

การออกแบบสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2

แหล่งกำเนิด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THERMAL
EVAPORATION SYSTEM WITH TWO EVAPORATION
SOURCES



ปัญญา พรหมศักดิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2559

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THERMAL
EVAPORATION SYSTEM WITH TWO EVAPORATION
SOURCES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ

การออกแบบสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิด

Design and Construction of Thermal Evaporation System with Two Evaporation Sources

ชื่อนักศึกษา

นายปัญญา พรหมศักดิ์ รหัสนักศึกษา 57050995

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.รัชก สัมพรเสนห์ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิด
ชื่อนักศึกษา	นายปัญญา พรหมศักดิ์ รหัสนักศึกษา 57050995
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบ 2 แหล่งกำเนิดเพื่อใช้กับระบบระเหยสารด้วยความร้อนโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค ส่วนที่สร้างจากทองแดงได้แก่ 1) เสาปรับระดับแท่นยึดแหล่งกำเนิดมีความสูง 148 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร 2) แท่นยึดแหล่งกำเนิดที่มีความยาว 70 มิลลิเมตร และยาว 44 มิลลิเมตร 3) ขั้วต่อสายไฟสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ส่วนที่ทำมาจากเทฟลอนได้แก่ 1) ตัวแยกขั้วไฟฟ้าที่มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ซึ่งทั้งสองชนิดเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศ แหล่งกำเนิดการระเหยสารจะถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุนขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ ทดสอบโดยการระเหยสาร Cu กับ Al ที่ความดันประมาณ 5.5×10^{-5} มิลลิบาร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกิดการผสมกันของสาร Cu และ Al เคลือบบนกระจก เป็นการยืนยันได้ว่าแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนแบบ 2 แหล่งกำเนิดสามารถระเหยสาร 2 ชนิดได้ภายในระบบสุญญากาศ

คำสำคัญ : การเคลือบในสุญญากาศ การระเหยสารด้วยความร้อน หม้อแปลงไฟฟ้า แหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบ 2 แหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Design and Construction of Thermal Evaporation System with two Evaporation Sources
Students	Mr. Panya Promsak Student ID 57050995
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assist.Prof. Dr. Nathaporn Promros

Abstract

In this research, the researcher has designed and constructed two evaporation sources for a thermal evaporation system using Solid Works. The parts that made from copper are as follows: 1) Adjustable poles with 148 mm of height and diameter of 15 mm 2) Heat source holder with length 70 mm and 44 mm 3) Power connector designed for rectangle with diameter of 15.5 mm and diameter of 10 mm. The part that made from Teflon is electric separator with a hole diameter of 15 mm. Both types of materials can be obtained within the country. The evaporation sources were connected to a 3000 VA variable voltage transformer and a transformer of 3000 VA. The two evaporation sources were tested by evaporating Cu and Al at the pressure as 5.5×10^{-5} mbar. the result of experiment showed a mixture of Al and Cu coatings on glass. This confirmed that two evaporation sources can evaporate two materials in vacuum system.

Keywords : Vacuum coating, Thermal evaporation, Transformer, Two evaporation sources

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้มอบหมายหัวข้อโครงการพิเศษเรื่องนี้แก่ผู้วิจัย ทั้งยังสนับสนุนในเรื่องต่างๆ ทั้งด้านอุปกรณ์และสถานที่ปฏิบัติงานรวมถึงคำแนะนำและความรู้ใหม่ๆที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปใช้ประยุกต์ในการปฏิบัติงานแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งคำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงส่วนต่างๆภายในระบบทำให้โครงการพิเศษเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ียรรอง หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ฝึกงานและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในช่วงปิดภาคเรียน เพื่อให้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและปฏิบัติงานเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการสร้างชั้นเคลือบฟิล์มบางพื้นฐานโดยเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง และดร.รัชก สมพรเสน่ห์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย รวมถึงการให้คำแนะนำในการปรับปรุงข้อบกพร่องของโครงการพิเศษนี้ รวมถึงคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการวิจัยได้อย่างดี

ขอบคุณนายพงศภัค สิทธิมาตร และนายอดิสร นพรุจิกุล นักศึกษาปริญญาโทและนักศึกษาปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้คำแนะนำขั้นตอนในการติดตั้ง การตั้งค่าระบบ และปรับแต่งส่วนต่างๆของระบบสุญญากาศเพื่อให้ทำการทดลองได้อย่างราบรื่น และนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ช่วยทำการทดลองในส่วนที่ผู้วิจัยไม่สามารถทำเพียงคนเดียวได้

ขอบคุณหน่วยงาน AUN/SEED-Net JICA ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทศรีวิศาล เกษรา จำกัดและบริษัทสเปคโออิเล็กทรอนิกส์พหลาย จำกัด ที่ได้สร้างงานคุณภาพและทำให้งานวิจัยและทดลองประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้เป็นอย่างดี

ขอน้อมกราบขอบพระคุณนางสาวพิมพา กันยารัตน์ ผู้เป็นมารดาที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนให้กำลังใจและอยู่เคียงข้างผู้วิจัยด้วยรักและห่วงใยเสมอมา

คุณประโยชน์อันเกิดจากโครงการพิเศษนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพคณาจารย์ทุกท่านที่ได้คอยอบรมสั่งสอนด้วยความรักและเมตตาามาโดยตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีใดๆ
ปัญหา פרמסקי
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การระเหยสาร (Evaporation)	4
2.1.1 หลักการระเหยของสาร	4
2.1.2 การระเหยสารในสุญญากาศ	5
2.1.3 ความดันไอของธาตุ (Vapor pressure of the elements)	7
2.2 กฎของแก๊ส	8
2.2.1 กฎของบอยล์ (Boyle's law)	8
2.2.2 กฎของชาร์ล (Charles's Law)	9
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.3.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.3.3 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	13
2.3.3.1 จำแนกตามลักษณะของแกนเหล็ก	13
2.3.3.2 จำแนกตามระบบไฟฟ้า	14
2.3.3.3 จำแนกตามพิกัดของแรงดันไฟฟ้าเข้าและออก	15
2.3.3.4 จำแนกตามพิกัดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านใดก็ตามโดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.5 จำแนกตามการใช้งานของเครื่องมือวัด	17
2.3.3.6 จำแนกตามลักษณะของการพันขดลวด	18
2.3.3.7 จำแนกตามลักษณะการปรับแรงดันไฟฟ้า	19
2.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	19
2.4.1 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัดอัตโนมัติ	20
2.4.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัดปรับด้วยมือ	20
2.5 ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์	21
2.5.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์	21
2.5.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์	22
2.6 แหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source)	23
2.6.1 หลักการทำงานของแหล่งกำเนิดความร้อน	24
2.6.2 ชนิดของแหล่งกำเนิดความร้อน	24
2.7 อุปกรณ์วัดความดัน	24
2.7.1 หน่วยวัดความดัน	25
2.8 การเลือกส่วนประกอบและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	25
2.8.1 เทฟลอน (Teflon)	25
2.8.2 ซีล (Seal)	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
2.9.1 งานวิจัยภายในประเทศ	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1 การออกแบบระบบระเหยสารด้วยความร้อน	28
3.1.1 วงจรสำหรับระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบ 2 แหล่งกำเนิด	28
3.1.2 อุปกรณ์วัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	29
3.1.3 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์	30
3.1.4 การออกแบบส่วนประกอบของระบบ	32
3.1.4.1 ชุดแหล่งกำเนิดการระเหยสาร	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ชั้นวางพาวเวอร์ซัพพลายและหม้อแปลงไฟฟ้า	41
3.3 ทดสอบระบบ	42
3.3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดส่วนประกอบที่เป็นโลหะ	42
3.3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกสไลด์	43
3.3.3 ขั้นตอนการติดตั้งและทดลองระเหยสาร	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	47
4.1 ชิ้นส่วนที่ออกแบบสร้าง	47
4.2 อุปกรณ์ที่จัดซื้อ	49
4.3 ผลการทดลอง	50
4.3.1 ทดลองใช้รูปแบบที่ 1 ในการระเหยสาร	51
4.3.2 ทดลองใช้รูปแบบที่ 2 ในการระเหยสาร	55
4.3.3 ทดลองใช้รูปแบบที่ 3 ในการระเหยสาร	58
4.3.4 ลักษณะชิ้นงานที่ได้	61
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	71
ภาคผนวก ค	72
ภาคผนวก ง	73
ภาคผนวก จ	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1 เปรียบเทียบหน่วยความดัน	25
2.2 คุณสมบัติของยาง	26
3.1 ตารางแสดงสมบัติของธาตุที่คาดว่าจะนำมาทดลอง	42
4.1 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 1	51
4.2 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 1	51
4.3 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 2	52
4.4 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 2	52
4.5 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 3	53
4.6 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 3	53
4.7 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 4	55
4.8 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 4	55
4.9 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 5	56
4.10 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 5	56
4.11 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 6	58
4.12 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 6	58
4.13 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 7	59
4.14 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 7	59
4.15 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของหม้อแปลงก่อนการระเหยสารของทั้ง 3 รูปแบบ	61
4.16 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของหม้อแปลงระหว่างการระเหยสารของทั้ง 3 รูปแบบ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการระเหย	4
2.2 แสดงการระเหยสารในระบบสุญญากาศ	6
2.3 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	8
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร	9
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตร	10
2.6 เส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดตัวนำ	11
2.7 โครงสร้างภายในของหม้อแปลง	12
2.8 แกนเหล็กแบบคอร์	13
2.9 แกนเหล็กแบบเชลล์	14
2.10 แกนเหล็กแบบตัว H	14
2.11 หม้อแปลง 1 เฟส	15
2.12 หม้อแปลง 3 เฟส	15
2.13 หม้อแปลงขนาดเล็ก	16
2.14 หม้อแปลงขนาดกลาง	17
2.15 หม้อแปลงกำลัง	17
2.16 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า	18
2.17 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า	18
2.18 แวรีแอก	19
2.19 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัดอัตโนมัติแบบต่างๆ	20
2.20 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัดปรับด้วยมือแบบต่างๆ	20
2.21 ส่วนประกอบต่างๆ ของแคลมป์มิเตอร์	21
2.22 ไดอะแกรมของแคลมป์มิเตอร์แบบ Current Transformer	22
2.23 ไดอะแกรมของแคลมป์มิเตอร์แบบ Hall Device	23
2.24 แสดงการระเหยจากแหล่งกำเนิดความร้อน	24
3.1 วงจรการระเหยสารแบบสองแหล่งกำเนิด	28
3.2 ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ KYORITSU KEW SNAP 200	29
3.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ KYORITSU MODEL 1009	30
3.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ UNI-TREND UT61B	30
3.5 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุนออกแบบโดยโปรแกรม SolidWork	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูล (ต่อ)

รูลที่	หน้า
3.6 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศ	32
3.7 ระบบระเหยสารแบบ 2 แหล่งกำเนิด	33
3.8 ขั้วสำหรับการระเหยสาร	33
3.9 แสดงส่วนฐานของตัวยัดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบแรก	34
3.10 แสดงส่วนฐานของตัวยัดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบที่สอง	35
3.11 แสดงแผ่นประกบตัวยัดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบแรก	35
3.12 แสดงแผ่นประกบตัวยัดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบที่สอง	36
3.13 แสดงขั้วต่อสายไฟ	36
3.14 แสดงเสาปรับระดับตัวยัดแหล่งกำเนิดความร้อน	37
3.15 ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านในภาชนะสุญญากาศ	38
3.16 ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านนอกภาชนะสุญญากาศ	39
3.17 แหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบโบท	40
3.18 ชั้นวางที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWork	41
3.19 แสดงตำแหน่งการวางหม้อแปลง	41
3.20 เครื่องสูบล้อตราโซนิค	43
3.21 ชุดเตอร์ถูกปิดเพื่อป้องกันการเคลือบ	44
3.22 วาล์ว Backing และ Roughting	44
3.23 การปรับวาล์ว isolate	45
3.24 แสดงแคลมป์มีเตอร์วัดกระแสขณะทำการระเหย	45
3.25 แสดงการเปิดชุดเตอร์ขณะสารที่กำลังระเหย	46
4.1 แสดงระบบระเหยสารพร้อมกับเครื่องสภาวะสุญญากาศ	47
4.2 ส่วนประกอบที่เป็นทองแดง	48
4.3 ส่วนประกอบที่เป็นเทฟลอนและเหล็กกล้าไร้สนิม	48
4.4 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ประกอบแล้ว	48
4.5 แสดงชุดแหล่งกำเนิดความร้อนทั้งสองชุด	49
4.6 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนหมุนขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัทสเตเบิลอิเล็กทรอนิกส์ซัพพลาย จำกัด	49
4.7 หม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัทสเตเบิลอิเล็กทรอนิกส์ซัพพลาย จำกัด	50
4.8 แสดงรูปแบบการจัดวางตัวยัดแหล่งกำเนิด	50

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงภาพขณะระเหยสารโดยใช้รูปแบบที่ 1	54
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐุมภูมิเฉลี่ยกับกระแสทุติยภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของรูปแบบที่ 1	54
4.11 แสดงภาพการระเหยสารด้วยรูปแบบที่ 2	57
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐุมภูมิเฉลี่ยกับกระแสทุติยภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของรูปแบบที่ 2	57
4.13 แสดงภาพการระเหยสารด้วยรูปแบบที่ 3	60
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐุมภูมิเฉลี่ยกับกระแสทุติยภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของรูปแบบที่ 3	60
4.15 แสดงภาพชิ้นงานที่ถูกเคลือบ	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
V_v	ปริมาตรของไอ
Φ_e	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
P_e	ความดันสมดุล (Equilibrium pressure)
m	มวลโมเลกุล
T	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
T_e	อัตราการระเหยมวลสาร (Mass evaporation rate)
ΔH_e	ความร้อนของสารในการระเหย
P	ความดัน
V	ปริมาตร
dN_e	จำนวนโมเลกุลมากที่สุดที่ระเหยออกจากผิวในช่วงเวลา dt
M	น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นไอ
λ	ค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ยของแก๊สที่เหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการเคลือบฟิล์มบางมีความสำคัญอย่างมากในด้านอุตสาหกรรมและงานวิจัยซึ่งเทคโนโลยีสุญญากาศจะถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงและระบบระเหยสารด้วยความร้อน ทั้งนี้การดำเนินงานวิจัยในเรื่องของการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศจำเป็นต้องอาศัยพื้นฐานด้านฟิสิกส์ในเรื่องวัสดุศาสตร์ (Materials) สถานะของแข็ง (Solid state) และสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เพื่อประยุกต์ใช้ในการวิจัยและอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบาง [1]

ในการศึกษาและทดลองวิจัยการเคลือบฟิล์มบางในด้านการระเหยสารด้วยความร้อนนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทางเพื่อใช้ในการทดลองวิจัยซึ่งต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาแพง ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือขึ้นมาใช้เองเพื่อลดต้นทุนในการวิจัย อีกทั้งผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาระบบระเหยสารด้วยความร้อน ให้สามารถระเหยสารได้หลายชนิดและผสมสารเข้าด้วยกันในครั้งเดียว นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเป็นช่องทางในการพัฒนาความรู้ทางด้านเทคโนโลยีในการเคลือบฟิล์มบางและยังสามารถนำไปใช้เพื่อประกอบการเรียน รวมถึงวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางให้กับผู้ที่สนใจได้ ซึ่งในเบื้องต้นผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะทำการออกแบบเครื่องมือเพื่อสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนเพื่อใช้ระเหยสาร และผสมสารพร้อมกันในการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งจะต้องใช้เครื่องมืออื่นๆ เข้าร่วมด้วย อาทิเช่น ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) บีมโรตารี (Rotary pump) บีมแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion pump) แผ่นกั้นไอ (baffle) เกจวัดความดัน (Pressure gauge) วาล์ว (Valve) เครื่องทำน้ำเย็นหมุนเวียน (Cooling bath) เป็นต้น [9]

ก่อนหน้านี้มีผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบแหล่งกำเนิดเดียว และได้ทำการทดลองระเหยสารด้วยความร้อนพบว่าสามารถทำการระเหยสารได้ และระเหยสารได้เพียงชนิดเดียวต่อการดำเนินการหนึ่งครั้ง ดังนั้นจึงมีความประสงค์ที่จะพัฒนาระบบระเหยสารให้สามารถสร้างสารประกอบจากสารสองชนิด ผู้วิจัยจะทำการทดลองสร้างสารประกอบโดยในเบื้องต้นจะใช้สาร Cu และ Al ในการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิดสำหรับใช้กับระบบระเหยสารด้วยความร้อน
- 2) เพื่อลดต้นทุนในการสั่งซื้อเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสำเร็จรูปจากต่างประเทศที่มีราคาการจำหน่ายที่สูง
- 3) เพื่อเป็นการพัฒนาศักยภาพด้านการนำความรู้เชิงฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบงานวิจัยและสิ่งประดิษฐ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิด
- 2) ออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนจากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศ
- 3) ทดลองระเหยสารเพื่อสร้างสารประกอบจากสาร 2 ชนิด

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินการ	ระยะเวลา											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	
ศึกษาหลักการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ	←————→											
ศึกษาการใช้การโปรแกรมโซลิดเวิร์คและออกแบบแหล่งกำเนิดความร้อน			←————→									
ติดตั้งแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิดเข้ากับระบบสุญญากาศ							←————→					
ทดลองการระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดการระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิด								←————→				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มี 2 แหล่งกำเนิด เครื่องแรกของภาควิชาเพื่อนำมาใช้ศึกษาทดลองของนักศึกษา
- 2) เข้าใจถึงหลักการของการระเหยสารด้วยความร้อน ระบบสุญญากาศ และการสร้างสารประกอบจากการระเหยสารหลายชนิด
- 3) ลดต้นทุนในการสั่งซื้อเครื่องเคลือบฟิล์มบางสำเร็จรูปจากต่างประเทศ
- 4) เข้าใจและชำนาญการออกแบบอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม Solidworks
- 5) ใช้เป็นเครื่องมือประกอบการเรียนและงานวิจัยของนักศึกษาภาควิชาฟิสิกส์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมถึงภาควิชาและสถาบันอุดมศึกษาอื่นๆ ที่มีความสนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางและเครื่องมือระบบระเหยสารด้วยความร้อนหลายแหล่งกำเนิด รวมถึงการศึกษาด้านวัสดุศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

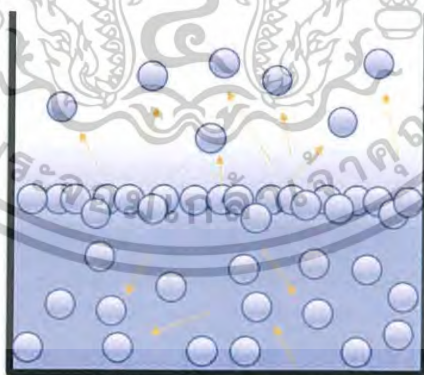
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการระเหยสารด้วยความร้อนนั้นจำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้เกิดความร้อนทำให้สารเปลี่ยนสถานะ และใช้ทฤษฎีทางด้านฟิสิกส์เข้ามาช่วยในอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อนำมาใช้กับระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยจะสร้างให้เป็นแบบ 2 แหล่งกำเนิด ดังนั้นผู้วิจัยจะขอกล่าวถึงหลักการที่สำคัญและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อาทิเช่น หลักการเกี่ยวกับการระเหยสาร หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดไฟฟ้า เป็นต้น ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 การระเหยสาร (Evaporation)

2.1.1 หลักการระเหยของสาร [1]

การระเหยคือการที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไออย่างช้าๆ การระเหยเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของของเหลวเท่านั้น การระเหยเกิดขึ้นได้ทุกๆ อุณหภูมิที่ยังมีของเหลวนั้นอยู่ เมื่อเกิดการระเหยพลังงานและอุณหภูมิของของเหลวที่เหลือจะลดลง เพราะโมเลกุลที่กลายเป็นไอเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูง ส่วนโมเลกุลที่เหลือในของเหลว ส่วนใหญ่มีพลังงานต่ำกว่า ระหว่างที่เกิดการระเหยเมื่อพลังงานและอุณหภูมิของของเหลวลดลง ก็จะมีการถ่ายเทพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ของเหลวนั้นแทนที่พลังงานที่เสียไปกับโมเลกุลที่กลายเป็นไอ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระเหยสารในสุญญากาศ [2]

การให้ความร้อนกับสารที่มีสถานะเป็นของแข็งในสภาวะสุญญากาศ เมื่อให้ความร้อนเทียบเท่าจุดหลอมเหลวจะทำให้สารเคลื่อนนั้นเริ่มระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งเมื่อไอของสารเคลื่อนที่ไปกระทบกับวัสดุรองรับจะเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นชั้นของฟิล์มบนวัสดุรองรับ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารจากของแข็งให้กลายเป็นไอจะต่ำกว่าการระเหยสารในความดันบรรยากาศปกติ โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในการระเหยสารในสภาวะสุญญากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar ที่ความดันนี้การเคลื่อนตัวของไอสารเคลื่อนจากแหล่งกำเนิดไปยังวัสดุรองรับที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะประมาณ 10 - 50 cm จะอยู่ในแนวเส้นตรง

