

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช

ปริญญานิพนธ์

ของ

จิราภรณ์ พงษ์ไธภา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม 2547

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๖๖๐.๒๘๔๒๖

๘๖๗๓๐

๕.๓

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช

บทคัดย่อ

ของ

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

พฤษภาคม ๒๕๔๗

จิราภรณ์ พงษ์โสภา. (2547). การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช .

ปริญญาานิพนธ์ วท.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.ณสรณ์ ผลโคก, ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา
ศิลป์สกุลสุข.

อุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช เป็นอุปกรณ์ที่ใช้โรยสารลงบนภาชนะให้ความร้อนภายในระบบสุญญากาศเพื่อให้เกิดฟิล์มบางเชิงประกอบ ซึ่งอุปกรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนให้ความร้อนกับภาชนะให้ความร้อน ซึ่งประกอบด้วยทองแดงกลึงขึ้นรูป 4 ชั้น เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและเป็นส่วนที่จับยึด ภาชนะให้ความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้น เกิดจากการให้ความร้อนผ่านหม้อแปลงปรับค่าได้และหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง ซึ่งบริเวณทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง ให้กระแสไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 300 แอมแปร์ ส่วนของการโรยสารซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดเพื่อให้เกิดอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าและเกิดการสั่นภายในภาชนะสุญญากาศ สร้างขึ้นโดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นอุปกรณ์โรยสารที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทำด้วยสเตนเลสกลึงขึ้นรูปประกอบกัน 4 ชั้น อลูมิเนียม 2 ชั้น โดยสเตนเลสชั้นหนึ่งต่อผ่านระหว่างภายในภาชนะสุญญากาศกับภายนอกภาชนะ และใช้เป็นแกนสำหรับสวมขดลวดทองแดง ส่วนวงจรควบคุมการโรยสารสามารถปรับค่าความถี่ได้ โดยอุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถโรยสารสูงสุด 3.38 กรัมต่อนาที ที่ความถี่ 5 Hz

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF FLASH EVAPORATION APPARATUS

AN ABSTRACT

BY

JIRAPORN PONGSOPA

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Science degree in Physics
at Srinakharinwirot University

May 2004

Jiraporn Pongsopa. (2004). *A design and construction of flash evaporation apparatus*. Master thesis , M.Sc. (Physics). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Assoc.Prof.Dr. Nason Phonphok, Assist.Prof. Bancha Silskulsuk.

The purpose of flash evaporation apparatus is dropping powdered material onto a heated boat in a vacuum system for making a compound thin film sample. The apparatus composes of two main parts .The first one is a heat source made of two copper electrical poles and 2 bases of copper for holding the boat .The heat originates from a variable transformer and a high current transformer with maximum current of 300 amperes . The second part is dropper working by passing current through a conduction coil. Magnetic field from the coil results in vibration of the dropper. One out of two major parts of the dropper, made of 4 pieces of stainless and two pieces of aluminium , is in the vacuum chamber.The role of a stainless pieces is connecting between inside and outside of vacuum chamber .The remainder part of the dropper is a control circuit in which the frequency can be varied such that the maximum dropping rate is 3.38 grams per minute at the frequency of 5 Hz.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช

ของ
นางสาวจิราภรณ์ พงษ์โสภา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)
วันที่ ๒๕ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๔๗

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฏฐ์ ผลโชค)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปกุลสุข)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญลดา วีระสัย)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(รองศาสตราจารย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา ความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา และช่วยแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ อย่างดี จากรองศาสตราจารย์ดร.ณสรศักดิ์ ผลโภค ซึ่งเป็นประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ที่ชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย และรองศาสตราจารย์สุรสิงห์ ไชยคุณ คณะกรรมการสอบปากเปล่า ที่ได้กรุณาเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ และได้นำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่คอยให้กำลังใจอยู่เสมอจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

จิราภรณ์ พงษ์โสภา

สารบัญ

บทที่

หน้า

1 บทนำ

ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	4
ความสำคัญของงานวิจัย.....	5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบสัญญาณภาค.....	6
ระดับความเป็นสัญญาณภาค.....	7
พฤติกรรมของอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ.....	9
การกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์.....	9
ระยะอิสระเฉลี่ย.....	10
แรงขับ.....	11
อัตราสูบ.....	12
การคายก๊าซ.....	12
การรั่ว.....	13
ความดันไอ.....	14
องค์ประกอบพื้นฐานและอุปกรณ์ของการเคลือบสัญญาณภาค.....	16
ภาชนะสัญญาณภาค.....	16
เครื่องสูบลำสัญญาณภาค.....	16
เครื่องสูบลำโรตารี.....	17
เครื่องสูบลำแฟรไอ.....	18
อุปกรณ์วัดความดัน.....	18
การเคลือบฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร.....	19
อัตราการระเหยสาร.....	19
วิธีการระเหยสาร.....	21

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ) การระเหยสารด้วยต้นกำเนิดความร้อนจากความดันทาน.....	23
การระเหยสารแบบแฟลช.....	24
ความร้อน.....	27
การถ่ายเทความร้อน.....	27
การนำความร้อน.....	27
การพาความร้อน.....	28
การแผ่ความร้อน.....	28
คุณสมบัติเชิงความร้อนของสสาร.....	29
ความจุความร้อน.....	29
ความร้อนแฝงการเปลี่ยนสถานะ.....	29
อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง.....	30
ไอซี 555.....	30
วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์.....	33
วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์.....	34
วงจรสวิตช์ทำงานด้วยทรานซิสเตอร์.....	36
วงจรการเรียงกระแสแบบเต็ม.....	36
ไฟฟ้าและแม่เหล็ก.....	37
กำลังและการสูญเสียความร้อน.....	38
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
โครงสร้างระบบสุญญากาศ.....	40
เครื่องสูบอากาศและภาชนะสุญญากาศ.....	40
ภาชนะสุญญากาศ.....	41
ระบบสูบอากาศ.....	42
การระบายความร้อนด้วยเครื่องทำความเย็น.....	43

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
3 (ต่อ)	เกจวัดความดัน.....	45
	การออกแบบขั้วไฟฟ้าและแหล่งความร้อน.....	46
	การออกแบบขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	46
	แหล่งความร้อนเพื่อระเหยสาร.....	49
	ฉนวนไฟฟ้า.....	50
	การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้โรยสาร.....	52
	แผ่นรองรับและแท่นรอง.....	64
	การออกแบบวงจรที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์โรยสาร.....	65
	ชุดหลอดทองแดง.....	67
	หลักการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการโรยสาร.....	67
	การคำนวณปริมาณความร้อน.....	69
	ความร้อนโดยการนำของไอสาร.....	69
	ความร้อนที่เกิดจากการพาของโมเลกุลอากาศ.....	71
	ความร้อนจากการแผ่รังสี.....	71
	ความร้อนที่ระบายให้กับทองแดง.....	72
4	การสร้างอุปกรณ์และการทดลอง	
	การทดสอบการโรยของอุปกรณ์โรยสาร.....	73
	วงจรควบคุมการโรยสาร.....	73
	ทดสอบโรยสาร.....	75
	การสร้างและทดสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาชนะบรรจุสาร.....	78
	ทดสอบเตรียมฟิล์มบาง.....	82
	ขั้นเตรียมอุปกรณ์.....	82
	ขั้นเตรียมระบบสุญญากาศ.....	82
	ขั้นทดสอบการระเหยสาร.....	83
	การระเหยสาร.....	84

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการวิจัย.....	88
สมบัติอุปกรณ์โรยสาร.....	88
สมบัติอุปกรณ์รองรับ.....	89
ผลการสร้างและทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อน.....	89
ผลการทดสอบระเหยสาร.....	89
อภิปรายผล.....	90
ข้อเสนอแนะ.....	91
บรรณานุกรม.....	92
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	94

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	การเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยความดัน.....	7
2	แสดงระยะอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ที่อุณหภูมิ 298 K ที่ระดับความดันต่างๆ....	11
3	จุดหลอมเหลวและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความดันไอ 10^{-4} mbar ของสาร.....	24
4	ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าทางออกพลิกฟลอปและทางออก (3)กับศักย์ไฟฟ้าที่ (6), (2).....	32
5	แสดงขนาดของดินขาวทรงกลมตันก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส	50
6	กำหนดค่าความถี่ของเครื่องเคาะหลังจากได้ทำการปรับค่าแล้ว.....	74
7	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเกล็ดอลูมิเนียม.....	76
8	น้ำหนักอลูมิเนียมที่โรยได้ในแต่ละความถี่.....	77
9	ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า.....	80
10	น้ำหนักฟิล์มที่ได้จากการระเหยสารแบบแฟลช.....	86

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ความสัมพันธ์ของระดับความเป็นสุญญากาศและช่วงความดัน.....	8
2 ของความดันไอของธาตุและอุณหภูมิ.....	15
3 เครื่องสูบลูกโรตารีชนิดน้ำมัน.....	17
4 เครื่องสูบลูกความดันแพร่ไอ (Diffusion Pump).....	18
5 ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัวของฟิล์ม.....	20
6 รูปแบบการระเหิดสารด้วยการให้ความร้อน.....	22
7 (a) ภาพขณะบรรจุสารแบบเส้น (b) ภาพขณะบรรจุสารแบบโบท.....	23
8 การออกแบบอุปกรณ์โรยสารโดย จอร์จ (George) และ ราดากริสนัน.....	26
9 ความสัมพันธ์ความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ.....	27
10 โครงสร้างวงจรภายในไอซี 555.....	31
11 โครงสร้างภายนอกไอซี 555.....	32
12 วงจรอะสเตเบิล.....	34
13 วงจรโมโนสเตเบิล.....	35
14 วงจรสวิตช์.....	36
15 วงจรเรียงกระแสแบบ Full Wave Rectifiers.....	36
16 การเกิดฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าบนขดลวด.....	37
17 โครงสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการระเหิดสารแบบแฟลช.....	40
18 (a) ด้านบนของภาชนะสุญญากาศบนฐานเบสเพลท (Base plate)	
(b) ขนาดภาชนะสุญญากาศที่มีในห้องปฏิบัติการ.....	41
19 เครื่องสูบลูกโรตารีที่ใช้ในการทดลอง.....	42
20 เครื่องสูบลูกความดันแพร่ไอที่ใช้ในการทดลอง.....	42
21 เครื่องทำความเย็นขนาด 14,000 BTU.....	43
22 เส้นทางของท่อไปยังตำแหน่งต่างๆ.....	44
23 เกจพิหรานี้ติดตั้งเพื่ออ่านค่าภายในภาชนะสุญญากาศ.....	45
24 แบบข้อต่อเกจ.....	46

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
25 แบบไข้วไฟฟ้าทองแดงซึ่งด้านใต้ของไข้วทองแดงพันด้วยท่อทองแดงสำหรับ การระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	47
26 แบบไข้วทองแดงเพื่อใช้ยึดภาชนะให้ความร้อน.....	48
27 วงจรอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสาร.....	49
28 แบบฉนวนไฟฟ้า.....	51
29 อุปกรณ์โรยสารประกอบเสร็จ.....	52
30 ชิ้นงาน A.....	53
31 ชิ้นงาน B.....	54
32 ชิ้นงาน C.....	55
33 ชิ้นงาน D.....	56
34 ชิ้นงาน E.....	57
35 ชิ้นงาน F.....	58
36 ชิ้นงาน G.....	59
37 ชิ้นงาน H.....	60
38 ชิ้นงาน I.....	61
39 ชิ้นงาน J.....	61
40 ชิ้นงาน K.....	62
41 ชิ้นงาน L.....	62
42 ชิ้นงาน M.....	63
43 ตำแหน่งการเจาะรู เพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับเมื่อทำการระเหยสาร.....	64
44 วงจรควบคุมอุปกรณ์โรยสาร.....	66
45 ขดลวดทองแดง.....	67
46 ความร้อนที่ใช้ในการระเหยสาร.....	69
47 ความร้อนที่เกิดจากการนำของไอสาร.....	69
48 กราฟน้ำหนักของเกล็ดอลูมิเนียม.....	78
49 การวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ.....	79
50 กราฟความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกำลังไฟฟ้าที่ขาออก.....	81

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
51 กราฟความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกำลังไฟฟ้าที่ขาเข้า.....	81
52 ตำแหน่งวาล์วเมื่อปิดระบบสุญญากาศ.....	83
53 โบทขณะให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	85

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสุญญากาศมีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ โดยที่ระบบสุญญากาศที่มีระดับความดันต่ำ สามารถใช้เตรียมฟิล์มบาง (Thin Films) หรือเคลือบผิววัสดุ เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องประดับ และการเคลือบเพื่อความคงทน โดยในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้ระบบสุญญากาศปริมาณที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา ทำให้มีการสั่งซื้อเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสารเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการสั่งซื้อจากต่างประเทศ เครื่องมือและอุปกรณ์จะมีราคาสูง หากสามารถสร้างหรือประดิษฐ์ได้เองในประเทศนอกจากเป็นการประหยัดแล้วยังสามารถนำไปสู่ความเข้าใจในเทคโนโลยี สามารถสร้างเทคโนโลยีขึ้นเองในประเทศทั้งเพื่อใช้ในการศึกษาและอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุหรือการเคลือบฟิล์มบางนั้น ในปัจจุบันพบว่ามีหลายวิธีด้วยกัน เช่น เคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating), การระเหยสาร (Evaporation), สเปตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น ซึ่งพบว่ากระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้านั้น มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งน้ำเสียและอากาศ เกิดสารพิษในทุกกระบวนการของการเคลือบผิว ทั้งในส่วนของการเตรียมชิ้นงานก่อนเคลือบขณะเคลือบ และหลังเคลือบ การเลือกเคลือบผิววัสดุหรือทำฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ จะทำได้ดีในที่ที่มีความเป็นสุญญากาศสูงหรือความดันต่ำกว่า 10^{-5} torr เป็นต้นไป¹ การเคลือบฟิล์มบางที่ความดันต่ำไม่เพียงพอ พบว่าโมเลกุลของสารที่ต้องการเคลือบผิววัสดุนั้น มีโอกาสที่จะชนกับโมเลกุลต่าง ๆ ของก๊าซ ที่อยู่ในอากาศ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ส่งผลให้ไอของสารที่ระเหยไม่สามารถไปเคลือบบนผิววัสดุรองรับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเทคโนโลยีเกี่ยวกับการเคลือบผิววัสดุ จึงพยายามที่จะลดปริมาณก๊าซที่มีอยู่ในระบบ เพื่อให้ได้ความดันในระดับที่ต้องการ

¹ Joy George. (1992). *Preparation of Thin Films*. p.1

องค์ประกอบหลักของระบบสุญญากาศจะประกอบด้วย เครื่องสูบ ภาชนะสุญญากาศ อุปกรณ์ส่งผ่านก๊าซและกระแสไฟฟ้า เครื่องมือวัดความดัน วาล์วและท่อ เป็นต้น

การเคลือบผิววัสดุในระบบสุญญากาศนั้น พบว่าการระเหยสารในสุญญากาศ มีการทำกันอย่างแพร่หลายและมีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งการระเหยสารในปัจจุบันพบว่ามีหลายวิธี เช่น การระเหยแบบให้ความร้อนกับตัวต้านทาน (Resistance evaporation)¹, การระเหยแบบแฟลช (Flash evaporation) , การระเหยแบบลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation)² และการระเหยแบบเลเซอร์ (Laser evaporation)³ เป็นต้น

การระเหยสาร (Evaporation) โดยทั่วไปจะมีอุปกรณ์และรูปแบบในการระเหยคล้ายคลึงกัน โดยจะประกอบด้วย เครื่องสูบอากาศ (Vacuum Pumps) เพื่อให้ความดันภายในระบบลดลง ภาชนะใส่สาร (Source) ใช้ใส่สารที่ต้องการระเหยโดยสามารถทนความร้อนได้สูงและมีความดันไอลดต่ำ แหล่งให้ความร้อน (Heater) ซึ่งต้องมีกำลังที่เพียงพอต่อการระเหยสาร อุปกรณ์วัดความดัน (Gauge Pressure) เป็นต้น ซึ่งในการระเหยสารแบบแฟลช จะมีอุปกรณ์เพิ่มเติมคืออุปกรณ์ที่ใช้โรยสารที่ต้องการระเหยลงบนภาชนะให้ความร้อน ซึ่งสารที่โรยลงบนภาชนะจะเกิดการระเหยในทันทีเมื่อได้รับความร้อนเพียงพอวิธีนี้จึงเหมาะกับการระเหยสารผสม ทั้งนี้ในการระเหยสารผสมด้วยวิธีให้ความร้อนกับภาชนะใส่สาร มักจะพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารผสมแล้ว จะเกิดการแยกตัวของสารผสม เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีความดันไอที่แตกต่างกัน ดังนั้นส่วนผสมของฟิล์มที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและเกิดการแยกตัวของสารแต่ละชนิดได้

เนื่องจากการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยแบบแฟลชนี้ มีการกระจายของฟิล์มที่สม่ำเสมอ และการจัดทำไม่ยุ่งยาก จึงมีผู้นิยมเตรียมฟิล์มบางชนิดนี้ โดยในปี ค.ศ.1981 จอร์จ (George) และราดาคริสนัน (Radhakrishnan) ได้ออกแบบอุปกรณ์โรยสารเพื่อใช้ระเหยสารแบบแฟลชเตรียมฟิล์มบาง Sb_2S_3 ⁴ และ ในปี ค.ศ.2000 รามาเดนและคณะ (Ramadan, et al.) ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสาร Egypt Journal เตรียมฟิล์มบาง Y-Ba-Cu-O โดยใช้การระเหยแบบแฟลช ซึ่งฟิล์มบางที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductor)⁵

¹ (online).(August ,2003). <http://www.hiqengineering.com/>

² (online).(August ,2003). <http://www.uccs.edu/~physics/solstlab.html>

³ (online).(August,2003). <http://www.mtmi.vu.lt/cmat/>

⁴ Joy George. (1992). *Preparation of thin films*. p. 11.

⁵ (online).(May,2003). <http://www.futurescience.com/manual/ybcomsds.html>

การทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยได้เลือกออกแบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการระเหยสารแบบแฟลช (Flash Evaporation) โดยอุปกรณ์โรยสารจะสามารถโรยสารลงทีละน้อย บนภาชนะใส่สารที่มีความร้อนเพียงพอที่ทำให้สารที่โรยระเหยหมดพร้อมกัน ทั้งนี้จะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยพิจารณาความดันไอของสาร ที่สามารถทำให้สารระเหยหมดในครั้งเดียว หลังจากนั้นทำการโรยสารทีละน้อย จนได้ฟิล์มของสารที่ต้องการ วิธีการนี้จะได้ฟิล์มบางที่ได้สัดส่วนสม่ำเสมอว่าการระเหยสารด้วยความร้อนธรรมดา เครื่องมือที่สร้างขึ้นจากวัสดุที่สามารถหาได้ในประเทศนี้ จะนำมาประกอบกับระบบสุญญากาศของภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และทดสอบเตรียมฟิล์มบางโดยใช้เกล็ดอลูมิเนียมเพื่อให้สามารถเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมได้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ ได้ตั้งความมุ่งหมายเพื่อให้ได้ชุดอุปกรณ์สำหรับการระเหยสารแบบแฟลชที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. ชุดอุปกรณ์ที่สามารถนำมาติดตั้งบนเบสเพลท (Base Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 เซนติเมตร ในภาชนะสุญญากาศขนาดความสูง 30.5 เซนติเมตร ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าที่สามารถทนกระแสสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 100 แอมแปร์ ชุดโรยสาร และแท่นวางวัสดุรองรับ
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถปรับปริมาณกระแสได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาชนะให้ความร้อน
3. ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้เตรียมฟิล์มบางของสารที่มีความดันไอไม่ต่ำกว่า 10^{-4} torr ที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 1200 K

ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช ติดตั้งบนเบสเพลทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 เซนติเมตร ในภาชนะสุญญากาศขนาดความสูง 30.5 เซนติเมตร
2. สามารถเตรียมฟิล์มบางของสารที่มีความดันไอไม่ต่ำกว่า 10^{-4} torr ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 K
3. สร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับป้อนผ่านกระแส (Current feed through) และขั้วทองแดงจับยึด ภาชนะให้ความร้อน ที่สามารถทนกระแสได้ ไม่ต่ำกว่า 100 แอมแปร์
4. สร้างแท่นวางแผ่นรองรับ (Substrate) ที่สามารถวางแผ่นรองรับได้ไม่น้อยกว่า 3 ชั้น ในตำแหน่งที่ทำมุมต่างกับกับแนวตั้งที่ผ่านศูนย์กลางภาชนะให้ความร้อน
5. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้โรยสาร ที่ปรับเปลี่ยนอัตราการโรยสารได้ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 กรัมต่อนาที หรือมากกว่า
6. สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายกระแสสูงสุด 100 แอมแปร์ หรือมากกว่า และสามารถปรับค่ากระแสได้
7. ทดสอบหาอัตราการโรยสารของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นกับผงอลูมิเนียม
8. ทดสอบการระเหยสารด้วยการระเหยสารแบบแฟลชกับอลูมิเนียม โดยหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับภาชนะให้ความร้อน ที่อัตราการโรยสารต่างกัน
9. วัดการกระจายมวลของฟิล์มบนแผ่นรองรับที่มุมทั้งสาม ตามที่ระบุในข้อ 4

ความสำคัญของงานวิจัย

1. สามารถสร้างอุปกรณ์การระเหยสารและระเหยสารแบบเฟลซโดยใช้อุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการและวัสดุที่จัดหาได้ภายในประเทศ โดยสามารถใช้งานได้จริง
2. นำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบางและนำไปสู่การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบางต่อไป
3. ลดต้นทุนการนำเข้าอุปกรณ์บางชนิดที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ
4. ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์เพื่อสร้างอุปกรณ์เตรียมฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและนำไปพัฒนาสำหรับการระเหยสารแบบอื่น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบและจัดอุปกรณ์การระเหยแบบแฟลช โดยมีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ คือ

- 2.1 ระบบสุญญากาศ
- 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานและอุปกรณ์ของการเคลือบสุญญากาศ
- 2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร
- 2.4 ความร้อน
- 2.5 อิเลคทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบสุญญากาศ

สุญญากาศ คือ บริเวณที่มีความดันต่ำกว่าระดับความดันบรรยากาศ ซึ่งที่ความดันมาตรฐานของความดันบรรยากาศคือ 760 มิลลิเมตรปรอทที่อุณหภูมิ 273 K^1 และความดันหมายถึงแรงเฉลี่ยที่เกิดจากอัตราส่วนของโมเลกุลของก๊าซที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งการวัดหน่วยความดันในระบบ SI นั้น มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร หรือใช้หน่วยปาสคาล (Pa) นอกจากนั้นยังมีหน่วยความดันอื่นที่นิยมใช้ในการเทคโนโลยีสุญญากาศ เช่น ทอร์ (torr), บาร์ (bar), บรรยากาศ (atm) เป็นต้น ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยความดันดังตาราง 1

¹ Roger Fabian. (1993). *Vacuum Technology*.ASM International. p.1

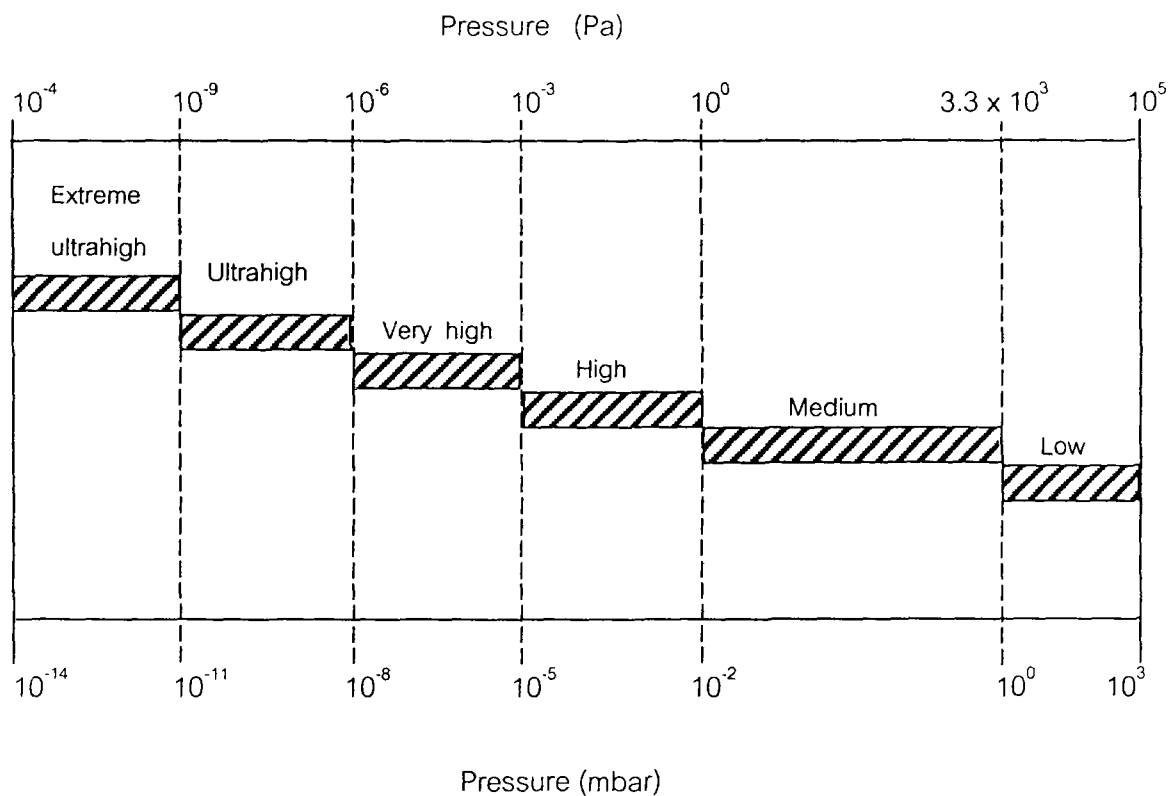
ตาราง 1 การเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยความดัน

ความดัน	หน่วย				
	พาสคัล(Pa)	มิลลิเมตรปรอท (mmHg) หรือ ทอร์ร(torr)	1บรรยากาศ (atm)	ดายย์ต่อตาราง เซนติเมตร (dyn/cm ²)	มิลลิบาร์ (mbar)
1 Pa = 1 (N/m ²)	1	7.50062×10^{-3}	9.86923×10^{-6}	10	10^{-2}
1 torr (mmHg)	133.322	1	1.31579×10^{-3}	1333.22	1.33322
1 atm	101,325	760	1	1,013,250	1013.25
1 dyn/cm ²	10^{-1}	7.50062×10^{-4}	9.86923×10^{-7}	1	10^{-3}
1 mbar	10^2	0.750062	9.86923×10^{-4}	10^3	1

ที่มา: Halland, L., Steckelmacher, W. & Yarwood, J. (1974). Vacuum Manual. London : E.& F. N.SPON

2.1.1 ระดับความเป็นสุญญากาศ (Degree of Vacuum)

ระบบสุญญากาศจัดเป็นระบบที่มีความดันของก๊าซน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นระบบความดันต่ำที่มนุษย์ได้สร้างขึ้นมา และยังมีโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซหลงเหลืออยู่ ซึ่งปริมาณที่หลงเหลืออยู่นี้ทำให้เกิดความดัน ดังนั้นจึงใช้ความดันเป็นตัวระบุระดับของสุญญากาศ โดยแบ่งพิจารณาความเป็นสุญญากาศ ดังแสดงภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ความสัมพันธ์ของระดับความเป็นสุญญากาศและช่วงความดัน

