบบ โดยการนำเสนอด้วยภาพประกอบ อักษร เสียงบรรยาย และภาพกราฟฟิคที่สร้างขึ้น โดยแบ่งออกเป็นบทเรียนย่อยเพื่อความสะดวกในการเรียนและช่วงเวลาของความสนใจต่อการเรียน ซึ่งเรียงตามลำดับเหตุการณ์และความสำคัญ ผู้เรียนสามารถควบคุมการเรียนได้เองตามความสามารถของตนเองได้ตลอดบทเรียนด้วยแถบเครื่องมือที่กำหนด สามารถเลือกบททวนเนื้อหาเดิมได้อีกครั้งเมื่อจบแต่ละหน่วยการเรียนรู้ย่อย หรือเลือกกิจกรรมการทดลองสร้างภาวะสุญญากาศด้วยตนเองได้ สำหรับในส่วนการฝึกสร้างภาวะสุญญากาศนี้จะจำลองมาจากระบบสุญญากาศจริง จึงมีลักษณะของเงื่อนไขเข้ามาเกี่ยวข้อง ผู้เรียนจะต้องเลือกหรือตัดสินใจต่อการทดลองนั้น เมื่อผู้เรียนปฏิบัติถูกต้องตามเงื่อนไขก็จะสามารถปฏิบัติขั้นต่อไปได้ แต่ถ้าผู้เรียนปฏิบัติไม่ถูกต้อง จะมีการแจ้งให้ผู้เรียนทราบว่าปฏิบัติไม่ถูกต้อง และให้ผู้เรียนกลับไปเริ่มทดลองใหม่

สำหรับรายละเอียดต่างๆ ของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มีดังนี้

1. กลุ่มเป้าหมาย

ผู้ที่ต้องปฏิบัติงานด้านสุญญาศ ซึ่งมีพื้นฐานวิทยาศาสตร์ระดับ ม.ปลาย

2. วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

2.1 หลังจากเรียนบทเรียนเรื่อง “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสุญญาศ” แล้ว

ผู้เรียนสามารถ

2.1.1 บอกความหมายของสุญญาศได้

2.1.2 บอกความหมายของแก๊สและความสำคัญของแก๊สที่มีต่อสุญญาศได้

2.1.3 บอกแนวคิดเกี่ยวกับการสร้างสุญญาศในภาชนะปิดได้

2.2 หลังจากเรียนบทเรียนเรื่อง “ส่วนประกอบของระบบสุญญาศ” แล้วผู้เรียน

สามารถ

2.2.1 บอกส่วนประกอบที่จำเป็นต้องใช้และมีในระบบสุญญาศพื้นฐานได้

2.2.2 บอกหน้าที่และความสำคัญของเครื่องสูบลมสุญญาศได้

2.2.3 บอกลักษณะและการทำงานของเครื่องสูบลมสุญญาศได้

2.2.4 บอกลักษณะ หน้าที่และการทำงานของมาตรวัดความดันสุญญาศได้

2.2.5 บอกลักษณะ หน้าที่และการทำงานของท่อและวาล์วได้

2.3 หลังจากเรียนบทเรียนเรื่อง “การสร้างภาวะสุญญาศ” แล้วผู้เรียนสามารถ

2.3.1 บอกอุปกรณ์ประกอบของระบบสุญญาศได้

2.3.2 บอกลำดับขั้นตอนการเปิดการสร้างภาวะสุญญาศได้

2.3.3 บอกลำดับขั้นตอนการปิดการสร้างภาวะสุญญาศได้

3. เนื้อหาบทเรียน : แบ่งเป็น 4 หน่วยย่อยดังนี้

3.1 หน่วยที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสุญญาศ ประกอบด้วย

3.1.1 สุญญาศคืออะไร

3.1.2 ธรรมชาติของแก๊ส

3.1.3 แก๊สอุดมคติ

3.1.4 แก๊สทำให้เกิดความดันได้อย่างไร

3.1.5 กฎของบอยล์และกฎของชาร์ล

3.1.6 เราสร้างภาวะสุญญาศได้อย่างไร

3.1.7 เมื่อไรจึงจะเกิดภาวะเป็นสุญญาศ

3.2 หน่วยที่ 2 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

3.2.1 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

3.2.2 ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber)