อัตราการระเหยของสารมากที่สุดจากผิวที่มีพื้นที่ A_e หาได้จากสมการของ Knudsen

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (2\pi mKT)^{-1/2} P_e \quad (2.1)$$

เมื่อ dN_e คือ จำนวนโมเลกุลมากที่สุดที่ระเหยออกจากผิวในช่วงเวลา dt

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)

m คือ มวลของโมเลกุล

สำหรับอัตราการระเหยของมวล m_e จากผิวหนึ่งหน่วยในสุญญากาศ จะเป็นไปตามสมการ Langmuir คือ

$$m_e = 5.83 \times 10^{-2} P_e \left(\frac{M}{T}\right)^{1/2} \quad (2.2)$$

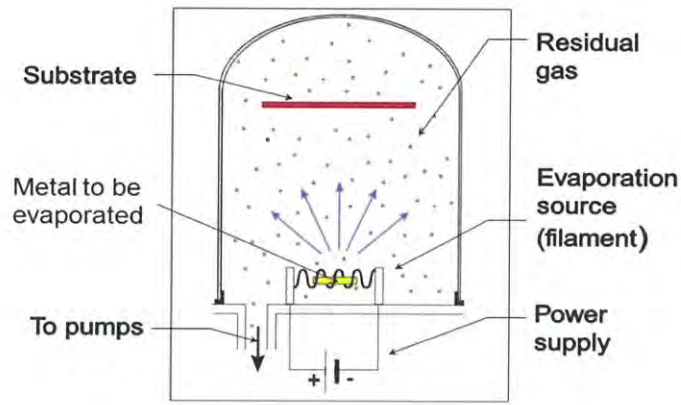
หรือ

$$N_e = 3.513 \times 10^{22} P_e \left(\frac{1}{MT}\right)^{1/2} \quad (2.3)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการระเหยสารในระบบสุญญากาศ [1]

ในกรณีที่เกิดฟิล์มของสารเคลือบบนวัสดุรองรับที่เกิดจากการระเหยของสารต้นกำเนิดที่มีขนาดเล็กจนถือว่าเป็นจุดสะอาด และอัตราการระเหยเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อัตราการเกิดฟิล์มบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นราบจะเป็นไปตาม Knudsen's cosine law คือแปรผันตาม $\cos\theta/r^2$ เมื่อ r เป็นระยะจากแผ่นรองรับถึงต้นกำเนิดไอและ θ เป็นมุมที่ r ทำกับแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ ถ้าให้ d_0 เป็นความหนาของการเกิดฟิล์มที่กึ่งกลางแนวตั้ง เหลือจุดที่เป็นต้นกำเนิดเป็นระยะทาง h และ d เป็นความหนาของฟิล์มที่ระยะ l จากแนวกึ่งกลาง จะได้ความสัมพันธ์ของ d/d_0 ตามสมการ

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (2.4)$$

ถ้าต้นกำเนิดไอเป็นพื้นที่เล็กๆ การกระจายความหนาจะเป็นตามสมการ

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^2} \quad (2.5)$$

ปกติแล้วการเคลือบฟิล์มบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ นอกจากอะตอมของสารเคลือบจะตกเคลือบบนแผ่นรองรับแล้ว ยังมีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นๆ ที่หลงเหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศที่กระทบกับวัสดุรองรับ แก๊สที่เหลืออยู่นี้จะมีผลโดยตรงต่อการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์ม เนื่องจากแก๊สเหล่านี้สามารถชนกับอะตอมของไอสารเคลือบที่ระเหยจากต้นกำเนิดที่อยู่ระหว่างต้นกำเนิดกับวัสดุรองรับโดยจำนวนครั้งของการชนจะขึ้นอยู่กับระยะปลอดการชนเฉลี่ย หรือ (mean free path) ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ถ้าให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง l โดยปราศจากการชนกับอะตอมอื่น จะพบว่า

$$N = N_0 \exp\left(\frac{-1}{\lambda}\right) \quad (2.6)$$

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

แก๊สที่หลงเหลืออยู่ภายในภาชนะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับมีการปนเปื้อนโมเลกุลของแก๊สที่เคลื่อนอยู่จะชนกับวัสดุรองรับ ขณะที่เกิดการก่อตัวของฟิล์มอัตราการชนของโมเลกุลแก๊สกับวัสดุรองรับนี้จะขึ้นอยู่กับตามสมการ

$$N_g = 3.513 \times 10^{22} \frac{P_g}{(M_g T_g)^{1/2}} \quad (2.7)$$

เมื่อ P_g คือ ความดันสมดุลของแก๊สที่อุณหภูมิ T_g

2.1.3 ความดันไอของธาตุ (Vapor pressure of the elements) [3,4]

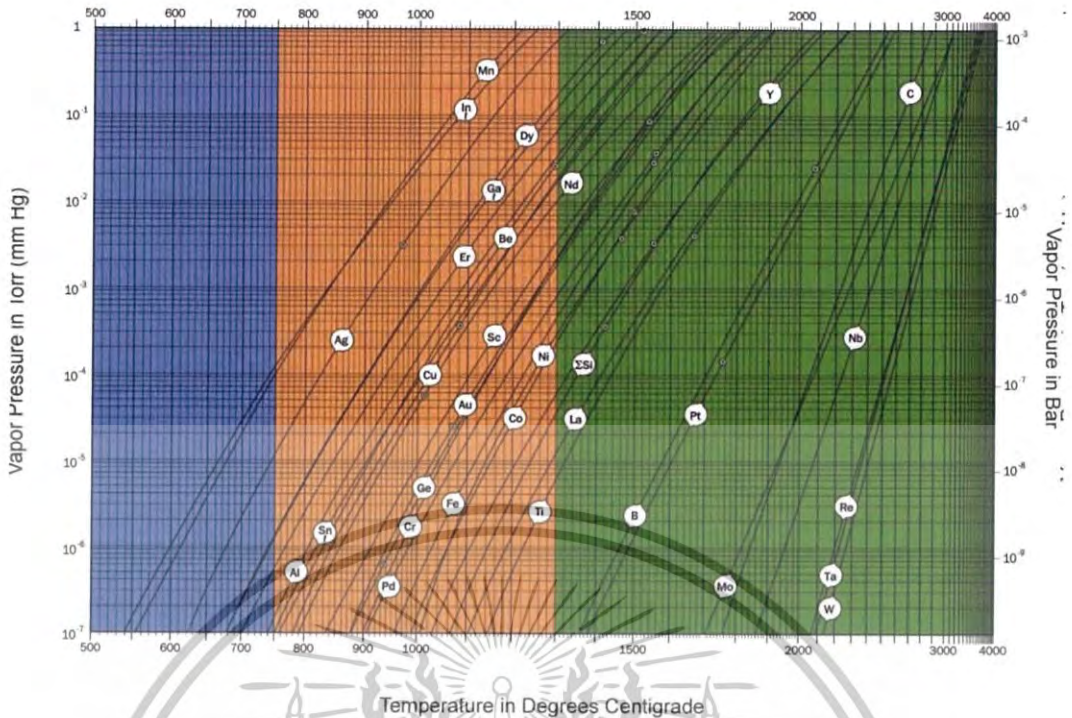
ธาตุของแข็งหรือของเหลวเมื่อได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.8 แล้วถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สเป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้นจะได้

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.8)$$

ถ้าให้ปริมาณ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) จากนั้นทำการอินทิเกรตซึ่งจะได้ค่าความดันไอของการระเหยออกมาเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้

$$P = P_0 \exp \frac{\Delta H_e}{RT} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว [4]

2.2 กฎของแก๊ส [5]

2.2.1 กฎของบอยล์ (Boyle's law)

ร็อบเบิร์ต บอยล์ (Robert Boyle) นักเคมีชาวอังกฤษ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊สในปี ค.ศ. 1662 (พ.ศ. 2205) ซึ่งมีสาระสำคัญคือ เมื่ออุณหภูมิและมวลของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผกผันกับความดัน

ถ้าให้ P แทนความดันของแก๊ส V แทนปริมาตรของแก๊ส ความสัมพันธ์ตามกฎของบอยล์เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$PV = k \tag{2.10}$$

ค่าคงที่ k ในสมการนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาตร มวลของแก๊ส และลักษณะเฉพาะของแก๊สแต่ละชนิด และจากผลการทดลองพบว่าผลคูณระหว่างปริมาตรและความดันของแก๊สมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นถ้าให้ P₁ และ V₁ เป็นความดันและปริมาตรที่สภาวะที่ 1 จะได้ว่า

$$P_1V_1 = k \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าให้ P_2 และ V_2 เป็นความดันและปริมาตรที่สภาวะที่ 1 จะได้ว่า

$$P_2V_2 = k \quad (2.12)$$

$$(2.11) = (2.12) \quad P_1V_1 = P_2V_2 \quad (2.13)$$

ผลที่ได้จากกฎของบอยล์เมื่อนำมาเขียนกราฟโดยให้ความดันเป็นแกนตั้ง และปริมาตรเป็นแกนนอน จะได้กราฟดังรูป 2.4 ซึ่งจากกราฟถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไปจะได้กราฟที่มีลักษณะไฮเปอร์โบลา และพบว่าอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น ลักษณะของเส้นกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร

2.2.2 กฎของชาร์ล (Charles's Law)

การเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้ปริมาตรของแก๊สเพิ่มขึ้น และการลดอุณหภูมิมีผลให้ปริมาตรของแก๊สลดลงด้วย แสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊ส การเปลี่ยนแปลงนี้ใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊สอธิบายได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สเพิ่มขึ้น โมเลกุลของแก๊สจึงเคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้โมเลกุลชนกันเองและชนผนังภาชนะมากขึ้น รวมทั้งพลังงานเอกสารนเป็นเอกสารทสงวนเวลาห้รบการไซงานเพื่อกรรคกษาเทานัน ไม่อนุญาติเหนาเปไซบระไซชนคานการคานไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการชนกันสูงขึ้นเป็นผลให้ความดันของแก๊สภายในสูงขึ้นด้วย ซึ่งกฎของชาร์ลมีใจความสำคัญว่า เมื่อมวลและความดันของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิเคลวิน

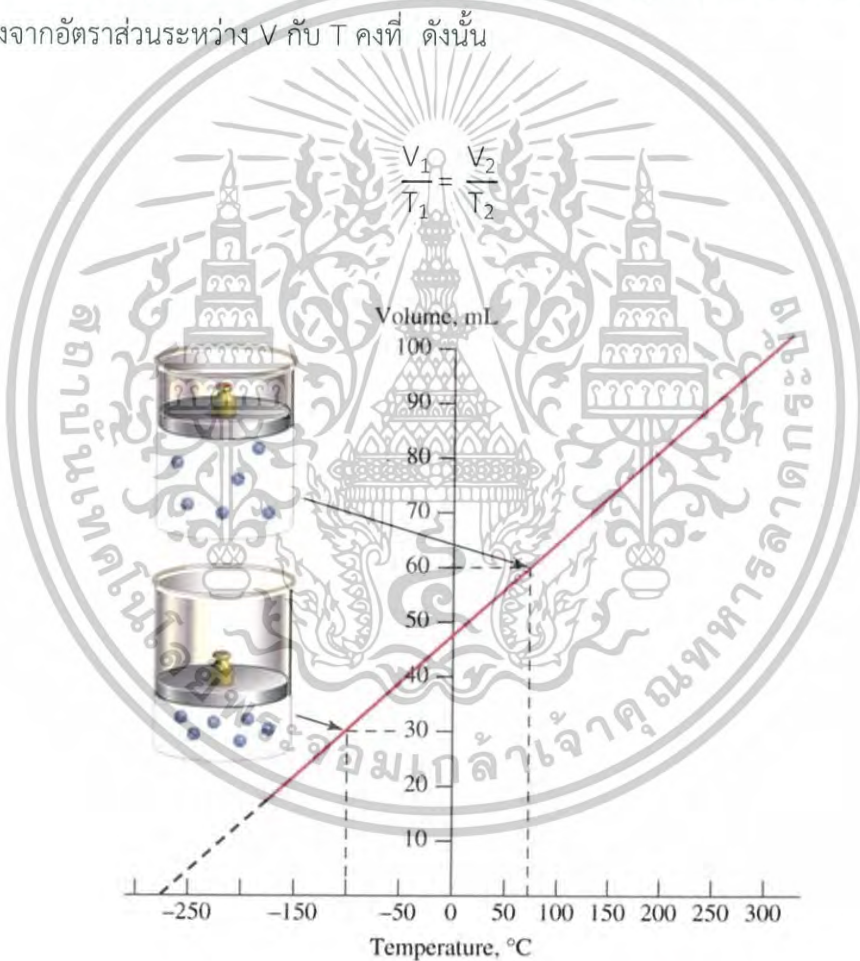
จากกฎของชาร์ล สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V = KT \tag{2.14}$$

$$\frac{V}{T} = K \tag{2.15}$$

ถ้าให้ V_1 เป็นปริมาตรของแก๊สที่อุณหภูมิ T_1 และ V_2 เป็นปริมาตรของแก๊สที่อุณหภูมิ T_2 เนื่องจากอัตราส่วนระหว่าง V กับ T คงที่ ดังนั้น

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \tag{2.16}$$



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตร

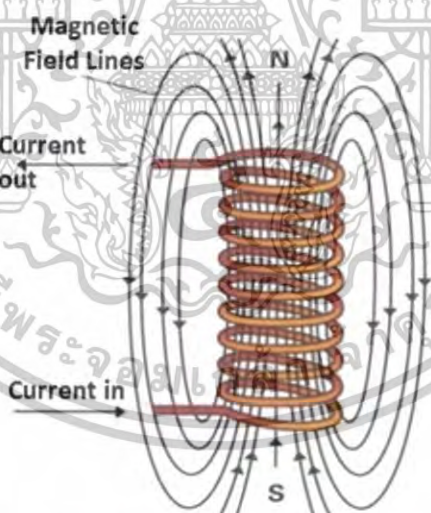
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า [6,7]

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้มีระดับแรงดันเหมาะสมที่จะใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ หรือ ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง ที่ระดับความถี่เดียวกัน โดยวิธีการเปลี่ยนทั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งใช้หลักการของวงจรแม่เหล็กที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น (Faraday's law)

2.3.1 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น อาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้กับตัวนำ คือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำนั้น และถ้ากระแสที่ป้อนมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปมา ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ถ้าสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตัดผ่านตัวนำ ก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำนั้น โดยขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก และความเร็วในการตัดผ่านตัวนำของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.6

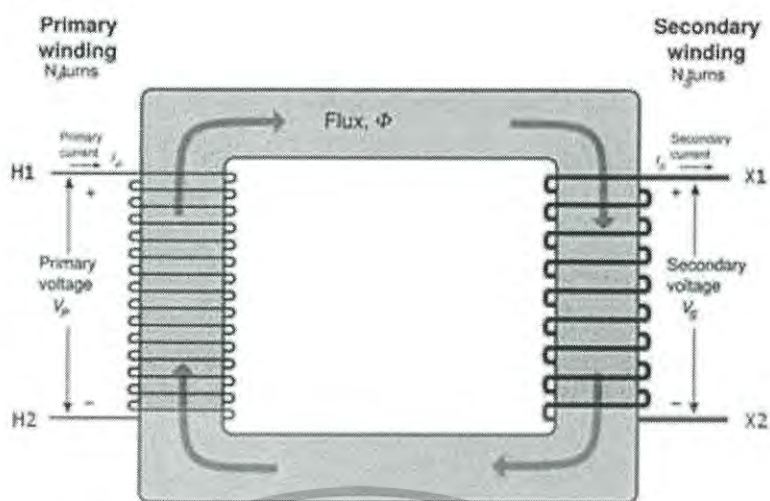


รูปที่ 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดตัวนำ

2.3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และฉนวน อาจจะมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีถึงบรรจุหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลง ตรีบระบายความร้อน ขั้วแรงดันด้านสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ขั้วแรงดันด้านต่ำ และอื่นๆ เป็นต้น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างภายในของหม้อแปลง

1. แกนเหล็ก (Core) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ เคลือบด้วยฉนวนนำมอดัดซ้อนกันเป็นรูปแกนของหม้อแปลง ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก แกนเหล็กที่ดีต้องเป็นเหล็กอ่อนมีส่วนผสมของสารซิลิกอน มีความซึมซับแม่เหล็ก (Permeability) ได้สูง การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ต่ำ มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำสูงถึง 1.35 - 1.55 เวเบอร์ต่อตารางเมตร เป็นเหล็กประเภทเกรนโอเรียนเตด (Grain oriented steel) ฉนวนที่นำมาฉาบแผ่นเหล็กทั้งสองด้านมีค่าความเป็นฉนวนตามผิวสูงเพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ซึ่งจะเป็นสารจำพวกวานิช (Varnish)

2. ขดลวด (Winding) ขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลงมีลักษณะเป็นขดลวดทองแดง หรือขดลวดอลูมิเนียมที่หุ้มหรือเคลือบด้วยฉนวน อาจจะเป็นได้ทั้งลวดแบนที่มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือลวดกลมก็ได้ หม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) โดยขดลวดปฐมภูมิจะเป็นชุดที่รับไฟเข้า ส่วนขดลวดทุติยภูมิเป็นชุดที่จ่ายไฟออกไปใช้งาน เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับให้กับขดปฐมภูมิ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป-มา โดยเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวก็จะวิ่งไป-มา ตามแกน และไปตัดกับขดทุติยภูมิทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดทุติยภูมิที่ต่อกับโหลด โดยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของขดลวด

3. ฉนวน (Insulation) ฉนวนมีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกันได้ (Short turn) สำหรับลวดตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.2 - 1.3 มิลลิเมตร หากต้องการให้ฉนวนมีคุณภาพดีและทนความร้อนได้มากจะต้องเคลือบด้วยไวนิเฟล็กซ์ (Viniflex) หรือพันทับด้วยไหมแคปรอน (Caprone) เทเรไลน์ (Telceline) หรือฝ้าย และถ้าลวดตัวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.3 - 4.1 มิลลิเมตร จะพันด้วยกระดาษเคเบิล (Cable paper) หลายชั้น ส่วนตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจะพันทับด้วยไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเม็ดดัดแปลงเนื้อที่และต้องอ่องถึงใจของเอกสารที่ควรนำมาใช้

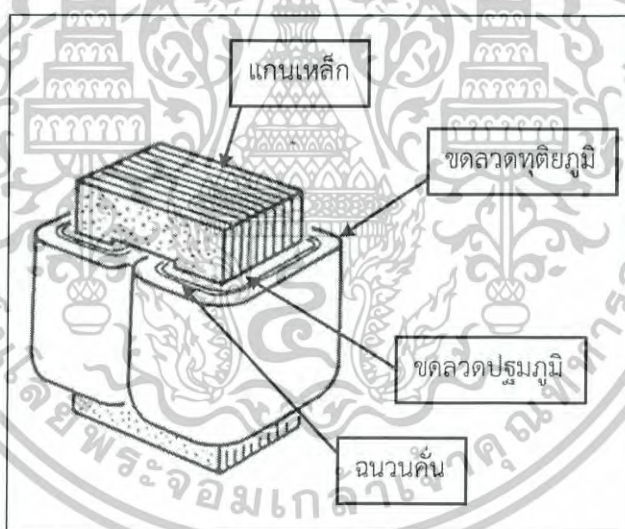
ฉนวนไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) สำหรับฉนวนที่คั่นระหว่างชั้นของขดลวดส่วนมากจะเป็นกระดาษเคลือบหนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร และจำนวนชั้นของกระดาษจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของหม้อแปลง

2.3.3 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป จึงมีการจำแนกชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็นแบบต่างๆ เพื่อให้เหมาะแก่การใช้งานและการศึกษาสามารถจำแนกตามประเภทต่างๆ ได้ 8 แบบดังนี้