ที่มา : Delchar ,T.A. *Vacuum Physics and Techniques*. (1993) . p.110

การสร้างระบบสุญญากาศในระบบปิดนั้น¹ ทำได้โดยลดโมเมนตัมรวมที่สะสมในก๊าซซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ ถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับก๊าซที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ในภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber) เพื่อให้ก๊าซเคลื่อนที่ออกจากภาชนะสุญญากาศ และอีกวิธีหนึ่งคือการจับโมเลกุลก๊าซไว้ที่พื้นผิวหนึ่งในระบบสุญญากาศทำให้ความดันก๊าซในภาชนะสุญญากาศลดลง

¹ บัญชา ศิลปสกุลสุข. (2539) ฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ. หน้า 8

2.1.2 พฤติกรรมของอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ

เนื่องจากภาชนะสุญญากาศยังมีอะตอมและโมเลกุลของก๊าซต่างๆ หลงเหลืออยู่ในภาชนะ ดังนั้นต้องศึกษาพฤติกรรมของอะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ และการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง เช่น การกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์ การคายก๊าซ ระยะปลอดการชน การระเหยกลายเป็นไอ การระเหิด ความดันไอ การแพร่ เป็นต้น

2.1.2.1 การกระจายความเร็วของแมกซ์เวลล์

(Maxwell ' s distribution of Velocities)

เนื่องด้วยโมเลกุลของก๊าซไม่ได้มีความเร็วในอัตราที่เท่ากันและมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) จึงไม่สามารถระบุความเร็วของโมเลกุลแต่ละตัวได้ แต่สามารถระบุได้ในระดับความเร็วในขณะนั้น มีจำนวนโมเลกุลอยู่เท่าใด จากการใช้กฎการกระจายของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's distribution Law)¹ จำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่อยู่ระหว่าง v และ $v+dv$ จะเป็นตามสมการ (1)

$$f(v) = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{mv^2}{2kT} \right) \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ $f(v)$ คือ จำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่อยู่ระหว่าง v และ $v+dv$
 N คือ จำนวนของโมเลกุลทั้งหมด
 m คือ มวลของโมเลกุล
 k คือ ค่าคงที่ของโบลมานส์ $13.805 \times 10^{-24} \text{ J deg}^{-1}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (C)
 v คือ ความเร็วของโมเลกุล (m/s)

¹Kinetic Theory of Gases.(online). (2003. June). Available: http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/Projects/Johnson/Chapters/Ch4_3.html

2.1.2.2 ระยะอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path)

ในความดันที่ต่างกันพบว่า ระยะอิสระเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันตามไปด้วย โดยที่ระยะอิสระเฉลี่ยคือระยะทางที่โมเลกุลตัวหนึ่งเคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลอีกตัวหนึ่ง ซึ่งระยะของการชนของตัวที่เคลื่อนและไปชนกับอีกโมเลกุลตัวหนึ่งนั้น มีค่าไม่เท่ากัน เพื่อให้เกิดการพิจารณาภาพรวมของระยะดังกล่าว ก็นำมาหาค่าเฉลี่ย เรียกว่า ระยะอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path) ซึ่งระยะที่ได้นี้แทนระยะที่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ระหว่างการชน

สมการการคำนวณระยะอิสระเฉลี่ยเมื่อพิจารณาโมเลกุลของก๊าซที่มีการกระจายความเร็วแบบแมกเวลล์

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \pi a^2 n} \quad \text{cm} \dots \dots \dots (2)$$

โดยที่ l = ระยะอิสระเฉลี่ย
 a = เส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล
 n = จำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตร

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นพบว่า ระยะอิสระเฉลี่ยแปรผกผันอย่างผกผันกับความดันโดยก๊าซที่มีความดันมากหรือมีความหนาแน่นของโมเลกุลก๊าซมาก จะมีระยะอิสระเฉลี่ยสั้น และในทางกลับกัน ก๊าซที่มีความดันน้อยจะมีระยะอิสระเฉลี่ยที่ยาวกว่า

จากค่าระยะอิสระเฉลี่ยที่หาได้ สามารถนำไปหาค่าตัวเลขคุดเสน (Knudsen Number : Kn) ซึ่งเป็นตัวระบุลักษณะการไหลของก๊าซได้ จากสมการ

$$Kn = l/L \quad \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อ L เป็นคุณลักษณะเฉพาะของระบบ เช่น ระยะระหว่างต้นกำเนิดไอและแผ่นรองรับ ซึ่งพบว่า ที่ $Kn > 1$ จะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระดับความเป็นสุญญากาศสูง (High Vacuum) ซึ่งเป็นการไหลในระดับโมเลกุล (Molecular Flow) และที่ $Kn < 0.01$ เป็นการไหลแบบหนืด (Viscous Flow) ซึ่งการระเหยสาร ต้องการความเป็นสุญญากาศที่มีความดันน้อยกว่า 10^{-5} torr และค่า $Kn > 1$

ตาราง 2 แสดงระยะอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ที่อุณหภูมิ 298 K ที่ระดับความดันต่างๆ

ความดัน Pressure (torr)	ระยะอิสระเฉลี่ย Mean free path (cm)	จำนวนการชนต่อวินาที ของโมเลกุล (Collisions per second between molecules)	อัตราการชน ผ่านรองรับ (Impingement rate (cm ² /s))	จำนวนชั้นเดี่ยว ต่อวินาที (Number of monolayers per second)
10 ⁻²	0.5	9 x 10 ⁴	3.8 x 10 ¹⁸	4400
10 ⁻⁴	51	900	3.8 x 10 ¹⁶	44
10 ⁻⁵	510	90	3.8 x 10 ¹⁵	4.4
10 ⁻⁷	5.1 x 10 ⁴	0.9	3.8 x 10 ¹³	4.4 x 10 ⁻²
10 ⁻⁹	5.1 x 10 ⁶	9 x 10 ⁻³	3.8 x 10 ¹¹	4.4 x 10 ⁻⁴

ที่มา : George , Joy. (1992). *Preparation of thin films*. New York : Marcel Dekker. p.3

2.1.2.3 แรงขับ (Through put : Q) คือ กำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนโมเลกุลก๊าซผ่านพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการ

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt} \quad \text{Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \dots\dots\dots(4)$$

โดย dV/dt คือ ปริมาตรก๊าซที่ไหลผ่านพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา
 P คือ ความดัน ณ ตำแหน่งที่ก๊าซไหลผ่าน (Pa)

2.1.2.4 อัตราสูบ (Pumping Speed: S_p) คือ ปริมาตรของก๊าซที่ไหลเข้าสู่เครื่องสูบ ในหนึ่งหน่วยเวลา

$$S_p = Q_p / P_i \quad \text{m}^3 \text{ s}^{-1} \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ Q_p คือ แรงขับของเครื่องสูบ

p_i คือ ความดันบริเวณทางเข้าเครื่องสูบ (Pa)

2.1.2.5 การคายก๊าซ (Out gassing)

¹การดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซเกาะติดอยู่กับผิวของของแข็ง แล้วทำให้เกิดเป็นชั้นอากาศหนาเท่ากับขนาดโมเลกุล 2-3 โมเลกุล แรงดึงดูดที่โมเลกุลกระทำต่อผิวเช่นนี้ อาจเป็นแรงทางฟิสิกส์ (Physisorption) หรือแรงทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทางฟิสิกส์เกี่ยวข้องกับแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุล (Van der Waal Force) ส่วนดูดซับทางเคมีจะมีแรงยึดเหนี่ยวสูงประมาณ $20 \text{ kg cal mole}^{-1}$

เมื่อผิวของของแข็งได้รับพลังงานความร้อนจะทำให้โมเลกุลหลุดออก (Desorption) จากผิว ซึ่งที่มีความดันต่ำจะเรียกว่าเกิดการคายก๊าซ (Out gassing) ซึ่งการสูบก๊าซออกจากภาชนะปิด จะส่งผลให้ความดันภายในภาชนะมีค่าลดลง เมื่อความดันลดลงมากพอ พบว่าก๊าซที่แทรกซึมอยู่ในวัสดุที่อยู่ภายในภาชนะปิดหรือผนังจะหลุดจากผิวของผนัง ทำให้ความดันภายในภาชนะเพิ่มขึ้น ซึ่งความดันที่เพิ่มขึ้นจากการคายก๊าซจะใช้อัตราการขับเคลื่อนโมเลกุลก๊าซ ตามสมการ (4) และพบว่าที่ระดับความดันที่ต้องการ จะนำค่าอัตราการขับเคลื่อนโมเลกุลก๊าซที่เกิดจากการคายก๊าซมาพิจารณา ²ดังสมการ (6)

¹ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไพบ. (2526).ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. หน้า 7

²The Evaporation Process. (online). (2003. May)

$$P = P_0 \exp \left[\frac{-St}{V} \right] + \frac{Q}{S} \quad \text{torr} \dots \dots \dots (6)$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันภายในภาชนะสุญญากาศที่เวลา (torr)
	P ₀	คือ	ความดันเริ่มต้น (torr)
	S	คือ	ความเร็วเครื่องสูบ (m ³ s ⁻¹)
	Q	คือ	อัตราการขับเคลื่อนโมเลกุลก๊าซที่เกิดจากการคายก๊าซ (torr. m ³ s ⁻¹)
	V	คือ	ปริมาตรของภาชนะสุญญากาศ (m ³)

2.1.2.6 การรั่ว ภายในระบบปิดที่มีความเป็นสุญญากาศนั้น พบว่าแม้ออกแบบให้ดีเพียงไร ก็อาจจะยังมีการรั่วของอากาศจากภายนอกสู่ภายในได้ การรั่วจะทำให้ความดันภายในภาชนะปิดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความดันที่อาจเกิดจากการคายก๊าซ การตรวจสอบรอยรั่วโดยการวัดความดัน จึงอาจเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นหากพบว่ามีความดันเพิ่มขึ้นโดยไม่ควรจะเป็น ให้ตรวจสอบบริเวณรอยต่อต่างๆ การซีล (Seal) ข้อต่อที่อยู่ระหว่างภายในกับภายนอกภาชนะสุญญากาศ

2.1.2.7 ความดันไอ (Vapor Pressure)

ในการศึกษาการระเหยสารภายใต้ระบบสุญญากาศ จะอาศัยหลักการทั้งการระเหิดและการระเหย แล้วแต่ชนิดของสารว่ามีสถานะใดซึ่งการระเหยคือการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวเป็นไอ อัตราการระเหยกลายเป็นไอจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาภายใต้ความเป็นสุญญากาศที่เกิดขึ้นภายในภาชนะปิด ไอที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ในภาชนะ โดยไอที่อยู่เหนือของเหลวย่อมมีความดันเรียกว่า ความดันไอ (Vapor pressure) ความดันไอจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโมเลกุลของไอเพิ่มขึ้น เมื่อถึงภาวะสมดุล ความดันไอเหนือของเหลวขณะนั้นก็จะเป็นความดันไอสูงสุดที่ไออยู่ได้เหนือของเหลวที่อุณหภูมินั้นๆ ความดันไอนั้น เรียกว่า ความดันไอสมดุล หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่าความดันไอ (Vapor Pressure)¹ ความดันไอเป็นความดันเมื่อไออยู่ในสมดุลกับของเหลวที่ทำให้เกิดไอ ความดันไอของของเหลวนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารและอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าสารใดที่มีความดันไอสูงที่อุณหภูมิปกติ จะเป็นสารที่ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในระบบสุญญากาศ

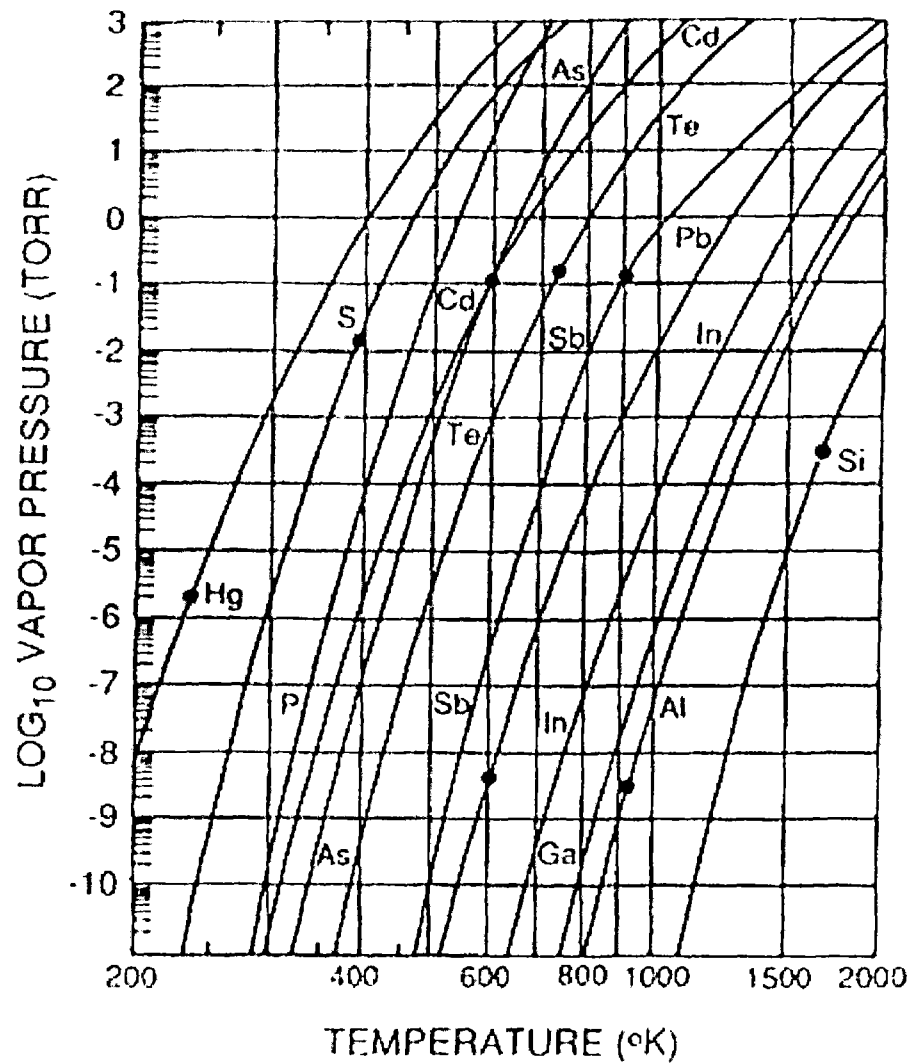
ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้จากสมการของคลอเซียส – แคลปีรอน (Clausius – Clapeyron Equation)²

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T(V_g - V_l)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ	p	คือ	ความดันไอ (torr)
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	H _v	คือ	ความร้อนของการระเหยต่อโมลที่อุณหภูมิ T (Molar heat of Vaporization at T)
	V _g	คือ	ปริมาตรต่อโมลของก๊าซหรือไอที่อุณหภูมิ T
	V _l	คือ	ปริมาตรต่อโมลของเหลวที่อุณหภูมิ T

¹ กฤษณา ชูติมา. (2536). *หลักเคมีทั่วไปเล่ม 1*. หน้า 307

² กัญญา บุญยเกียรติ. (2543). *การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี*. จุฬาลงกรณ์



ภาพประกอบ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันไอของธาตุและอุณหภูมิ

ที่มา : Ohring, Milton. (1992). *The Material Science of Thin Films*. p.84.

2.2 องค์ประกอบพื้นฐานและอุปกรณ์ของการเคลือบสุญญากาศ

2.2.1 ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

คือภาชนะปิดที่ต้องการให้ความดันลดลงโดยการสูบอากาศออก เพื่อใช้ในการระเหยสาร วัสดุที่ใช้ทำห้องเคลือบส่วนใหญ่จะเป็นประเภทโลหะ โลหะผสมและแก้ว โดยโลหะที่นิยมในการทำภาชนะสุญญากาศจะใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความทนทานสูง บำรุงรักษาง่าย เกิดการคายก๊าซน้อย ส่วนประเภทแก้วจะใช้ แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) เช่น แก้วไพเรกซ์ (Pyrex) เป็นต้น

2.2.2 เครื่องสูบสุญญากาศ (Vacuum Pump)

การทำให้ระบบที่พิจารณามีความเป็นสุญญากาศนั้น สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องสูบสุญญากาศซึ่งปัจจุบันมีการประดิษฐ์เครื่องสูบสุญญากาศหลากหลายชนิด ซึ่งสามารถสูบอากาศแล้วทำให้เกิดความเป็นสุญญากาศแตกต่างกัน และศักยภาพของเครื่องสูบแต่ละชนิดก็แตกต่างกัน และในหนึ่งระบบอาจต้องใช้เครื่องสูบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปควบคู่กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการระดับของความเป็นสุญญากาศ โดยหลักการของเครื่องสูบแต่ละชนิดจะทำการลดหรือนำเอาโมเลกุลของอากาศออกจากระบบ ซึ่งเมื่อพิจารณากระบวนการลดจำนวนโมเลกุลของเครื่องสูบ จะทำให้แบ่งประเภทของเครื่องสูบได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องสูบบแบบถ่ายทอดโมเมนตัมและเครื่องสูบที่ไม่ถ่ายทอดโมเมนตัม¹

1. เครื่องสูบบแบบถ่ายทอดโมเมนตัม เครื่องสูบประเภทนี้จะนำโมเลกุลก๊าซออกโดยการย้ายโมเลกุลออกจากระบบด้วยวิธีการเชิงกลในการถ่ายทอดโมเมนตัม (Mechanical momentum Removal) การเคลื่อนที่ซึ่งเป็นกลไกย่อยที่อยู่ในเครื่องสูบจะทำหน้าที่เคลื่อนย้ายโมเลกุลออกจากระบบ เช่น เครื่องสูบโรตารี (Rotary Pump) เครื่องสูบรูท (Roots Pump), เครื่องสูบแพร่ไอ (Diffusion Pump), เครื่องสูบเทอร์โบโมเลกูลาร์ (Turbomolecular Pump) เป็นต้น

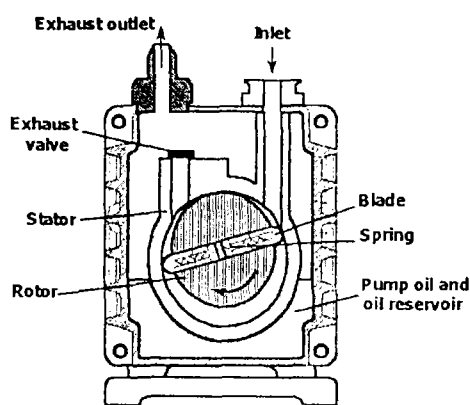
2. เครื่องสูบบแบบไม่ถ่ายทอดโมเมนตัม คือ เครื่องสูบที่ทำการลดโมเลกุลหรือปริมาณก๊าซในภาชนะลดลง โดยไม่ใช้กลไกทางกลและการถ่ายทอดโมเมนตัม (Non - mechanical Momentum Removal) แต่จะจับโมเลกุลของก๊าซไว้ที่พื้นผิวหนึ่ง เช่น เครื่องสูบซอร์พชัน (Sorption Pump), เครื่องสูบเก็บก๊าซ (Getter Pump) เป็นต้น

¹Delchar,T.A.(1993). *Vacuum Physics and Techniques*. p.70.

โดยระบบหนึ่งที่ยินยอมให้ จะประกอบไปด้วยเครื่องสูบ 2 ชนิด คือเครื่องสูบโรตารีและเครื่องสูบแพร่ไอ ซึ่งเป็นเครื่องสูบแบบถ่ายทอดโมเมนตัม สามารถลดความดันได้ต่ำที่สุด 10^{-6} ถึง 10^{-7} torr ขึ้นกับชนิดของของเหลวที่ใช้

2.2.2.1 เครื่องสูบโรตารี (Rotary Pump)

ความสามารถของเครื่องสูบกลชนิดนี้ จัดเป็นเครื่องสูบพื้นฐานที่นิยมมาก เมื่อต้องการความเป็นสุญญากาศไม่มากนัก โดยเครื่องสูบโรตารีนั้น สามารถสูบอากาศตั้งแต่ความดันบรรยากาศ จนถึง 10^{-3} torr การทำงานของเครื่องสูบอาศัยการหมุนของโรเตอร์ (Rotor) ภายในสเตเตอร์ (Stator) โดยมีใบพัดติดตั้งอยู่ที่โรเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่อัดอากาศที่เข้ามาทางช่องอากาศเข้า และปล่อยอากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ออกจากช่องปล่อยอากาศออก ซึ่งเครื่องสูบโรตารีชนิดน้ำมันปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น แบบใบพัดเดี่ยว แบบสามใบพัด แบบลูกสูบ แบบมีก๊าซบัลลัสท์ เป็นต้น



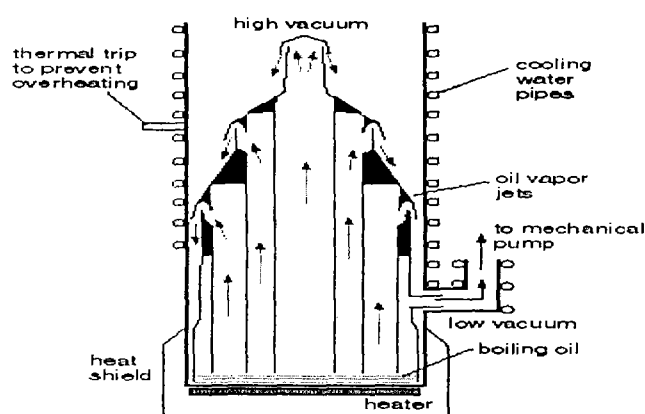
ภาพประกอบ 3 เครื่องสูบโรตารีชนิดน้ำมัน

ที่มา : Modern vacuum practice.(online).(2003. August). Available:[http:// www.](http://www.modernvacuumpractice.com/editor/user_DocView.asp?DocumentID=19)

modernvacuumpractice.com/editor/user_DocView.asp?DocumentID=19

2.2.2.2 เครื่องสูบน้ำไอ (Diffusion Pump)

การทำงานของเครื่องสูบน้ำชนิดนี้จะแตกต่างจากกรณีที่เราได้กล่าวมาแล้ว โดยจะประกอบด้วยหลอดความร้อนเพื่อให้ความร้อนกับน้ำมันที่มีความดันไอสูง ซึ่งอาจใช้ปรอทแทนได้แต่เนื่องจากปรอทเป็นสารพิษจึงไม่ค่อยนิยม น้ำมันที่ร้อนจะมีการระเหยกลายเป็นไอน้ำมัน พุ่งขึ้นตามปล่องและพุ่งผ่านช่องเปิด ไอน้ำมันจะพุ่งลงและกระทบกับผนังซึ่งมีการหล่อเย็นทำให้ไอน้ำมันตกสู่ด้านล่าง ซึ่งอากาศที่อยู่ด้านล่างก็จะถูกสูบออกด้วยเครื่องสูบน้ำอีกเครื่องหนึ่ง ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำชนิดนี้ สามารถสูบน้ำอากาศหรือก๊าซความดัน ในช่วง 10^{-3} torr ถึง 10^{-7} torr



ภาพประกอบ 4 เครื่องสูบน้ำความดันแพร่ไอ (Diffusion Pump)

ที่มา : Diffusion Pump. (online) .(2003.August)

Available:<http://jan.ucc.nau.edu/~wittke/Microprobe/DiffPump.gif>

2.2.3 อุปกรณ์วัดความดัน (Gauge)

การวัดค่าความดันภายในภาชนะสุญญากาศ จะใช้การอ่านค่าความดัน จากอุปกรณ์วัดความดันหรือเกจ (Gauge) ซึ่งเกจที่ใช้ในปัจจุบันนี้โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกส่วนรับรู้ความดันทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และส่วนที่สองจะใช้แสดงผลค่าความดันซึ่งทำหน้าที่แปลค่าสัญญาณที่วัดได้จากส่วนรับรู้ความดัน ปัจจุบันพบว่าอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันหรือเกจนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน และงานวิจัยในครั้งนี้ ได้ใช้อุปกรณ์วัดความดัน 2 ชนิด ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ คือ เกจพิรานี (Pirani Gauge) วัดความดันที่ความดันบรรยากาศถึงความดัน 10^{-2} torr และ เกจเพนนิง (Penning Gauges) วัดความดันในช่วง $10^{-3} - 10^{-6}$ torr

2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร

2.3.1 อัตราการระเหยสาร (Rate of Evaporation)

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารนั้น เป็นกระบวนการที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารที่เป็นของแข็งและเหลวซึ่งอยู่ในภาชนะที่ให้ความร้อน ให้เคลื่อนเป็นเส้นตรงไปยังแผ่นรองรับ แล้วเกิดการสะสมกันเกิดเป็นฟิล์มบาง ซึ่งระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุรองรับและแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ทำให้ไอสารเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงนั้น มีระยะระหว่าง 10 – 50 cm ที่ความดัน 10^{-5} torr ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองของเอิร์ทซ - คูดเซน (Hertz - Knudsen)

¹การเคลื่อนที่ของไอสาร จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังแผ่นวัสดุรองรับ ซึ่งถ้าภายในภาชนะสุญญากาศ มีความดันต่ำเพียงพอ โมเลกุลก๊าซจะมีระยะอิสระเฉลี่ยยาว ถ้ากำหนดให้ h เป็นระยะระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อน และแผ่นวัสดุรองรับ อัตราการระเหยสารมากที่สุด dN_e จากพื้นผิว A_e ในช่วงเวลา dt จะเป็นตามสมการของคูดเซน คือ

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi mkT}} P_e \dots\dots\dots(8)$$

โดยที่ $dN_e/A_e dt$	คือ	อัตราการระเหยมากที่สุดของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา
P_e	คือ	ความดันไอสมดุล (torr)
m	คือ	มวลของโมเลกุล
k	คือ	ค่าคงที่ของโบลมานส์ $13.805 \times 10^{-24} \text{ J deg}^{-1}$
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (C)

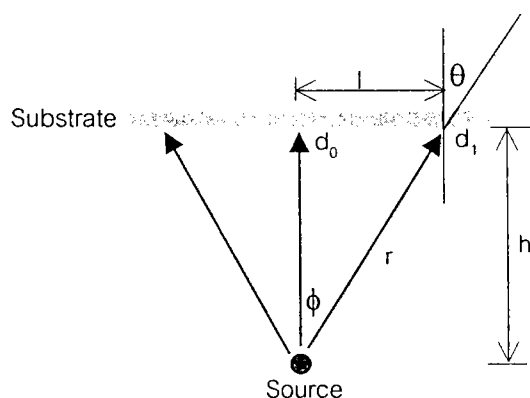
¹ George , Joy. (1992). *Preparation of thin films*. p.2.