3.2.3 เครื่องสูบลสุญญากาศ (vacuum pump)

3.2.4 มาตรวัดความดัน pressure gauge

3.2.5 ท่อและวาล์ว (pipe and valves)

3.3 หน่วยที่ 3 การสร้างภาวะสุญญากาศ

3.3.1 ระบบสุญญากาศพื้นฐาน

3.3.2 ขั้นตอนการเปิดการสร้างภาวะสุญญากาศ

3.3.3 ขั้นตอนการปิดการสร้างภาวะสุญญากาศ

3.3.4 การเปิดภาชนะสุญญากาศชั่วคราว

3.4 หน่วยที่ 4 การฝึกการสร้างภาวะสุญญากาศ

3.4.1 ฝึกสร้างภาวะสุญญากาศต่ำ

3.4.2 ฝึกสร้างภาวะสุญญากาศสูง

4.2.2 แนวทางการพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

การพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรม ดำเนินการโดย เริ่มจากศึกษาแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยสอนประเภทต่างๆ จากนั้นจึงมากำหนดสมบัติและลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ออกแบบสร้างเนื้อหาบทเรียน เรื่อง “ระบบสุญญากาศ” ให้เหมาะสมสำหรับการนำเสนอด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้เนื้อหารายละเอียดตามเอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีสุญญากาศ ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดมาประกอบการพัฒนา ในส่วนของการพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ โปรแกรม Macromedia Flash MX ซึ่งสามารถรองรับต่อการแสดงผลทั้งภาพ เสียง และภาพเคลื่อนไหวได้เป็นอย่างดี

สำหรับขั้นตอนการพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเริ่มจากการเขียนผังงานสตอรีบอร์ด แล้วจึงพัฒนาบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงนำไปทดลองใช้กับผู้เรียนเป็นรายบุคคล (one-to-one try out) จำนวน 2 คน เพื่อตรวจสอบบทเรียนด้านการสื่อความ ลำดับขั้นและวิธีการนำเสนอว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ จากนั้นจึงนำบทเรียนมาปรับปรุงแก้ไข แล้วนำไปทดลองใช้กับผู้เรียนจำนวน 6 คน เพื่อตรวจสอบปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเรียน จากนั้นจึงนำปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ที่ตรวจพบมาปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้บทเรียนที่มีประสิทธิภาพและมีความสมบูรณ์ตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ แล้วจึงจัดทำคู่มือประกอบการใช้บทเรียน ก่อนนำไปใช้ทดสอบภาคสนาม

4.2.3 ลักษณะของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญาภาศ

บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญาภาศในงานวิจัยนี้เป็นชุดบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประเภทรวมวิธีการสอนต่างๆ เข้าด้วยกัน (combination) 3 แบบ คือ

1. แบบการสอนเนื้อหา (tutorial) เป็นส่วนนำเสนอเนื้อหาความรู้ที่เกี่ยวข้องกับสุญญาภาศ

2. แบบการสาธิต (demonstration) เป็นส่วนที่สาธิตขั้นตอนการใช้งานระบบสุญญาภาศ

3. แบบจำลองสถานการณ์ (simulation) เป็นส่วนจำลองสถานการณ์แบบกระบวนการกล่าวคือ โปรแกรมจะจำลองลำดับขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์สำคัญๆ และจำลองขั้นตอนการทำงานของระบบสุญญาภาศ ซึ่งผู้เรียนสามารถศึกษาขั้นตอนตามที่กำหนดไว้

สำหรับการนำเสนอเนื้อหาของบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ดังนี้

1. ส่วนนำ เป็นส่วนที่แจ้งชื่อเรื่อง หน่วยงานที่ผลิต สร้างความเข้าใจโดยใช้ภาพในลักษณะสามมิติที่มีความเคลื่อนไหว และพสานกับดนตรีที่เร้าใจเข้ามาประกอบ