2.3.3.1 จำแนกตามลักษณะของแกนเหล็ก

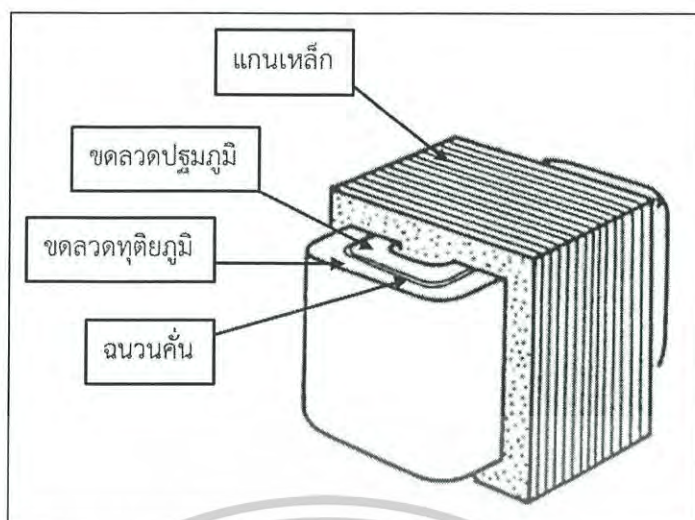
1) แกนเหล็กแบบคอร์ (Core Type) เป็นแกนเหล็กแผ่นบางๆ มีลักษณะเป็นรูปตัว L สองตัวประกบเข้าหากัน หรือเป็นรูปตัว U กับตัว I นำมาประกอบเข้าด้วยกัน มีวงจรมแม่เหล็กเป็นแบบวงจรรเดียวยหรือวงจรรอนุกรม ซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองด้าน แยกกันอยู่คนละข้าง



รูปที่ 2.8 แกนเหล็กแบบคอร์

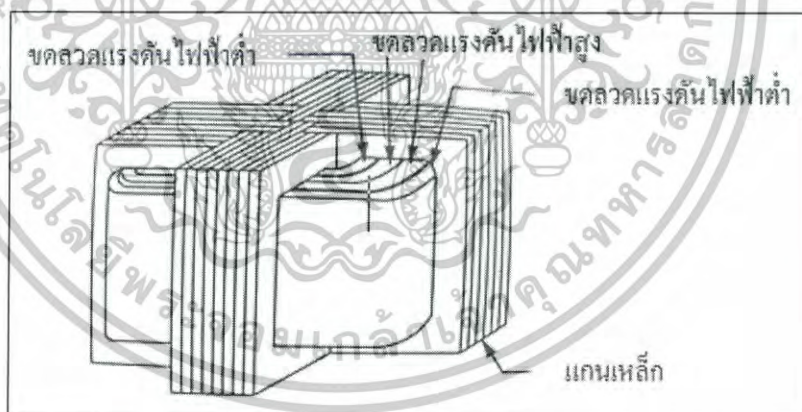
2) แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell Type) แกนเหล็กแบบนี้มีลักษณะเป็นรูปตัว E กับ I เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะมีวงจรมแม่เหล็ก 2 วง หรือวงจรมแม่เหล็กแบบขนาน ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะพันอยู่ที่ขากกลางของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แกนเหล็กแบบเชลล์

3) แกนเหล็กแบบตัว H หรือแบบกระจาย เป็นการรวมกันระหว่างแกนเหล็กแบบคอร์กับแบบเชลล์หรือรวมตัว L เข้ากับตัว E มีวงจรมแม่เหล็กล้อมรอบขดลวดหม้อแปลง ขดลวดแรงดันสูงจะพันไว้ระหว่างขดลวดแรงดันต่ำทั้งสองชุด และระหว่างขดลวดแต่ละชุดจะกั้นด้วยฉนวนไฟฟ้า การพันขดลวดหม้อแปลงแบบนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุด



รูปที่ 2.10 แกนเหล็กแบบตัว H

2.3.3.2 จำแนกตามระบบไฟฟ้า

1) หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single Phase Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส มีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิอย่างละ 1 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 หม้อแปลง 1 เฟส

2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (Three Phase Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอย่างละ 3 ชุด ต่อเข้าด้วยกันเป็นแบบวาย (Wye) หรือแบบเดลตา (Delta)



รูปที่ 2.12 หม้อแปลง 3 เฟส

2.3.3.3 จำแนกตามพิกัดของแรงดันไฟฟ้าเข้าและออก

1) หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่ม (Step up Transformer) เป็นหม้อแปลงที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าออกมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยใช้ปรับระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดในโรงไฟฟ้า ซึ่งปกติจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ ให้สูงขึ้นเป็น 69 115 230 และ 500 กิโลโวลต์ ส่งไปตามสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หรืออาจจะมีหม้อแปลงมากกว่าหนึ่งตัวใช้ยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเป็นช่วงๆ ก็ได้

2) หม้อแปลงไฟฟ้าลด (Step down Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้จะจ่ายแรงดันด้านออกน้อยกว่าแรงดันด้านเข้า เช่น หม้อแปลงขนาดเล็กที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ร้านขายอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งหม้อแปลงของการไฟฟ้าภูมิภาคมีแรงดันไฟฟ้าด้านสูง 11 22 และ 33 กิโลโวลต์ และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าด้านต่ำในระบบ 3 เฟส 400/230 โวลต์ และระบบ 1 เฟส 460/230 โวลต์ ส่วนหม้อแปลงของการไฟฟ้านครหลวงใช้กับแรงดันไฟฟ้าด้านสูง 12 หรือ 24 กิโลโวลต์ และแรงดันไฟฟ้าด้านต่ำในระบบ 3 เฟส 416/240 โวลต์ และระบบ 1 เฟส 480/240 โวลต์

3) หม้อแปลงไอโซเลติง (Isolating Transformer) หม้อแปลงชนิดนี้จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เช่น หม้อแปลงที่ใช้กับโต๊ะทดลองของห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแยกออกจากกัน เมื่อเกิดข้อบกพร่องในการทดลองหรือเกิดการลัดวงจรจะเกิดความรุนแรงน้อยกว่าเมื่อไม่มีหม้อแปลง สาเหตุมาจากการยุบตัวของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ไม่เกิดการอาร์กที่รุนแรง นับเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้าชนิดหนึ่ง และยังใช้กับเครื่องจักรที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ โดยการแปลงไฟจาก 380 โวลต์ 3 เฟส 3 สายให้เป็น 380/220 โวลต์ 3 เฟส 4 สาย

2.3.3.4 จำแนกตามพิกัดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า

1) หม้อแปลงขนาดเล็ก มีพิกัด 1000 โวลต์-แอมป์ลงมา เป็นหม้อแปลงที่นำมาใช้กับภาคจ่ายไฟของเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังรวมถึงหม้อแปลงขนาดเล็กที่ใช้ในการเชื่อมโยงสัญญาณของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย



รูปที่ 2.13 หม้อแปลงขนาดเล็ก

2) หม้อแปลงขนาดกลาง มีพิกัด 1-1000 กิโลโวลต์-แอมป์ ส่วนใหญ่จะใช้กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง ใช้กับโรงงาน โรงพยาบาล สำนักงาน อาคารสูง และที่พักอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 หม้อแปลงขนาดกลาง

3) หม้อแปลงกำลัง มีขนาดตั้งแต่ 1000 โวลต์-แอมป์ขึ้นไป เป็นหม้อแปลงที่มีใช้งานกับระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ใช้กับสถานีไฟฟ้าแรงสูง การผลิตและการส่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 หม้อแปลงกำลัง

2.3.3.5 จำแนกตามการใช้งานของเครื่องมือวัด

เป็นหม้อแปลงที่ใช้สำหรับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า เช่น เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า หรือ กิโลวัตต์-อวามิเตอร์ เพื่อวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าแต่ละเดือน ซึ่งการวัดโดยตรงของแรงดันหรือกระแสสูงๆ ทำให้ต้องใช้เครื่องวัดขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง หม้อแปลงเครื่องมือวัดจะมีขนาดเล็กและราคาไม่แพง ถูกออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือวัด มีความปลอดภัยและเที่ยงตรงสูง มี 2 ชนิดด้วยกัน

1) หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) เป็นหม้อแปลงแรงดันขนาดเล็กใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสูงๆ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ใช้กับโวลต์มิเตอร์ วัดตมิเตอร์ และกิโลวัตต์อวามิเตอร์

พิกัดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์ (VA) ส่วนพิกัดแรงดันจะบอกแรงดันไฟฟ้าของขด

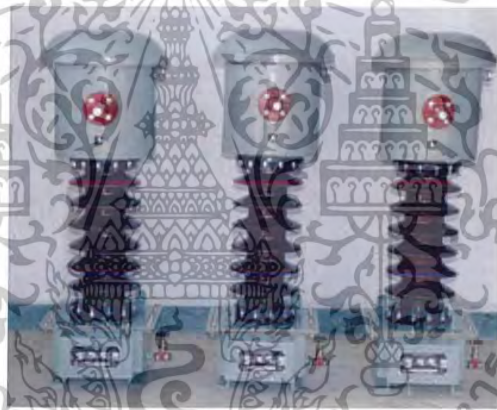
เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าปลีกและขดทุติยภูมิ เช่น 1500/100 โวลต์ 4800/120 โวลต์ 22000/220 โวลต์ เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า

2) หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานสำหรับลดกระแสสูงๆ ที่ไหลในสายไฟฟ้าให้มีค่าลดต่ำลง เพื่อนำไปต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ วัดคัมมิเตอร์ และ กิโลวัตต์-อวามิเตอร์เช่นเดียวกัน ขนาดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์ (VA) พิกัดกระแสบอกเป็นอัตราส่วน เช่น 100/5 200/5 300/5 เป็นต้น



รูปที่ 2.17 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

2.3.3.6 จำแนกตามลักษณะของการพันขดลวด

1) หม้อแปลงแบบแยกขดลวด ซึ่งขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิที่พันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองขดแยกออกจากกัน โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของขดลวดต่อถึงกัน เป็นหม้อแปลงที่มีใช้งานโดยทั่วไป

2) หม้อแปลงแบบใช้ขดลวดขดเดียวร่วมกัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หม้อแปลงออโต (Auto Transformer) หม้อแปลงแบบนี้มีขดลวดเป็นขดเดียวที่ทำหน้าที่เป็นทั้งขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ จึงทำให้ประหยัดลวดทองแดง และมีราคาถูกกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวด 2 ขด อัตราส่วนของหม้อแปลงแบบออโตจะต่ำ ซึ่งส่วนมากแล้วจะไม่เกินกว่า 4 : 1 สามารถแปลง

แรงดันได้ทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น ส่วนมากจะนำไปใช้เพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของสายเคเบิลที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายไปยังโหลด ใช้เป็นอุปกรณ์สตาร์ทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ใช้กับหม้อแปลงของเตาหลอมโลหะ (Furnace Transformer) และใช้เป็นหม้อแปลงกำลังในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

2.3.3.7 จำแนกตามลักษณะการปรับแรงดันไฟฟ้า

1) หม้อแปลงแบบมีแทปแยก ซึ่งลักษณะของแทปแยกจะอยู่ทางด้านขดทุติยภูมิ มีให้เลือกใช้งานตามความต้องการ เช่น 6 12 24 และ 48 โวลต์ หรืออาจจะเป็นแบบมีแทปศูนย์อยู่ตรงกลาง เช่น 36-0-36 โวลต์ และ 48-0-48 โวลต์ เป็นต้น ส่วนมากจะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก เครื่องขยายเสียง

2) หม้อแปลงแบบปรับค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโตชนิดหนึ่ง เรียกว่า แวรีแอก หรือสไลด์เรกกูเลเตอร์ (Slide regulator) ขดลวดจะพันอยู่รอบๆ แกนทอรอยด์ (Toroid) ที่ด้านบนของขดลวดจะถูกกดให้แบนเพื่อให้แปร่งถ่านสัมผัสกับขดลวดได้ดี



รูปที่ 2.18 แวรีแอก

2.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ [1]

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส กำลังงาน ไฟฟ้าจริงกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าไฟฟ้าปรากฏ ตัวประกอบกำลังฮาร์โมนิก ค่าพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์เป็นมัลติมิเตอร์ที่สามารถวัดค่าปริมาณไฟฟ้าได้หลายชนิดเช่นเดียวกับ มัลติมิเตอร์ชนิดเข็ม เช่น วัดแรงดันไฟตรง วัดแรงดันไฟสลับ วัดกระแสไฟตรง วัดกระแสไฟสลับ และความต้านทาน เป็นต้น นอกจากนี้ในดิจิตอลมัลติมิเตอร์บางรุ่นยังสามารถวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆ ได้ เช่น วัดการต่อวงจรแสดงด้วยเสียง วัดอุณหภูมิ วัดความถี่ วัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ วัดอัตราการขยายของทรานซิสเตอร์ และวัดขาทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบยานวัดอัตโนมัติ และดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบยานวัดปรับด้วยมือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัตต์อัตโนมัติ

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบย่านวัตต์อัตโนมัติ ปริมาณไฟฟ้าแต่ละชนิดที่จะวัดค่ามีย่านตั้งวัดเพียงย่านเดียว สามารถใช้วัดปริมาณไฟฟ้าตั้งแต่ค่าต่ำๆ ไปจนถึงค่าสูงสุดที่เครื่องสามารถแสดงค่าออกมาได้ ใช้งานได้ง่าย และสะดวกรวดเร็ว



รูปที่ 2.19 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัตต์อัตโนมัติแบบต่างๆ

2.4.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัตต์ปรับด้วยมือ

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบย่านวัตต์ปรับด้วยมือ ผู้ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์จะต้องเป็นผู้ปรับเลือกย่านวัดให้เหมาะสมกับค่าปริมาณไฟฟ้าที่วัด หากปรับค่าไม่ถูกต้องดิจิตอลมัลติมิเตอร์จะไม่สามารถแสดงค่าการวัดออกมาได้ การใช้งานคล้ายมัลติมิเตอร์แบบเข็ม แตกต่างเพียงดิจิตอลมัลติมิเตอร์เมื่อวัดค่าสามารถแสดงค่าปริมาณไฟฟ้าที่วัดได้เป็นตัวเลขออกมาเลย



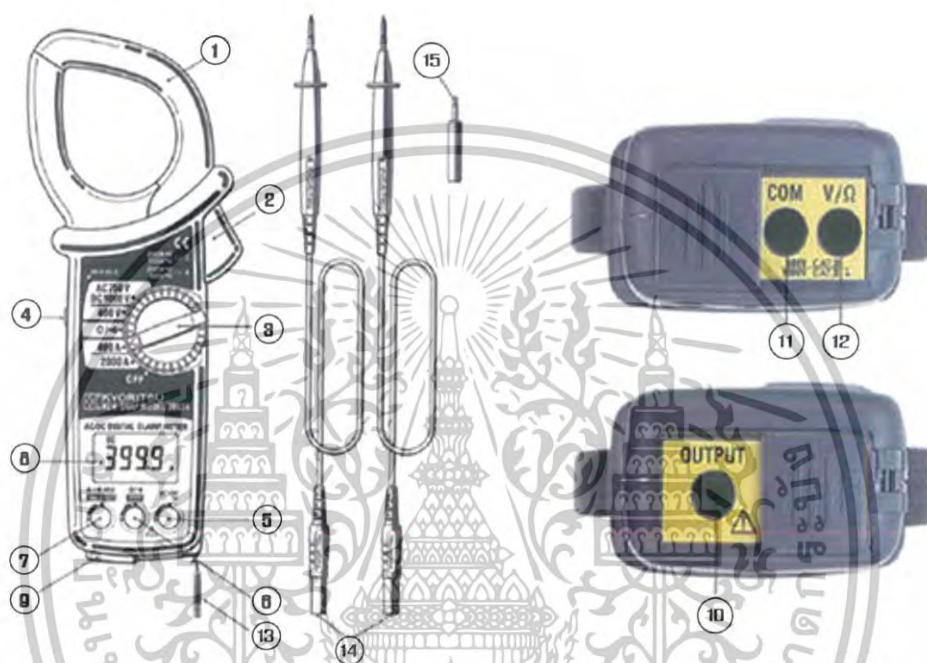
รูปที่ 2.20 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ย่านวัตต์ปรับด้วยมือแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ [8]

ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสไฟตรง และสลับจะใช้วิธีการตรวจจับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นรอบสายไฟฟ้า แล้วนำสัญญาณที่ตรวจจับได้ไปแปลงเป็นค่าที่สามารถอ่านค่าได้

2.5.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบต่างๆ ของแคลมป์มิเตอร์

1. ก้ามปู (Transformer Jaws)
2. ปุ่มกดสำหรับเปิดก้ามปู (Jaw Trigger)
3. สวิตช์เลือกย่านการวัด (Function Selector Switch)
4. ปุ่มกดสำหรับคงค่าที่วัดไว้ (Data Hold Button)
5. ปุ่มลือคย่านวัดไฟ AC/DC (AC/DC Button)
6. ปุ่มกดเลือกโหมด (Mode Button)
7. ปุ่มกดปรับศูนย์ (Zero ADJ. RESET Button)
8. จอแสดงผล (LCD Display)
9. ฝาครอบขั้วต่อย่านวัด (Terminal Cover)
10. ขั้วต่อเอาต์พุต (OUTPUT Terminal)

11. ขั้วคอมมอน (COM Terminal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรเผยแพร่ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

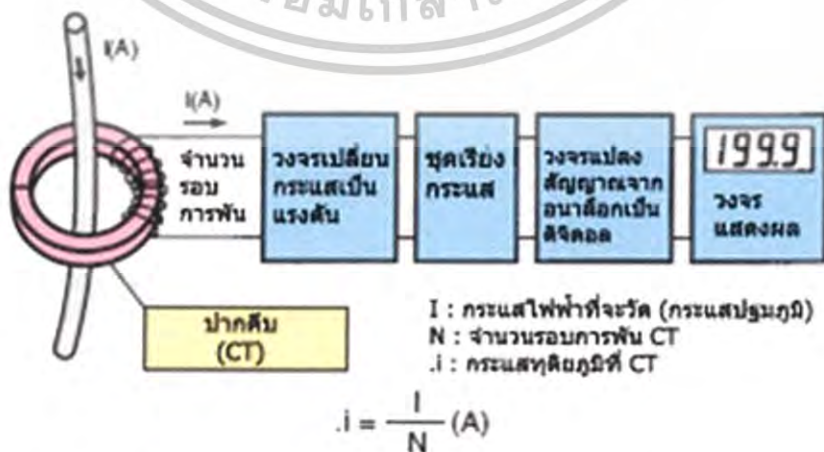
12. ขั้ววัดแรงดันไฟฟ้าและโอห์ม (V/ Ω Terminal)
13. สายคล้องแขน (Safety Hand Strap)
14. สายวัด (Test Leads (7107))
15. ช่องเสียบเอาต์พุต (Output Plug (8201))

2.5.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์

ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟฟ้ายู่นั้น รอบๆ สายไฟจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ถ้าหากนำเอาขั้วม้วนของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ไปคล้องกับสายไฟฟ้าที่ต้องการวัดกระแส ภายในขั้วม้วนซึ่งเป็นแกนเหล็กวงกลมและขดลวด จะทำให้ตัวตรวจจับสัญญาณที่อยู่ตรงขั้วม้วนแล้วส่งค่าที่ได้ไปแสดงผลที่ภาคแสดงผลของดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ต่อไป ซึ่งวิธีการตรวจจับมีด้วยกันอยู่หลายวิธี โดยจะอธิบายเฉพาะวิธีที่นิยมใช้กันมากเท่านั้นคือ 1) วิธีตรวจจับโดยใช้ CT (Current Transformer) และ 2) วิธีตรวจจับโดยใช้ Hall Device

1) วิธีการตรวจจับโดยใช้ Current Transformer

เมื่อเรานำเอา Clamp Meter คล้องเข้ากับสายไฟในขณะที่มีกระแสไหลอยู่ภายในสายเส้นนั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ สายไฟจะเกิดการเหนี่ยวนำไปตัดกับขดลวดทองแดงที่พันอยู่รอบแกนเหล็กของขั้วม้วน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดบนแกนเหล็กหลักการดังกล่าวนี้จะคล้ายกับหลักการของการเหนี่ยวนำภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำของขดลวดนี้จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันและผ่านการลดทอนสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณขนาดที่พอเหมาะ ในขณะที่สัญญาณที่ได้รับจะเป็นสัญญาณ AC ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปแสดงผล เราจึงต้องทำการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณ DC ด้วยวงจร Rectifier แล้วส่งสัญญาณให้ภาค A/D converter เพื่อเปลี่ยนสัญญาณ Analog แรงดันที่ได้จากวงจร Rectifier เป็นสัญญาณดิจิตอล ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังภาคแสดงผลแบบดิจิตอลต่อไป



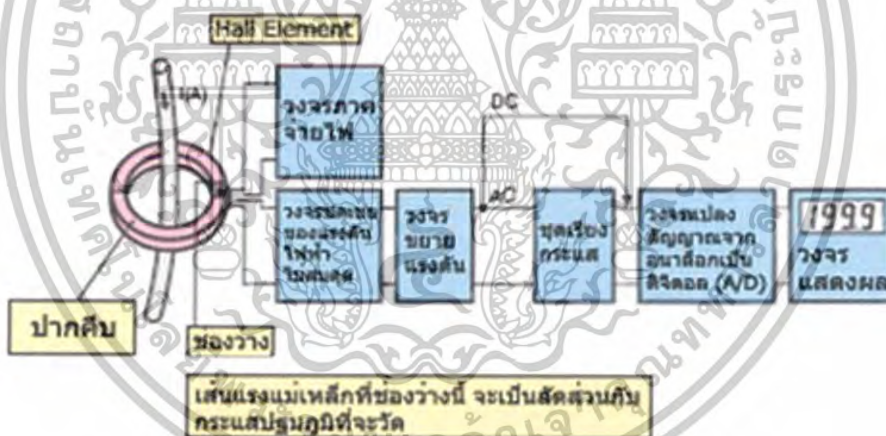
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมของแคลมป์มิเตอร์แบบ Current Transformer
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วิธีตรวจจับด้วย Hall Device