ซึ่งอัตราการระเหยของมวล m_e (Mass Evaporation Rate) จากผิวที่สะอาดหนึ่งหน่วยพื้นที่ ในสุญญากาศนั้น สามารถหาได้จากสมการแลงมัวร์ (Langmuir Expression)

$$m_e = 5.83 \times 10^{-2} P_e \sqrt{\frac{M}{T}} \quad \text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1} \dots\dots\dots(9)$$

โดยที่ m_e คือ อัตราการระเหยมวล (Mass evaporation rate)
 T คือ อุณหภูมิ (K)
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของไอสาร
 P_e คือ ความดันที่จุดสมดุล (torr)

อัตราการระเหยสารไปสู่แผ่นรองรับนั้น จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของแหล่งกำเนิดไอ มุมและทิศทางตำแหน่งของวัสดุรองรับ และสัมประสิทธิ์การกลั่นตัวของสาร (Condensation coefficient)



ภาพประกอบ 5 ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัวของฟิล์ม

จากภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างแหล่งกำเนิดไอและแผ่นรองรับ เมื่อ $\phi = \theta$, ϕ เป็นมุมที่ r ทำกับเส้นที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ และอัตราการก่อตัวบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นราบ จะเป็นไปตามกฎโคไซน์ของคุดเสน (Knudsen' cosine law) ซึ่งจะแปรผันตาม $\cos \theta / r^2$

การกระจายความหนาของฟิล์มบาง จะแยกพิจารณาจากต้นกำเนิดไอเพียง 2 แบบ คือ ต้นกำเนิดไอเป็นจุด และต้นกำเนิดไอเป็นพื้นที่

เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์ม เป็นระยะทาง l เมื่อวัดจากจุดศูนย์กลาง

d_0 คือ ความหนาของฟิล์มตรงกึ่งกลางในแนวตั้งเหนือจุดกำเนิดไอ

1. ต้นกำเนิดไอเป็นจุด (Point source)

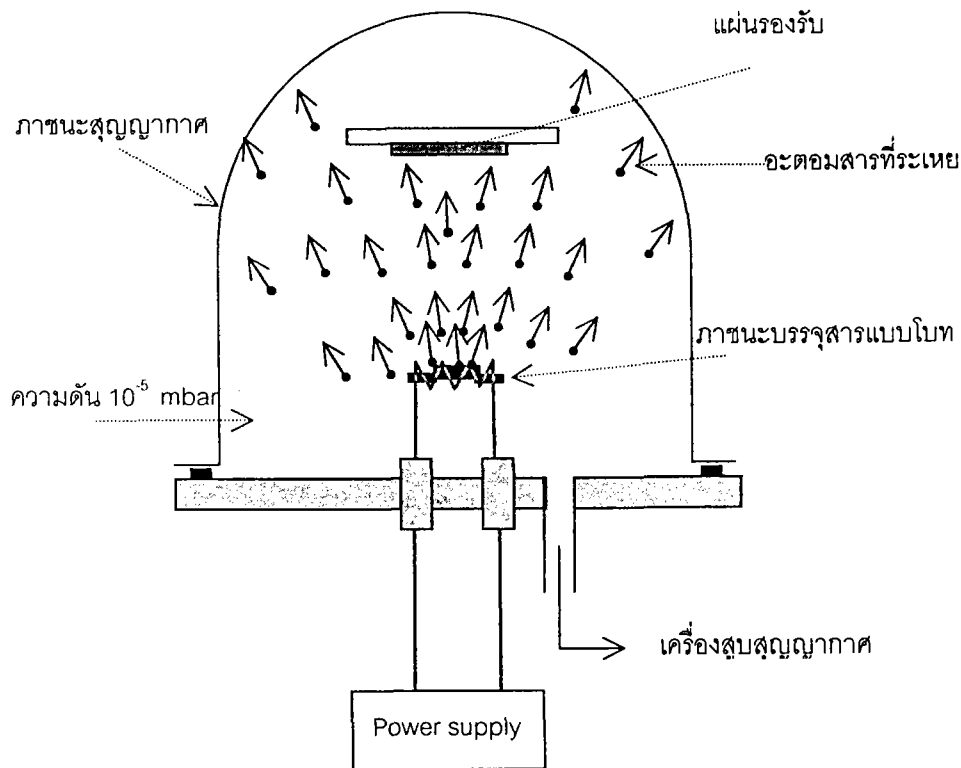
$$\frac{d}{d_0} = \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad \dots\dots\dots(10)$$

2. ต้นกำเนิดไอที่เป็นพื้นที่ (Surface source) การกระจายความหนาจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{d}{d_0} = \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right]^{-2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

2.3.2 วิธีการระเหยสาร (Method of evaporation)

หลักการระเหยสารในระบบสุญญากาศแบบให้ความร้อนในลักษณะต่างๆ จะมีหลักการคล้ายคลึงกัน คือนำสารที่ต้องการจะระเหย ซึ่งอยู่บนภาชนะบรรจุสาร ใส่ในภาชนะปิด ซึ่งได้สูบล้ออากาศออก จนภายในมีความดันประมาณ 10^{-5} torr ให้กำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนระดับหนึ่ง (การให้ความร้อนจะแตกต่างกันขึ้นกับวิธีที่ใช้ระเหย) ทำให้อะตอมของสาร เริ่มระเหิดหรือระเหยจากภาชนะที่บรรจุสารอยู่ ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 รูปแบบการระเหยสารด้วยการให้ความร้อน

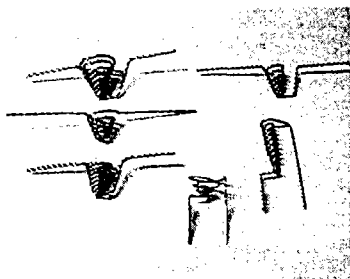
การระเหยสารในสุญญากาศด้วยการให้ความร้อน (Thermal Evaporation) มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การระเหยสารด้วยการให้ความร้อนชนิดตัวต้านทาน การระเหยแบบแฟลช ระเหยแบบเลเซอร์ แบบลำอิเล็กตรอน เป็นต้น ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีแหล่งกำเนิดให้ความร้อนแตกต่างกันไป ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกทำการระเหยแบบแฟลชซึ่งมีการเตรียมการคล้ายคลึงกับการระเหยสารด้วยการให้ความร้อนชนิดตัวต้านทาน ดังนั้นจึงจะกล่าวเพียงการระเหย 2 ชนิดนี้เท่านั้น

2.3.3 การระเหยสารด้วยต้นกำเนิดความร้อนจากความต้านทาน

(Resistance Heat Source Evaporation)

การระเหยสารวิธีนี้ จะใช้แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน ซึ่งจะได้รับความร้อนจากการผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก จะผ่านไปยังภาชนะที่บรรจุสารที่ต้องการระเหย เมื่อสารที่จะระเหยได้รับความร้อน จะระเหยเคลื่อนมากระทบที่ผิววัสดุรองรับ ดังภาพประกอบ 6 และเกิดการควบแน่นและหนาจนเป็นชั้นของฟิล์มบาง (Thin Films) ซึ่งสารที่ใช้ในการระเหยเพื่อให้เกิดฟิล์มบางนั้น อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว

ภาชนะที่ใช้สำหรับบรรจุสารที่ต้องการระเหยนั่น มีรูปร่างแตกต่างกันอาจมีลักษณะเป็นเส้นหรือแผ่นโลหะขึ้นรูป ดังภาพประกอบ 7 ซึ่งวัสดุที่ใช้สำหรับใส่สาร จะเลือกใช้วัสดุที่มีความดันไอต่ำและจุดหลอมเหลวสูง (High Melting Points) เช่น ทังสเตน (Tungsten:W), โมลิบดีนัม (Molybdenum:Mo), แแทนทาลัม (Tantalum:Ta) เป็นต้น



(a)



(b)

ภาพประกอบ 7 (a) ภาชนะบรรจุสารแบบเส้น (b) ภาชนะบรรจุสารแบบโบท

ที่มา : Filaments and boats for deposition. (online) .(2004.April)

Available: <http://www.vr-me.com/english/mypage03-1.htm>

2.3.4 การระเหยสารแบบแฟลช (Flash Evaporation)

วิธีการระเหยสารแบบแฟลชนั้น ภาชนะที่ใช้ใส่สารต้องมีความร้อนสูงซึ่งทำให้เกิดความร้อนได้โดยใช้กระแสไฟฟ้าถ่ายเทไปยังภาชนะบรรจุสาร เมื่อภาชนะใส่สารมีความร้อนเพียงพอจะโรยสารที่บดเป็นผงลงในภาชนะใส่สาร ซึ่งทำให้สารระเหยหมดทันที การระเหยสารวิธีนี้เป็นประโยชน์ในการระเหยสารที่เป็นสารผสม โดยสารแต่ละชนิดในสารผสมจะมีค่าความดันไอที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 3 เมื่อเตรียมฟิล์มสารผสมด้วยการระเหยแบบให้ความร้อนฟิล์มสารผสมจะเกิดการแยกตัว การระเหยแบบแฟลชนี้จะช่วยลดความยุ่งยากที่เกิดจากการเตรียมฟิล์มบางของสารผสมที่มีความดันไอแตกต่างกัน และเพื่อให้สารผสมระเหยพร้อมกันทุกตัว อุณหภูมิที่ให้กับสารผสมนั้น ต้องสูงพอที่จะทำให้สารผสมระเหยพร้อมกัน

ตาราง 3 จุดหลอมเหลวและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความดันไอ 10^{-4} mbar ของสาร

สารที่ต้องการ ระเหย	จุดหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิ (°C) ที่ ความดันไอ 10^{-4} mbar	ชนิดวัสดุของโบท (boat)	ชนิดวัสดุของ ภาชนะใส่สาร แบบเส้น(coil)
Aluminium (Al)	660	1010	-	W,WS
Copper(Cu)	1,083	1,017	W,Mo,Ta	W
Gold(Au)	1,063	1,132	W,Mo	W
Indium(In)	157	742	W,Mo	-
Magnesium(Mg)	651	327	W,Mo,Ta	W
Molybdenum (Mo)	2,610	2,117	-	-
Selenium(Se)	217	170	W,Mo,Ta	W,Mo
Silver(Ag)	961	684	W,Mo,Ta	W,Mo,Ta
Tantalum(Ta)	2,996	2,590	-	-
Tungsten(W)	3,382	2,757	-	-

Key : W = Tungsten ,Ws = Stabilised ,Mo = Molybdenum, Ta = Tantalum

ที่มา : Evaporation application table.(online). (2003 August).

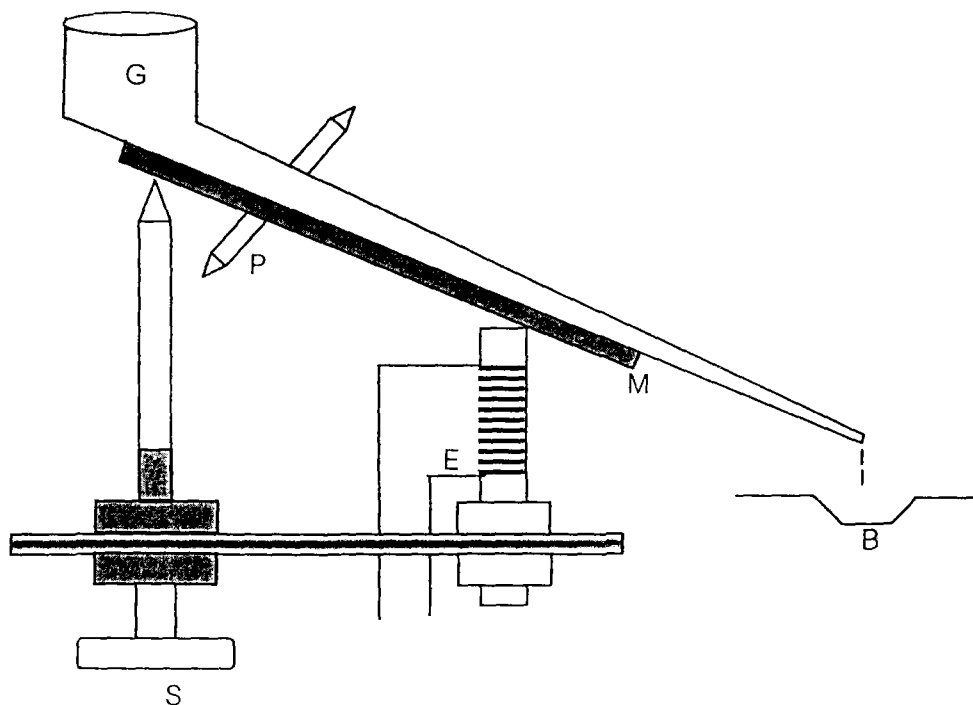
Available : www.megatech.demon.co.uk/evapapp.htm

การโรยผงของสารผสม สามารถใช้อุปกรณ์สำหรับโรยสารแตกต่างกัน เช่น ใช้เครื่องจักรกล (Mechanic), แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic), การสั่น (Vibrating), การหมุน (Rotating) เป็นต้น ซึ่งการเตรียมสารแบบแฟลชนี้มีผู้ใช้วิธีการโรยสารหลายรูปแบบ โดยในปี ค.ศ. 1948 แฮร์รีและซีเกิล (Harris and Siegel) เป็นกลุ่มแรกที่น่าการระเหยแบบแฟลชมาใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง โดยการใช้การสั่นของกระดิ่งที่ควบคุมด้วยมอเตอร์สำหรับใช้โรยสาร ต่อมาในปี ค.ศ. 1965 แคมเบลและเฮนไดร์ (Campbell and Hendry) ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าสั่นสารเพื่อให้สารลงสู่ภาชนะใส่สาร และในปี ค.ศ. 1981 จอร์จ (George) และ ราดากริสนัน (Radhakrisnan) ได้ใช้การระเหยแบบแฟลชเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบาง Sb_2S_3 โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าสั่นเพื่อให้สารตกลงบนภาชนะใส่สาร ซึ่งเป็นวิธีการที่คล้ายกับแคมเบลและเฮนไดร์ โดยได้ใช้แผ่นเหล็กอ่อน สกรูจัดระดับดังภาพประกอบ 8 ซึ่งเมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขดลวด ทำให้แผ่นเหล็กอ่อนสั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่ง สารที่อยู่ในหลอดแก้วจะค่อยๆ ไหลลงบนโบทที่ใช้ใส่สาร การโรยสารจะถูกควบคุมโดยวงจร มัลติไวเบรเตอร์ แบบไม่เสถียร (Astable multivibrator) ที่ทำงานที่ความถี่ 2 Hz

ในปี ค.ศ. 1986 จอร์จและคณะ (Gheorghiu and Other) ได้เตรียมฟิล์มบางพวกแอมมอฟัส (Amorphous) จำพวก GaAs, GaP และ GaSb ในระดับความดันต่ำมาก (Ultra High Vacuum) คือในช่วงความดัน 10^{-7} torr โดยใช้การระเหยแบบแฟลชเช่นกัน ซึ่งใช้อุปกรณ์สำหรับโรยสารคือ เบลเซอร์ ไวเบรติงฟีดเดอร์ (Blazer vibrating feeder) ในปี ค.ศ. 1989 เอกและวูก (Ece and Vook) ได้ใช้การระเหยแบบแฟลชเพื่อใช้เตรียมฟิล์ม Y-Ba-Cu-O บนแผ่นรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ โดยโรยสาร $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ บนตัวต้านทานที่ทำจากทั้งสแตนเลสและแอนนิลในออกซิเจน 60 นาที ที่อุณหภูมิ 1203 K และพบว่าฟิล์มแสดงสมบัติเป็นตัวนำยวดยิ่ง (Superconductivity)

ความยุ่งยากที่จะเกิดจากปัญหาการระเหยแบบแฟลชนั้น พบว่าจะเกิดการคายก๊าซของสารที่นำมาระเหย ดังนั้นเพื่อลดปริมาณการคายก๊าซของสาร จะต้องนำสารที่ต้องการระเหยมาเก็บในระบบสุญญากาศ ประมาณ 24-36 ชั่วโมง ก่อนทำการระเหยสาร สารที่ไม่ได้เก็บในสุญญากาศจะเกิดการคายก๊าซเป็นจำนวนมากเมื่อทำการระเหย และเกิดการกระเด็นระหว่างทำการระเหย

¹ George , Joy. (1992). *Preparation of thin films*. p. 6-11



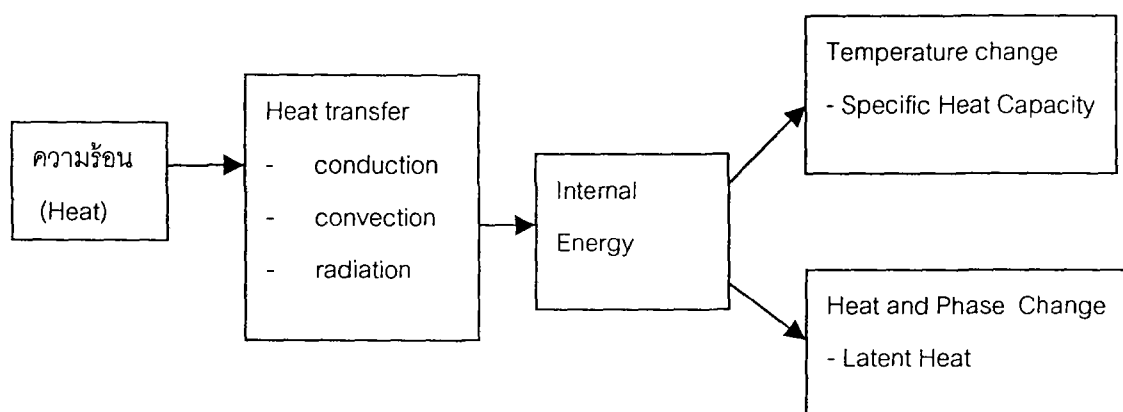
ภาพประกอบ 8 การออกแบบอุปกรณ์โรยสารโดย จอร์จ (George) และ ราวากริสนัน(Radhakrisnan)

(โดย G ท่อใส่สาร , M เหล็กอ่อน ,E แม่เหล็กไฟฟ้า , S สกรูปรับระยะห่างแม่เหล็ก ,
ไฟฟ้ากับเหล็กอ่อน B ภาชนะความร้อน P แกนหมุน)

ที่มา : George,Joy .(1992).Preparation of thin film. p.11

2.4 ความร้อน (Heat)

ความร้อนคือพลังงานในรูปแบบหนึ่งมีหน่วยเป็นจูล(J) ความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ ในการทำวิจัยจะศึกษาความสัมพันธ์ปริมาณความร้อนกับกำลังงานทางไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์สำหรับการระเหยสาร ซึ่งการพิจารณาพลังงานความร้อนจะทำการศึกษาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านบริเวณหนึ่งๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งมีหน่วยจูลต่อวินาทีหรือวัตต์ (J/s หรือ W) กับคุณสมบัติเชิงความร้อนของสาร โดยปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้อง จะเป็นไปตามภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ความสัมพันธ์ของความร้อนในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Heat. (online). (2003 August). Available: <http://niuhep.physics.niu.edu/~blazey/250/week14/lesson45.html>

2.4.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ การนำความร้อน, การพาความร้อน, การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลภายในวัสดุ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความต้านทานของวัสดุ และสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อน จากสมการ (12)

$$q = \frac{kA\Delta T}{L} \quad \text{W} \dots \dots \dots (12)$$

เมื่อ	q	คือ	อัตราความร้อนผ่านตัวกลางที่มีสภาพนำความร้อน k (W)
	k	คือ	สภาพนำความร้อนของตัวกลาง (Thermal conductivity: W/m.K)
	ΔT	คือ	ความแตกต่างอุณหภูมิ (Temperature difference : K)
	L	คือ	ระยะห่างระหว่างสองจุดที่อุณหภูมิต่างกัน ΔT

2.4.1.2 การพาความร้อน (Convection)¹

การพาความร้อนคือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนจากที่หนึ่งอีกสู่ที่หนึ่ง ด้วยการไหลของของเหลว หรือการพัดพาของก๊าซ ซึ่งพลังงานความร้อนที่ถูกโอนถ่ายมีผลจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุล

อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาสามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์

$$q = hA\Delta T \quad \text{W} \dots \dots \dots (13)$$

เมื่อ	q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	h	คือ	สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (W.m ⁻² .K ⁻¹)
	A	คือ	พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน (m ²)
	ΔT	คือ	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

2.4.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งอุณหภูมิต่ำ พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือในรูปของโฟตอนโดยไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดขึ้นในสุญญากาศได้

¹Thermodynamic I Chapter 5 .(online). (2003. May). Available:

<http://eng.src.ku.ac.th/~sompop/Thermo/chapter5.pdf>

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทจากการแผ่รังสีที่พื้นผิวหนึ่ง ๆ เป็นตามสมการ

$$q = \epsilon \sigma A T^4 \quad \text{W} \dots \dots \dots (14)$$

เมื่อ	q	คือ	อัตราการแผ่ความร้อน (W)
	T	คือ	อุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยสัมบูรณ์ (K)
	σ	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟาน – โบลต์มานส์ และมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$
	A	คือ	พื้นผิวของการแผ่รังสี (m^2)
	ϵ	คือ	ค่าสภาพการแผ่รังสี (Emissivity) ของพื้นผิว

2.4.2 สมบัติเชิงความร้อนของสสาร

2.4.2.1 ความจุความร้อน (Heat capacity)

พิจารณาปริมาณความร้อนที่ให้กับวัตถุ และอุณหภูมิของวัตถุที่เพิ่มขึ้นนั้น ตัวแปรที่ใช้อ้างอิงคือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ซึ่งสารต่างชนิดกันจะมีค่าความจุความร้อนที่ต่างกัน

ค่าความจุความร้อนจำเพาะนั้นคือ ปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารที่ทำให้สารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 K ดังนั้นปริมาณความร้อน (Q) ที่เปลี่ยนไปขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของสาร จะเป็นไปตามสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad \text{J} \dots \dots \dots (15)$$

เมื่อ	Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่สารได้รับ (J)
	m	คือ	มวลของสาร (kg)
	ΔT	คือ	อุณหภูมิของสารที่เพิ่มขึ้น (K)
	c	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/(kg.K))

2.4.2.2 ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ (Latent heat)

คือปริมาณความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะ โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง มีหน่วย จูลต่อ กิโลกรัม (J / kg)

- ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent Heat of Fusion : L_f) คือ พลังงาน ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งไปเป็นของเหลว

- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat of Evaporation: L_v) คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวกลายเป็นไอ

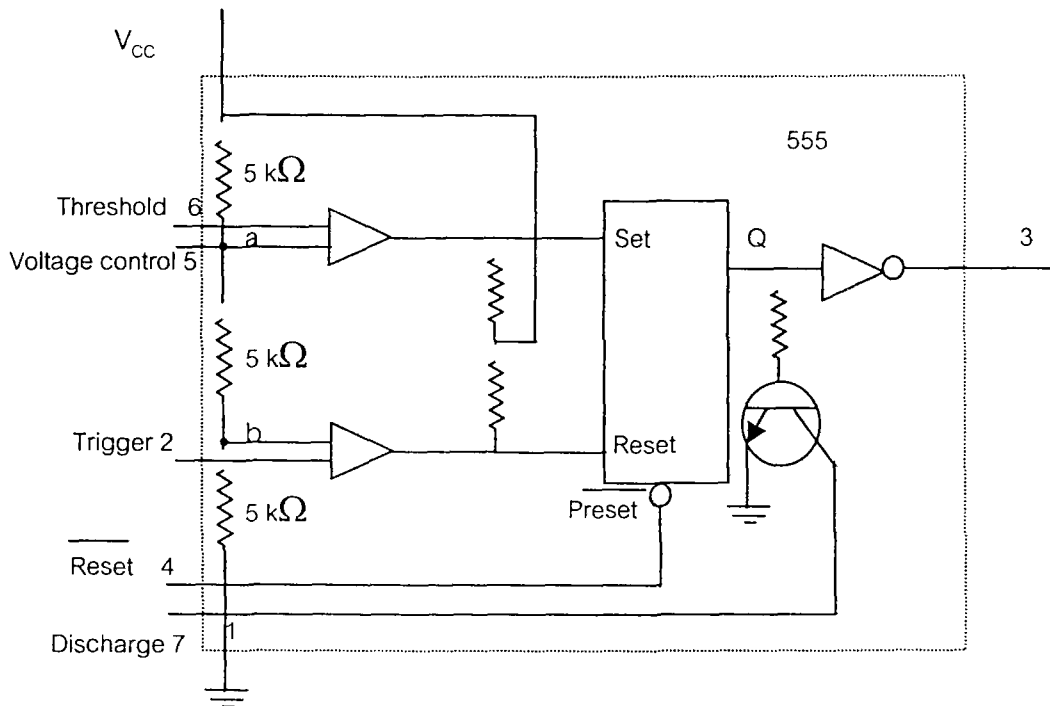
2.5 อิเลคทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ไอซี 555

ไอซี 555 เป็นไอซีที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการนำมาใช้ประกอบเป็นวงจรสำหรับตั้งเวลา โดยสามารถสร้างพัลส์อย่างต่อเนื่องหรือสร้างสัญญาณ เพื่อไปกระตุ้นให้กับวงจรอื่น วงจรที่มีการนำไอซี 555 มาใช้ เช่น วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ (Astable Multivibrator) ซึ่งจะผลิตคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมต่อเนื่องออกมาทางเอาต์พุต วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ (Monostable Multivibrator) ซึ่งจะให้คลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมออกมาหนึ่งลูก เมื่อวงจรถูกกระตุ้นหนึ่งครั้ง

โครงสร้างของ ไอซี 555 นี้ประกอบด้วยตัวเปรียบเทียบ 2 ตัว วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้า ฟลิปฟลอป ทราเนซิสเตอร์แบ่งกระแสไฟฟ้า และบัฟเฟอร์ วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ เพื่อให้เป็นระดับศักย์อ้างอิงที่ทางเข้าของตัวเปรียบเทียบทั้ง 2 ตัว (ที่จุด a และ b) โดยที่ a มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $2V_{CC}/3$ และที่ จุด b มีศักย์ไฟฟ้าเป็น $V_{CC}/3$ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของฟลิปฟลอป(Q) และทางออก (3) จะสัมพันธ์กับระดับของศักย์ไฟฟ้าที่(6) threshold และ (2) Trigger ดังตาราง 4

¹อิเลคทรอนิกส์ฮอปต์. (2546,ธันวาคม). *Hobby Electronics*. ปีที่ 12 (137) : หน้า 62.