2. ส่วนเมนูบทเรียนหรือเมนูหลัก (Main menu) เมื่อผู้เรียนเข้าสู่บทเรียนจะมีการทักทายผู้เรียนด้วยเสียงอธิบายแนะนำส่วนประกอบบนหน้าเมนูหลักของบทเรียนซึ่งจะมีสัญลักษณ์มือ (สีแดงกระพริบ) นำสายตา ในส่วนเมนูหลักประกอบด้วยเมนูบทเรียน 3 บทเรียน เพื่อสู่บทเรียน, เมนูการทดลองสร้างภาวะสุญญาภาศ เพื่อฝึกสร้างภาวะสุญญาภาศด้วยตนเอง, เมนูคำแนะนำ เพื่อแนะนำการใช้และเมนูออกจากโปรแกรม

3. ส่วนเมนูบทเรียนย่อย (Sub menu) เมื่อผู้เรียนต้องการศึกษาเนื้อหาบทเรียนและทำการเลือกบทเรียนในเมนูหลักแล้ว บทเรียนจะแสดงเมนูย่อยของบทเรียนนั้นและแสดงจุดประสงค์ของบทเรียนนั้นๆ

4. ส่วนเนื้อหาบทเรียน เสนอในลักษณะภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่จำลองขึ้นเพื่อถ่ายทอดความเข้าใจและมีเสียงบรรยายประกอบตลอด ผู้เรียนสามารถที่จะควบคุมบทเรียนได้ตามที่ต้องการ เช่น การหยุดชั่วคราว การเลื่อนไปยังตำแหน่งที่เรียนผ่านมาแล้ว หรือเมื่อต้องการเรียนซ้ำอีกครั้งด้วยแถบเครื่องมือด้านล่างของจอภาพ

5. ผู้เรียนสามารถฝึกสร้างภาวะสุญญาภาศด้วยตนเอง เมื่อศึกษาเนื้อหาบทเรียนแล้วหรือเมื่อผู้เรียนต้องการทดลองสร้างภาวะสุญญาภาศ จะมีการตอบสนองต่อการกระทำของผู้เรียนอย่างต่อเนื่อง ทั้งถูกและผิด

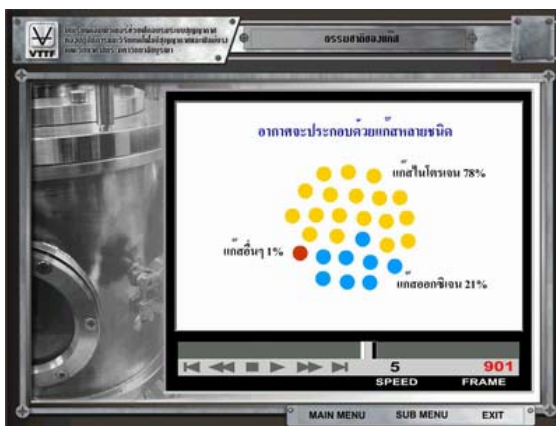
6. ส่วนของการออกจากโปรแกรม ผู้เรียนสามารถออกจากบทเรียนได้ตลอดเวลาตามที่ต้องการ หรือยกเลิกการออกจากบทเรียนได้หากยังไม่ประสงค์ที่จะออกจากบทเรียน เนื่องจากจะมีหน้าเมนูเพื่อให้ผู้เรียนยืนยันอีกครั้ง และเมื่อออกจากบทเรียนก็จะแสดงการขอบคุณคณะผู้จัดทำ