หลักการ Hall Device คือ เมื่อป้อนกระแสไปอัสทางด้าน Input ของ Hall Device และมีความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ใกล้ Hall Device แล้วจะมี Output ของ Hall Device ออกมาเป็นแรงดัน โดยแรงดันที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับผลคูณของสนามแม่เหล็ก และกระแสไปอัส

Clamp Meter แบบที่ใช้ตัวตรวจจับแบบ Hall Device นี้จะมี Hall Device อยู่ที่ช่องว่างเล็กๆ (GAP) เมื่อเรานำ Clamp Meter มาวัดกระแสไฟฟ้าแล้ว จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กไหลในก้ามปูเป็นผลให้ Hall Device ส่งแรงดัน Output ออกมา ผ่านวงจรชดเชยสัญญาณ แล้วผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณที่พอเหมาะ จากนั้นสัญญาณจะถูกนำไปกรองให้เป็นไฟ DC และส่งต่อไปยังวงจร A/D เพื่อแสดงผลแบบดิจิตอลต่อไป

วิธีการวัดแบบนี้ วงจรชดเชยสัญญาณ (Compensator) จะมีความสำคัญเนื่องจากวิธีการวัดวิธีนี้เมื่อใช้กับไฟกระแสตรงจะเกิดแรงดันไฟที่ไม่สมดุล (Unbalanced Voltage) จากแรงดันไฟออฟเซตของวงจรและอื่นๆ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีวงจรชดเชยเข้าช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อ Hall Device ในขณะที่ใช้วัดไฟกระแสตรง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกจากตำแหน่งศูนย์ได้



รูปที่ 2.23 ไดอะแกรมของแคลมป์มิเตอร์แบบ Hall Device

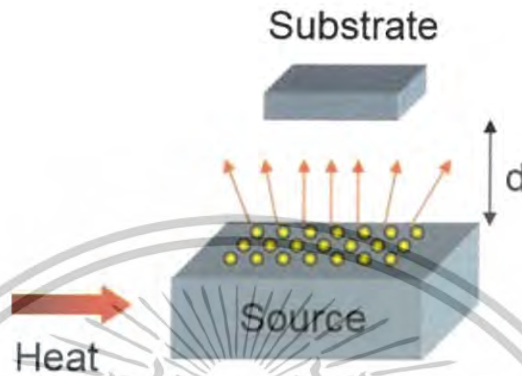
2.6 แหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source)

คือวัสดุที่มีความต้านทานสูง มีจุดหลอมเหลวสูง และสามารถทนความร้อนได้สูง วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน คือ ทังสเตน หรือแทนทาลัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 หลักการทำงานของแหล่งกำเนิดความร้อน

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีความต้านทานสูงทำให้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้แปรผันตรงกับค่าความต้านทานของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความต้านทานสูงจะทำให้มีความร้อนสูง แต่หากวัสดุมีความต้านทานต่ำก็จะทำให้ค่าความร้อนต่ำ



รูปที่ 2.24 แสดงการระเหยจากแหล่งกำเนิดความร้อน

2.6.2 ชนิดของแหล่งกำเนิดความร้อน [2]

1) แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (resistance heated sources) ใช้วิธีการจ่ายไฟฟ้ากำลังสูงเข้าไปยังขดลวดหรือแผ่นโลหะที่ใช้เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถ่ายเทไปยังสารเคลือบแล้วทำให้สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ

2) แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ (induction heated sources) เป็นการนำขดลวดมาพันรอบถ้วยใส่สาร (crucible) แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นภายในเนื้อสารเคลือบ จนสารเคลือบเปลี่ยนสภาวะกลายเป็นไอ

3) การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam heated sources) เป็นการรวมพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจำนวนมากเป็นจุดเล็กๆ ลงไปยังเนื้อสารเคลือบ เพื่อทำให้สารเคลือบเกิดความร้อนและระเหยกลายเป็นไอ สารเคลือบที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีนี้จะถูกบรรจุอยู่ในถ้วยใส่สารซึ่งมักทำจากอลูมินา (alumina) หรือทองแดง โดยถ้วยใส่สารดังกล่าวนี้จะต้องมีการหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลาที่ยิงลำอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันไม่ให้ถ้วยถูกหลอมไปด้วย

2.7 อุปกรณ์วัดความดัน [9]

อุปกรณ์วัดความดันอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การขยายตัว หดตัวของก๊าซ เมื่อความกดดันเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนค่าการนำความร้อนของโลหะภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เป็นก๊าซชนิดต่างๆ หรืออาศัยหลักการแตกตัวของก๊าซชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของยาง [9]

วัสดุยาง	ความซึมได้ของก๊าซต่อนิว ($\text{atm cm}^3\text{s}^{-1}$)	ความดันไอต่ำสุด (torr)	อัตราซัพก๊าซ ($\text{torr} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)
ซิลิโคน	100×10^{-8}	2.2×10^{-7}	0.44×10^{-5}
ไวตัน	1.6×10^{-8}	1.3×10^{-9}	2.04×10^{-5}
ไนไตรล์	0.31×10^{-8}	-	-
ยางธรรมชาติ	-	4.5×10^{-9}	-
นีโอพรีน	-	2.1×10^{-9}	5.4×10^{-5}

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยภายในประเทศ

รวิวรรณ เฉลียวพงษ์ (2558 : บทคัดย่อ) [1] ได้ศึกษา การออกแบบวงจรสำหรับระเหยสารในระบบสุญญากาศ พบว่าค่ากระแสและแรงดันหุติยภูมิที่แหล่งกำเนิดการระเหยสารยังคงรูปเดิมสำหรับแบบรอยหยัก คือ 1.091 โวลต์ 59.63 แอมแปร์ สำหรับแบบขด คือ 3.327 โวลต์ 50.87 แอมแปร์ สำหรับแบบตะกร้า คือ 1.882 โวลต์ 32.93 แอมแปร์ และสำหรับแบบโบ๊ท คือ 1.829 โวลต์ 197.17 แอมแปร์ ตามลำดับ เมื่อทำการระเหยทองแดงพบว่าค่ากระแสและแรงดันหุติยภูมิที่ทองแดงเริ่มระเหยสำหรับแบบรอยหยัก คือ 0.871 โวลต์ 53.07 แอมแปร์ สำหรับแบบขด คือ 2.623 โวลต์ 47.77 แอมแปร์ สำหรับแบบตะกร้า คือ 1.397 โวลต์ 29.77 แอมแปร์ และสำหรับแบบโบ๊ท คือ 1.073 โวลต์ 171.40 แอมแปร์ ตามลำดับ เมื่อทำการระเหยอะลูมิเนียมพบว่าค่ากระแสและแรงดันหุติยภูมิที่อะลูมิเนียมเริ่มระเหยสำหรับแบบรอยหยัก คือ 1.113 โวลต์ 55.70 แอมแปร์ สำหรับแบบขด คือ 3.327 โวลต์ 52.13 แอมแปร์ สำหรับแบบตะกร้า คือ 1.924 โวลต์ 28.63 แอมแปร์ และสำหรับแบบโบ๊ท คือ 1.765 โวลต์ 198.37 แอมแปร์ ตามลำดับ

ปัญญา สิงห์คา และพีรศิลป์ เจริญยืนยาว (2558 : บทคัดย่อ) [9] ได้ศึกษา การออกแบบสร้างระบบสุญญากาศเพื่อระบบผสมของระบบการระเหยสารด้วยความร้อนและแมกนีตรอนสปัตเตอร์ พบว่าภาชนะสุญญากาศที่ได้ทำการออกแบบสร้างมีปริมาตรภายในประมาณ 18.5 ลิตร โดยมีแปลนมาตรฐานเชื่อมต่อทั้งหมด 6 แปลน ขนาด ISO 250 160 100 และ 63 รวมถึงส่วนประกอบอื่นที่ได้ทำการออกแบบสร้างได้อาทิเช่นฝาปิดแปลนของภาชนะสุญญากาศ ข้องอ 90 องศา ตัวอุดรู ตัวล็อกฝาแปลนบน-ล่าง เป็นต้น โดยระบบที่ได้ทำการออกแบบจัดสร้างขึ้นมาสามารถสร้างค่าความดันได้ 10^{-5} torr ใช้เวลา 1 ชั่วโมง โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองเคลือบฟิล์มบางของระบบผสมของการระเหยสารด้วยความร้อนและแมกนีตรอนสปัตเตอร์ได้

สรพงษ์ นรสิงห์ สมยศ เต็นจิตเจริญ และพิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ (: บทคัดย่อ) [13] ได้ศึกษา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนฐานการค้า ระบบการเคลือบภายใต้สุญญากาศขนาดเล็กสำหรับการระเหยสารด้วยความร้อน ระบบที่สร้างขึ้นนี้ไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย (1) ปั๊มกลโรตารี 2 จังหวะ เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งปั๊มหยาบ (roughing pump) และปั๊ม ด้านท้าย (backing pump) สำหรับภาชนะสุญญากาศ (chamber) และ(2) ปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) ซึ่งเป็นปั๊มที่สามารถลดความดันให้ต่ำลงจนถึงประมาณ 10^{-7} ทอร์ จากผลการ ทดลองระบบที่สร้างขึ้นพบว่า ภาชนะสุญญากาศถูกสูบอากาศออกจากความดันบรรยากาศจนถึง ความดัน 2.2×10^{-2} ทอร์ ในเวลา 6 นาทีด้วยปั๊มกลโรตารีและสามารถลดความดันลงอย่างต่อเนื่อง จนถึง 4.5×10^{-5} ทอร์ ในเวลา 30 นาที ด้วยปั๊มแพร่ไอน้ำมัน นอกจากนี้ระบบยังได้ถูกทดสอบเพื่อทำ การเคลือบอะลูมิเนียมซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.999 % ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนขนาด 100 ด้วย แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดความต้านทานที่ทำจากทั้งสแตน โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ประมาณ 2.19 โวลต์ และ 110 แอมแปร์ ตามลำดับ พื้นผิวถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM และ AFM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

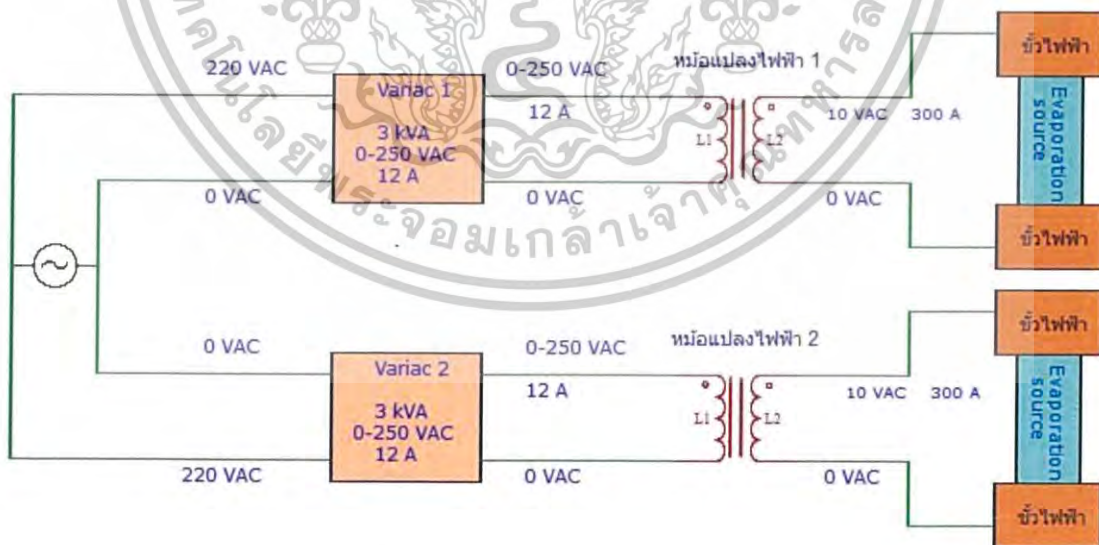
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้กับระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบ 2 แหล่งกำเนิดรวมทั้งการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ ในส่วนถัดมาจะเป็นการอธิบายถึงการทดสอบระบบระเหยสารแบบ 2 แหล่งกำเนิดโดยใช้สาร Cu และ Al โดยคาดหวังว่าจะสามารถสร้างสารประกอบ CuAl ได้

3.1 การออกแบบระบบระเหยสารด้วยความร้อน

ขั้นตอนในการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับใช้กับระบบระเหยสารด้วยความร้อนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ วงจรสำหรับระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบ 2 แหล่งกำเนิด การจัดหาอุปกรณ์สำหรับแปลงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และการออกแบบสร้างส่วนประกอบต่างๆของแหล่งกำเนิดความร้อน

3.1.1 วงจรสำหรับระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบ 2 แหล่งกำเนิด

วงจรระเหยสารประกอบไปด้วย สายไฟสำหรับวงจร หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน หม้อแปลงไฟฟ้า ขั้วสำหรับการระเหยสาร แหล่งกำเนิดการระเหยสาร ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด



รูปที่ 3.1 วงจรการระเหยสารแบบสองแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์วัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการวัดและบันทึกค่าในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าแรงดันปฐมภูมิ กระแสปฐมภูมิ แรงดันทุติยภูมิ และกระแสทุติยภูมิ เพื่อเปรียบเทียบกับระบบประเหยสารด้วยความร้อนระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยจะใช้ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ และดิจิตอลมัลติมิเตอร์

1) ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์

มิเตอร์ชนิดนี้จะถูกนำมาวัดกระแสปฐมภูมิและกระแสทุติยภูมิ เนื่องจากงานวิจัยนี้จะใช้กระแสที่สูง และดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ที่สามารถวัดกระแสได้สูงถึง 400 A ทำให้ง่ายต่อการวัดและสะดวกต่อการเปลี่ยนตำแหน่งการวัด ซึ่งดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นของบริษัท KYORITSU รุ่น KEW SNAP 200 โดยคุณสมบัติอื่นๆ ถูกแสดงในภาคผนวก ง



รูปที่ 3.2 ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ KYORITSU KEW SNAP 200

2) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

มิเตอร์ชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าปฐมภูมิและแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ เนื่องจากมัลติมิเตอร์ที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 10 A วัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600 V ไม่เหมาะกับการวัดกระแสสูงๆ จึงนำมาใช้วัดแรงดันไฟฟ้าแทน โดยงานวิจัยนี้ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์สองบริษัท คือ บริษัท KYORITSU รุ่น MODEL 1009 และ UNI-TREND รุ่น UT61B โดยคุณสมบัติอื่นๆ ถูกแสดงในภาคผนวก จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ KYORITSU MODEL 1009



รูปที่ 3.4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ UNI-TREND UT61B

3.1.3 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์

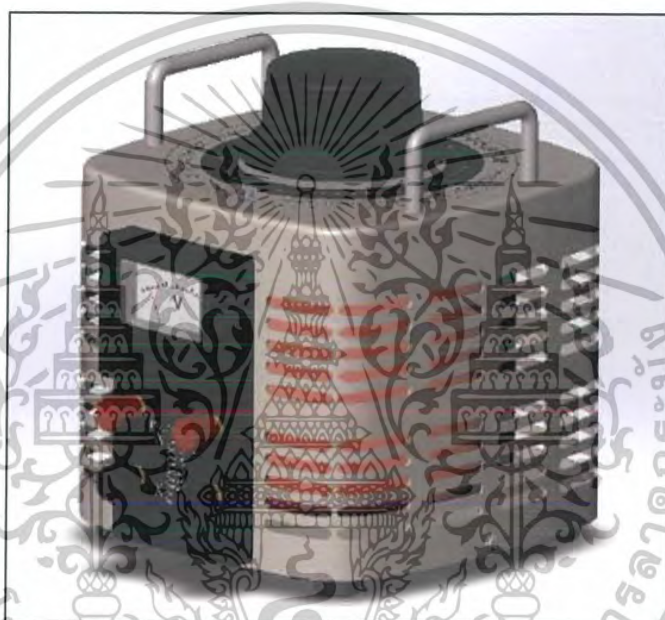
ในส่วนของวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องทำการจัดหาานั้นจะเป็นส่วนสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งจะประกอบไปด้วย 1) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน และ 2) หม้อแปลงไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน

หม้อแปลงชนิดนี้สั่งซื้อจากบริษัทสเตเบิลอิเล็กทรอนิกส์พพลาย จำกัด ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- หม้อแปลงขนาด 3 KVA
- อินพุต 220 VAC
- เอาท์พุต 0-250 VAC
- กระแสสูงสุด 12 A
- ระบบไฟฟ้า 1 เฟส
- ความถี่ 50-60 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.5 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุนออกแบบโดยโปรแกรม SolidWork

2) หม้อแปลงไฟฟ้า

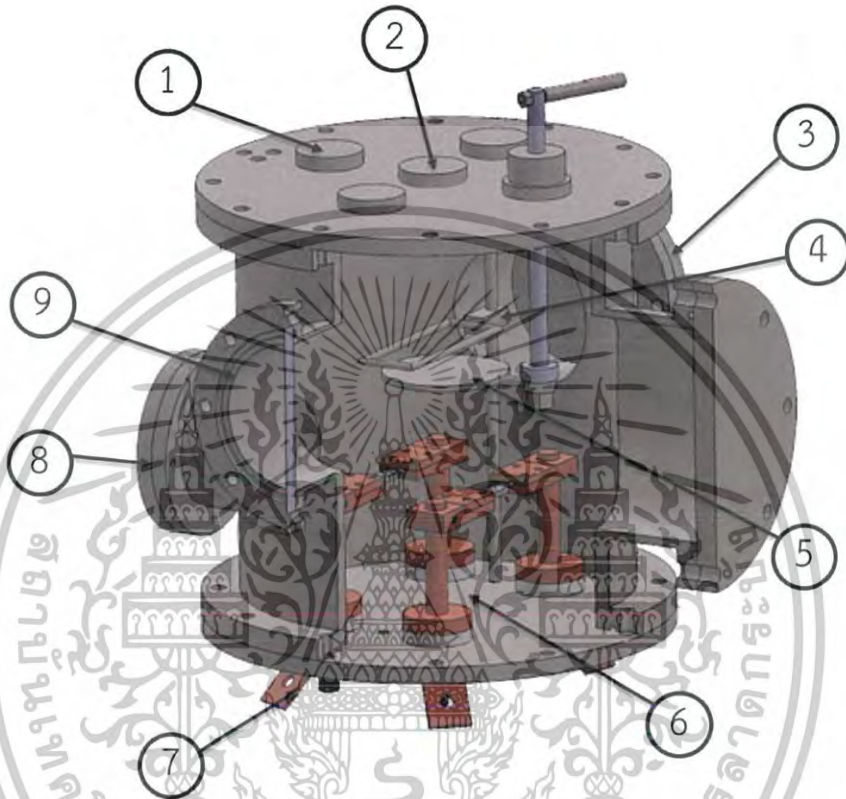
เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ step down จากบริษัทสเตเบิลอิเล็กทรอนิกส์พพลาย จำกัด มีคุณสมบัติดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3 KVA
- แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 VAC
- กระแสไฟฟ้าอินพุตสูงสุด 13.64 A
- แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุต 10 VAC
- กระแสไฟฟ้าเอาท์พุตสูงสุด 300 A
- ขนาดกว้างxสูง (228.6 mm x 190,5 mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การออกแบบส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบต่างๆของแหล่งกำเนิดการระเหยสารที่ได้ออกแบบจะถูกประกอบเข้ากับภาชนะสุญญากาศที่มีอยู่แล้วซึ่งจะต่อกับเครื่องสูบลสุญญากาศ โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ 2 ส่วน นั่นคือ ชุดแหล่งกำเนิดการระเหยสารและชุดกันการเคลือบ (shutter)