ภาพประกอบ 10 โครงสร้างวงจรภายในไอซี 555

วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้า เป็นวงจรที่ใช้แบ่งศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างปลายทั้งสองของวงจรออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งการจะแบ่งออกเป็นกี่ส่วนขึ้นกับจำนวนตัวต้านทาน และศักย์ไฟฟ้าที่แบ่งมานั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของความต้านทาน

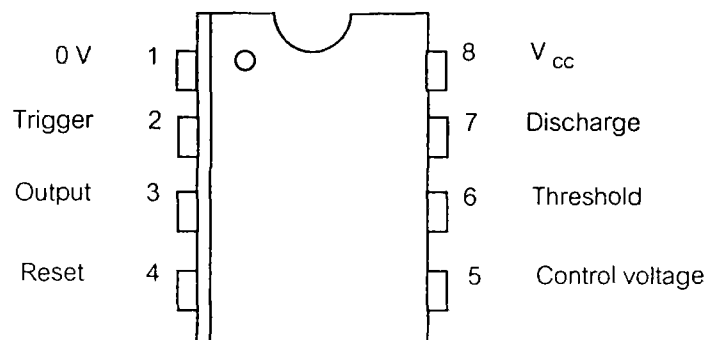
ตัวเปรียบเทียบแต่ละตัวจะประกอบด้วยทางเข้าลบ ทางเข้าบวกและทางออก ตัวเปรียบเทียบจะทำหน้าที่เปรียบเทียบระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าลบและทางเข้าบวก ถ้าทางเข้าลบต่ำกว่าทางเข้าบวก ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเป็นระดับระดับศักย์สูง แต่ถ้าระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้าลบมากกว่าทางเข้าบวก ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเป็นระดับระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำ

ฟลิปฟล็อป เป็นชนิดที่เรียกว่า RS ศักย์ไฟฟ้าที่ Q จะขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า set และ reset การเปลี่ยนระดับศักย์ไฟฟ้า ของ Preset หรือ Reset จากระดับสูงไปสู่ต่ำทำให้ Q มีระดับไฟฟ้าที่สูง

บัฟเฟอร์ทางออก (Out Buffer) เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งในวงจรนี้แบบกลับค่า (Inverter) หมายความว่าถ้าทางเข้าของบัฟเฟอร์ มีศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าสูง (H) ศักย์ไฟฟ้า

ทางออกจะเป็นต่ำ (L) หรือในทางกลับกัน ถ้าทางเข้าของบัฟเฟอร์ มีศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าต่ำ (L) ศักย์ไฟฟ้าทางออกจะเป็นสูง (H)

ทรานซิสเตอร์แบ่งกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้า ในการประยุกต์บางกรณี เช่น กรณีต้องการระบายประจุไฟฟ้าออกจากตัวเก็บประจุที่ประกอบในวงจร astable multivibrator



ภาพประกอบ 11 โครงสร้างภายนอกไอซี 555

ตาราง 4 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าทางออกฟลิปฟล็อปและทางออก (3) กับศักย์ไฟฟ้าที่ (6),(2)

(6) threshold	(2)Trigger	Q	ทางออก (3)
มากกว่า $2V_{cc}/3$	มากกว่า $2V_{cc}/3$	ระดับศักย์ไฟฟ้าสูง	ระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำ
น้อยกว่า $2V_{cc}/3$	มากกว่า $2V_{cc}/3$	คงสถานะเดิม	คงสถานะเดิม
น้อยกว่า $2V_{cc}/3$	น้อยกว่า $2V_{cc}/3$	ระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำ	ระดับศักย์ไฟฟ้าสูง

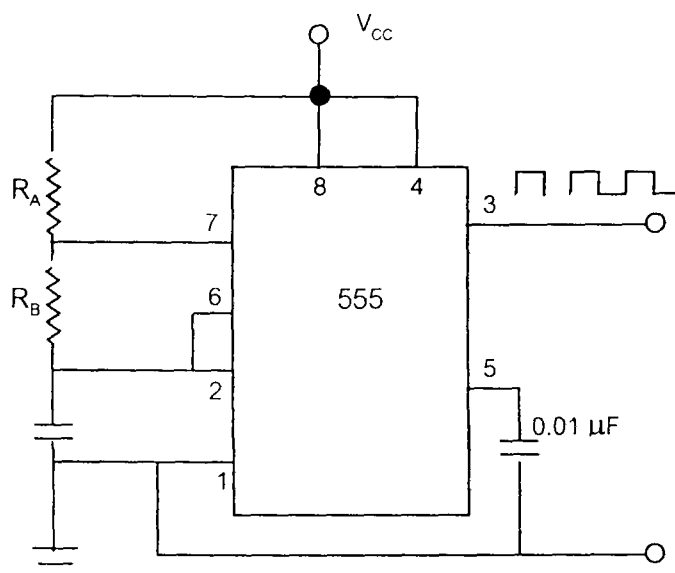
2.5.2 วงจรออสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator)

วงจรออสเตเบิลนี้ ประยุกต์ใช้ไอซี 555 เพื่อใช้เป็นวงจรตั้งเวลาซึ่งสามารถสร้างสัญญาณความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) โดยวงจรจะประกอบด้วย ไอซี 555 ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ตามภาพประกอบ 12

การทำงานของวงจรมัน เมื่อพิจารณาจากตาราง (5) ศักย์ไฟฟ้าที่ (2) และ (6) ต่ำกว่า $V_{CC}/3$ ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะมีระดับสูง ทรานซิสเตอร์จะไม่นำกระแสไฟฟ้า ตัวเก็บประจุจะเริ่มสะสมประจุจนศักย์ไฟฟ้าที่ (2) และ (6) สูงกว่า $2V_{CC}/3$ ศักย์ไฟฟ้าทางออกจะเปลี่ยนจากระดับสูงไปต่ำ และตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุจนศักย์ไฟฟ้าที่ (2) และ (6) ต่ำกว่า $V_{CC}/3$ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าทางออกจะเปลี่ยนเป็นระดับสูงอีกครั้ง โดยความถี่ของวงจร ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ที่เกิดจากการคายหรือการสะสมประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของค่าตัวเก็บประจุ C และความต้านทาน R_A , ความต้านทาน R_B ตามสมการ 16

$$f = \frac{1.44}{c(2R_B + 2R_A)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

โดยที่	f	คือ ความถี่ (Hz)
	R_A, R_B	คือ ความต้านทานของตัวต้านทาน R_A และ $R_B(\Omega)$
	c	คือ ความจุของตัวเก็บประจุ (F)



ภาพประกอบ 12 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

2.5.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable Multivibrator)

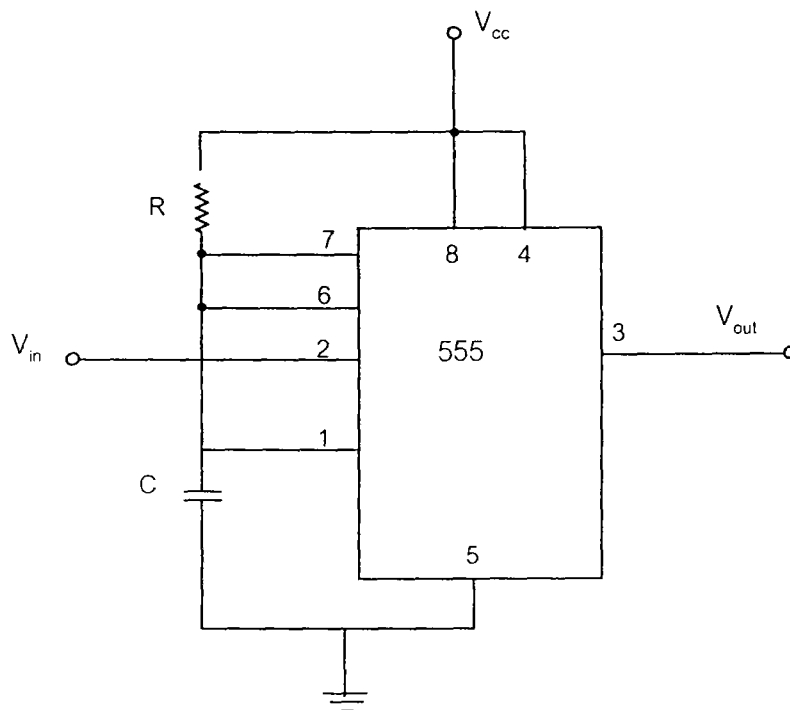
วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ เป็นวงจรที่สร้างขึ้นโดยใช้ ไอซี 555 ซึ่งจะสร้างสัญญาณความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) คล้ายกับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ แต่จะสร้างเพียง 1 รูปคลื่นสัญญาณต่อการกระตุ้น 1 ครั้ง

การทำงานของวงจรนั้น ขณะเริ่มต้นศักย์ไฟฟ้าที่ขา 6,7 และ 2 จะเท่ากับ V_{CC} ซึ่งจากตาราง (5) ทางออก (3) จะเป็นระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำในที่นี้คือ 0 V ทรานซิสเตอร์จะนำกระแสไฟฟ้าประจุบนตัวเก็บประจุและจะคายออกผ่านทรานซิสเตอร์ทำให้ระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางเข้า (6) ต่ำกว่า $2V_{CC}/3$ ซึ่งทางออกของวงจรจะคงสถานะเดิม เมื่อมีคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเข้าที่ขา 2 ศักย์ไฟฟ้าที่ (2) จะลดลงเป็นศูนย์ชั่วคราว เมื่อมีคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเข้า โดยในช่วงเวลานี้ ระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกจะเปลี่ยนเป็นระดับสูง ขณะนี้ทรานซิสเตอร์ภายในไอซี 555 จะหยุดนำกระแสไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ C จะเริ่มสะสมประจุเพิ่มขึ้น จนศักย์ไฟฟ้าที่ (6) สูงกว่า $2V_{CC}/3$ จะทำให้ทางออกของวงจรกลับมาเป็นศูนย์อีกครั้ง ซึ่งช่วงเวลา (T) ที่ศักย์ไฟฟ้าทางออก (3) คงค่าระดับสูงอยู่นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ต่อกับขา 6 ซึ่งช่วงเวลาหรือคาบ (T) ที่เกิดขึ้นนั้น จะมีความสัมพันธ์ตามสมการ

(17)

$$T = 1.1RC \quad \text{s} \dots \dots \dots (17)$$

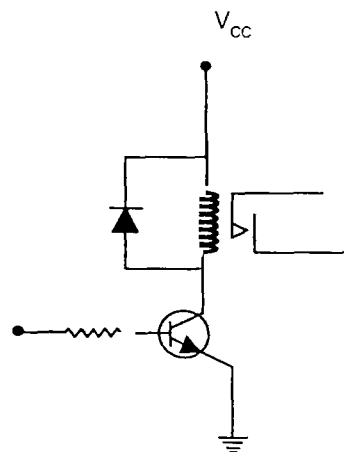
- เมื่อ T คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (s)
 R คือ ความต้านทาน (Ω)
 C คือ ค่าตัวเก็บประจุ (F)



ภาพประกอบ 13 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์

2.5.4 วงจรสวิตช์ทำงานด้วยทรานซิสเตอร์

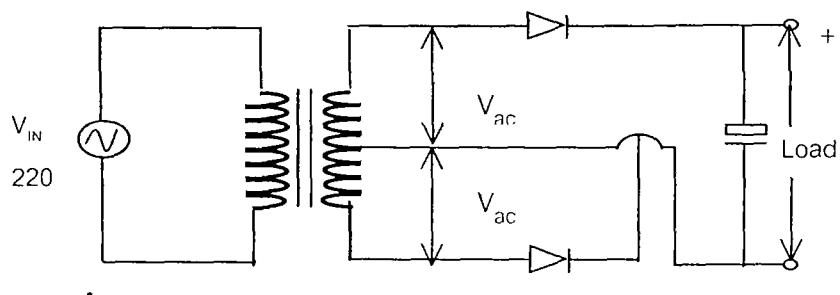
ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบหนึ่งของการขยายสัญญาณ คือการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ วงจรประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน รีเลย์ ไดโอด ดังแสดงตามภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 วงจรสวิตช์

2.5.5 วงจรการเรียงกระแสแบบเต็ม (Full Wave Rectifiers)

Full Wave Rectifiers เป็นวงจรการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ทำหน้าที่แปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรประกอบด้วย หม้อแปลง, ไดโอด 2 ตัว และ ตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบ 15



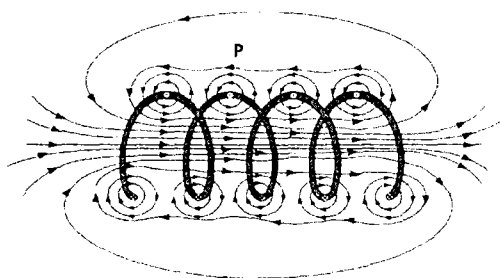
ภาพประกอบ 15 วงจรเรียงกระแสแบบ Full Wave Rectifiers

2.5.6 ไฟฟ้าและแม่เหล็ก

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดหรือขดลวด กระแสไฟฟ้าจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กหรือ ฟลักซ์ (Flux) รอบๆ เส้นลวด ตามภาพประกอบ 16 ซึ่งความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กนั้น สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ตามกฎของแอมแปร์ (Ampere' Law)

$$\oint_{\text{closed loop}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad \dots\dots\dots (17)$$

¹ปริมาณ $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ หมายถึง ผลคูณระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะทางสั้น ๆ ในทิศเดียวกับสนาม ณ จุดนั้น เมื่อรวมผลคูณนี้ตลอดเส้นทางปิดใดๆ จะมีค่าเท่ากับ $\mu_0 I$ โดยที่ I คือกระแสสุทธิที่ถูกล้อมโดยเส้นทางปิดนั้น



ภาพประกอบ 16 การเกิดฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าบนขดลวด

ที่มา: Magnetics. (online) . (2004 March). Available <http://www.ndted.org/>

EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/CoilField.htm

2.5.7 กำลังและการสูญเสียความร้อน

กำลัง คือ งานที่ทำได้ในหนึ่งวินาที

$$P = W/t \quad W \dots\dots\dots (18)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

W คือ งาน (J)

t คือ เวลา (s)

ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ จะเกิดการสูญเสียพลังงาน ซึ่งพลังงานที่สูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่พบมากที่สุด จะอยู่ในรูปของความร้อน ซึ่งเกิดจากการที่มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน R ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์

$$P = I^2 R \quad W \dots\dots\dots (19)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

R คือ ความต้านทาน (Ω)

จากการพิจารณาสมการข้างต้น หากต้องการนำความร้อนไปใช้ การเพิ่มความร้อนสามารถทำได้ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน

บทที่ 3

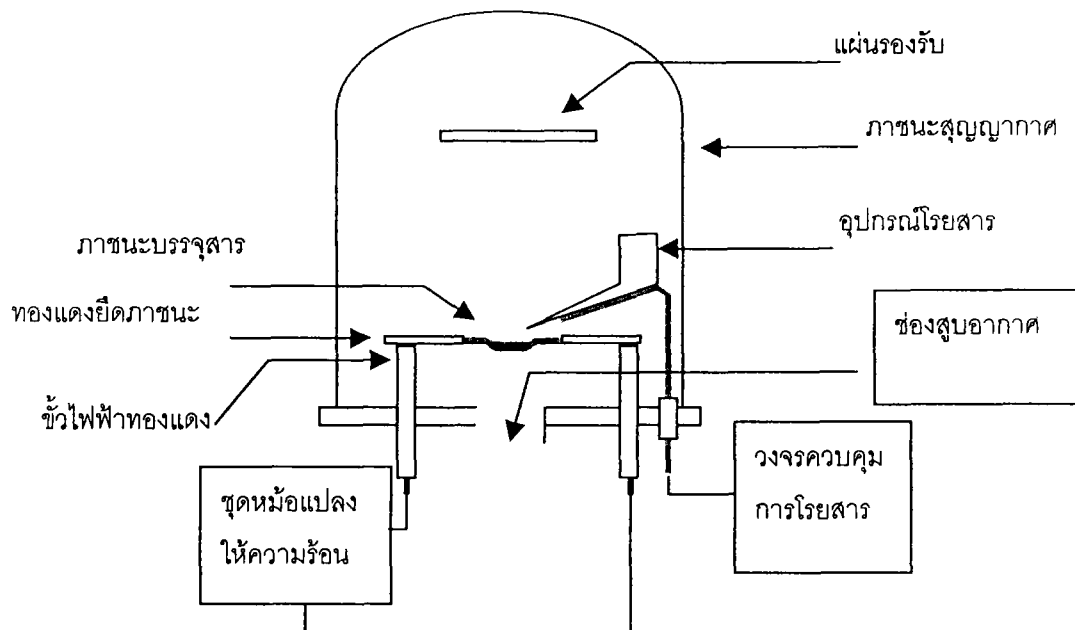
วิธีดำเนินการวิจัย

การสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลชนั้น จะออกแบบให้ใช้ได้ร่วมกับภาชนะ
สุญญากาศ ระบบสูบลมอากาศ ซึ่งมีอยู่ในภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ การเลือก
อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบสุญญากาศสำหรับการสร้างและออกแบบ ต้องศึกษารายละเอียดขององค์
ประกอบต่างๆ ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการสุญญากาศ และติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆสำหรับระบบสุญญากาศ
2. ศึกษาหลักการ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการออกแบบการระเหยสารแบบแฟลช (Flash Evaporation) เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องสูบลมโรตารีและเครื่องสูบลมเพอร์ไอ
3. ศึกษาตัวอย่างสารที่สามารถระเหยได้ด้วยวิธีการแบบแฟลช
4. ศึกษาวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ที่สามารถใช้ในระบบสุญญากาศ
5. ศึกษาวงจรที่ใช้ในการระเหยสารแบบแฟลช
6. ออกแบบอุปกรณ์โรตารีที่ใช้ในการระเหยแบบแฟลช
7. ทดสอบอุปกรณ์โรตารี
8. ออกแบบและสร้างขั้วไฟฟ้าของทองแดงที่ใช้จับภาชนะใส่สาร ซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน
กับสารที่ต้องการระเหย
9. คำนวณปริมาณความร้อนสูงสุด ที่ภาชนะบรรจุความร้อนใช้ในการระเหยสาร
10. ออกแบบและทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับภาชนะบรรจุสาร เพื่อให้ความร้อน
11. ทดลองเตรียมฟิล์มบาง

3.2 โครงสร้างระบบสุญญากาศ



ภาพประกอบ 17 โครงสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการระเหยสารแบบแฟลช

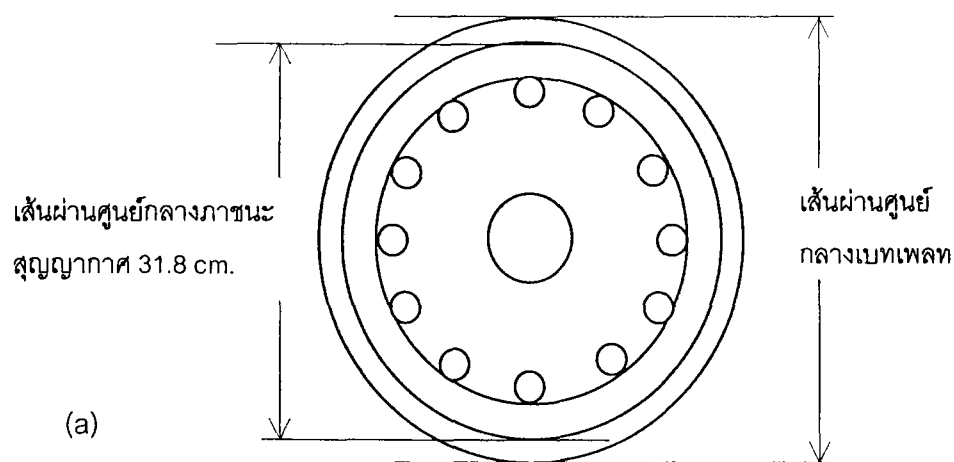
ในส่วนของการทำวิจัยในครั้งนี้ นอกจากการสร้างอุปกรณ์เพื่อให้โรยสารให้สามารถเตรียมฟิล์มบางได้ ผู้วิจัยจะต้องดำเนินการออกแบบอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง และติดตั้งอุปกรณ์บางส่วน ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ และทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เพื่อเตรียมความพร้อมในการระเหยสาร อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแบบแฟลช ประกอบด้วย ระบบสูบลมอากาศ ภาชนะสุญญากาศ อุปกรณ์ให้ความร้อน ขั้วไฟฟ้า ภาชนะบรรจุสาร อุปกรณ์โรยสาร วงจรที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์โรยสาร เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์แสดงตามภาพประกอบ 17

3.3 เครื่องสูบลมอากาศและภาชนะสุญญากาศ

การออกแบบอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการระเหยสารแบบแฟลช ได้ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ซึ่งมีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงมีการศึกษาอุปกรณ์เบื้องต้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

ภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในการทำวิจัย ได้ใช้ภาชนะสุญญากาศที่มีในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำจากแก้วไพเรกซ์ ดังภาพประกอบ 16 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.8 cm ความสูงทั้งหมดของภาชนะสุญญากาศ 31 cm. หนา 0.45 cm โดยภาชนะสุญญากาศจะจัดวางบนเบสเพลท (Base Plate) ซึ่งทำจากสเตนเลส



(b)

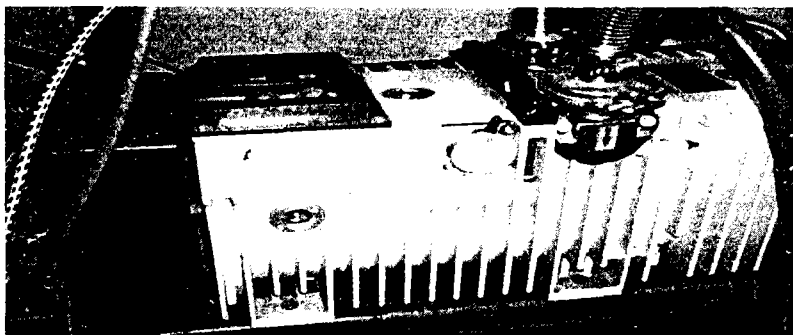


ภาพประกอบ 18 (a) ด้านบนของภาชนะสุญญากาศบนฐานเบสเพลท (Base plate)

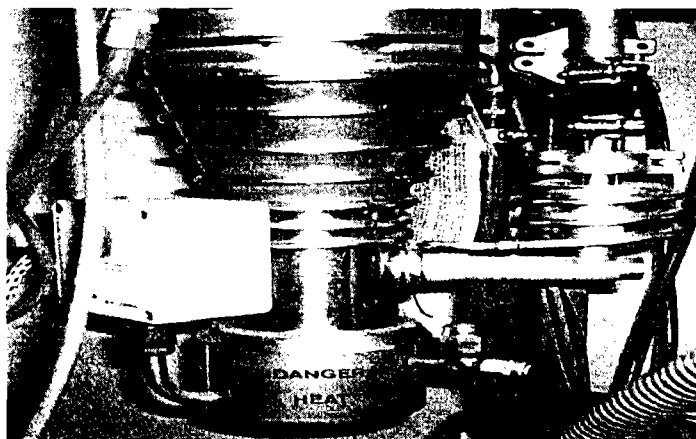
(b) ขนาดภาชนะสุญญากาศที่มีในห้องปฏิบัติการ

3.3.2 ระบบสูบน้ำอากาศ (Pumping System)

เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทำให้เกิดความเป็นสุญญากาศนั้น ช่วงแรกจะใช้เครื่องสูบน้ำโรตารี (Rotary Pump) แบบ 2 จังหวะ ของบริษัท BALLZER ทำการสูบน้ำจนได้ความดันประมาณ 10^{-2} torr จึงใช้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำแพร่ไอ (Diffusion Pump) ซึ่งเป็นเครื่องสูบน้ำแบบ 3 ชั้น ซึ่งจะทำให้เกิดความดันได้ถึง 10^{-6} torr



ภาพประกอบ 19 เครื่องสูบน้ำโรตารีที่ใช้ในการทดลอง



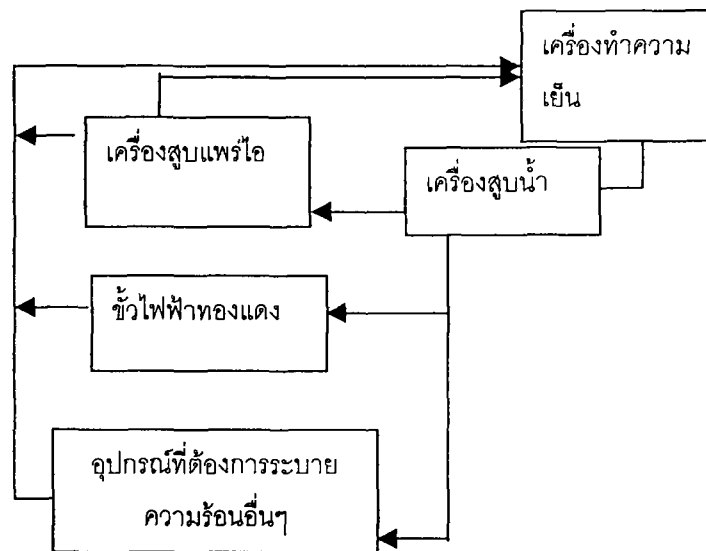
ภาพประกอบ 20 เครื่องสูบน้ำความดันแพร่ไอที่ใช้ในการทดลอง

3.4 การระบายความร้อนด้วยเครื่องทำความเย็น

ในการทำงานของระบบสุญญากาศ มีความจำเป็นต้องมีการระบายความร้อน ซึ่งทำได้โดยใช้เครื่องทำความเย็น ในการทำงานของเครื่องสูบความดันแปรไอและการให้กำลังไฟฟ้าแก่ภาชนะบรรจุสาร จะเกิดความร้อนในปริมาณสูง ซึ่งเครื่องทำความเย็นต้องมีความเย็นที่จะระบายความร้อนได้เพียงพอ ในการออกแบบการระเหยสารนี้ ได้ทดลองใช้กับเครื่องทำความเย็นที่มีอัตราการทำความเย็น 14,000 BTU ตามภาพประกอบ 21 ทำให้น้ำมีอุณหภูมิต่ำสุดได้ถึง 13 องศาเซลเซียส ขณะใช้งานระเหยสาร



ภาพประกอบ 21 เครื่องทำความเย็นขนาด 14,000 BTU

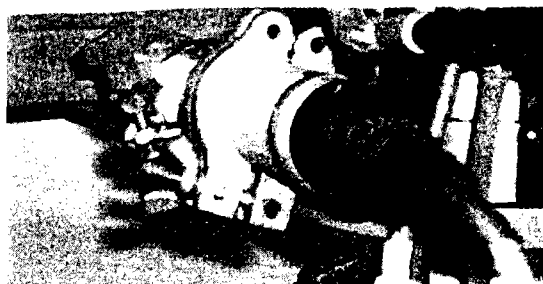


ภาพประกอบ 22 เส้นทางของท่อไปยังตำแหน่งต่างๆ

เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบการเตรียมฟิล์มบางนั้น ต้องใช้เครื่องทำความเย็นระบายความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดเส้นทางเพื่อต่อกับเครื่องทำความเย็น เพื่อให้มีการระบายความร้อนอย่างทั่วถึง ซึ่งการต่อเครื่องทำความเย็นกับส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในระบบ ทำได้ โดยการใช้ท่อพีวีซี ขนาดต่าง ๆ และเครื่องสูบน้ำ ซึ่งท่อที่ต่อจากเครื่องทำความเย็น จะถูกส่งไปยังบริเวณที่มีความร้อนสูง เพื่อใช้ในการระบายความร้อน คือ เครื่องสูบลมดันแอร์ไอ ท่อระบายความร้อนของหัวไฟฟ้าทองแดง ดังแสดงตามภาพ 22

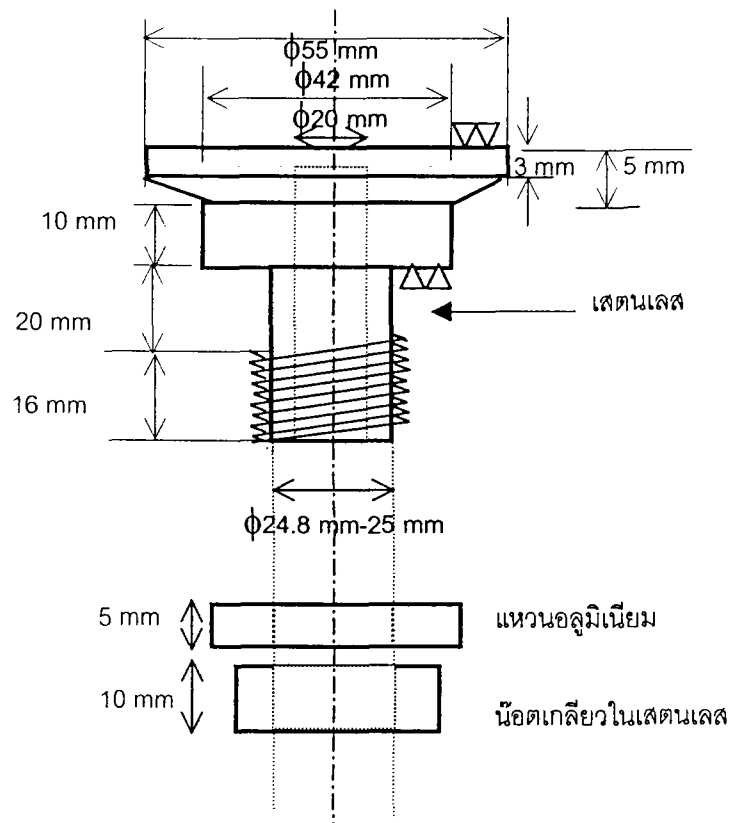
3.5 เกจวัดความดัน

เกจวัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 แบบ คือ เกจพิรานี ใช้วัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศ ถึง 10^{-2} torr และเกจเพนนิ่งใช้วัดความดันในช่วงความดัน 10^{-3} - 10^{-6} torr ซึ่งหัววัดของเกจพิรานีได้ติดตั้ง พร้อมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ตามภาพประกอบ 23 ส่วนเกจเพนนิ่งจะติดตั้งเข้ากับช่องบนเบสเพลท (Base Plate) ที่ใช้วางภาชนะสุญญากาศ