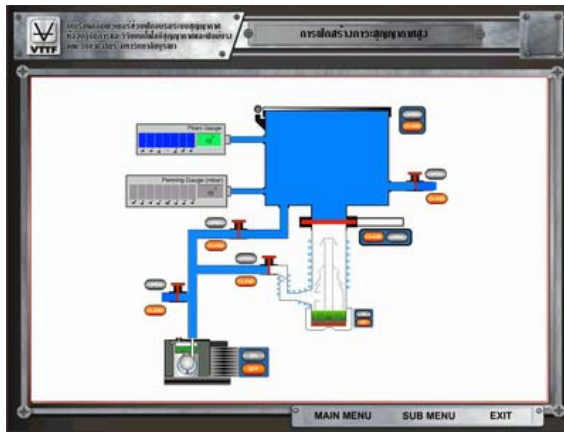
รูปที่ 4.1 หน้าแรกของโปรแกรมและเมนูหลัก



รูปที่ 4.2 เมนูย่อยซึ่งจะแสดงจุดประสงค์ของบทเรียนด้านซ้าย



รูปที่ 4.3 ส่วนของโปรแกรมที่แสดงเนื้อหาบทเรียนประกอบคำบรรยาย



รูปที่ 4.4 ส่วนการฝึกอบรมซึ่งผู้เรียนจะได้ทดลองใช้หากผิดพลาดจะมีการเตือน



รูปที่ 4.5 เมนูย่อยเลือกการทำงานเมื่อจบแต่ละหน่วยการเรียนรู้



รูปที่ 4.6 ส่วนออกจากโปรแกรมจะมีการยืนยันการออกจากโปรแกรม

4.2.4 การทดสอบบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมที่ผ่านการปรับปรุงแก้ไขแล้วมาทดลองใช้กับ นิสิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชั้นปีที่ 2 ชั้นปีที่ 3 และ ชั้นปีที่ 4 จำนวน 30 คน โดยพิจารณาผู้เรียนจากระดับผลการเรียนที่ผ่านมา ให้คะแนนระหว่างผู้เรียนที่มีผลการเรียนสูงและผลการเรียนต่ำ จากนั้น ให้ผู้เรียนนำบทเรียนไปศึกษาเป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 12 คาบ (ประมาณ 3 สัปดาห์) โดยแต่ละสัปดาห์ให้ผู้เรียนมาทำแบบทดสอบผลสัมฤทธิ์หลังเรียน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที แล้วนำข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพหลังเรียนของบทเรียน จากนั้นนำค่าประสิทธิภาพที่หาได้มาทำการทดสอบว่าค่าประสิทธิภาพหลังเรียนที่ได้มานั้นเป็นสัดส่วนเดียวกับกลุ่มประชากร สอดคล้องกับการประเมินความคิดเห็นของผู้เรียนที่มีต่อบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ 5 ด้าน คือ ด้านเนื้อหา ด้านคุณภาพการสอน ด้านการออกแบบ ด้านเทคนิคของโปรแกรม และด้านคู่มือประกอบบทเรียน

4.2.5 ผลการทดสอบบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

จากการทดลองใช้ในภาคสนามกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนิสิตคณะวิทยาศาสตร์ จำนวน 30 คน โดยให้ กลุ่มตัวอย่างนำบทเรียนไปติดตั้งเพื่อศึกษาและทำแบบทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน พบว่ามีผู้ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 28 คน คิดเป็น ร้อยละ 93.33 เมื่อนำค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพหลังเรียนมาทำการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบว่าเป็นสัดส่วนเดียวกับกลุ่มประชากรผลปรากฏว่า บทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศมีประสิทธิภาพหลังเรียนสูงกว่าร้อยละ 80 ของผู้เรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

หลังจากที่ผู้เรียนได้เรียนและทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแล้วได้แสดงความคิดเห็นต่อบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศใน 5 ด้าน ดังนี้คือ ด้านเนื้อหา ด้านคุณภาพการสอนด้านการออกแบบ ด้านเทคนิคของโปรแกรม และด้านคู่มือประกอบบทเรียน จากการศึกษาพบว่าผู้เรียนมีความคิดเห็นว่าบทเรียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์อยู่ในเกณฑ์ดี ($\bar{X}=4.05$)

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพหลังเรียนกับสัดส่วนของกลุ่มประชากร

		Z
ร้อยละของผู้เรียนผ่านเกณฑ์ทดสอบที่คำนวณได้	93.33	1.82*
ร้อยละของผู้เรียนผ่านเกณฑ์ทดสอบที่ตั้งเป้า	80.00	

P < 0.05 * (ทดสอบหางเดียว)

ตารางที่ 4.2 คะแนนเฉลี่ยความคิดเห็นของผู้เรียนที่มีต่อบทเรียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยฝึกอบรมระบบสุญญากาศ

ข้อ	เรื่อง	$\bar{X}$	SD	ระดับความคิดเห็น
1	ด้านเนื้อหา	4.01	.53	ดี
2	ด้านคุณภาพการสอน	4.05	.66	ดี
3	ด้านเทคนิคของโปรแกรม	4.01	.54	ดี
4	ด้านการออกแบบ	3.98	.61	ดี
5	คู่มือการใช้บทเรียน	4.19	.57	ดี
เฉลี่ยรวม		4.05	.58	ดี