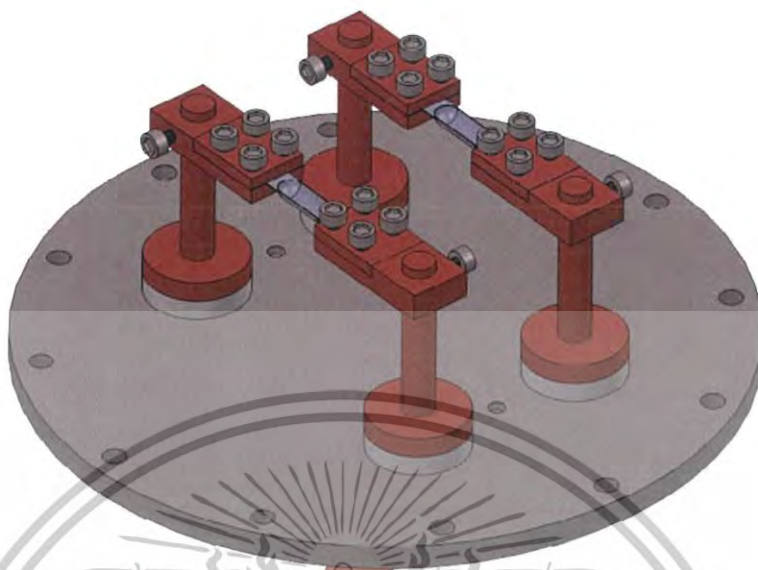


รูปที่ 3.6 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศ

- ① ช่องสำหรับต่อกับเกจวัดความดัน
- ② ช่องสำหรับต่อกับหัวแมกนีตรอนสปัดเตอริง
- ③ ช่องสำหรับต่อกับปั๊มแพร์ไอ
- ④ ฐานรองรับชิ้นงาน (substrate)
- ⑤ แผ่นกันเคลือบ
- ⑥ ชุดแหล่งกำเนิดการระเหยสาร
- ⑦ ขั้วต่อไฟฟ้า
- ⑧ ช่องสำหรับต่อกับปั๊มกล
- ⑨ หน้าต่างอะคริลิกใส

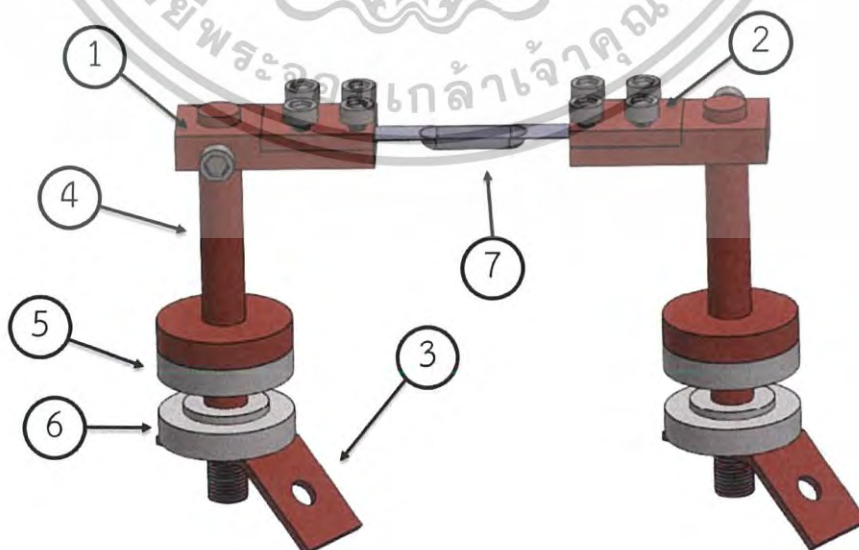
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.1 ชุดแหล่งกำเนิดการระเหยสาร



รูปที่ 3.7 ระบบระเหยสารแบบ 2 แหล่งกำเนิด

ข้อสำหรับการระเหยสารทำจากทองแดงเนื่องจากมีความต้านทานการไหลของกระแสต่ำ มีความทนทานไฟฟ้าสูง สภาพคล่องทางไฟฟ้าสูง โดยข้อสำหรับการระเหยสารจะประกอบไปด้วย ส่วนสำหรับยึดแหล่งกำเนิดการระเหยสาร เสาสำหรับนำกระแส ข้อต่อสายไฟกระแสสูง และเมื่อนำไปใช้ในระบบสุญญากาศจำเป็นต้องใช้เทฟลอนแยกข้อไฟฟ้าและกันการรั่วไหลของระบบสุญญากาศ

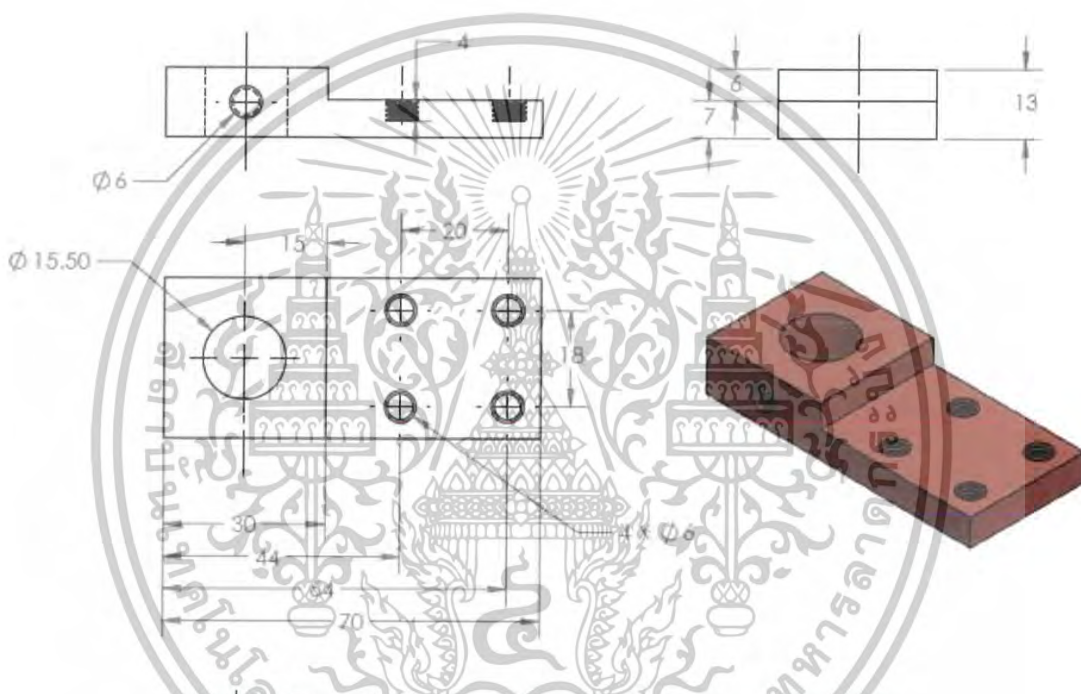


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 ข้อสำหรับการระเหยสาร

1) ตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนส่วนฐาน

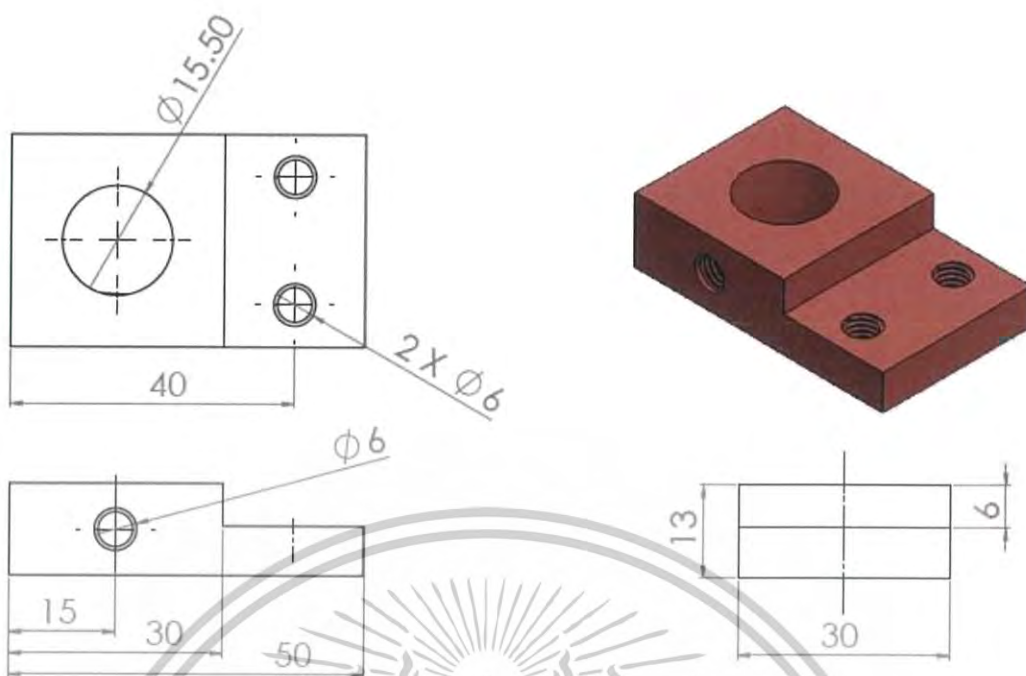
ได้ทำการออกแบบให้เป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าลักษณะเหมือนตัว L มีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร บริเวณที่ใส่เสามีความหนา 13 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.5 มิลลิเมตรเพื่อใส่กับเสาด้านข้างเจาะรูทะลุผ่านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเกลียวเพื่อที่จะใช้น็อตล็อคตัวยึดแหล่งกำเนิดไว้กับเสาที่ระดับต่างๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง บริเวณที่ใช้จับยึดแหล่งกำเนิดมีความหนา 7 มิลลิเมตร โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู ลึก 4 มิลลิเมตร ใช้วัสดุในการขึ้นรูปที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี คือ ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนฐานของตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบแรก

โดยในส่วนของตัวฐานนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเพิ่มเติมอีกหนึ่งรูปแบบคือ ตัวฐานจะมีความยาวที่สั้นลงทำให้มีระยะในการยึดจับแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระยะทางในการไหลของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยแต่เกิดความร้อนมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบแรกที่ได้ออกแบบ ซึ่งมีขนาดดังนี้ กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร บริเวณที่ใส่เสามีความหนา 13 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.5 มิลลิเมตรเพื่อใส่กับเสาด้านข้างเจาะรูทะลุผ่านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเกลียวเพื่อที่จะใช้น็อตล็อคตัวยึดแหล่งกำเนิดไว้กับเสาที่ระดับต่างๆ บริเวณที่ใช้จับยึดแหล่งกำเนิดมีความหนา 7 มิลลิเมตร โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 2 รู ลึก 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10

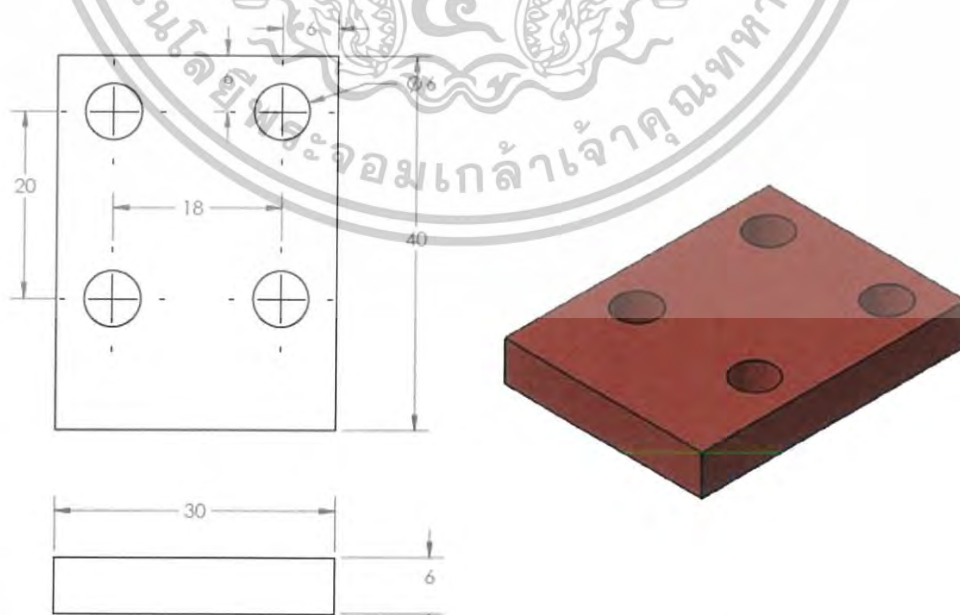
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



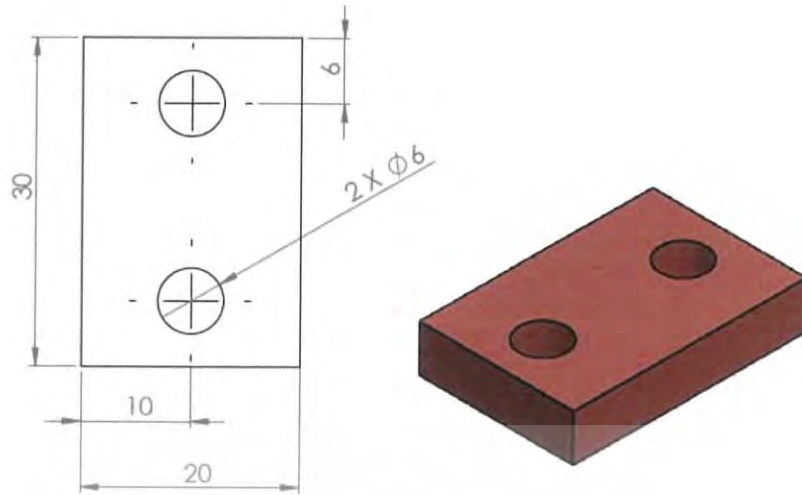
รูปที่ 3.10 แสดงส่วนฐานของตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบที่สอง

2) แผ่นประกบตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อน

ลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมแบนมีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรหนา 6 มิลลิเมตร เจาะรูทะลุแผ่นจำนวน 4 รู แต่ละรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และแบบที่สองจะถูกปรับลดให้มีความยาวเหลือ 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



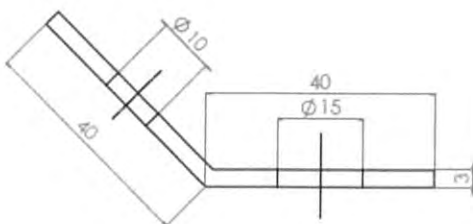
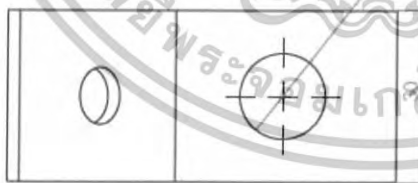
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 3.11 แสดงแผ่นประกบตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบแรก ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงแผ่นประกบตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนแบบที่สอง

3) ขั้วต่อสายไฟ

ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่งอเป็นมุม 135 องศา ขึ้นรูปจากทองแดง มีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.5 มิลลิเมตร เพื่อใส่กับเสาน้ำกระแส อีกฝั่งเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

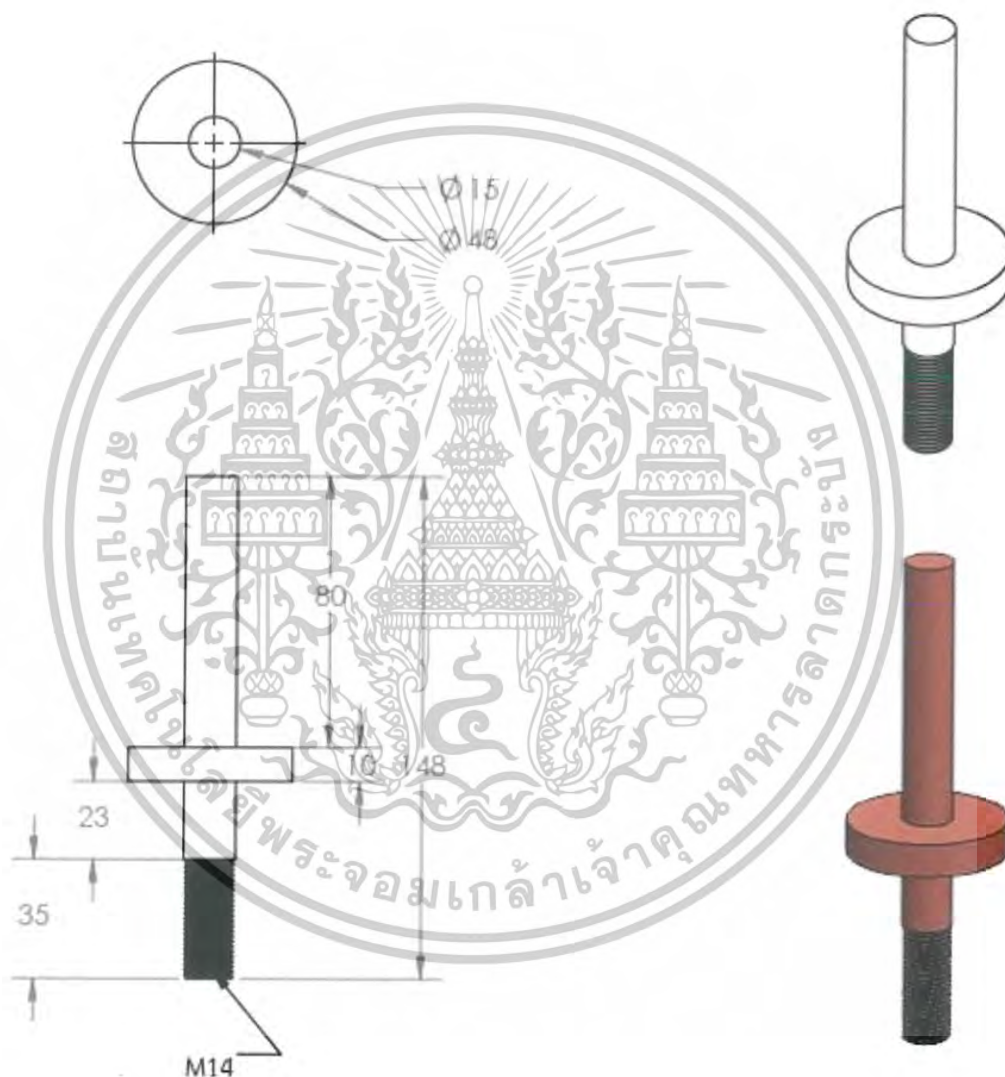


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.13 แสดงขั้วต่อสายไฟ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เสาปรับระดับตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อน

เสาปรับระดับตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อนถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกตัน ปลายท่อทั้งสองด้านมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สูงทั้งหมด 148 มิลลิเมตร ห่างจากปลายท่อไป 80 มิลลิเมตรมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหนา 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร ยื่นออกมาและปลายท่ออีกด้านทำเป็นเกลียวขนาด M14 เพื่อล๊อคติดกับภาชนะสุญญากาศ ใช้วัสดุทองแดงในการสร้าง



รูปที่ 3.14 แสดงเสาปรับระดับตัวยึดแหล่งกำเนิดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านในภาชนะสุญญากาศ

ส่วนนี้จะทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดของระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ชั้นที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 13 มิลลิเมตร ทำร่องโอรังขนาด 3 มิลลิเมตร ที่ชั้นแรกทั้งสองด้านเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศ และเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร วัสดุนี้ทำจากเทฟลอน ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า



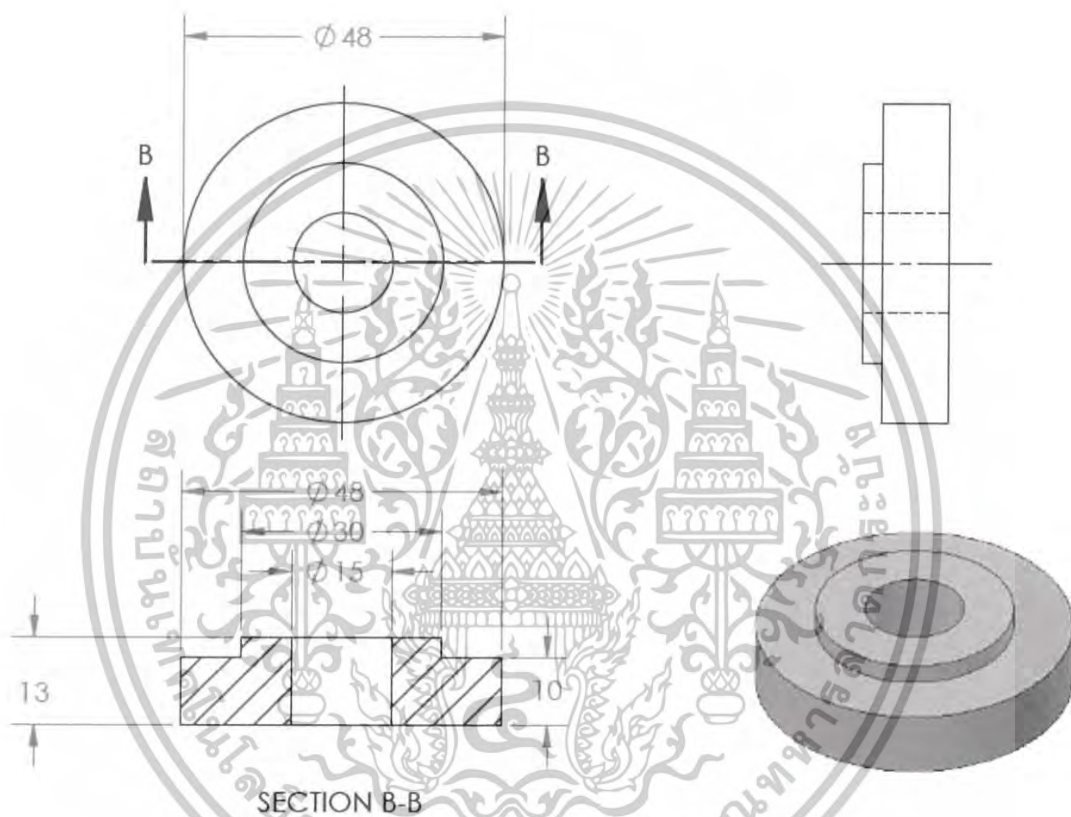
SECTION A-A

รูปที่ 3.15 ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านในภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านนอกภาชนะสุญญากาศ