ภาพประกอบ 23 เกจพิรานีติดตั้งเพื่ออ่านค่าภายในภาชนะสุญญากาศ

เนื่องจากเกจวัดความดันชนิดเพนนิ่งที่มีในห้องปฏิบัติการ ไม่สามารถติดตั้งในช่องของเบสเพลทได้ เพราะช่องบนแผ่นเบสเพลทมีขนาดเล็กกว่าหน้าแปลนของเกจ ดังนั้นจึงออกแบบสร้างตัวเชื่อมต่อ ซึ่งทำด้วยวัสดุสเตนเลส ดังภาพประกอบ 24 เพื่อให้เกจเพนนิ่งสามารถติดตั้งบนเบสเพลทได้



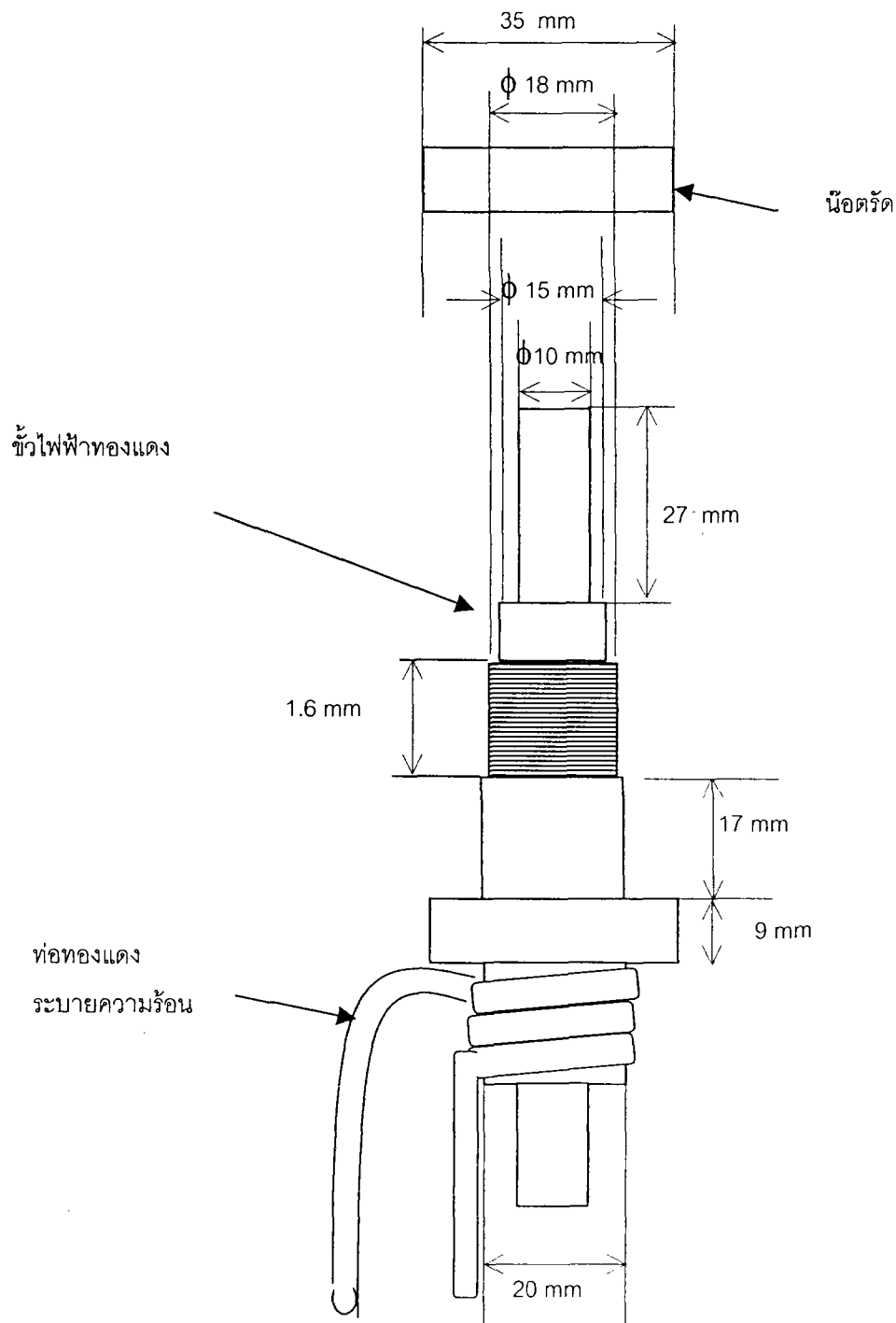
ภาพประกอบ 24 แบบข้อต่อเกจ

3.6 การออกแบบหัวไฟฟ้าและแหล่งความร้อน

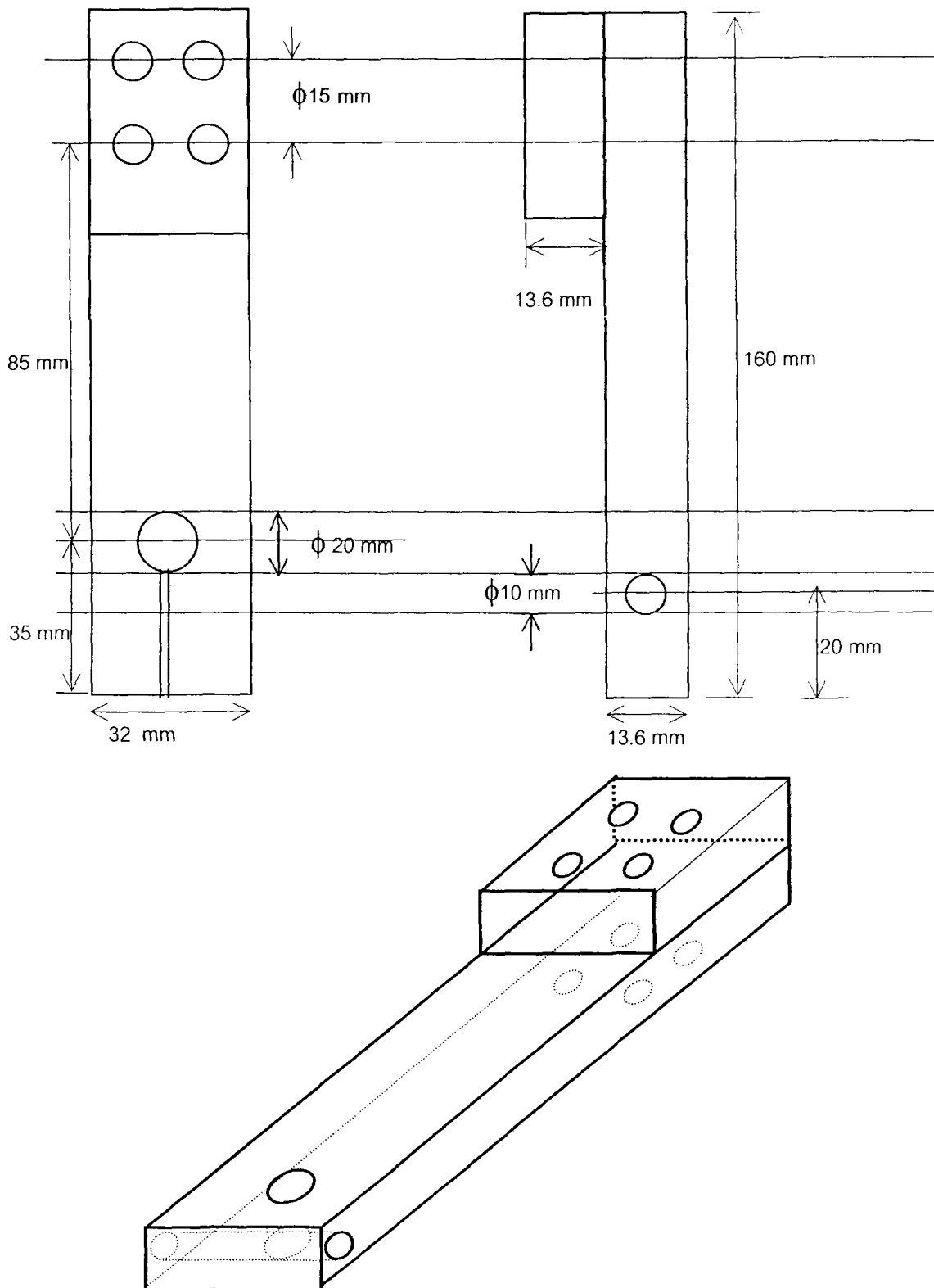
3.6.1 การออกแบบหัวไฟฟ้าทองแดง

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดของช่องที่อยู่บนเบสเพลท (Base Plate) เพื่อให้สามารถติดตั้งหัวไฟฟ้าทองแดงได้พอดี ซึ่งหัวไฟฟ้าทองแดงที่สร้างขึ้นมีจำนวน 2 อัน ติดตั้งในแต่ละช่องของเบสเพลท โดยที่เบสเพลทที่ใช้ จะมี 12 ช่อง โดยมีรูปร่างดังภาพประกอบ 18 ซึ่งการออกแบบหัวไฟฟ้าทองแดง ได้เลือกขนาดของหัวทองแดงจากห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการทดสอบเป็นต้นแบบ โดยใช้วิธีการกลึงขึ้นรูป พร้อมทั้งออกแบบอุปกรณ์ใช้จับยึดภาชนะบรรจุสาร (Boat) ซึ่งจะต้องยึดติดกับหัวไฟฟ้าทองแดงเพื่อส่งความร้อนไปยังภาชนะบรรจุสารได้

การสร้างขั้วไฟฟ้าทองแดงตามรูปร่างที่ออกแบบนั้น บริเวณที่อยู่ภายนอกภาชนะสุญญากาศจะเป็นส่วนที่สามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศได้ โดยใช้ท่อทองแดงซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกประมาณ 5 mm พันรอบขั้วทองแดงบริเวณที่ยื่นออกจากภาชนะสุญญากาศจำนวน 3 รอบ และทำการประสานผิวสัมผัสของท่อทองแดงกับขั้วไฟฟ้าทองแดงด้วยตะกั่วบัดกรี



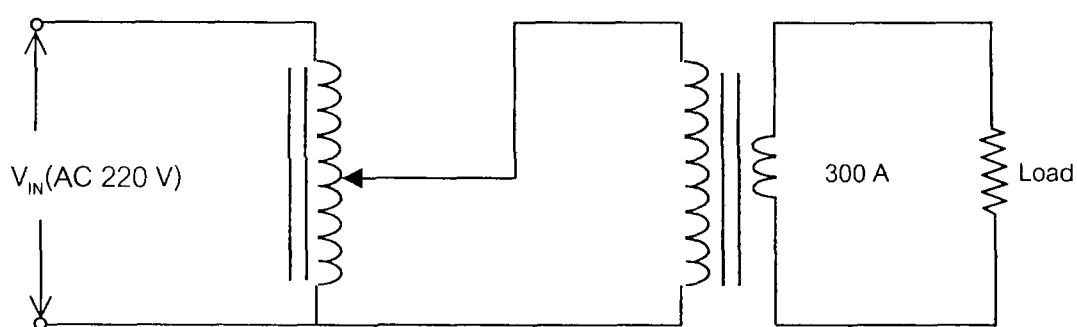
ภาพประกอบ 25 แบบขั้วไฟฟ้าทองแดงซึ่งด้านใต้ของขั้วทองแดงพันด้วยท่อทองแดงสำหรับ
การระบายความร้อนด้วยน้ำ



ภาพประกอบ 26 แบบขั้วทองแดงเพื่อใช้ยึดภาชนะให้ความร้อน

3.6.2 แหล่งความร้อนเพื่อระเหยสาร

การออกแบบระบบระเหยสาร ได้เลือกใช้ภาชนะบรรจุสารแบบโบท โดยมีตัวไฟฟ้าที่ใช้จับภาชนะบรรจุสารเป็นขั้วทองแดง ติดตั้งภาชนะบรรจุสารที่ตำแหน่งกลางเบสเพลท (Base Plate) แหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หม้อแปลงแบบปรับค่า (Variac Transformer) ให้กระแสสูงสุด 20 แอมแปร์ จ่ายให้กับหม้อแปลงกระแสสูง ซึ่งให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่ต่ำกว่า 300 แอมแปร์



ภาพประกอบ 27 วงจรอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสาร

3.7 ฉนวนไฟฟ้า

เนื่องจากการทำให้สารที่อยู่ในภาชนะบรรจุสาร ระเหยไปเกาะบนแผ่นรองรับ ต้องใช้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอก ซึ่งส่งผ่านจากขั้วทองแดงไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ยึดภาชนะบรรจุสาร ขั้วไฟฟ้านี้จะต้องแยกออกจากเบสเพลทซึ่งเป็นตัวนำ จึงจำเป็นต้องมีฉนวนและต้องมีรูปร่างที่พอดีกับขั้วทองแดง โดยอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทองแดงกับฐานเบสเพลทสแตนเลส เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า ฉนวนนั้นนอกจากจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรยังใช้เพื่อบังคับตำแหน่งของแหวนยางไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลขณะถูกบีบอัด ดังนั้นขนาดของฉนวนจะต้องมีความพอดีเพื่อให้เกิดการซีลที่ดีและมีความแข็งแรงต่อการบีบอัด เมื่อประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้า

ในการทำฉนวนไฟฟ้าในครั้งนี้ ผู้จัดทำได้เลือกใช้ดินขาว บ้านปางคำ อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง ซึ่งมีอยู่ในห้องปฏิบัติการ นำมาล้างและกรอง ลักษณะของดินเป็นผงสีขาว และมีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบหลัก มีความทนความร้อนอยู่ในช่วง 1,520 - 1,573 K

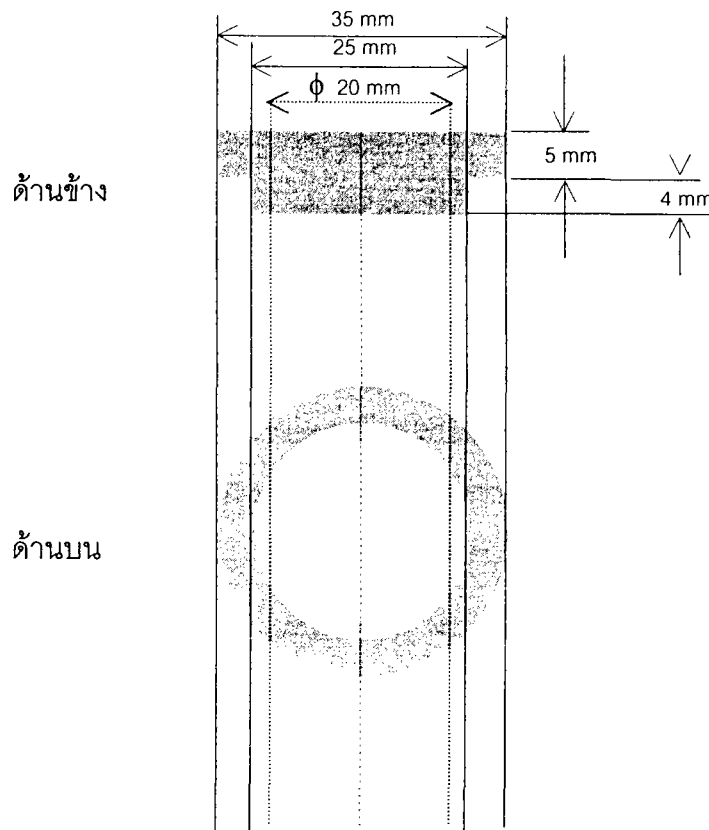
ขั้นตอนการทำฉนวนไฟฟ้า

1. ผสมดินขาวและน้ำ ในอัตรา 1:1
2. ทดสอบการทนไฟของดินขาวที่อุณหภูมิช่วงต่างๆ คือ 400 , 800, 1200, 1300 1400 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสมีความทนไฟและมีความแข็งแรง
3. เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสม ทำการปั้นปูนขาวทรงกลมตัน เพื่อใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว เพื่อให้ได้ดินขาวที่มีรูปร่างตรงตามแบบที่ต้องการ ซึ่งการหดตัวของดินขาวเป็นไปตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงขนาดของดินขาวทรงกลมตันก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 1,350 °C

ลำดับ	เส้นผ่าศูนย์กลางก่อนอบ	เส้นผ่าศูนย์กลางหลังอบ	เปอร์เซ็นต์การหดตัว	ความหนา ก่อนอบ	ความหนา หลังอบ	เปอร์เซ็นต์การหดตัว
	(mm)	อบ(mm)	(%)	(cm)	(cm)	(%)
1	24.4	21.5	12.1	5.4	4.7	13.0
2	24.3	21.2	12.7	5.4	4.6	14.8
3	24.4	21.5	12.1	5.6	4.9	12.5
	เฉลี่ย		12.3	เฉลี่ย		13.4

4. ศึกษาข้อมูลการหัดตัว และทำการออกแบบขนาดของดินขาวที่นำมาใช้เป็นฉนวน ตามภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แบบฉนวนไฟฟ้า

5. ขึ้นรูปดินขาวที่ผสมน้ำ โดยใช้ท่อกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ,35 mm และท่อผิวเกลี้ยงตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm

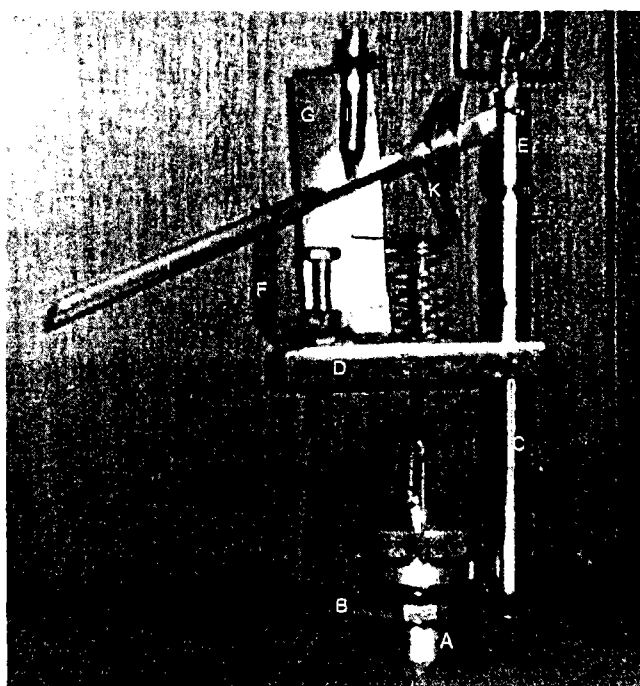
6. นำดินใส่ในท่อเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm และ 35 mm ตามลำดับ จากนั้นนำท่อตันกดทับดิน ดึงท่อตันอย่างช้า ๆ จะได้ดินที่เป็นท่อกลวงเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm และมีความหนา 2.5 mm และ 7.5 mm นำท่อกลวงทั้งสองชิ้นประกบกัน โดยใช้ดินขาวซึ่งผสมกับน้ำในอัตรา 1:3 ใช้ในการยึดท่อทั้งสองเข้าด้วยกัน ทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน

7. นำดินขาวที่ทิ้งไว้แล้ว 1 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น ใช้กระดาษทรายละเอียดขัดดินขาวที่เย็นแล้ว ให้ได้รูปทรงและผิวตามที่ต้องการ

8. นำดินขาวเข้าอบอีกครั้งแต่เพิ่มอุณหภูมิ เป็น 1,350 องศาเซลเซียส อบนาน 6 ชั่วโมง

3.8 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้โรยสาร

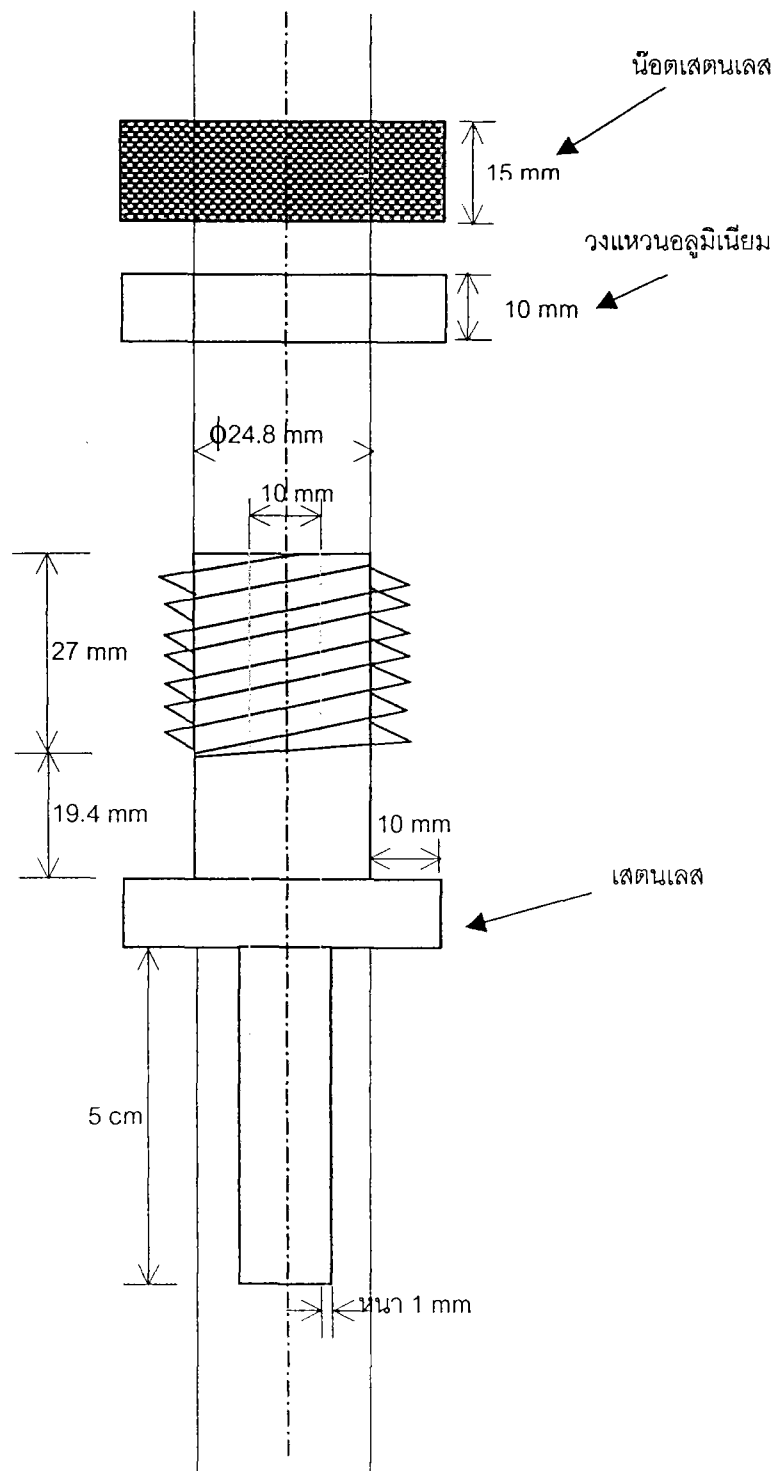
การออกแบบอุปกรณ์โรยสารนั้น จะออกแบบเพื่อให้สามารถติดตั้งบนช่องของฐานเบสเพลทได้พอดี และมีขนาดไม่เกินกว่าขนาดของภาชนะสุญญากาศ โดยอุปกรณ์โรยสารที่ออกแบบนั้น ประกอบด้วย 13 ชิ้นส่วน ทำจากสเตนเลสและอลูมิเนียม ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการกลึงขึ้นรูป การตัดและตะไบตกแต่ง ซึ่งอุปกรณ์สามารถปรับระดับความสูง เพื่อหามุมที่ใช้ในการเทได้ โดยรูปร่างของอุปกรณ์โรยสาร แสดงดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 อุปกรณ์โรยสารประกอบเสร็จ

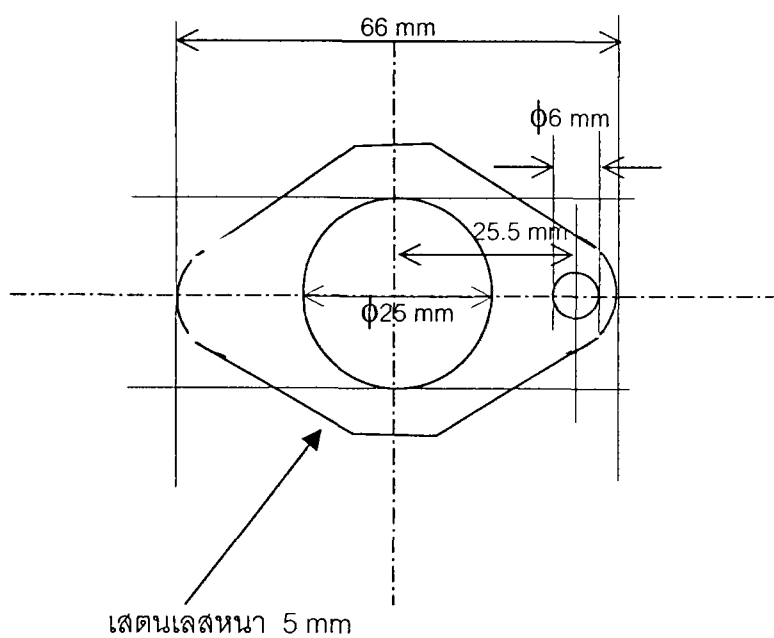
จากภาพประกอบ 29 ของอุปกรณ์โรยสาร จะประกอบด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 13 ชิ้น ประกอบกัน ซึ่งมีรายละเอียด เกี่ยวกับการออกแบบดังนี้

1. A – สเตนเลส สามารถใส่ในช่องบนฐานเบทเพลทพอดี้ และส่วนปลายของชิ้นงาน ยื่นออกนอกภาชนะสุญญากาศ โดยภายในชิ้นงานเจาะรูกลวงขนาด 10 mm ขึ้นเกลียวขนาด 27 mm



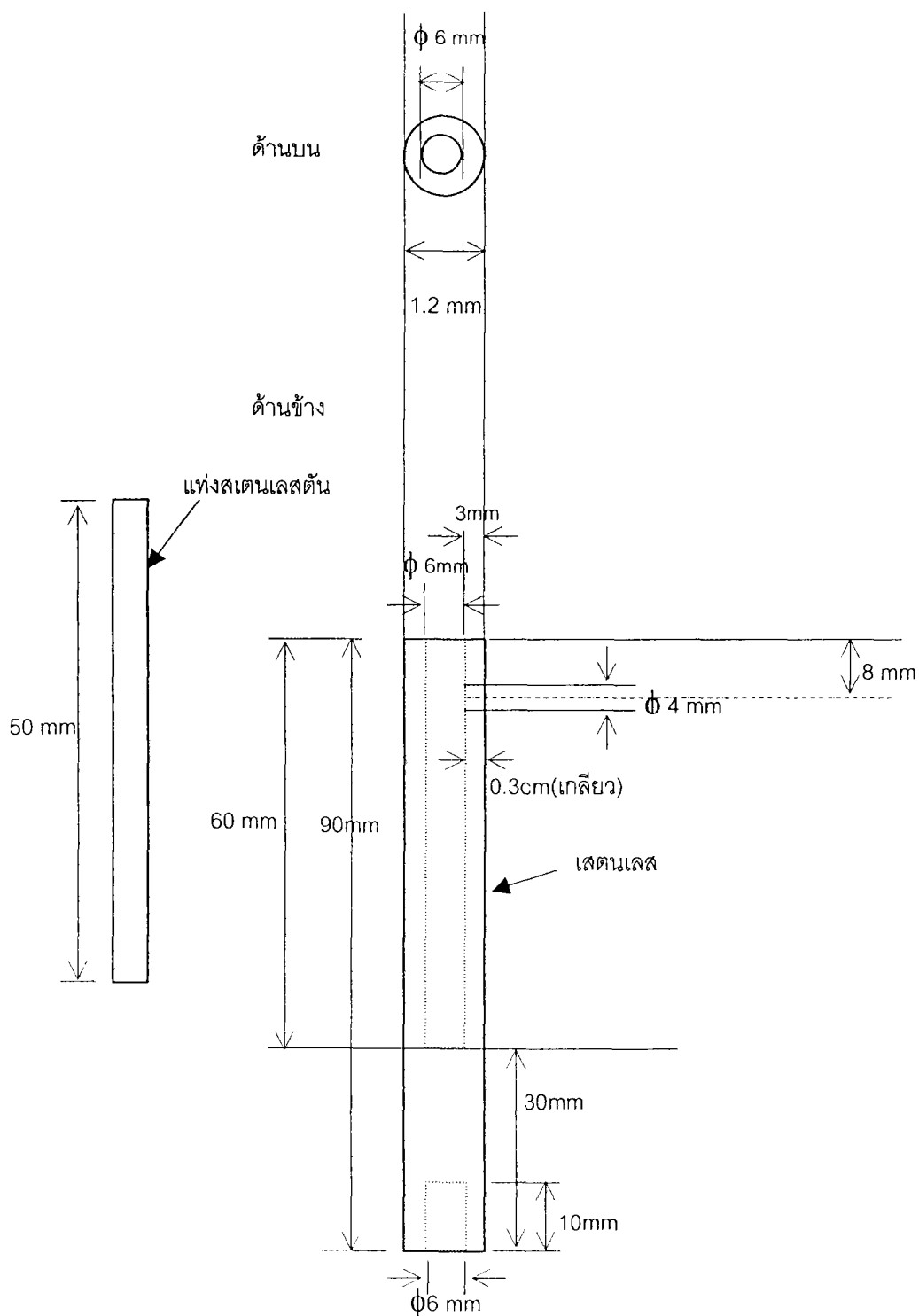
ภาพประกอบ 30 ชิ้นงาน A

2. B - เสดนเลสหนา 5 mm เจาะรูขนาด 25 mm และ 6 mm ซึ่งชิ้นงาน B จะวางบนชิ้นงาน A ซึ่งทำการติดตั้งภายในภาชนะสุญญากาศ



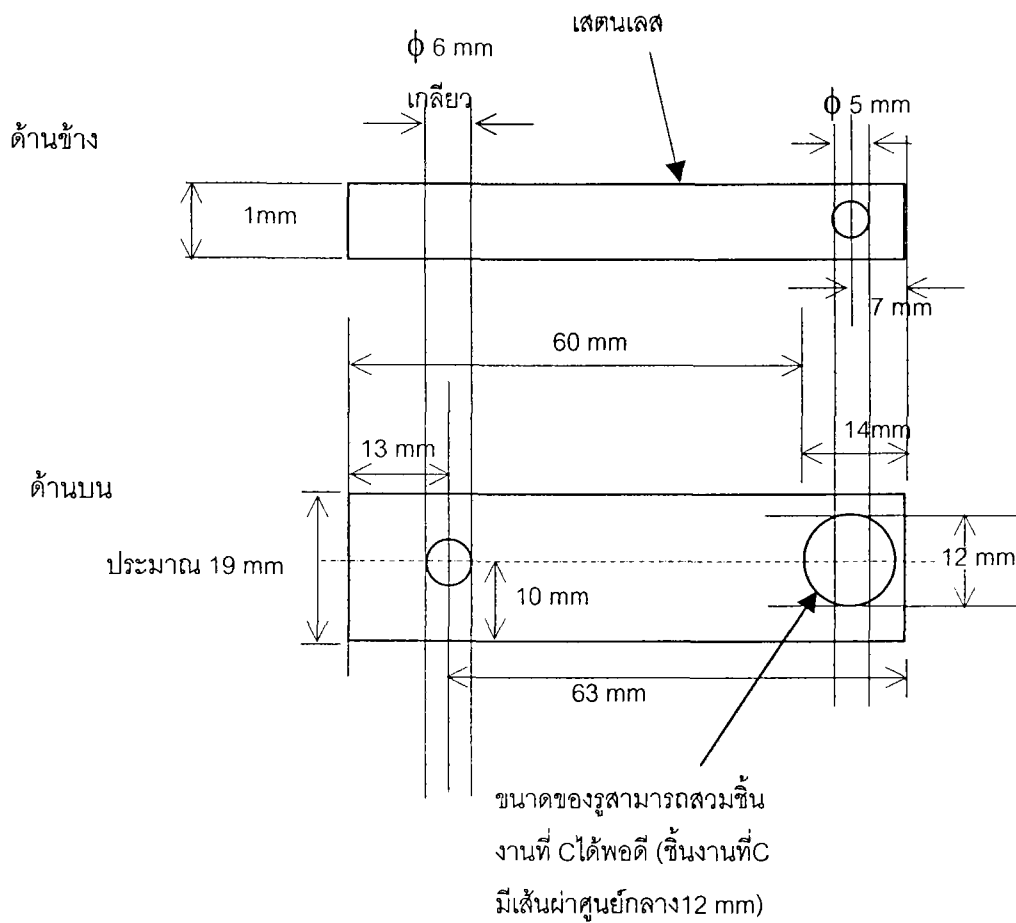
ภาพประกอบ 31 ชิ้นงาน B

3. C – ท่อเสตนเลสและแท่งเสตนเลสตัน ขึ้นเกลียวที่ปลายท่อ เพื่อติดตั้งบนชิ้นงาน B และภายในท่อกลวงนี้มีแท่งเสตนเลสตัน ซึ่งมีขนาดใส่ในท่อเสตนเลสได้พอดี เพื่อใช้ในการปรับระดับความสูงได้ โดยปรับลือระดับความสูงโดยการขึ้นเกลียวด้านข้างของท่อเสตนเลส



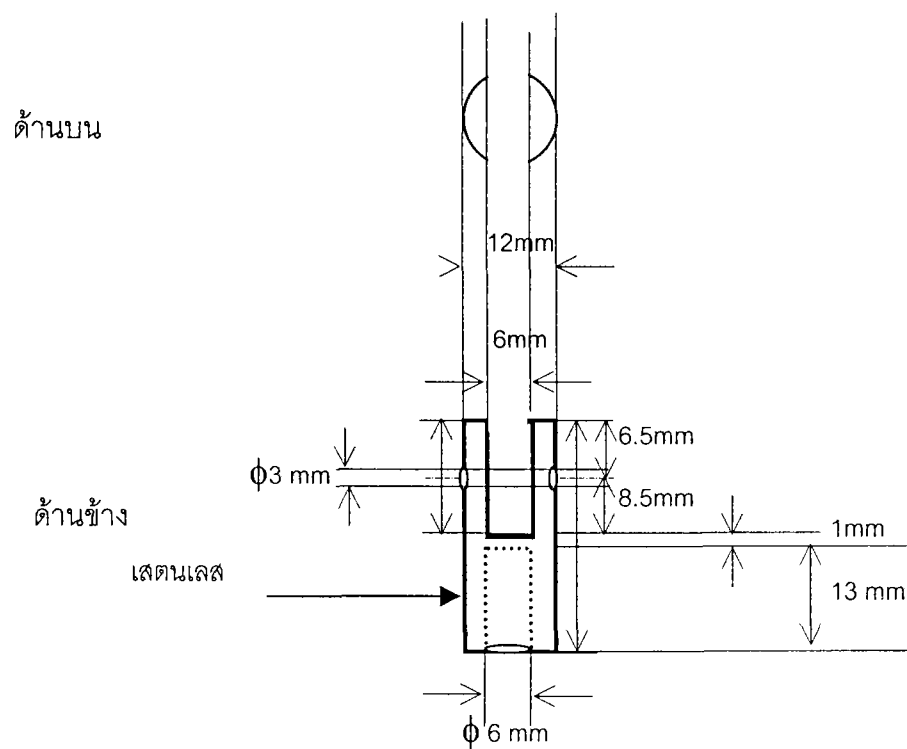
ภาพประกอบ 32 ชิ้นงาน C

4. D – เสดนเลสฐานรองรับสปริง เจาะรูเพื่อสามารถติดตั้งในชิ้นงาน C ได้ และทำเกลียวด้านข้างเพื่อสามารถปรับระดับได้ และเจาะรูขึ้นเกลียวขนาด ϕ 6 mm เพื่อใช้ ยึดแผ่นรับท่อโรยสาร



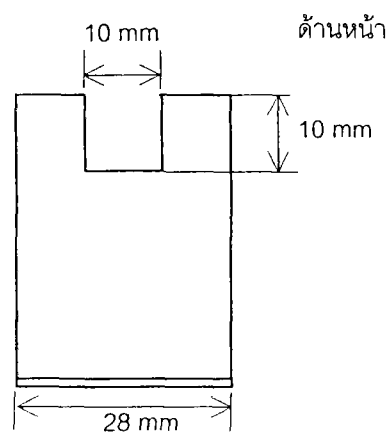
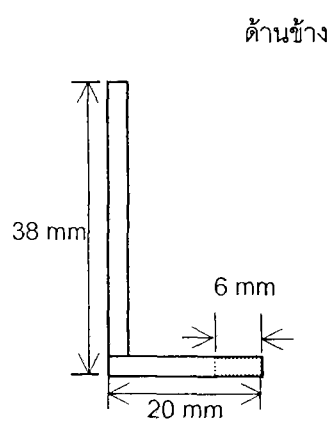
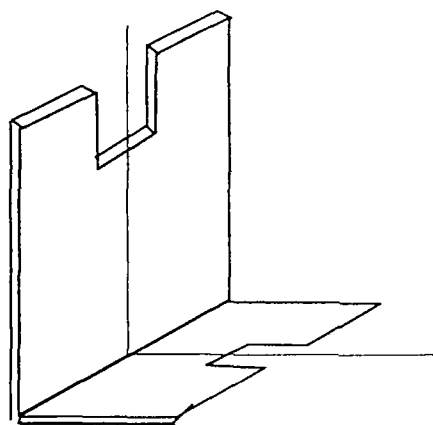
ภาพประกอบ 33 ชิ้นงาน D

5. E - เสดนเลสหัวรับก้านเคาะติดตั้งบนชิ้นงาน C โดยด้านบนผ่ากว้าง 0.6 cm และเจาะรูทะลุตามรูป สำหรับใช้ติดตั้งท่อรอยสาร



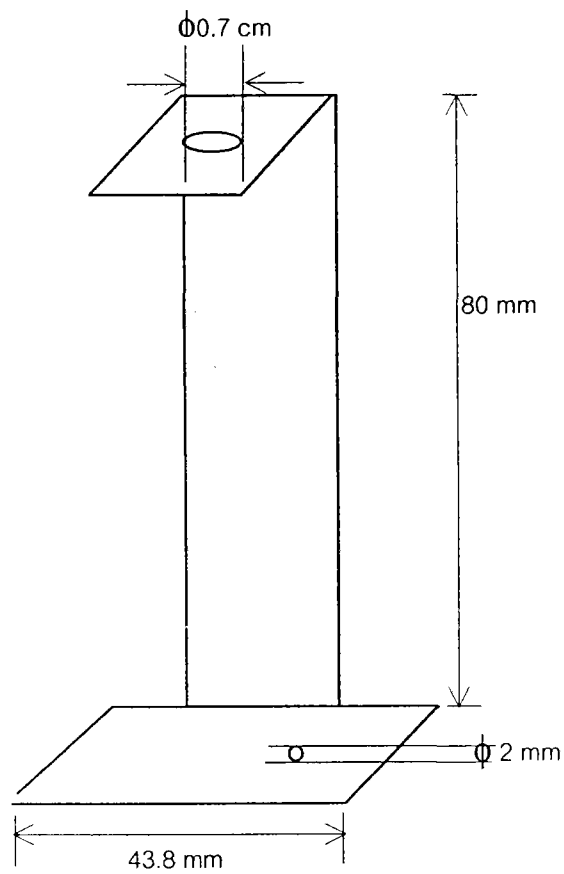
ภาพประกอบ 34 ชิ้นงาน E

6. F – แผ่นอลูมิเนียมบาง สูง 37 mm. ฝาครอบตรงกลางเพื่อรับการกระทบของท่อโรย
เมื่อมีการสั่นติดตั้งบนชิ้นงาน D



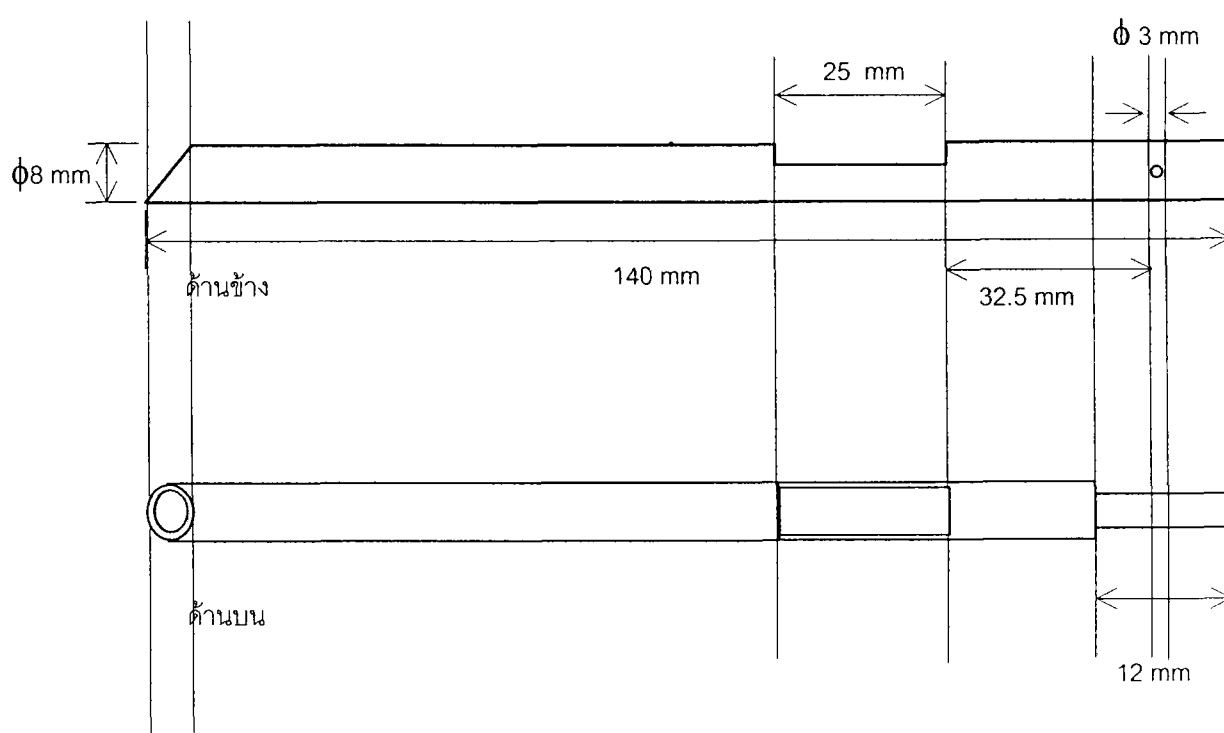
ภาพประกอบ 35 ชิ้นงาน F

7. G – แผ่นอลูมิเนียมบางสูง 80 mm ด้านบนเจาะรู เพื่อใส่หลอดแก้วใสสาร ด้านล่างยึดติดกับชิ้นงาน D และกดทับสปริง



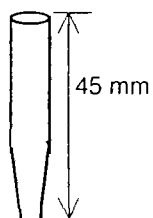
ภาพประกอบ 36 ชิ้นงาน G

8. H – ท่อโรยสารอลูมิเนียม หนา 1 mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6.5 mm ท่อยาว 140 mm ด้านบนตะไบเปิดเพื่อให้ต่อกับหลอดแก้วใส่สาร และปลายท่อด้านหนึ่งตะไบแบนและทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งบนชิ้นงาน E ส่วนปลายด้านหนึ่งตะไบเฉียงเพื่อลดขนาดปลายท่อให้มีขนาดเล็กลง และอยู่ห่างจากชิ้นงาน F 2 mm



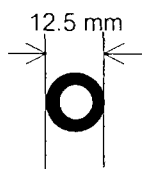
ภาพประกอบ 37 ชิ้นงาน H

9. I – หลอดแก้วสูง 45 mm เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 7 mm หนา 0.8 mm ใส่สารที่
ต้องการโรย



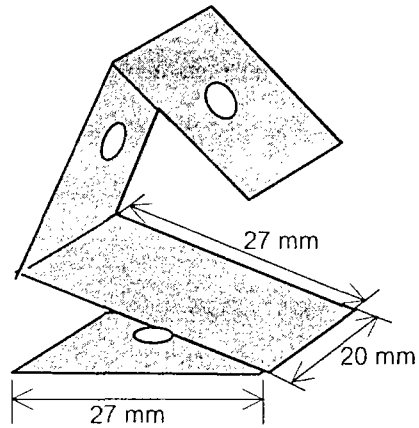
ภาพประกอบ 38 ชิ้นงาน I

10. J – โอริง เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 12.5 mm. หนา 3 mm ติดตั้งบนหลอดแก้ว



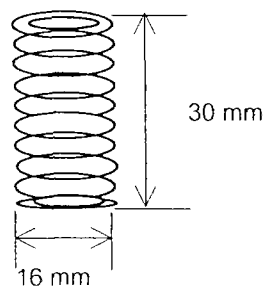
ภาพประกอบ 39 ชิ้นงาน J

11. K – แผ่นอลูมิเนียมบาง พับและเจาะรูขนาดเท่ากับท่อโรยสาร เพื่อยึดติดท่อและ
เป็นหน้าสัมผัสกับสปริง



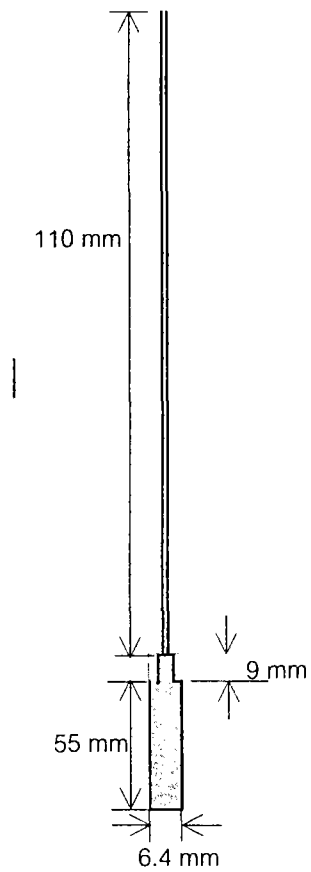
ภาพประกอบ 40 ชิ้นงาน K

12. L – สปริงติดตั้งบนชิ้นงาน D คำนีจของสปริง 10 N/m



ภาพประกอบ 41 ชิ้นงาน L

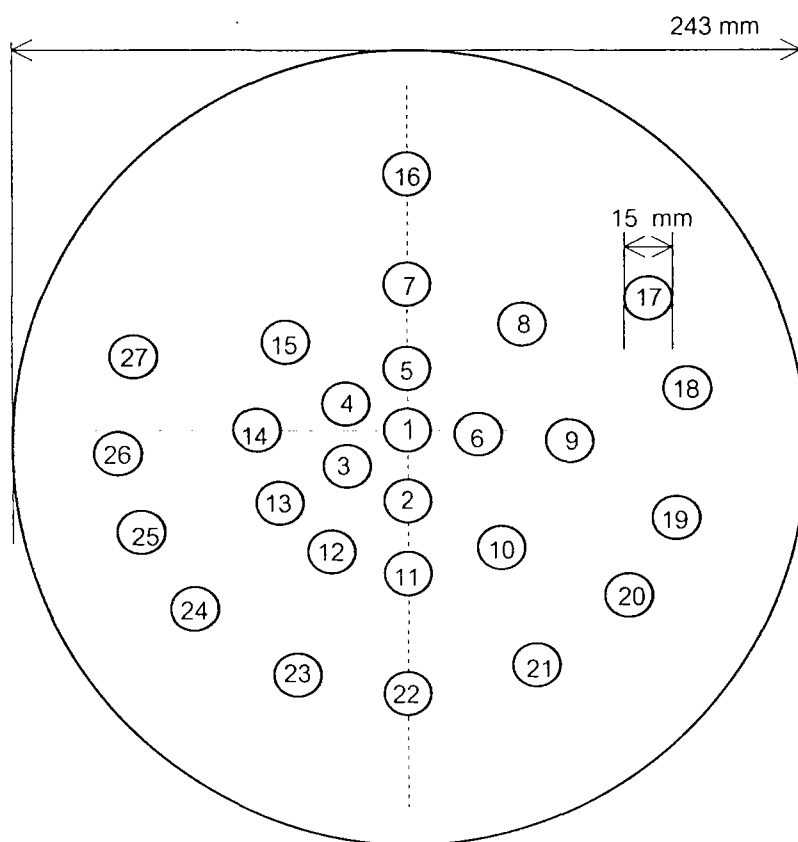
13. M - แท่งเหล็กกลมตันทรงกระบอก ผูกติดกับลวดขนาดเล็กร้อยผ่านชิ้นงาน D และสปริง และยึดติดชิ้นงาน K



ภาพประกอบ 42 ชิ้นงาน M

3.9 แผ่นรองรับและแท่นวาง

ในการออกแบบอุปกรณ์ สำหรับใช้วางแผ่นรองรับ(สไลด์) จะออกแบบแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแท่นวาง ซึ่งจะใช้การตัดอลูมิเนียมตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ด้านล่างยึดติดกับ น็อตที่อยู่บนฐานเบทเพลท ตัดให้สูง วัดจากขอบน็อตจะมีความสูง 220 mm ซึ่งระดับความสูงนี้ จะ ถูกจำกัด โดยความสูงของภาชนะสุญญากาศ เมื่อได้ความสูงระดับที่ต้องการ จะตัดอลูมิเนียมให้เป็น วงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 215 mm เพื่อใช้สำหรับวางแผ่นอลูมิเนียมบาง โดยแผ่น อลูมิเนียมจะเจาะรูขนาด 15 mm ด้วยมุมต่าง ๆ เมื่อเทียบกับภาชนะบรรจุสาร โดยทำการเจาะรูทั้ง หมด 27 รู

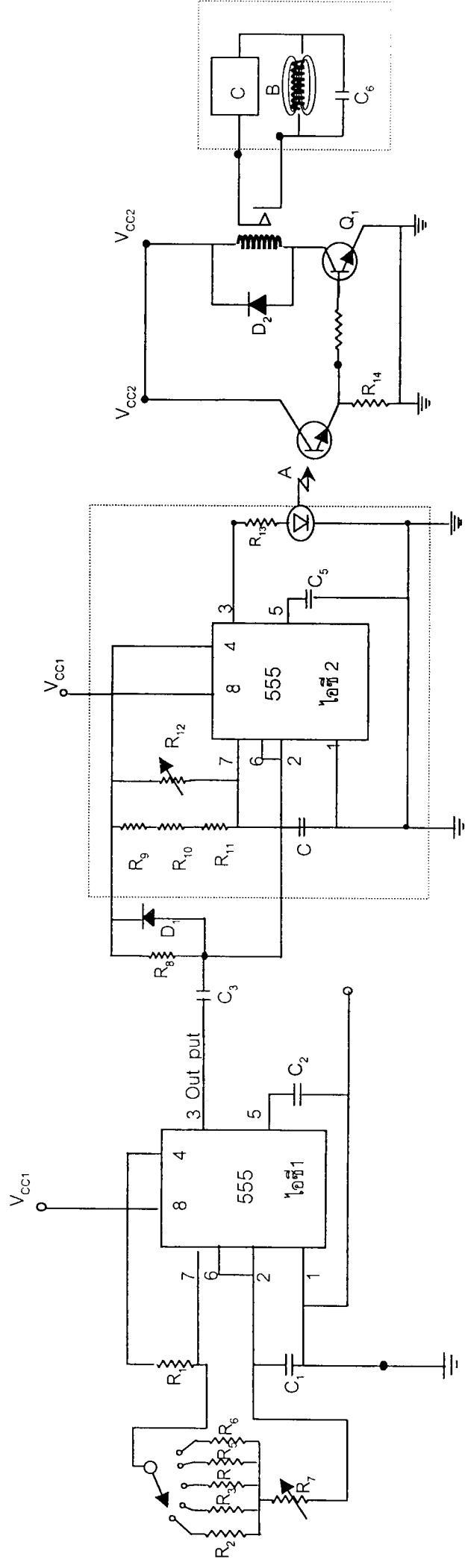


ภาพประกอบ 43 ตำแหน่งการเจาะรู เพื่อใช้เป็นแผ่นรองรับเมื่อทำการระเหยสาร

3.9 การออกแบบวงจรที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์โรยสาร

วงจรควบคุมและขับเคลื่อนอุปกรณ์โรยสาร ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ วงจรอะอสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ วงจรสวิตช์ ขดลวดทองแดง โดยรายละเอียดที่สมบูรณ์จะเป็นดังภาพประกอบ 44 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ไอซี 555 (ไอซี 1, ไอซี 2)	2	ตัว
2. ตัวต้านทานเก็อกมาปรับค่าได้	1	ตัว
3. ตัวต้านทาน (R_1) ขนาด 1.8 กิโลโอห์ม	1	ตัว
4. ตัวต้านทาน (R_2) ขนาด 100 กิโลโอห์ม	1	ตัว
5. ตัวต้านทาน (R_3) ขนาด 250 กิโลโอห์ม	1	ตัว
6. ตัวต้านทาน (R_4) ขนาด 400 กิโลโอห์ม	1	ตัว
7. ตัวต้านทาน (R_5) ขนาด 550 กิโลโอห์ม	1	ตัว
8. ตัวต้านทาน (R_6) ขนาด 700 กิโลโอห์ม	1	ตัว
9. ตัวเก็บประจุ (C_2, C_3, C_6) ขนาด 0.01 ไมโครฟารัด	3	ตัว
10. ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_7) ขนาด 100 กิโลโอห์ม	1	ตัว
11. ตัวต้านทาน (R_8) ขนาด 300 กิโลโอห์ม	1	ตัว
12. ไดโอด เยอรมาเนียมพีเอ็น (D_1)	1	ตัว
13. ตัวต้านทาน (R_9, R_{10}) ขนาด 100 กิโลโอห์ม	2	ตัว
14. ตัวต้านทาน (R_{11}) ขนาด 22 กิโลโอห์ม	1	ตัว
15. ตัวเก็บประจุ (C_4) ขนาด 2.2 ไมโครฟารัด	1	ตัว
16. ตัวต้านทาน (R_{13}) ขนาด 390 โอห์ม	1	ตัว
17. ตัวต้านทาน (R_{14}) ขนาด 10 กิโลโอห์ม	1	ตัว
18. ตัวต้านทาน (R_9) ขนาด 33 กิโลโอห์ม	1	ตัว
19. ตัวต้านทานปรับค่า (R_{12}) ขนาด 500 กิโลโอห์ม	1	ตัว
20. ไดโอด (D_2) เบอร์ 1 N4007	1	ตัว
21. ทรานซิสเตอร์ (Q_1) ชนิด NPN เบอร์ TIP31	1	ตัว
22. ไฟโตทรานซิสเตอร์(A)	1	ชุด
23. ขดลวดทองแดง (B)	1	ชุด
24. วงจรเรกติไฟ์ล์แบบเต็มคลื่น(C)	1	ชุด