ส่วนนี้จะทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าคู่กับตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านในภาชนะสุญญากาศ โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ชั้นที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 13 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร โดยส่วนนี้จะไม่ทำร่องโอรัง และวัสดุนี้ทำจากเทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 ตัวแยกขั้วไฟฟ้าด้านนอกภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) แหล่งกำเนิดการระเหยสาร

แหล่งกำเนิดการระเหยสารเป็นโพลด์สำหรับทำให้เกิดความร้อนเพื่อทำให้สารเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ทำจากทั้งสแตนเนื่องจากมีค่าความต้านทานการไหลของกระแสสูง ทนกระแส และมีจุดหลอมเหลวสูง แหล่งกำเนิดการระเหยสารที่ใช้ในการการวิจัยครั้งนี้เป็นชนิดความต้านทานแบบโบ้ท (Boat Heaters) ซึ่งมีลักษณะแบน ตรงกลางมีร่องคล้ายเรือ มีความหนา 0.010 นิ้ว กว้าง 0.5 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว ความยาวของร่อง 1.5 นิ้ว สามารถใช้งานได้ที่แรงดันสูงสุด 2.10 โวลต์ กระแส 196 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 568 วัตต์ อุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส

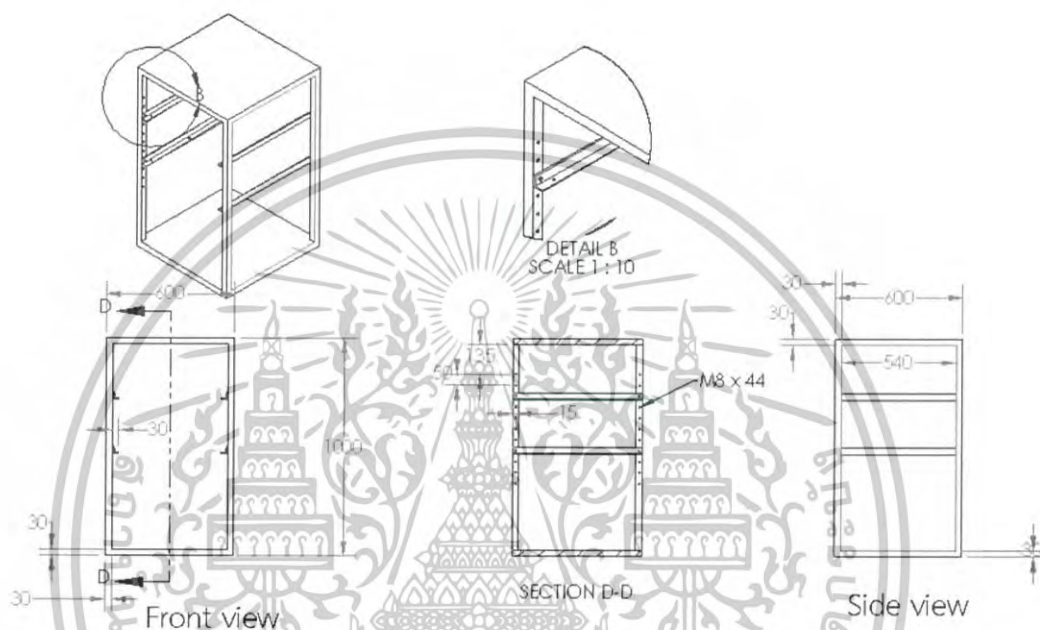


รูปที่ 3.17 แหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบโบ้ท

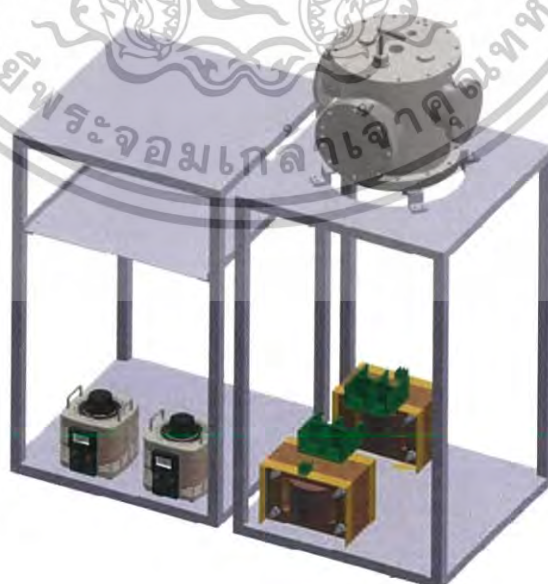
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ชั้นวางพาวเวอร์ซัพพลายและหม้อแปลงไฟฟ้า

ชั้นสำหรับวางพาวเวอร์ซัพพลายและหม้อแปลงไฟฟ้านี้ได้ออกแบบขึ้นมาเพิ่มเติมจากแบบเดิมที่มีอยู่เพื่อวางหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน และพาวเวอร์ซัพพลายสำหรับใช้งานในกระบวนการสัปดาห์ซึ่งออกแบบให้สามารถปรับระดับของชั้นวางภายในได้ โดยประกอบด้วยเหล็กฉาก 2 ชั้นและแผ่นเหล็กหนา 1 ชั้น ต่อหนึ่งชั้น มีความสูง 1000 มิลลิเมตร กว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร โดยความหนาของแกนเหล็ก 30 มิลลิเมตร วัสดุทั้งหมดทำจากเหล็กและทาสีกันสนิม



รูปที่ 3.18 ชั้นวางที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWork



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.19 แสดงตำแหน่งการวางหม้อแปลง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ทดสอบระบบ

เพื่อทดสอบระบบที่ออกแบบสร้างมา ผู้วิจัยทำการทดลองระเหย Cu และ Al เพื่อสร้างสารประกอบ CuAl ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันไป โดยหากได้สารประกอบตามที่คาดการณ์ไว้ ในอนาคตจะมีการสร้างสารประกอบจากสารชนิดอื่น เช่น Ba และ Si เป็นต้น ในการทดลองนี้จะทำการวัดผลของแรงดันปฐมภูมิ กระแสปฐมภูมิ แรงดันหุติยภูมิและกระแสหุติยภูมิ เทียบกับระบบระเหยสารเดิมที่มีอยู่ ซึ่งขั้นตอนแรกจะต้องมีการเตรียมการทดลอง เช่น การทำความสะอาด การเตรียมระบบสุญญากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสมบัติของธาตุที่คาดว่าจะนำมาทดลอง

ธาตุ	เลขอะตอม	เลขมวล	จุดหลอมเหลว	จุดเดือด	สภาพ
Cu	29	63.54	1083 °C	2595 °C	เบส
Si	14	28.086	1410 °C	2680 °C	กรดและเบส
Al	13	26.9815	660 °C	2450 °C	กรดและเบส
Ba	56	137.34	714 °C	1640 °C	เบส

3.3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดส่วนประกอบที่เป็นโลหะ

1. เตรียมสำลี ฟองน้ำ น้ำยาล้างจาน อะซิโตน เมทานอล
2. ถอดแยกชิ้นส่วนต่างๆออกจากกัน
3. สวมถุงมือและทำความสะอาดเบื้องต้น
 - 3.1. ใช้น้ำเปล่าผสมน้ำยาล้างจานล้างชิ้นส่วนต่างๆเพื่อล้างคราบไขมันออก
 - 3.2. ใช้ฟองน้ำขัดถูให้ทั่ว
 - 3.3. ใช้น้ำเปล่าล้างน้ำยาล้างจานออกให้สะอาด
 - 3.4. นำชิ้นส่วนต่างๆที่ผ่านการล้างแล้วไปผึ่งไว้ให้แห้ง
4. สวมถุงมือคู่ใหม่เพื่อป้องกันสิ่งตกค้างจากการล้างครั้งก่อนหน้า
5. ใช้น้ำยาอะซิโตนพรมให้ทั่วสำลีแล้วนำไปเช็ดชิ้นส่วนต่างๆที่ผึ่งแห้งแล้วเพื่อล้างน้ำยาล้างจานตกค้างออก
6. จากนั้นใช้เมทานอลพรมให้ทั่วสำลีแล้วนำไปเช็ดเพื่อล้างอะซิโตนออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกสไลด์

1. เตรียมสำลี ฟองน้ำ น้ำยาล้างจาน อะซิโตน เมทานอล น้ำปลอดประจุ และเครื่องอัลตราโซนิก
2. ใช้ฟองน้ำชุบน้ำยาล้างจานผสมน้ำเปล่าล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกออก
3. ล้างน้ำยาล้างจานออกด้วยน้ำเปล่า
4. นำไปสั่นในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาที
5. นำไปสั่นในเมทานอลด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาที
6. นำไปสั่นในน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
7. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. หากยังไม่นำไปใช้ทันทีให้ห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันฝุ่น



รูปที่ 3.20 เครื่องสั่นอัลตราโซนิก

3.3.3 ขั้นตอนการติดตั้งและทดลองระเหยสาร

1. ติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งกำเนิดการระเหยสารเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ
2. ต่อขั้วไฟฟ้าจากหม้อแปลงฟ้าเข้ากับขั้วต่อสายไฟของแหล่งกำเนิด
3. ใส่กระจกสไลด์เข้าไปที่แท่นวางฐานรองและปิดชัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ชุดเตอร์ถูกปิดเพื่อป้องกันการเคลือบ

4. เปิดระบบน้ำในการระบายความร้อนของปั๊มแพร่อือ
5. เปิดปั๊มกลโรตารี เปิดวาล์วปั๊มกลโรตารีไปที่ Backing 15 นาที
6. เปิดอุปกรณ์วัดความดัน
7. เปิดวาล์วของปั๊มกลโรตารีจากจาก Backing ไปที่ Roughing เพื่อสูบลอากาศออก
จากภายในภาชนะ จนได้ความดันที่ประมาณ 3.3×10^{-2} mbar
8. เปิดวาล์วปั๊มกลโรตารีไปที่ Backing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.22 วาล์ว Backing และ Roughing ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ค่อยๆเปิดวาล์ว isolate จนได้ความดันประมาณ 10^{-5} mbar



รูปที่ 3.23 การปรับวาล์ว isolate

10. ค่อยๆ ปรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนหมุนพร้อมกันทั้งสองตัวจนกระทั่งเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารในโบ๊ทให้หยุดปรับหม้อแปลงชนิดแกนหมุนของข้างนั้น



รูปที่ 3.24 แสดงแคลมป์มิเตอร์วัดกระแสขณะทำการระเหย

11. ปรับหม้อแปลงชนิดแกนหมุนเพิ่มขึ้นอีก 5-10 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใ้ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ป้เนอบอากาศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
12. เปิดชัตเตอร์ไว้ตามเวลาที่กำหนด 15 นาที แล้วปิดชัตเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงการเปิดชุดเตอร์خمะสารที่กำลังระเหย

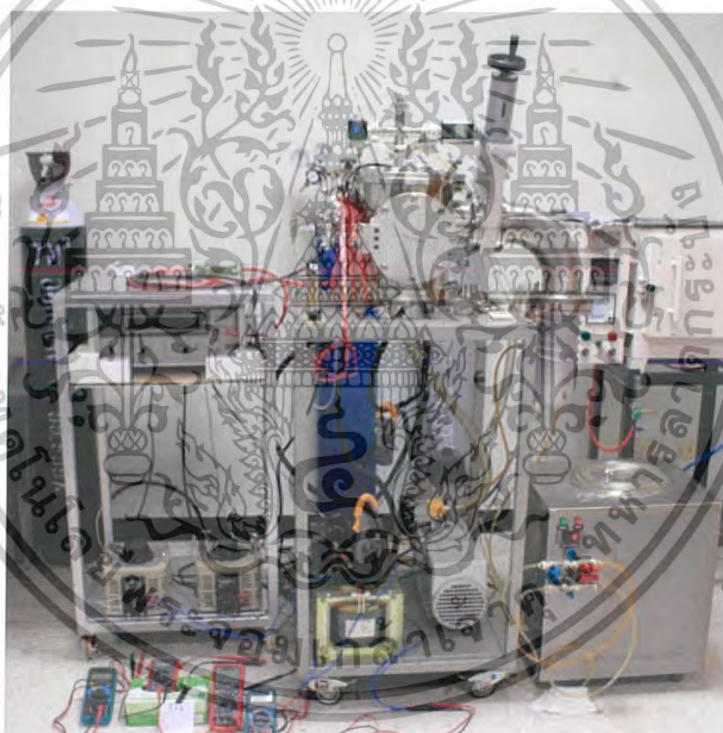
13. ปรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนหมนทั้งสองตัวมาที่ 0 V อย่างช้าๆ
14. ปิดวาล์ว isolate
15. ปิดปั๊มแพร์ไอ
16. รอจนอุณหภูมิของปั๊มแพร์ไอลดลงเหลือประมาณอุณหภูมิห้อง
17. ปิดปั๊มกลโรตารี
18. ปิดปั๊มน้ำระบายความร้อนของปั๊มแพร์ไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้จะเป็นผลจากการทดลองออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWork แล้วสั่งทำขึ้นจากโรงงาน รวมทั้งอุปกรณ์ที่ได้ทำการสั่งซื้อจากบริษัทภายนอกเพื่อนำมาประกอบเป็นระบบระเหยสารแบบสองแหล่งกำเนิด จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดที่ออกแบบเพิ่มขึ้นมาเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดเดิมและทำการสร้างสารประกอบ โดยผู้วิจัยมุ่งหวังให้ระบบที่ออกแบบสร้างมีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือมากกว่าระบบเดิมและสามารถสร้างสารประกอบจากสารสองชนิดได้ ซึ่งจากการออกแบบสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนทำให้ได้ส่วนประกอบของระบบดังนี้

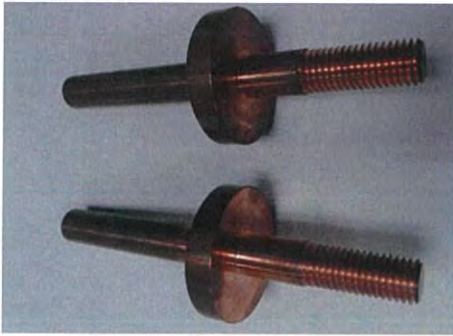


รูปที่ 4.1 แสดงระบบระเหยสารพร้อมกับเครื่องสภาวะสุญญากาศ

4.1 ชิ้นส่วนที่ออกแบบสร้าง

ทำจากทองแดงทั้งหมด ยกเว้นสกรูที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมและเทปล่อนที่ใช้แยกข้อไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดการทำปฏิกิริยาในระหว่างการทดลองระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบที่เป็นทองแดง

(ก) เสาปรับระดับตัวยึดแหล่งกำเนิด

(ข) ตัวยึดแหล่งกำเนิด



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบที่เป็นเทฟลอนและเหล็กกล้าไร้สนิม

(ก) เทฟลอนด้านในภาชนะสุญญากาศ

(ข) เทฟลอนด้านนอกภาชนะสุญญากาศ

(ค) สกรูเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหัวจม



รูปที่ 4.4 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ประกอบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงชุดแหล่งกำเนิดความร้อนทั้งสองชุด

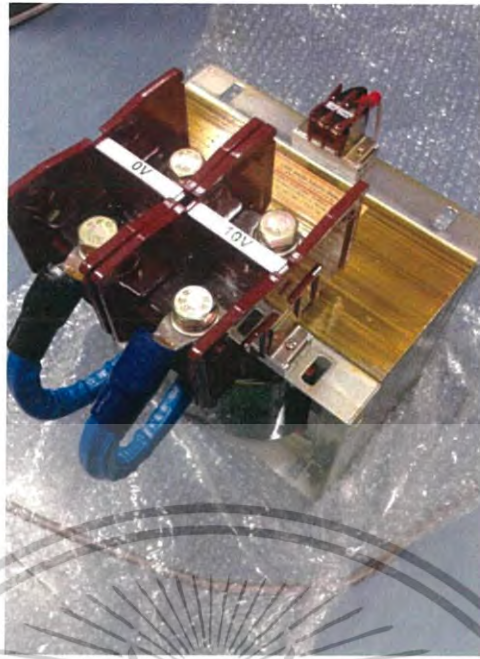
4.2 อุปกรณ์ที่จัดซื้อ



รูปที่ 4.6 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนหมุนขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัทสเตเบลอิเล็กทรอนิกส์

ชัยพลาย จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 หม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัทสเตรเบิลอิเล็กทรอนิกส์พลาย จำกัด

4.3 ผลการทดลอง

จะทำการทดลองใช้รูปแบบการวางตัวของตัวยึดแหล่งกำเนิดการระเหยสารเป็นหลัก โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบที่แตกต่างกันดังนี้



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการจัดวางตัวของยึดแหล่งกำเนิด

ก) รูปแบบที่ 1

ข) รูปแบบที่ 2

ค) รูปแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ทดลองใช้รูปแบบที่ 1 ในการระเหยสาร

จากการทดลองปรับตัวยัดแหล่งกำเนิดเป็นแบบที่ 1 ซึ่งเป็นแบบเดิมที่เคยมีผู้วิจัยไว้แล้ว จะทำการวัดประมาณแรงดันปฐมภูมิ แรงดันทุติยภูมิ กระแสปฐมภูมิ กระแสทุติยภูมิและความดันในการระเหยสาร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 รูปแบบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 1

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.130	2.200	48.600
10.000	0.224	4.600	96.900
15.000	0.446	6.400	134.600
20.000	0.641	7.700	157.400
25.000	0.801	9.400	195.600
30.000	0.982	10.900	225.800

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 1

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.153	2.000	45.200
10.000	0.299	4.000	87.600
15.000	0.462	5.500	119.800
20.000	0.653	6.500	138.100
25.000	0.863	7.500	158.600
30.000	1.070	8.100	173.400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 2

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.146	2.000	43.500
10.000	0.309	4.100	86.600
15.000	0.483	5.800	121.400
20.000	0.672	6.900	148.300
25.000	0.886	8.100	177.400
27.000	0.921	9.000	189.900
28.000	0.954	9.400	196.100

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 2

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.152	2.200	49.500
10.000	0.299	4.300	92.500
15.000	0.438	5.900	127.200
20.000	0.647	6.900	158.200
25.000	0.867	7.600	163.800
27.000	1.016	8.100	171.500
28.000	1.070	8.500	181.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

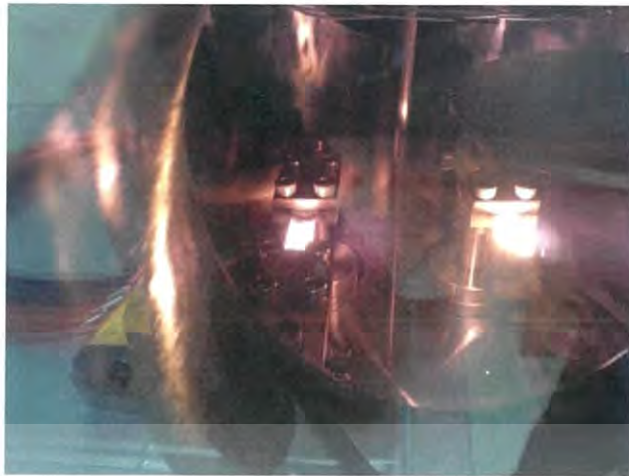
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 3

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.152	1.900	40.800
10.000	0.314	3.900	81.800
15.000	0.486	5.600	118.400
20.000	0.672	6.700	145.400
25.000	0.848	8.200	172.500
28.000	0.935	8.900	189.300
30.000	1.077	8.900	192.900
35.000	1.333	9.100	197.300