ภาพประกอบ 44 วงจรสำหรับอุปกรณ์โรยสาร

3.9.1 ขดลวดทองแดง

ขดลวดทองแดง พันรอบท่อพลาสติกยาว 4 cm ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 1.2 cm จำนวน 450 รอบ โดยใช้เส้นลวดทองแดง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.045 cm ติดเหล็กรูป C จำนวน 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัว กว้าง 2 cm ยาวกว่าขนาดของท่อเล็กน้อย เพื่อให้ยึดติดกับขดลวดทองแดงพอดี และ บัดกรีต่อสาย โดยใช้กระแสขับเคลื่อนจากหม้อแปลง 12 V ที่ผ่านการจัดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และ ใช้ตัวเก็บประจุ ต่อคร่อมขดลวด



ภาพประกอบ 45 ขดลวดทองแดง

3.9.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการโรย

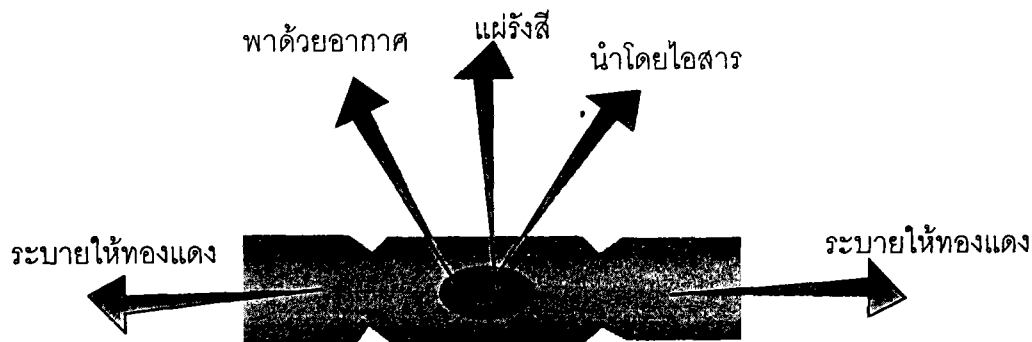
1. เมื่อกดสวิตช์ ON บนหน้าปัดอุปกรณ์ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V จะผ่านหม้อแปลง ขนาด 9 V และถูกแปลงเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบกระแสตรง(DC) ด้วยวงจรเรกติไฟ์ล์แบบเต็มคลื่น
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้า DC จะถูกจ่ายให้กับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้าทางออก (Out put) ที่ขา 3 เป็นสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) ซึ่งความถี่ที่ได้นี้สามารถวัดได้ โดยใช้การอ่านรูปคลื่น จากออสซิลโลสโคป และเปลี่ยนค่าความถี่ได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R
3. ต่อขา 3 จากวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ผ่านตัวเก็บประจุ ไดโอด และตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่ตัดรูปคลื่นซีกบวกออก ให้เหลือเพียงซีกลบ สำหรับกระตุ้นการทำงานของของวงจรโมโนสเตเบิล

4. ที่ขา 3 ของวงจรโมโนอะสเตเบิล จะต่อกับไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด ซึ่งมีโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวรับแสง การเปลี่ยนระดับศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรโมโนสเตเบิล จะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์เกิดการตัดต่อตามจังหวะของสัญญาณ โฟโตทรานซิสเตอร์นี้จะต่อกับทรานซิสเตอร์อีกตัวที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสสำหรับขับเคลื่อนรีเลย์

5. กระแสที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์เท่ากับกระแสที่ขับเคลื่อนรีเลย์ กระแสนี้จะผ่านคอยล์ของรีเลย์ และสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อดึงหน้าสัมผัสของสวิตช์ให้แตะกัน เป็นการต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับดึงท่อโรยสาร

6. ขดลวดไฟฟ้าทองแดง เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า จะสร้างสนามแม่เหล็กภายในขดลวด ซึ่งการเกิดสนามแม่เหล็กเป็นจังหวะตามวงจรนี้เอง จะทำให้เกิดการดึงแท่งเหล็กที่อยู่ในแนวแกนกลางของขดลวด ดึงท่อโรยสารให้เคาะเป็นจังหวะ ตามความถี่ที่เราใช้

3.10 การคำนวณปริมาณความร้อน

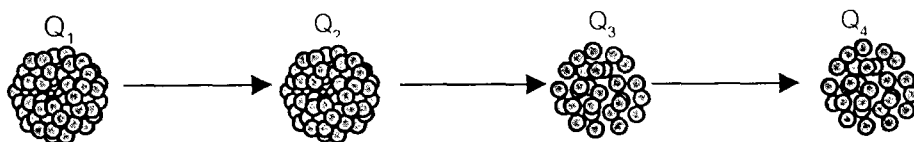


ภาพประกอบ 46 ความร้อนที่ใช้ในการระเหยสาร

การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาชนะบรรจุสาร เพื่อให้มีความร้อนเพียงพอในการที่จะระเหยเกลือลูมิเนียม 0.01 กรัมต่อการโยนหนึ่งครั้งได้ จะต้องพิจารณาปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องกับภาชนะบรรจุสาร ดังนี้

3.10.1 ความร้อนโดยการนำโดยไอสาร

พิจารณาอุณหภูมิ น้ำหนัก 0.01 กรัม ความร้อนที่อุณหภูมิ 0.01 กรัมใช้ในการระเหยสารนั้น จะใช้ความร้อนแบ่งเป็น 4 ส่วน ตามภาพประกอบ 47 โดยที่อุณหภูมิมีคุณสมบัติดังนี้



ภาพประกอบ 47 ความร้อนที่เกิดจากการนำของไอสาร

ปริมาณความร้อน Q_1 แทนความร้อนที่ทำให้อลูมิเนียม 0.01 กรัมอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 300 K เป็น 933 K

$$\begin{aligned} Q_1 &= mc \Delta T \\ &= (0.01 \times 10^{-3} \text{ kg})(938 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})(933 \text{ K} - 300 \text{ K}) \\ &= 5.94 \text{ J} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อน Q_2 แทนความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (Latent Heat of Fusion) ของอลูมิเนียม

$$\begin{aligned} Q_2 &= mL_f \\ &= (0.01 \text{ g})(397 \text{ J/g}^{-1}) \\ &= 3.97 \text{ J} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อน Q_3 แทนความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 933 K เป็น 1250 K

$$\begin{aligned} Q_3 &= mc \Delta T \\ &= (0.01 \times 10^{-3} \text{ kg})(1090 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})(1250 \text{ K} - 933 \text{ K}) \\ &= 3.46 \text{ J} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อน Q_4 แทนความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization) ของอลูมิเนียม

$$\begin{aligned} Q_4 &= mL_v \\ &= (0.01 \text{ g})(10800 \text{ J/g}^{-1}) \\ &= 108 \text{ J} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อนสูงสุดที่อลูมิเนียมใช้ในการระเหยสาร คือ 121.37 J

3.10.2 ความร้อนที่เกิดจากการพาของโมเลกุลอากาศ

$$\begin{aligned}
 E_k &= (3/2)k_B T \\
 &= (1.5)(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(1250 - 300) \\
 &= 1.86 \times 10^{-20} \text{ J} \quad \dots\dots\dots(20)
 \end{aligned}$$

(18) ซึ่งจำนวนโมเลกุลของอากาศที่เคลื่อนที่ชน ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ใน 1 วินาที หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \phi &= 3.53 \times 10^{22} [P/(MT)^{-1/2}] \\
 &= 3.53 \times 10^{22} [10^{-5}/(14 \times 300)^{-1/2}] \\
 &= 5.4 \times 10^{15} \text{ molecule/cm}^2 \cdot \text{sec} \quad \dots\dots\dots(21)
 \end{aligned}$$

จากสมการ 19 เป็นจำนวนโมเลกุลสูงสุดที่เคลื่อนที่ ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ใน 1 วินาที ดังนั้น ภาชนะบรรจุสาร มีพื้นที่ 4 cm^2 พบว่า จะมีจำนวนโมเลกุลของอากาศวิ่งชนภาชนะบรรจุสารทั้ง 2 ด้าน ใน 1 วินาที จำนวน 4.32×10^{16} โมเลกุล ซึ่งจากสมการ (18) พบว่า 1 โมเลกุลพาพลังงาน ไปจากภาชนะ $1.86 \times 10^{-20} \text{ J}$ ดังนั้น 4.32×10^{16} โมเลกุล จะใช้พลังงานเพียง $8.04 \times 10^{-4} \text{ J}$ ซึ่ง แสดงว่าความร้อนที่เกิดจากการพาของโมเลกุลของอากาศมีค่าน้อยมาก จึงสามารถตัดทิ้งได้

3.10.3 ความร้อนจากการแผ่รังสี

ภาชนะบรรจุสารสำหรับเตรียมฟิล์มบางนั้น จะใช้วัสดุที่ทำจากโมลิบดีนัม แทนทาลัม ทั้งสแตน ซึ่งสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิววัสดุ (ϵ) ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1600 K มีค่าระหว่าง 0.15 – 0.84 ในที่นี้จะใช้ค่าสูงสุดของวัสดุซึ่งเท่ากับ 0.84 และอุณหภูมิ 1600 K เพื่อให้ได้ขอบเขตสูงสุดของ อุปกรณ์ให้ความร้อน สำหรับการนำไปใช้งานของภาชนะบรรจุสารทั้ง 3 ชนิด เมื่อ q แทนอัตราการแผ่รังสีความร้อน และ ค่าคงตัวของสเตฟาน – โบลต์มานส์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ดังนั้นจากสมการ (14)

$$\begin{aligned}
 q &= \varepsilon A \sigma T^4 \\
 &= (0.84)(4 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1600 \text{ K})^4 \\
 &= 124.8 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการสูญเสียความร้อนทั้ง 2 ด้าน เท่ากับ 249.4 W

3.10.4 ความร้อนที่ระบายให้กับทองแดง

เพื่อประมาณการปริมาณกำลังงานในส่วนนี้ อาจพิจารณาว่าการกระจายอุณหภูมิจากตำแหน่งที่หัวทองแดงจับยึดโบทไปถึงกึ่งกลางโบทมีการกระจายแบบเชิงเส้น ดังนั้น อัตราการสูญเสียความร้อนของภาชนะบรรจุสาร ที่เกิดจากการระบายให้ทองแดงที่ยึดภาชนะบรรจุสาร

$$\begin{aligned}
 q &= kA \Delta T / L \\
 &= (57 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1})(0.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(1600 \text{ K} - 300 \text{ K}) / (2 \times 10^{-2} \text{ m}) \\
 &= 6.5 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการสูญเสียความร้อนทั้งสองด้าน เท่ากับ 13 W

จากการคำนวณปริมาณความร้อนทั้ง 4 ส่วน จะพบพลังงานที่พอเพียงทำให้ลูมิเนียมจำนวน 1 กรัมระเหยได้หมด จะเท่ากับ 12,137 J และถ้าต้องการระเหยสารนี้ใน 1 นาที จะต้องใช้กำลังงานเท่ากับ 202.2 วัตต์

กำลังงานที่สูญเสียไปในหัวข้อ 2 ,3 และ 4 ซึ่งเท่ากับ 262.4 วัตต์ เป็นกำลังงานที่ใช้ประมาณการอุณหภูมิที่เกิดขึ้น บริเวณภาชนะบรรจุสารแบบโบทเมื่อไม่ได้ระเหยสาร เพื่อให้ได้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการระเหยสาร ซึ่งกำลังงานที่ได้จะใช้เป็นกำลังงานอย่างต่ำ สำหรับนำไปใช้ออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาชนะบรรจุสารแบบโบท เพื่อใช้ในการระเหยสารต่อไป

บทที่ 4

การสร้างอุปกรณ์และการทดลอง

ในส่วนของบทที่ 4 จะแบ่งการทดลอง ออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของการทดลองโรยสารของอุปกรณ์โรยสาร ส่วนการทดสอบหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาชนะบรรจุสารและส่วนของการทดสอบการเตรียมฟิล์มบาง

4.1 การทดสอบการโรยของอุปกรณ์โรยสาร

เนื่องจากอุปกรณ์โรยสารประกอบไปด้วย ส่วนของอุปกรณ์โรยสาร และเครื่องควบคุมการโรยสาร ดังนั้นจึงจะแบ่งพิจารณาการทดสอบออก 2 ส่วน

4.1.1 วงจรควบคุมการโรยสาร

วงจรควบคุมการโรยสารที่สร้างขึ้นจะเป็นตามภาพประกอบที่ 4.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ วงจรสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม วงจรกำหนดความกว้างของช่วงเวลาผ่านกระแสให้ขดลวด และวงจรขับเคลื่อนกระแสสำหรับขดลวด การทำงานของวงจรและการทดสอบทำโดย เมื่อกดสวิตช์ on วงจรสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งประกอบจาก ไอซี 555 ของวงจรอะสเตเบิล จะสร้างสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ทางออกขา 3 ทำการปรับความถี่ของสัญญาณนี้ โดยใช้อสซิลโลสโคปดูสัญญาณที่ทางออกนี้แล้วปรับค่าความต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 , R_4 และ R_5 ให้ได้ความถี่ของคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ทางออกเป็น 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ สัญญาณนี้จะป้อนเข้าสู่ทางเข้าของ monostable (IC555 ,IC2) ซึ่งจะให้สัญญาณทางออกเป็นสัญญาณที่มีความกว้างของพัลส์ (pulse width) ที่กำหนดได้ด้วย ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน 500 กิโลโอห์ม ทำการปรับค่าความต้านทานนี้ให้ได้ช่วงความกว้างของสัญญาณที่ทางออกเป็น 1/10 Hz โดยดูสัญญาณจากอสซิลโลสโคป ตรวจสอบสัญญาณความถี่นี้ด้วยอสซิลโลสโคป วิธีการทดสอบวงจรควบคุมการโรยสารนั้น จะทดสอบพร้อมกับการติดตั้งตัวโรย และทดสอบโรยจริงกับเกล็ดอลูมิเนียม ซึ่งจะทดสอบหาความถี่ที่เหมาะสมซึ่งในช่วงแรกพบว่าอุปกรณ์สามารถเกิดคลื่นความถี่แบบสี่เหลี่ยม และสามารถปรับค่าความถี่ได้ แต่มีบางช่วงที่มีการกระเพื่อมของวงจร จึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการแยก(isolate)วงจรออกจากกัน โดยการใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ แต่เมื่อมีการทดสอบการโรยสาร ปรากฏว่าแม้มีการปรับค่าความถี่ แต่ในการโรยสารที่มีปริมาณเท่ากันนั้น มีการใช้เวลาเท่ากัน ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าที่ผลเป็นเช่นนั้น เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่

ให้กับขดลวดทองแดงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีค่าความถี่ 50 Hz ทำให้การปรับค่าความถี่ของวงจรไม่ได้ผล จึงทำการแก้ไขโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 V และทำการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifiers) เพื่อให้อุปกรณ์สามารถปรับค่าความถี่ได้ จะใช้เครื่องกำเนิดความถี่ (Generator) แทนการทำให้เกิดพัลส์รูปสี่เหลี่ยมของวงจรอะอสเตเบิล เพื่อหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการโรยสารก่อน และเมื่อทำการทดสอบหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมแล้ว จะทำการปรับค่าตัวต้านทานของวงจรอะอสเตเบิล โดยใช้การคำนวณจากสมการเพื่อหาช่วงของตัวต้านทานที่ตรงกับความถี่ที่ต้องการ ในการปรับค่าความต้านทานจะใช้ตัวต้านทาน 2 ตัว คือตัวต้านทานแบบปรับค่าและไม่ปรับค่า เพื่อให้ได้ความถี่ที่ใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งค่าตัวต้านทานที่ปรับจะเป็นไปตามตาราง 6 โดยช่วงของความถี่ที่เหมาะสมในการโรย คือความถี่ 1 – 5 Hz ซึ่งสามารถหาความถี่ได้จากการคำนวณ และตรวจความถูกต้องโดยการอ่านค่าจากออสซิลโลสโคป

ตาราง 6 กำหนดค่าความถี่ของเครื่องเคาะหลังจากได้ทำการปรับค่าแล้ว

ความถี่ที่อ่านจากออสซิลโลสโคป (Hz)	ค่าความต้านทาน $R_B(k\Omega)$ จากการคำนวณ $f = 1.44/C(2R_B + R_A)$ เมื่อ $C = 4.7 \mu F$ $R_A = 1.8 k\Omega$
1	152
2	305
3	459
4	612
5	765

4.1.2 ทดสอบการโรยสาร

การทดสอบอุปกรณ์โรยสารมีขั้นตอนดังนี้

4.1.2.1 ขั้นเตรียมสารทดสอบการโรย ซึ่งในการทดสอบอุปกรณ์ในการโรยสารนี้ จะทดสอบอุปกรณ์โรยสารกับเกล็ดอลูมิเนียม ซึ่งจะใช้ในการทดลองสร้างฟิล์มบางจริง ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งเกล็ดอลูมิเนียมที่ใช้ จะได้จากการตะไบอลูมิเนียมต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm โดยเกล็ดอลูมิเนียมที่นำมาทดสอบมีน้ำหนัก 1 กรัม ซึ่งได้ใช้ไมโครสโคป (Microscope) รุ่น 3160 ของบริษัท Precision Tool & Instrument วัดเส้นผ่านศูนย์กลางเกล็ดอลูมิเนียม จำนวน 40 ข้อมูล ซึ่งแสดงตามตาราง 7

ตาราง 7 เส้นผ่านศูนย์กลางเกล็ดอลูมิเนียมสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง

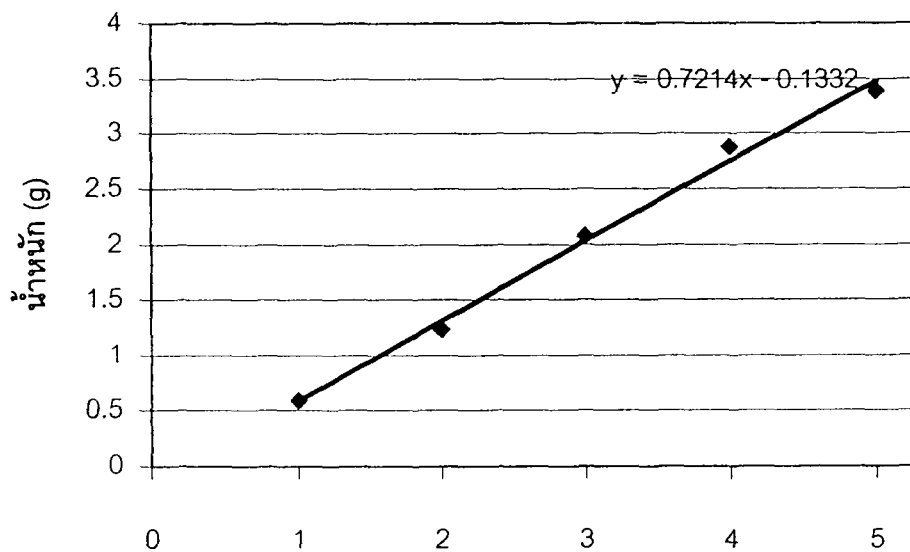
เกล็ดที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm)	เกล็ดที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)
1	0.025	21	0.034
2	0.011	22	0.032
3	0.021	23	0.028
4	0.029	24	0.023
5	0.036	25	0.028
6	0.031	26	0.018
7	0.079	27	0.02
8	0.034	28	0.035
9	0.049	29	0.035
10	0.13	30	0.034
11	0.021	31	0.033
12	0.109	32	0.04
13	0.061	33	0.02
14	0.062	34	0.08
15	0.039	35	0.013
16	0.023	36	0.023
17	0.034	37	0.009
18	0.035	38	0.025
19	0.021	39	0.032
20	0.035	40	0.015
		เฉลี่ย	0.037

4.1.2.2 ขั้นตอนทดสอบการโรย

การทดสอบอุปกรณ์การโรยสาร จะทำการทดสอบภายนอกก่อนทำการติดตั้งจริง เพื่อศึกษาอัตราการโรยสาร และหาค่าความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งพบจากการทดสอบอุปกรณ์ตามที่กล่าวมาแล้ว ความถี่ 1 – 5 Hz เป็นช่วงความถี่ที่มีการเคาะในแต่ละครั้ง ได้น้ำหนักของเกล็ดอลูมิเนียมมีความใกล้เคียงกันต่อการเคาะ 1 ครั้ง โดยมีน้ำหนักประมาณ 0.010994 g ทำให้ประมาณการ จำนวนครั้งของการเคาะ ที่จะเกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อใส่สารปริมาณ 1 กรัมภายในหลอดแก้วใส่สาร

ตาราง 8 น้ำหนักอลูมิเนียมที่โรยได้ในแต่ละความถี่

ความถี่ (Hz)	ครั้งที่	น้ำหนักรที่โรยได้ต่อจำนวนครั้ง			เฉลี่ยนน.ที่โรยได้ ต่อ1ครั้ง	นน.ที่โรยได้ต่อ 1นาที่
		30 ครั้ง	60 ครั้ง	90 ครั้ง	(g)	(g)
1	1	0.22174	0.58656	0.96378	0.00997	0.59
	2	0.17477	0.51279	0.86335		
	3	0.15851	0.49405	0.86519		
2	1	0.18472	0.55206	0.92911	0.01024	1.23
	2	0.17501	0.53796	0.90671		
	3	0.17853	0.55476	0.93048		
3	1	0.17467	0.60083	1.02723	0.01150	2.07
	2	0.22473	0.64588	1.03481		
	3	0.24717	0.65555	1.04452		
4	1	0.22669	0.68467	1.09431	0.01199	2.88
	2	0.24056	0.69522	1.07467		
	3	0.18825	0.62132	1.06835		
5	1	0.24484	0.64961	1.04596	0.01127	3.38
	2	0.22057	0.68046	1.00802		
	3	0.22575	0.63542	0.99090		

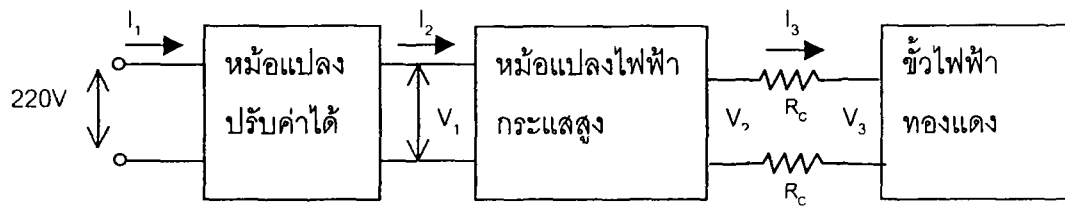


ภาพประกอบ 48 กราฟน้ำหนักของเกล็ดดอคูมินิกที่โรยได้ใน 1 นาที ในช่วงความถี่ 1 – 5 Hz

4.2 การสร้างและทดสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาชนะบรรจุสาร

จากการคำนวณตามที่กล่าวในบทที่ 3 ได้ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อให้จ่ายไฟฟ้ากับภาชนะให้ความร้อน โดยได้เลือกใช้ตู้เชื่อมที่สามารถจ่ายกระแสสูงถึง 150 แอมแปร์ที่ 60 โวลต์ ที่มีขดลวดทางด้านทางออกอนุกรมกันสองชุดมาทำการดัดแปลงให้เป็นขดลวดขนาน ซึ่งทำให้สมบัติของตู้เชื่อมเปลี่ยนไปเป็นสามารถจ่ายกระแส 300 แอมแปร์ที่ 30 โวลต์ ซึ่งการใช้งานกับโบทขนาดเล็กทั่วไป เช่น ทังสเตน หรือแทนทาลัม จะต้องการความต่างศักย์ไม่เกินกว่า 5 โวลต์ ที่กระแส 300 แอมแปร์ กำลังงานที่ต้องการของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจึงไม่มีความจำเป็นต้องเกินกว่า 300×5 วัตต์ หรือ 1.5 กิโลวัตต์

การเลือกหม้อแปลงปรับค่า เพื่อใช้กับหม้อแปลงกระแสสูงนั้น เนื่องจากหม้อแปลงกระแสสูงมีการสูญเสียพลังงานมาก (I^2R) การเลือกหม้อแปลงปรับค่าเพื่อใช้กับหม้อแปลงกระแสสูงจะต้องเลือกให้มีกำลังงานสูงกว่า ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงที่จ่ายกระแสได้สูงสุด 20 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 240 โวลต์ หรือ 4.8 กิโลวัตต์



ภาพประกอบ 49 การวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ

การทดสอบอุปกรณ์จะทำการทดสอบโดยทำการวัดค่า กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามภาพประกอบ ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดดังนี้

I_1 จะทำการวัดโดยใช้แอมมิเตอร์ที่อ่านกระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 แอมแปร์ต่ออนุกรมระหว่างไฟฟ้ากระแสลับที่มีความต่างศักย์ 220 โวลต์ กับ input ของหม้อแปลงปรับค่าได้

I_2 จะทำการวัดโดยใช้แอมมิเตอร์ที่อ่านกระแสได้สูงสุด 10 แอมแปร์ ต่ออนุกรมกับ out put ของหม้อแปลงปรับค่าได้และ in put ของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง

I_3 ทำการวัดโดยใช้แอมป์มิเตอร์แบบเหนี่ยวนำ วัดที่ตำแหน่ง Out put ของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง

V_1 วัดความต่างศักย์ที่ out put ของหม้อแปลงปรับค่าได้ โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

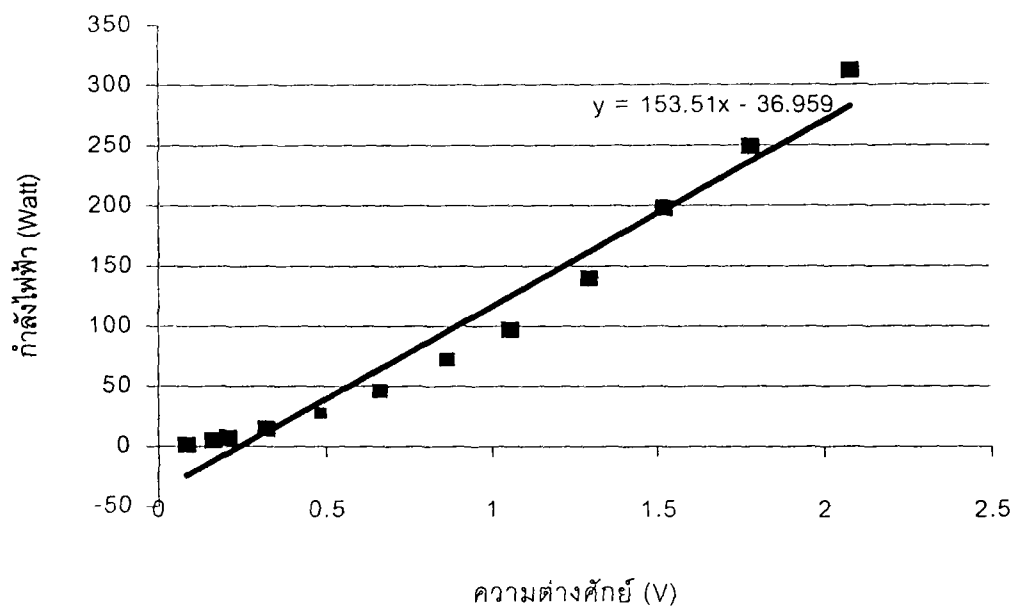
V_2 วัดความต่างศักย์ที่ out put ของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

V_3 วัดความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าทองแดง โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

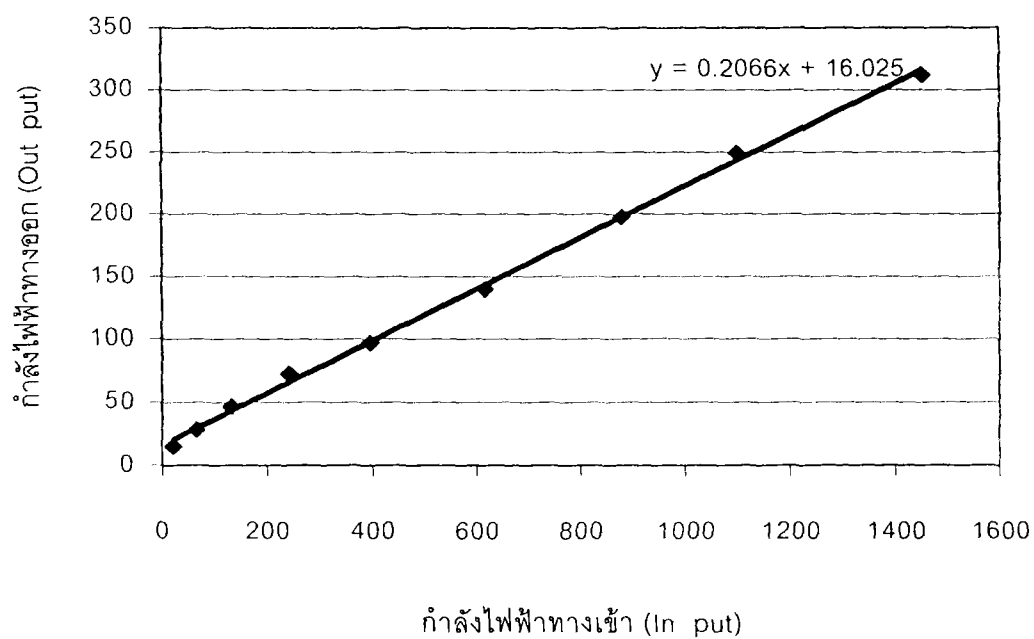
รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นดังตาราง 9

ตาราง 9 ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ความต่าง ศักย์ที่ ตำแหน่ง V_1 (โวลต์)	ความต่างศักย์ ที่ตำแหน่ง V_2 (โวลต์)	ความต่างศักย์ที่ ตำแหน่ง V_3 (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าที่ ตำแหน่ง I_1 (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้าที่ ตำแหน่ง I_2 (แอมแปร์)	กระแสไฟฟ้าที่ ตำแหน่ง I_3 (แอมแปร์)
14.25	0.123	0.084	-	0.2	18
25.42	0.23	0.164	-	0.8	30
30.56	0.283	0.209	-	1.2	35
39.55	0.416	0.322	0.1	2	46
50.6	0.612	0.482	0.3	3.2	58
60.4	0.811	0.662	0.6	4.3	70
70.4	1.055	0.864	1.1	5.5	84
80.2	1.267	1.056	1.8	6.6	92
91	1.55	1.296	2.8	8.1	108
100.9	1.814	1.523	4	9.4	130
110	2.07	1.78	5	-	140
119.8	2.393	2.079	6.6	-	150



ภาพประกอบ 50 กราฟความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ V_3 กับกำลังไฟฟ้า P_3



ภาพประกอบ 51 กราฟความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าทางเข้า P_1 กับกำลังไฟฟ้าทางออก P_3

4.3 การทดสอบเตรียมฟิล์มบาง

4.3.1 ขั้นตอนเตรียมอุปกรณ์

1. ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในภาชนะสุญญากาศทุกชนิด เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศต้องการความสะอาดสูง ดังนั้นจึงทำความสะอาดอุปกรณ์ทุกชนิดโดยล้างความความมันทุกชนิด หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและทำการเป่าให้แห้ง ในระหว่างการสัมผัสอุปกรณ์ที่ทำความสะอาด ต้องสวมถุงมือทุกครั้ง

2. ติดตั้งอุปกรณ์โรยสาร, เกจ, ขั้วไฟฟ้าทองแดง, ภาชนะให้ความร้อน โบท, นี้อตเสตนเลส พร้อมโอริง และแท่นอลูมิเนียมวางแผ่นสไลด์ บนฐานเบสเพลท

3. นำเกล็ดอลูมิเนียม จำนวน 1 กรัม ใส่ในหลอดแก้ว

4. วางแผ่นอลูมิเนียมบาง ที่เจาะรูทำมุมต่าง ๆ บนแท่นอลูมิเนียม โดยจัดให้มุม 0 องศา ตรงกับโบท

5. ชั่ง น้ำหนักแผ่นสไลด์ ทีละแผ่น บันทึกผลและตำแหน่งที่วางบนแผ่นวางสไลด์ จากนั้นเก็บไว้ในถุงพลาสติก เพื่อป้องกันฝุ่นละออง

6. วางแผ่นสไลด์ทั้งหมด บนแผ่นอลูมิเนียมบางที่ได้เจาะรูแล้ว และวางแผ่นสไลด์ 3 แผ่น ในบริเวณที่ไม่เจาะรู เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบต่อไป

5. ทากิริชที่ขอบยางของภาชนะสุญญากาศ และวางบนฐานเบสเพลท

4.3.2 ขั้นตอนเตรียมระบบสุญญากาศ

1. เปิดเครื่องสูบลมโรตารีและทำการอ่านค่าความดัน และเลื่อนวาล์วเล็ก ไปตำแหน่ง 1 และ 2 สลับไปมา พร้อมทั้งสลับการอ่านค่าความดัน โดยอุปกรณ์ที่ใช้อ่านค่าความดัน เป็นของบริษัท Balzer รุ่น TPG 300 เมื่อตำแหน่งวาล์วเล็กอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ให้อ่านค่าความดันที่ตำแหน่ง A_2 ซึ่งการเลื่อนวาล์วไปที่ตำแหน่ง 2 นั้น คือการสูบลมภายในภาชนะสุญญากาศ และตำแหน่ง 1 คือการสูบลมด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ

2. เมื่อความดัน ของที่ตำแหน่ง 1 และ 2 เริ่มใกล้เคียงกัน คือที่ความดันประมาณ 1.77×10^{-2} torr เปิดเครื่องสูบน้ำและเครื่องทำความเย็น จนได้ความเย็นประมาณ 13 องศาเซลเซียส เลื่อนวาล์วเล็กไปยังตำแหน่ง 1 และเลื่อนวาล์วใหญ่ไปตำแหน่งเปิดตามภาพประกอบ 47 และเปิดเครื่องสูบลมความดันแฟรไอ



ภาพประกอบ 52 ตำแหน่งวาล์วเมื่อปิดระบบสุญญากาศ

3. ในระหว่างที่เครื่องสูบลuftทำงาน การอ่านค่าที่เครื่องควบคุมที่ตำแหน่ง A_1 และตำแหน่ง A_2 เริ่มไม่สามารถอ่านค่าได้ ดังนั้น ให้เลื่อนไปอ่านค่าที่ตำแหน่ง A_3 ซึ่งเป็นการอ่านค่าผ่านเกจเพนนิ่ง ทำการสูบลuftจนได้ความดันประมาณ 10^{-5} torr

4. เลื่อนวาล์วเล็กไปตำแหน่งกลาง ปิดวาล์วใหญ่ ปิดเครื่องสูบลuft, เครื่องสูบโรตารีและอุปกรณ์ควบคุม รอประมาณ 15 นาที จึงปิดระบบหล่อเย็น เนื่องจากแม่ปิดเครื่องสูบลuft เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่อยู่ภายในก็ยังร้อนอยู่

4.3.3 ขั้นตอนทดสอบการระเหยสาร

ในการทดสอบในขั้นนี้ ทำการทดสอบโดยเตรียมระบบให้มีความดัน ที่ 10^{-4} torr เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและอุณหภูมิ ระบุค่าที่อุณหภูมิ 1200 เคลวิน มีความดันไอ 10^{-4} torr ดังนั้นจึงทำการทดสอบที่ความดันไอ 10^{-4} torr และทำการปรับค่าความต่างศักย์ของหม้อแปลง ที่ได้ต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูง ผ่านขั้วไฟฟ้าทองแดงซึ่งยึดติดกับภาชนะบรรจุสารแบบโบทแทนทาลัม บันทึกค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ในการระเหยต่อการโรย 1 ครั้ง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการระเหยจะให้การสังเกตที่โบท โดยสังเกตจากช่องมองภาชนะสุญญากาศ ซึ่งข้อมูลความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ระเหยสาร จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อใช้ในการโรยสารจริง โดยพบว่ากำลังที่ออก (Out put) จาก Autotransformer มีความต่างศักย์ 115 V มีกระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ซึ่งได้จากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์ ทำให้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าได้ 1,320 วัตต์ (กำลังไฟฟ้าสูงสุด) และวัดค่าความต่างศักย์

ทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงได้ 2.5 V ดังนั้น จากกราฟกำลังงานทางออกและความต่างศักย์ กำลังงานทางออกจะเท่ากับ 331 วัตต์โดยประมาณ โดยพบว่า เวลาที่ใช้ในการโรยสารให้ระเหยหมดในแต่ละครั้งคือ 10 วินาที

4.4 การระเหยสาร

4.4.1 วิธีการทดลอง

1. เตรียมอุปกรณ์และปฏิบัติตาม หัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 ทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง
2. ทำการเตรียมระบบสุญญากาศอีกครั้ง เมื่อความดัน 1.77×10^{-5} torr ป้อนกระแสไฟฟ้า โดยปรับความต่างศักย์ของหม้อแปลงปรับค่าไปที่ 115 V อย่างช้าๆ
3. ในระหว่างที่มีการให้ความร้อน (Heat) ด้วยกระแสไฟฟ้านี้ ค่าความดันจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 115 V ให้อ่านค่าความดันรอให้ความดันคงที่
4. ทำการโรยสารด้วยความถี่ 0.1 Hz ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด 18 นาที
5. เมื่อโรยสารเสร็จ ปรับความต่างศักย์ที่หม้อแปลงปรับค่าได้ที่ 0 V
6. ปิดเครื่องสูบลม แอร์ วาล์วใหญ่และเล็ก ปิดเครื่องสูบลมโรตารี ทิ้งไว้ซักครู่ ปิดเครื่องสูบน้ำ และเครื่องทำความเย็น
7. เปิดวาล์วปล่อย เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ และทำการเปิดภาชนะสุญญากาศ
8. นำแผ่นสไลด์ที่วางในตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งนำหนักอีกครั้ง และหาค่าความแตกต่าง ของก่อน ชั่งและหลังชั่ง ดังแสดงตามตาราง 10



ภาพประกอบ 53 โบทชนะให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า

4.4.2 น้ำหนักฟิล์มที่ได้จากการระเหยสารแบบแฟลช

ตาราง 10 น้ำหนักฟิล์มที่ได้จากการระเหยสารแบบแฟลช

ตำแหน่งมุม เมื่อเทียบกับ โบท	ตำแหน่งสไลด์ ที่วางบนแผ่น รองรับ	น้ำหนักแผ่น สไลด์ก่อน เคลือบ (g)	น้ำหนักแผ่น สไลด์หลัง เคลือบ (g)	น้ำหนักของ ฟิล์มบาง (g)	ค่าเฉลี่ยของน้ำ หนักฟิล์มบางที่ มุมต่าง ๆ (g)
0	1	0.11943	0.12121	0.00178	0.00178
	2	0.11887	0.12059	0.00172	
	3	0.11795	0.11916	0.00121	
	4	0.11462	0.11594	0.00132	0.00138
	5	0.11728	0.11843	0.00115	
	6	0.1161	0.11762	0.00152	
10.57	7	0.12098	0.12189	0.00091	
	8	0.12169	0.12295	0.00126	
	9	0.12165	0.12293	0.00128	
	10	0.12049	0.1213	0.00081	
	11	0.11714	0.11846	0.00132	0.00113
	12	0.11642	0.11757	0.00115	
	13	0.1185	0.11971	0.00121	
	14	0.12044	0.12159	0.00115	
	15	0.11938	0.12044	0.00106	
	16	0.12208	0.12316	0.00108	
20.47	17	0.1208	0.12163	0.00083	
	18	0.11933	0.12046	0.00113	
	19	0.12077	0.12166	0.00089	
	20	0.12242	0.12347	0.00105	0.00096
	21	0.12006	0.12134	0.00128	
	22	0.11679	0.11778	0.00099	

ตาราง 11

(ต่อ)

ตำแหน่งมุม เมื่อเทียบกับ โบท	ตำแหน่งสไลด์ ที่วางบนแผ่น รองรับ	น้ำหนักแผ่น สไลด์ก่อน เคลือบ(g)	น้ำหนักแผ่น สไลด์หลัง เคลือบ(g)	น้ำหนักของ ฟิล์มบาง (g)	ค่าเฉลี่ยของน้ำ หนักฟิล์มบางที่ มุมต่าง ๆ (g)
29.26	23	0.12175	0.12275	0.00100	0.00096
	24	0.12093	0.12161	0.00068	
	25	0.12100	0.12191	0.00091	
	26	0.12076	0.12148	0.00072	
	27	0.11930	0.12031	0.00101	

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการระเหยสารแบบเฟลซ โดยผลการออกแบบและสร้างเป็นดังนี้

สมบัติของอุปกรณ์โรยสาร

1. อุปกรณ์โรยสารมีหลอดแก้วบรรจุสาร สามารถบรรจุสารได้ไม่น้อยกว่า 1 กรัม และเมื่อติดตั้งกับวงจรควบคุมการโรยสาร ซึ่งปรับค่าความถี่ได้ 2 แบบ คือแบบควบคุมความถี่และแบบเคาะโรยสารเมื่อกดสวิตช์ควบคุม (Manual)

2. เครื่องโรยสารสามารถติดตั้งบนเบสเพลทโดยใช้ช่องบนเบสเพลทเพียง 1 ช่อง โดยมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกภาชนะสุญญากาศ เพื่อหลีกเลี่ยงการคายก๊าซของสารฉนวนหุ้มเส้นลวด ขดลวดนี้ใช้สำหรับสร้างแรงแม่เหล็กเพื่อดึงก้านเคาะสาร ตัวขดลวดทำด้วยลวดทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตรเคลือบฉนวน พันบนแกนท่อพีวีซีขนาด 1/4 นิ้ว จำนวน 450 รอบ การติดตั้งอุปกรณ์จะใช้วิธีอุดรอยต่อด้วยแหวนยางกลม

3. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น สามารถควบคุมจังหวะการเคาะและจ่ายกระแสให้กับขดลวดเพื่อดึงก้านเคาะ โดยกำหนดความถี่ได้ 5 ความถี่ คือ 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz และ 5Hz โดยสามารถให้เคาะตามจังหวะการกดสวิตช์

4. การทดสอบการโรยสาร พบว่าอัตราการโรยสารสูงสุดของอุปกรณ์โรยสาร สามารถโรยเกล็ดอลูมิเนียมที่มีขนาดเฉลี่ย 0.037cm ได้หมด 1 กรัม ในเวลา 20 วินาที คือเมื่อใช้ความถี่ในการเคาะ 5 Hz ส่วนที่ความถี่อื่นๆ อัตราการโรยจะลดลงตามส่วนโดยขึ้นกับความถี่ ซึ่งจากข้อมูลตาราง 8 ปริมาณสารที่โรยในการเคาะแต่ละครั้งจะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารจากการโรยแต่ละครั้งของการเคาะเท่ากับ 0.01 กรัม

สมบัติของอุปกรณ์แผ่นรองรับ

แผ่นวางแผ่นรองรับสามารถวางชิ้นงานได้ไม่น้อยกว่า 27 ชิ้น และมีมุมที่ทำกับแนวตั้งที่ผ่าน ศูนย์กลางภาชนะให้ความร้อน 4 มุม คือ ที่ 0,10,20,29 องศา

ผลการสร้างและทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อน

1 อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับการระเหยสารที่สร้างขึ้นตามแบบดังภาพประกอบ 26 และ 27 สร้างขึ้นโดยใช้ทองแดงเป็นวัสดุ

2. การทดสอบระเหยสารควบคู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้านั้น พบว่าขณะทำการระเหยสาร ที่กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับหม้อแปลงปรับค่าได้ 1452 W จะได้กำลังไฟฟ้าที่ทางออกของหม้อแปลงปรับค่าได้ เป็น 1040 W และเมื่อผ่านหม้อแปลงกระแสสูง พบว่าจะเหลือกำลังไฟฟ้าที่ทางออก 311 W ซึ่งจะ เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะจ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทองแดง

3.. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยหม้อแปลงกระแสสูงและหม้อแปลงปรับค่า ให้กระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 300 แอมแปร์ และสามารถปรับค่าระดับศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสได้

4. จากการตรวจสอบขั้วไฟฟ้าทองแดงหลังการใช้งานที่ 150 A พบว่าขั้วไฟฟ้ายังมีสภาพดีไม่มี จุดหลอมละลายจากความร้อนตามบริเวณรอยเชื่อมต่อต่างๆ และอุปกรณ์สามารถระบายความร้อน ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

ผลการทดสอบระเหยสาร

เครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาทดสอบระเหยสาร ด้วยการเคาะเกล็ดอลูมิเนียมลงบนภาชนะ ให้ความร้อน โดยควบคุมการเคาะตามจังหวะการกวดชีวิต การทดสอบการโรยสารจะทำการทดสอบ 2 ครั้ง โดยแยกทดสอบดังนี้

1. ทดสอบ ที่ความดัน 10^{-4} torr

พบว่าแรงเคลื่อนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการทำให้เกล็ดอลูมิเนียมเริ่มระเหย คือที่ ความต่างศักย์ของหม้อแปลงที่ใช้ปรับค่าประมาณ 120 โวลต์ โดยในการโรยแต่ละครั้ง พบว่าใช้เวลา ในการระเหยหมดประมาณ 10 วินาที

2. ทดสอบ ที่ความดัน 10^{-5} torr

การทดสอบในขั้นนี้ จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในข้อ 1 ซึ่งเป็นเป็นเงื่อนไขต่ำสุดในการ พิจารณา เพื่อให้เป็นข้อมูลเพื่อการระเหยสาร โดยสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ ที่ความดันไอ 10^{-5} torr และอุณหภูมิ ต่ำกว่า 1200 K ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เตรียมได้ มีการกระจายมวลที่มุมต่างๆ บนแผ่น

รองรับ โดยที่มุม 0 องศา จะมีมวลมากที่สุดคือ 0.00178 กรัม บนพื้นที่วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm และลดลงที่มุมกว้างขึ้น โดยที่มุมสูงสุด 29 องศา มีมวล 0.00096 กรัม

อภิปรายผล

1. ในการปรับค่าความถี่ของวงจรที่ใช้ในการโรยสาร สามารถปรับค่าได้ด้วยการปรับเปลี่ยนความถี่ซึ่งปรับได้ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 Hz อย่างไรก็ตามเราอาจปรับให้เครื่องมือสามารถเคาะที่ความถี่มากกว่า 5 Hz แต่เนื่องจากปัจจัย ที่ทำให้เกิดการโรยสารไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่เพียงอย่างเดียว เพราะบริเวณช่วงห่างระหว่างท่อ กับแผ่นอลูมิเนียมที่รับท่อ จะได้รับแรงจากการกระทบของท่อ กับแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นระยะการเคลื่อนที่ของท่อจะน้อยลงอันเป็นผลจากความเฉื่อยที่เกิดจากมวลของท่อ ทำให้ท่อไม่กระทบกับอลูมิเนียมที่รองรับท่อ อัตราการโรยจะเริ่มลดลง ทำให้การเพิ่มความถี่ไม่สามารถทำให้เกิดการโรยสารด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้น

2. อัตราการโรยสารของอุปกรณ์ที่ได้ เป็นอัตราการโรยสาร เมื่อทดสอบอุปกรณ์โรยสารโดยใช้เกล็ดอลูมิเนียมซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากน้ำหนักสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

3. จากข้อสรุปเกี่ยวกับการทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อน พบว่ากำลังไฟฟ้า 1452 W ที่จ่ายสำหรับการระเหยสาร และที่ทางออกของหม้อแปลงกระแสสูงมีกำลังไฟฟ้า 311 W ซึ่งพบว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง 21 % ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบทั้งหมด โดยที่หม้อแปลงกระแสสูงเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงปรับค่าได้ ซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ อาทิ ขนาดของลวดทองแดง รอยต่อที่ไม่สนิท การสูญเสียจากกระแสเหนี่ยวนำในแกนหม้อแปลง เป็นต้น

4. กำลังไฟฟ้า 311 W เป็นเพียงกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะทดลองที่จ่ายระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกภาชนะสุญญากาศ คำนวณจากสมการ $P=VI$ เนื่องจากไม่สามารถวัดกระแสที่ขั้วของโบทได้โดยตรง จึงอาจเกิดการลดลงของกำลังไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออื่นๆระหว่างขั้วไฟฟ้ากระแสสูงถึงตัวโบท

5. การเลือกทดสอบโรยสารที่ความดัน 10^{-4} torr เนื่องจากที่ความดันไอของอลูมิเนียม ที่ 10^{-4} torr จะมีอุณหภูมิ 1200 K ดังนั้นหากอลูมิเนียมสามารถระเหยได้ที่ความดันและอุณหภูมิดังกล่าว เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสูงผ่านเข้าไป แสดงว่าที่ความดัน 10^{-5} torr ก็จะสามารถระเหยสารได้ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสูงในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากบริเวณที่มีความเป็นสุญญากาศมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารก็ลดลง

6. ฟิล์มบางที่ได้ในการระเหยสาร ข้อมูลในบางมุมอาจมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากในบางมุม ไอสารอาจชนกับอุปกรณ์ที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์การระเหยสารแบบแฟลช

1. วงจรสำหรับควบคุมการโรยสาร ควรแยก (Isolate) วงจร จ่ายไฟฟ้าสำหรับขดลวด เพราะขณะตัดต่อวงจรอาจเหนี่ยวนำให้เกิดการรบกวนการทำงานในส่วนอื่นๆของวงจร
2. บริเวณจุดรอยต่อของขั้วไฟฟ้าทองแดงและทองแดงจับยึดภาชนะบรรจุสารแบบโบท ต้องต่อให้สนิทมากที่สุด เพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อจากความต้านทานที่รอยต่อ
3. หากต้องการใส่ปริมาณสาร เพื่อใช้ในการโรยสารให้เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มความยาวของหลอดแก้วบรรจุสาร
4. หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสูงนั้น เป็นการดัดแปลงตู้เชื่อมไฟฟ้า ซึ่งมีรอยต่อระหว่างขดลวดทองแดงหลายจุด ดังนั้นเพื่อให้การลดลงของกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด ควรเชื่อมรอยต่อด้วยความระมัดระวัง และแน่ใจว่าแต่ละรอยต่อมีการเชื่อมต่อกันอย่างดี

บรรณานุกรม

- กฤษณา ชูติมา. (2536). *หลักเคมีทั่วไปเล่ม 1 ครั้งที่ 11*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัญญา บุญเกียรติ. (2543). *การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไนย. (2526). *ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ*. กรุงเทพฯ : โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรมสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น).
- โซ สาลีนัน และคณะ. (2535). *การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบสารในสุญญากาศ*. รายงานการวิจัย. ภาควิชาฟิสิกส์ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. ถ่ายเอกสาร .
- ธเนศ อุดมคณารักษ์. (2544). *การสร้างเครื่องมือวัดสุญญากาศแบบโคลด์แคโทดไอออนไนเซชัน*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.(ระบบควบคุมเครื่องวัด) . กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- บัญชา ศิลปสกุลสุข. (2539). *ฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ*. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : SCIENCE CENTER.
- สุพรรณิ แจ่มสว่าง. (2545). *การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลชีลีเนียมเตรียมโดยวิธีการระเหิดด้วยความร้อนในสุญญากาศ*. วิทยานิพนธ์ วท.ม.(ฟิสิกส์ประยุกต์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ถ่ายเอกสาร.
- Basket Supplies And Wires*. (Online). (2003, August).
Available: http://www.fullam.com/Evap_sup.htm.
- Delchar, T.A. (1993). *Vacuum Physics and Techniques*. London : Chapman & hall.
- Diffusion Pump*. (Online). (2003, August).
Available: <http://jan.ucc.nau.edu/~wittke/Microprobe/DiffPump.gif>.
- The Evaporation Process*. (Online). (2003, May). Available:
<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/metalliz.html>
- Evaporation application table*. (Online). (2003, August).
Available : www.megatech.demon.co.uk/evapapp.htm.

Fabian, Roger (1993). *Vacuum Technology Practical Heat Treating and Brazing*.: ASM International.

Filaments and boats for deposition. (Online). (2004, April).

Available: <http://www.vr-me.com/english/mypage03-1.htm>

George , Joy. (1992). *Preparation of thin films*. New York : Marcel Dekker.

Guthrie, Andrew. (1963). *Vacuum Technology*. United States of America : John Wiley & Son.

Heat. (Online). (2003, August). Available: [http://niuhep.physics.niu.edu/~](http://niuhep.physics.niu.edu/~blazey/250/week14/lesson45.html)

[blazey/250/week14/lesson45.html](http://niuhep.physics.niu.edu/~blazey/250/week14/lesson45.html)

Holland, L. (1970). *Vacuum Deposition of Thin Films*. London : Chapman & Hall.

Kinetic Theory of Gases. (Online). (2003, June). Available: [http://www-gap.dcs.st-](http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/Projects/Johnson/Chapters/Ch4_3.html)

[and.ac.uk/history/Projects/Johnson/Chapters/Ch4_3.html](http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/Projects/Johnson/Chapters/Ch4_3.html).

Kohl, Walter H. (1995). *Handbook of materials and Techniques for vacuum devices*.

United of America : Van Nostrand Reinhold.

Leaver, K.D. (1971). *Thin films*. London : Wykeham.

Modern vacuum practice. (Online). (2003, August).

Available: [http://www.modernvacuumpractice.com/editor/user_DocView.asp?](http://www.modernvacuumpractice.com/editor/user_DocView.asp?DocumentID=19)

[DocumentID=19](http://www.modernvacuumpractice.com/editor/user_DocView.asp?DocumentID=19) .

Ohring, Milton. (1992). *The Material Science of Thin Films*. London :

Roger Fabian. (1993). *Vacuum Technology*. ASM International.

Smith, Donald L. (1995). *Thin-Film Deposition*. United of America : McGraw – Hill.

Stuart, R.V. (1983). *Vacuum Technology Thin Films An Introduction*. London :

Academic.

Thermodynamic I Chapter 5. (Online). (2003, June). Available:

<http://eng.src.ku.ac.th/~sompop/Thermo/chapter5.pdf>

Vapor pressure. (Online). (2003, August).

Available: <http://www.glue.umd.edu/~ddev/602/lectures>

[/metal_vapor_pressure.jpg](http://www.glue.umd.edu/~ddev/602/lectures/metal_vapor_pressure.jpg).

What is ultra high vacuum?. (Online). (2003, June).

Available: http://www.chem.qmw.ac.uk/surfaces/scc/scat4_1.htm.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาว จิราภรณ์ พงษ์โสภา
วันเดือนปีเกิด	เกิดวันที่ 9 เดือน ธันวาคม พุทธศักราช 2520
สถานที่เกิด	สถานที่เกิด อำเภอบ้านเขว้า จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	สถานที่อยู่ปัจจุบัน 31/74 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันราชภัฏสวนดุสิต เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2538	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
พ.ศ. 2542	ศษ.บ. การสอนวิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2547	วท.ม.(ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