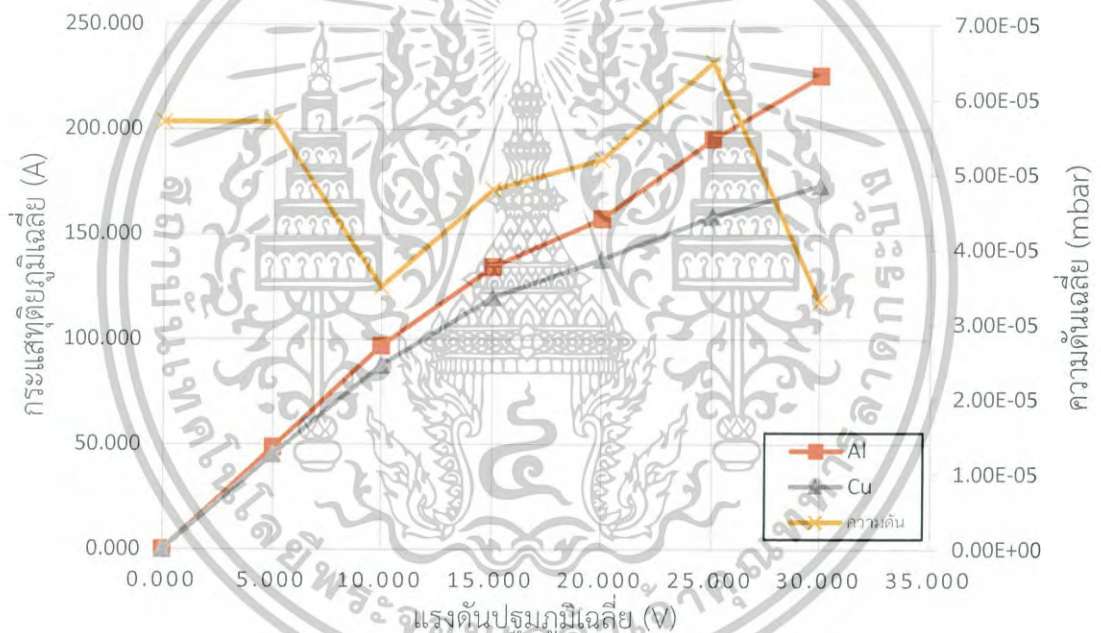
ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 3

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.158	2.200	49.300
10.000	0.289	4.200	90.200
15.000	0.439	6.000	129.000
20.000	0.615	7.100	160.400
25.000	0.868	7.600	168.500
30.000	1.089	8.400	178.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงภาพขณะระเหยสารโดยใช้รูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐุมุมิเฉลี่ยกับกระแสทุติยภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของรูปแบบที่ 1

จากรูปที่ 4.11 พบว่ารูปแบบการจัดวางตัวยึดแหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบที่ 1 มีการใช้กระแสที่สูงมาก จากกราฟความดันช่วงที่สารภายในแหล่งกำเนิดการระเหยสารมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวคือที่แรงดันปฐุมุมิประมาณ 10 โวลต์ กระแสทุติยภูมิอยู่ในช่วง 87-100 แอมแปร์ ความดันได้ลดลงอย่างรวดเร็วจาก 5.7×10^{-5} mbar เป็น 3.5×10^{-5} mbar และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อสารระเหยมากขึ้น ซึ่งเมื่อระเหยต่อไปที่แรงดันปฐุมุมิ 15 โวลต์ กราฟความดันมีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งเนื่องจากสาร Al เกิดการเปลี่ยนแปลง และความดันลดลงอีกครั้งเมื่อสารเริ่มระเหยใกล้หมดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ทดลองใช้รูปแบบที่ 2 ในการระเหยสาร

จากการทดลองปรับตัวยึดแหล่งกำเนิดเป็นแบบที่ 2 ซึ่งเป็นแบบใหม่ จะทำการวัดประมาณแรงดันปฐมภูมิ แรงดันทุติยภูมิ กระแสปฐมภูมิ กระแสทุติยภูมิและความดันในการระเหยสาร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับทั้ง 3 รูปแบบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 4

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.400	0.215	14.500
10.000	1.800	0.415	38.500
15.000	3.000	0.596	63.900
20.000	3.600	0.827	77.000
22.000	4.000	0.908	84.000
25.000	4.400	1.040	92.800

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 4

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	1.500	0.164	.5.5
10.000	3.000	0.332	65.100
15.000	3.800	0.538	81.500
17.000	3.800	0.647	81.500
20.000	4.300	0.795	92.200
25.000	4.900	0.999	103.900
27.000	5.200	1.088	108.700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 5

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.176	1.300	31.200
10.000	0.372	2.700	58.200
15.000	0.577	3.500	75.200
20.000	0.792	4.300	90.600
25.000	1.032	4.800	101.200
30.000	1.246	5.400	112.300

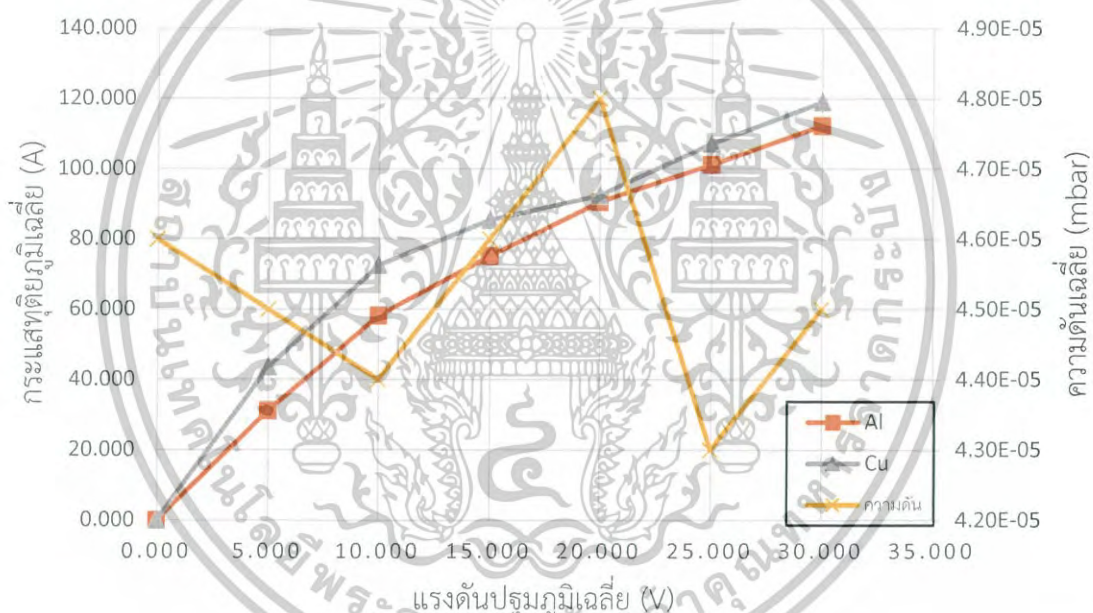
ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 5

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.174	2.000	43.600
10.000	0.339	3.300	72.500
15.000	0.559	4.000	85.400
20.000	0.765	4.500	92.400
25.000	0.988	5.000	107.100
30.000	1.214	5.600	119.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงภาพการระเหยสารด้วยรูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐุมภูมิเฉลี่ยกับกระแสทุติยภูมิเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยของรูปแบบที่ 2

จากรูปที่ 4.12 พบว่ารูปแบบการจัดวางตัวยึดแหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบที่ 2 มีการใช้กระแสต่ำกว่าแบบที่ 1 จากกราฟความดันช่วงที่สารภายในแหล่งกำเนิดการระเหยสารมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวคือที่แรงดันปฐุมภูมิประมาณ 10 โวลต์ กระแสทุติยภูมิอยู่ในช่วง 58-73 แอมแปร์ ความดันได้ลดลงอย่างรวดเร็วจาก 4.6×10^{-5} mbar เป็น 4.4×10^{-5} mbar และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อสารระเหยมากขึ้น ซึ่งเมื่อระเหยต่อไปที่แรงดันปฐุมภูมิ 20 โวลต์ ความดันลดลงอย่างรวดเร็วมาที่ 4.3×10^{-5} mbar เนื่องจากสาร Al เริ่มระเหยหมดและยังคงเหลือ Cu ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ทดลองใช้รูปแบบที่ 3 ในการระเหยสาร

จากการทดลองปรับตัวยัดแหล่งกำเนิดเป็นแบบที่ 3 ซึ่งเป็นแบบใหม่ จะทำการวัด ปริมาณแรงดันปฐมภูมิ แรงดันทุติยภูมิ กระแสปฐมภูมิ กระแสทุติยภูมิและความดันในการระเหย สาร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 รูปแบบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 6

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.144	1.900	42.700
10.000	0.333	3.200	69.500
15.000	0.549	4.000	86.300
20.000	0.779	4.800	103.100
25.000	0.971	5.500	115.100
30.000	1.192	6.100	128.600
35.000	1.397	6.600	140.300

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 6

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.150	1.900	42.100
10.000	0.338	3.100	66.000
15.000	0.555	3.800	81.100
20.000	0.813	4.500	95.600
25.000	0.982	5.100	108.100
30.000	1.242	5.600	119.300
35.000	1.215	5.700	120.700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

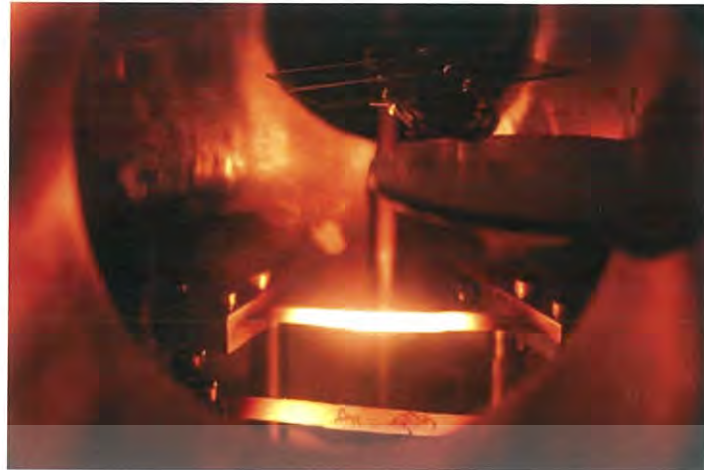
ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Al ครั้งที่ 7

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.183	2.000	28.300
10.000	0.634	2.500	53.700
15.000	0.561	3.400	75.100
20.000	0.772	4.300	89.700
25.000	0.976	5.000	105.000
30.000	1.181	6.000	123.800
35.000	1.393	6.700	137.400

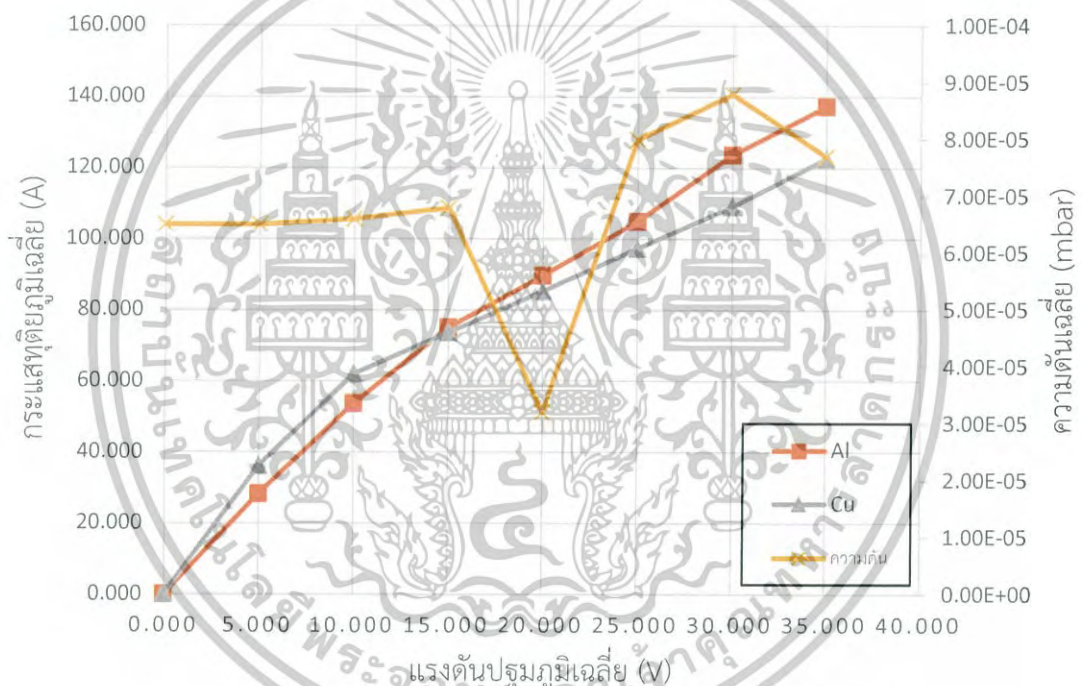
ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณกระแสและแรงดันที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดการระเหยสาร Cu ครั้งที่ 7

แรงดันปฐมภูมิ (V)	แรงดันทุติยภูมิ (V)	กระแสปฐมภูมิ (A)	กระแสทุติยภูมิ (A)
0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	0.209	2.100	36.100
10.000	0.392	2.800	62.000
15.000	0.597	3.400	73.700
20.000	0.825	3.900	85.300
25.000	1.037	4.500	97.300
30.000	1.240	5.000	109.100
35.000	1.467	5.700	122.600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงภาพการระเหยสารด้วยรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนกับกระแสและความดันของรูปแบบที่ 3

จากรูปที่ 4.13 พบว่ารูปแบบการจัดวางตัวยึดแหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบที่ 3 มีการใช้กระแสน้อยกว่าแบบที่ 1 แต่มากกว่าแบบที่ 2 จากกราฟความดันสารเริ่มมีการระเหิดโดยที่ยังไม่กลายเป็นของเหลวที่แรงดันป้อนตั้งแต่ 5 โวลต์ขึ้นไปจนถึง 15 โวลต์และลดลงอย่างรวดเร็วจาก 6.8×10^{-5} mbar เป็น 3.2×10^{-5} mbar ที่แรงดันป้อนประมาณ 20 โวลต์ กระแสอยู่ที่ 80-90 แอมแปร์ จากนั้นความดันได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจากการระเหยของทั้งสองสาร และช่วงแรงดันป้อนอยู่ที่ 25-30 โวลต์ สาร Al เริ่มระเหยหมดตามด้วย Cu จากนั้นความดันเริ่มลดลงไม่วากรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของหม้อแปลงก่อนการระเหยสารของทั้ง 3 รูปแบบ

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หม้อแปลง 1 (Al)	หม้อแปลง 2 (Cu)	variac 1 (Al)	variac 2 (Cu)
แบบที่ 1	27.68	27.68	27.68	27.68
แบบที่ 2	27.72	27.75	27.85	27.85
แบบที่ 3	27.12	27.00	27.57	27.63

ตารางที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของหม้อแปลงระหว่างการระเหยสารของทั้ง 3 รูปแบบ

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	หม้อแปลง 1 (Al)	หม้อแปลง 2 (Cu)	variac 1 (Al)	variac 2 (Cu)
แบบที่ 1	35.80	38.80	30.60	33.50
แบบที่ 2	33.60	36.10	41.20	43.30
แบบที่ 3	34.30	37.50	39.80	42.70

4.3.4 ลักษณะชิ้นงานที่ได้



รูปที่ 4.15 แสดงภาพชิ้นงานที่ถูกเคลือบ

- (ก) ชิ้นงานที่เคลือบด้วยรูปแบบที่ 1
- (ข) ชิ้นงานที่เคลือบด้วยรูปแบบที่ 2
- (ค) ชิ้นงานที่เคลือบด้วยรูปแบบที่ 3

รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบ Al และ Cu ด้วยการระเหยสารด้วยความร้อนจากแหล่งกำเนิดทั้งสองอัน ในรูป (ก) เคลือบโดยการจัดวางแหล่งกำเนิดในรูปแบบที่ 1 (ข) เคลือบโดยการจัดวางแหล่งกำเนิดในรูปแบบที่ 2 และ(ค) เคลือบโดยการจัดวางแหล่งกำเนิดในรูปแบบที่ 3 โดยทั้ง 3 แบบ พบว่าได้ฟิล์มบางของการผสมกันระหว่าง Al และ Cu เคลือบบนกระจกอย่างชัดเจนและมีความมันวาวสม่ำเสมอ จากผลการทดสอบการทดลองที่ได้แสดงให้เห็น

ว่า แหล่งกำเนิดที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถใช้ในการระเหยสาร 2 ชนิดได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยออกแบบสร้างระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มีสองแหล่งกำเนิด ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบสร้างส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับระบบระเหยสาร อาทิเช่น ชั้นวางหม้อแปลงและพาวเวอร์ซัพพลาย เสาปรับระดับแท่นยึดแหล่งกำเนิด แท่นยึดแหล่งกำเนิด ตัวแยกขั้วไฟฟ้า เป็นต้น โดยใช้วัสดุที่เป็นทองแดง เหล็กกล้าไร้สนิม และเทพลอนซึ่งสามารถหาได้ภายในประเทศรวมถึงการจัดซื้ออุปกรณ์ต่างๆเพื่อนำมาใช้กับระบบระเหยสาร ได้แก่ หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน หม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งนี้ผู้วิจัยได้รับมาซึ่งอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบและจัดสร้างเสร็จสมบูรณ์ดังต่อไปนี้

- I. เสานำกระแสสำหรับระเหยสาร จำนวน 2 เสา
- II. เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้า จำนวน 4 ชั้น
- III. แท่นจับยึดแหล่งกำเนิด จำนวน 2 ชุด
- IV. ชั้นวางหม้อแปลงและพาวเวอร์ซัพพลาย 1 ชุด
- V. ขั้วต่อสายไฟ จำนวน 2 ชุด

และในส่วนของอุปกรณ์ที่จัดซื้อได้แก่

- I. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน ขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัท สเตเบิล อิเล็กทริก ซัพพลาย จำกัด
- II. หม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 3000 โวลต์-แอมแปร์ จากบริษัท สเตเบิล อิเล็กทริก ซัพพลาย จำกัด

จากนั้นผู้วิจัยทำการประกอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดเข้าด้วยกัน ทดลองระเหยสาร CuAl เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งใช้ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงแผ่นรองรับอยู่ในช่วง 6-10 เซนติเมตร เวลาในการระเหยอยู่ในช่วง 5-30 นาที โดยจากการทดลอง ได้ฟิล์ม CuAl ไปยึดติดบนกระจกจากการจัดวางแหล่งกำเนิดทั้ง 3 แบบ ซึ่งยืนยันได้ว่า แหล่งกำเนิดที่ออกแบบสร้างขึ้นมา สามารถใช้ในการระเหยสาร 2 ชนิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- I. นำฟิล์มที่เคลือบได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์
- II. ควรควบคุมตัวแปรต่างๆ ในระหว่างการเคลือบ อาทิเช่น เวลาในการเคลือบ และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดถึงแผ่นรองรับ
- III. ขี้ของระบบระเหยสารสามารถปรับระยะได้ ควรศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างของฟิล์มเมื่อปรับระยะของขี้
- IV. เพิ่มเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในระบบสุญญากาศเพื่อทำการวัดอุณหภูมิของโบทที่ใช้ระเหยสาร
- V. ออกแบบสร้างฐานวางชิ้นงานสำหรับระบบระเหยสารด้วยความร้อนแบบเฉพาะ ซึ่งอาจจะมีซีตเตอร์อยู่ในตัวเพื่อง่ายต่อการทำการทดลอง
- VI. ออกแบบสร้างภาชนะสุญญากาศที่เหมาะสมกับการระเหยสารแบบสองแหล่งกำเนิด โดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอยู่ด้วยและสามารถใส่ฐานวางชิ้นงานแบบมีซีตเตอร์ในตัวได้อย่างพอดี
- VII. ทดลองระเหยสารใหม่ที่ยังไม่เคยทดลอง เช่น $BaSi_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รวีวรรณ เฉลียวพงษ์. 2558. “การออกแบบวงจรสำหรับระเหยสารในระบบสุญญากาศ.” ปรินญา วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] สุรสิงห์ ไชยคุณ และนิรันดร์ วิทอนันต์. 2558. เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ. มหาวิทยาลัยบูรพา. สืบค้นจาก: http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files//2559_004
- [3] พงศภัค สิทธิมาตร และณัฐฐาทิพย์ ป่าธนู. 2557. “การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ขนาดเล็กและลักษณะเฉพาะของหัว.” ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] K. B. Ucer. (6 มีนาคม 2560). Vacuum Evaporation. [Online]. Available : http://users.wfu.edu/ucerkb/Nan242/L06-Vacuum_Evaporation.pdf
- [5] ณปภัช พิมพ์ดี. (6 มีนาคม 2560). กฎของแก๊ส. [Online]. Available : [http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2142-%E0%B8%81%E0%B8%8E%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%AA+\(Gas+Law\)?groupid=342](http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2142-%E0%B8%81%E0%B8%8E%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%AA+(Gas+Law)?groupid=342)
- [6] มหาวิทยาลัยสยาม. (9 กุมภาพันธ์ 2560). บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ. [Online]. Available : http://www.research-system.siam.edu/images/coop/INSTALLATION_AND_MAINTENANCE_TRANSFORMERS_OF_THE_PROVINCIAL/ch2.pdf.
- [7] วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด. (9 กุมภาพันธ์ 2560). บทที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้า. [Online]. Available : http://www.retc.ac.th/v3/kru_pitoon/2/10.doc.
- [8] TARAD.com. (9 กุมภาพันธ์ 2560). CLAMP METER. [Online]. Available : http://img.tarad.com/shop/m/meterandinstruments/imglib/con_20140321143209_u.pdf.
- [9] ปัญญา สิงห์คา และพีรศิลป์ เจริญยาว. 2558. “การออกแบบสร้างระบบสุญญากาศเพื่อระบบผสมของระบบการระเหยสารด้วยความร้อนและแมกนีตรอนสปัตเตอร์.” ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] กมลธร ปุณยวุฒิวานิชย์, ศรายุทธ จันทโสตา และนายสกุลไทย คหิฎฐา. 2551. “การพัฒนาเครื่องระเหยสารอินทรีย์ในระบบสุญญากาศ.” ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ประสพพร จุลบุตร์ และรัศมีรักษ์ หนุณรงค์. 2551. “ระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยด้วยอัลตราโซนิก.” ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] เกียรติพงษ์ ได้การ. (6 มีนาคม 2560). X-ray Diffractometer XRD. [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html>
- [13] สรพงษ์ นรสิงห์, สมยศ เด่นจิตเจริญ และพิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. ม.ป.ป. “ศึกษาระบบการเคลือบภายใต้สุญญากาศขนาดเล็กสำหรับการระเหยสารด้วยความร้อน.” ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [14] ฟิสิกส์ราชมงคล.(6 มีนาคม 2560).การระเหย. [Online]. Available : www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/2/3/gas/gas/data5.htm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงขนาดและคุณสมบัติต่างๆของสายไฟกระแสสูงไทยยาคากิ



0.6/1KV-CV						IEC 60502-1				
0.6/1 kV 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED PVC SHEATHED POWER CABLE										
CABLE STRUCTURE						TECHNICAL DATA				
Conductor : Concentric Stranded and compacted round annealed copper Single-core : Sizes 1.5 mm ² up to 1,000 mm ² Multi-cores : Sizes 1.5 mm ² up to 400 mm ² Insulation : Cross-linked Polyethylene (XLPE) Core identification Single-core : Natural (Translucent) 2 Cores : Blue and Brown 3 Cores : Brown, Black and Grey 4 Cores : Blue, Brown, Black and Grey Other colors are available on customer request Sheath : Black polyvinyl chloride (PVC/ST2)						Classification : Maximum conductor temperature 90°C : Circuit voltage not exceeding 1,200 Volts Rated voltage (U ₀ /U) 0.6/1 kV : 600 Volts between Line-to-Earth : 1,000 Volts between Line-to-Line Testing voltage : 3,500 Volts Reference standard : IEC 60502-1, IEC 60228, IEC 60332-1				
APPLICATION										
Use for installation in open tray, conduit, underground duct trench or direct burial in ground, at wet or dry location.										
Number of core	Nominal cross sectional area	Number of wires minimum	Insulation thickness nominal	Sheath thickness nominal	Overall diameter approx.	Conductor resistance at 20°C maximum	Insulation resistance at 20°C minimum	Continuous current rating in free air maximum	Cable weight approx.	Standard length
	(mm ²)									
1	1.5	7/0.53	0.7	1.4	6.3	12.1	2,500	31	50	500/D
	2.5	7/0.67	0.7	1.4	6.8	7.41	2,100	42	60	500/D
	4	7/0.85	0.7	1.4	7.3	4.61	1,700	55	80	500/D
	6	7/1.04	0.7	1.4	7.9	3.08	1,450	69	100	500/D
	10	6	0.7	1.4	8.4	1.83	1,250	93	140	500/D
	16	6	0.7	1.4	9.4	1.15	1,000	123	200	500/D
	25	6	0.9	1.4	11.0	0.727	1,050	164	300	500/D
	35	6	0.9	1.4	12.0	0.524	900	202	400	500/D
	50	6	1.0	1.4	13.5	0.387	850	245	500	500/D
	70	12	1.1	1.4	15.0	0.268	800	309	750	500/D
	95	15	1.1	1.5	17.5	0.193	650	383	1,000	500/D
	120	18	1.2	1.5	19.0	0.153	650	446	1,200	500/D
	150	18	1.4	1.6	21	0.124	700	510	1,500	500/D
	185	30	1.6	1.6	23	0.0991	700	591	1,900	500/D
	240	34	1.7	1.7	26	0.0754	650	705	2,500	500/D
	300	34	1.8	1.8	29	0.0601	600	814	3,100	500/D
	400	53	2.0	1.9	32	0.0470	600	950	3,900	500/D
500	53	2.2	2.0	36	0.0366	600	1,111	5,000	500/D	
630	53	2.4	2.2	40	0.0283	550	1,293	6,500	500/D	
800	53	2.6	2.3	45	0.0221	550	1,486	8,500	300/D	
1,000	53	2.8	2.4	51	0.0176	500	1,701	10,500	300/D	


D : Packing in drum

THAI-YAZAKI

B54

Low Voltage Power Cables

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6/1KV-CV		IEC 60502-1			
0.6/1 KV 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED PVC SHEATHED POWER CABLE					
					
CONDUCTOR		INSULATION		SHEATH	
CABLE STRUCTURE			TECHNICAL DATA		
Conductor : Concentric Stranded and compacted round annealed copper Single-core : Sizes 1.5 mm ² up to 1,000 mm ² Multi-cores : Sizes 1.5 mm ² up to 400 mm ² Insulation : Cross-linked Polyethylene (XLPE) Core identification Single-core : Natural (Translucent) 2 Cores : Blue and Brown 3 Cores : Brown, Black and Grey 4 Cores : Blue, Brown, Black and Grey Other colors are available on customer request Sheath : Black polyvinyl chloride (PVC/ST2)			Classification : Maximum conductor temperature 90°C : Circuit voltage not exceeding 1,200 Volts Rated voltage (U_p/U) 0.6/1 kV 600 Volts between Line-to-Earth 1,000 Volts between Line-to-Line Testing voltage : 3,500 Volts Reference standard : IEC 60502-1, IEC 60228, IEC 60332-1		
APPLICATION					
Use for installation in open tray, conduit, underground duct trench or direct burial in ground, at wet or dry location.					
Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	A.C. Resistance R (Ω/km)	Inductance L (mH/km)	Reactance XL (Ω/km)	Impedance Z (Ω/km)
1	1.5	15.4287	0.6005	0.1572	15.4295
	2.5	9.4485	0.4665	0.1466	9.4496
	4	5.8782	0.4339	0.1363	5.8798
	6	3.9273	0.4103	0.1289	3.9295
	10	2.3335	0.3916	0.1230	2.3367
	16	1.4665	0.3670	0.1153	1.4710
	25	0.9272	0.3540	0.1112	0.9338
	35	0.6684	0.3410	0.1070	0.6769
	50	0.4938	0.3300	0.1037	0.5046
	70	0.3423	0.3200	0.1005	0.3567
	95	0.2469	0.3120	0.0982	0.2657
	120	0.1981	0.3070	0.0965	0.2185
	150	0.1594	0.3070	0.0965	0.1863
	185	0.1279	0.3050	0.0958	0.1598
	240	0.0983	0.3000	0.0943	0.1362
	300	0.0793	0.2970	0.0934	0.1225
	400	0.0633	0.2950	0.0927	0.1122
	500	0.0510	0.2920	0.0914	0.1050
	630	0.0415	0.2900	0.0911	0.1001
	800	0.0348	0.2870	0.0903	0.0967
	1,000	0.0303	0.2830	0.0889	0.0939


Laying Type : Touching

THAI-YAZAKI

B55

Low Voltage Power Cables

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


0.6/1KV-CV		IEC 60502-1			
0.6/1 kV 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED PVC SHEATHED POWER CABLE					
					
CONDUCTOR		INSULATION		SHEATH	
CABLE STRUCTURE			TECHNICAL DATA		
Conductor : Concentric Stranded and compacted round annealed copper Single-core : Sizes 1.5 mm ² up to 1,000 mm ² Multi-cores : Sizes 1.5 mm ² up to 400 mm ² Insulation : Cross-linked Polyethylene (XLPE) Core identification Single-core : Natural (Translucent) 2 Cores : Blue and Brown 3 Cores : Brown, Black and Grey 4 Cores : Blue, Brown, Black and Grey Other colors are available on customer request Sheath : Black polyvinyl chloride (PVC/ST2)			Classification : Maximum conductor temperature 90°C : Circuit voltage not exceeding 1,200 Volts Rated voltage (U_0/U) 0.6/1 kV 600 Volts between Line-to-Earth 1,000 Volts between Line-to-Line Testing voltage : 3,500 Volts Reference standard : IEC 60502-1, IEC 60228, IEC 60332-1		
APPLICATION					
Use for installation in open tray, conduit, underground duct trench or direct burial in ground, at wet or dry location.					
Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	A.C. Resistance R (Ω/km)	Inductance L (mH/km)	Reactance XL (Ω/km)	Impedance Z (Ω/km)
1	1.5	15.4287	0.6391	0.2008	15.4300
	2.5	9.4485	0.6051	0.1901	9.4500
	4	5.9782	0.5726	0.1799	5.8810
	6	3.9273	0.5489	0.1724	3.9311
	10	2.3335	0.5302	0.1666	2.3394
	16	1.4664	0.5056	0.1589	1.4750
	25	0.9271	0.4930	0.1547	0.9399
	35	0.6683	0.4790	0.1506	0.6851
	50	0.4937	0.4690	0.1473	0.5152
	70	0.3420	0.4590	0.1441	0.3711
	95	0.2465	0.4510	0.1417	0.2844
	120	0.1957	0.4460	0.1400	0.2406
	150	0.1588	0.4460	0.1400	0.2117
	185	0.1272	0.4440	0.1394	0.1887
	240	0.0973	0.4390	0.1379	0.1688
	300	0.0781	0.4360	0.1369	0.1576
	400	0.0618	0.4330	0.1362	0.1496
	500	0.0490	0.4310	0.1353	0.1439
	630	0.0390	0.4290	0.1347	0.1402
	800	0.0318	0.4260	0.1338	0.1375
	1,000	0.0268	0.4210	0.1324	0.1351

Laying type : Spacing

THAI-YAZAKI**B56**

Low Voltage Power Cables

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6/1KV-CV		IEC 60502-1				
0.6/1 kV 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED PVC SHEATHED POWER CABLE						
						
CABLE STRUCTURE		TECHNICAL DATA				
Conductor : Concentric Stranded and compacted round annealed copper Single-core : Sizes 1.5 mm ² up to 1,000 mm ² Multi-cores : Sizes 1.5 mm ² up to 400 mm ² Insulation : Cross-linked Polyethylene (XLPE) Core identification Single-core : Natural (Translucent) 2 Cores : Blue and Brown 3 Cores : Brown, Black and Grey 4 Cores : Blue, Brown, Black and Grey Other colors are available on customer request Sheath : Black polyvinyl chloride (PVC/ST2)		Classification : Maximum conductor temperature 90°C : Circuit voltage not exceeding 1,200 Volts Rated voltage (U_0/U) 0.6/1 kV 600 Volts between Line-to-Earth 1,000 Volts between Line-to-Line Testing voltage : 3,500 Volts Reference standard : IEC 60502-1, IEC 60228, IEC 60332-1				
APPLICATION						
Use for installation in open tray, conduit, underground duct trench or direct burial in ground, at wet or dry location.						
Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	A.C. Resistance		Inductance	Reactance	Impedance
		R (Ω/km)	L (mH/km)	XL (Ω/km)	Z (Ω/km)	
1	1.5	15.4287	0.4542	0.1427	15.4294	
	2.5	9.4485	0.4203	0.1320	9.4494	
	4	5.8782	0.3877	0.1218	5.8795	
	6	3.9273	0.3640	0.1144	3.9280	
	10	2.3335	0.3453	0.1085	2.3360	
	16	1.4685	0.3208	0.1008	1.4699	
	25	0.9272	0.3080	0.0967	0.9322	
	35	0.6684	0.2950	0.0926	0.6748	
	50	0.4938	0.2840	0.0892	0.5018	
	70	0.3423	0.2740	0.0860	0.3529	
	95	0.2469	0.2660	0.0836	0.2607	
	120	0.1961	0.2610	0.0820	0.2125	
	150	0.1594	0.2610	0.0819	0.1792	
	185	0.1279	0.2590	0.0813	0.1516	
	240	0.0983	0.2540	0.0798	0.1266	
	300	0.0793	0.2510	0.0788	0.1118	
400	0.0633	0.2490	0.0781	0.1006		
500	0.0501	0.2460	0.0772	0.0925		
630	0.0415	0.2440	0.0766	0.0871		
800	0.0348	0.2410	0.0757	0.0834		
1,000	0.0303	0.2370	0.0743	0.0803		

Laying Type : Trefoil

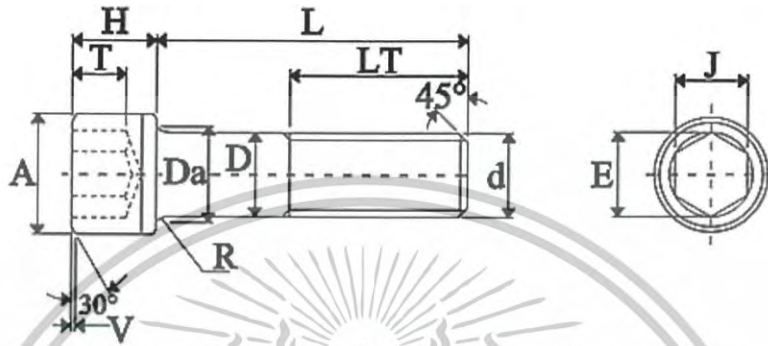
THAI-YAZAKI**B57**

Low Voltage Power Cables

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผู้วิจัยใช้สกรูแบบ HEXAGON SOCKET HEAD CAP SCREWS



Unit : mm

Thread Size(d)	Thread Pitch	D		A		R		V		J	E	T	R	Da
		Nominal Size	Min. Max.	Nominal Size	Min. Max.	Nominal Size	Min. Max.	Tolerance	Approx.					
M3	0.5	3	2.86 5.5	5.32	3	2.86	0.3	2.5	+0.080 +0.020	2.87	1.3	0.10	3.6	
M4	0.7	4	3.82 7.0	6.78	4	3.82	0.4	3.0	+0.080 +0.020	3.44	2.0	0.20	4.7	
M5	0.8	5	4.82 8.5	8.28	5	4.82	0.5	4.0	+0.095 +0.020	4.58	2.5	0.20	5.7	
M6	1.0	6	5.82 10.0	9.78	6	5.70	0.6	5.0	+0.140 +0.020	5.72	3.0	0.25	6.8	
M8	1.25	8	7.78 13.0	12.73	8	7.64	0.8	6.0	+0.140 +0.020	6.86	4.0	0.40	9.2	
M10	1.5	10	9.78 16.0	15.73	10	9.64	1.0	8.0	+0.175 +0.025	9.15	5.0	0.40	11.2	
M12	1.75	12	11.73 18.0	17.73	12	11.57	1.2	10.0	+0.175 +0.025	11.43	6.0	0.60	13.7	
M14	2.0	14	13.73 21.0	20.67	14	13.57	1.4	12.0	+0.212 +0.032	13.72	7.0	0.60	15.7	
M16	2.0	16	15.73 24.0	23.67	16	15.57	1.6	14.0	+0.212 +0.032	16.00	8.0	0.60	17.7	
M18	2.5	18	17.73 27.0	26.67	18	17.57	1.8	14.0	+0.212 +0.032	16.00	9.0	0.60	20.2	
M20	2.5	20	19.67 30.0	29.67	20	19.48	2.0	17.0	+0.230 +0.050	19.44	10.0	0.80	22.4	
M22	2.5	22	21.67 33.0	32.61	22	21.48	2.2	17.0	+0.230 +0.050	19.44	11.0	0.80	24.4	
M24	3.0	24	23.67 36.0	35.61	24	23.48	2.4	19.0	+0.275 +0.065	21.73	12.0	0.80	26.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดการระเหยสารแบบโบ๊ทชนิดต่างๆ ของบริษัท
Kurt J. Lesker



Ordering Table

Description	Thickness Size	No. Per Pack	Dim A (in.)	Dim B (in.)	Dim C (in.)	Volt	Amps	Watts	Temp.	PartNo
Molybdenum Narrowed	0.005"	5	1-1/2	4	1/2	1.84	81	149	1400°C	EVS20A005MO
Tantalum Narrowed	0.005"	5	1-1/2	4	1/2	3.40	94	320	1600°C	EVS20A005TA
Tungsten Narrowed	0.005"	5	1-1/2	4	1/2	3.95	140	533	1800°C	EVS20A005W
Molybdenum Narrowed	0.010"	5	1-1/2	4	1/2	1.27	129	164	1400°C	EVS20A010MO
Tantalum Narrowed	0.010"	5	1-1/2	4	1/2	2.61	129	337	1600°C	EVS20A010TA
Tungsten Narrowed	0.010"	5	1-1/2	4	1/2	2.90	196	568	1800°C	EVS20A010W
Tungsten Narrowed	0.015"	5	1-1/2	4	1/2	2.10	250	525	1800°C	EVS20A015W
Description	Thickness Size	No. Per Pack	Dim A (in.)	Dim B (in.)	Dim C (in.)	Volt	Amps	Watts	Temp.	PartNo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

แคลมป์มิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรุ่น KEW SNAP 200 ของบริษัท KYORITSU โดยมีคุณสมบัติดังนี้



KEW SNAP 200	
AC A	40.00/400.0A ±2.0%rdg±6dgt(50/60Hz)
AC V	400.0/600V(Auto-ranging) ±2.0%rdg±5dgt(50/60Hz)
DC V	400.0/600V(Auto-ranging) ±1.5%rdg±5dgt
Ω	400.0/4000N(Auto-ranging) ±2.0%rdg±5dgt
Continuity buzzer	buzzer sounds below 50±35N
Conductor size	Φ30mm max.
Applicable standards	IEC 61010-1 CAT." 300V(ACA), CAT.I 600V Pollution degree 2 IEC 61010-031, IEC61010-2-032, IEC61326-1
Power source	R03(1.5V)(AAA) x 2 *Continuous measuring time:approx.200 hours(Auto power save: approx.10 minutes)
Dimensions	184(L) x 68.6(W) x 38.5(D)mm
Weight	Approx. 190g(including batteries)
Accessories	R03(AAA) x 2, Instruction manual
Optional	9105(Carrying case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรุ่น MODEL 1009 ของบริษัท KYORITSU โดยมีคุณสมบัติดังนี้



1009	
DC V	400mV/4/40/400/600V(Input impedance 10MΩ) ±0.6%rdg±4dgt(400mV/4/40/400V) ±1.0%rdg±4dgt(600V)
AC V	400mV/4/40/400/600V(Input impedance 10MΩ) ±1.6%rdg±4dgt(20~400mV) ±1.3%rdg±4dgt(4/40V) ±1.6%rdg±4dgt(400/600V)
DC A	400/4000 A/40/400mA/4/10A ±2.0%rdg±4dgt(400/4000 A) ±1.0%rdg±4dgt(40/400mA) ±1.6%rdg±4dgt(4/10A)
AC A	400/4000 A/40/400mA/4/10A ±2.6%rdg±4dgt(400/4000 A) ±2.0%rdg±4dgt(40/400mA/4/10A)
Ω	400Ω/4/40/400kΩ/4/40MΩ ±1.0%rdg±4dgt(400Ω/4/40/400kΩ/4MΩ) ±2.0%rdg±4dgt(40MΩ)
Continuity buzzer	400Ω(Buzzer sounds below 70Ω)
Diode test	1.5V Release Voltage ; Approx. 0.4mA test current
Capacitance test	40/400nF/4/40/100 F
Frequency	5.12/51.2/512Hz/5.12/51.2/512kHz/5.12/10MHz (Input sensitivity Current:more than 200 A;~10kHz) Voltage:more than 1.5V[~10kHz] Hz:more than 1.5V[~1MHz], 2V[>1MHz])
DUTY	0.1~99.9%(Pulse width/Pulse period) ±2.5%±5dgt
Withstand voltage	3700V AC for 1 minute
Applicable standards	IEC 61010-1 CAT. III 300V IEC 61010-031 IEC 61326-1
Power source	R6P(1.5V) × 2 (Auto power off : approx. 30 minutes)
Dimensions	155(L) × 75(W) × 33(D)mm
Weight	260g approx.
Accessories	7210A(Test leads) 8919(Ceramic fuse[10A/600V]) × 1 8923(Fuse[0.5A/600V]) × 1 R6P × 2 Instruction manual

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรุ่น UT61B ของบริษัท UNI-TREND โดยมีคุณสมบัติ
ดังนี้



SPECIFICATIONS

Basic Functions	Range	Best Accuracy
DC Voltage	40mV/400mV/4V/40V/400V/1000V	±(0.5%+1)
AC Voltage	40mV/400mV/4V/40V/400V/750V	±(1.0%+3)
AC Current	400μA/4000μA/40mA/400mA/4A/10A	±(1.2%+5)
DC Current	400μA/4000μA/40mA/400mA/4A/10A	±(1.0%+2)
Resistance	400Ω/4kΩ/40kΩ/400kΩ/4MΩ/40MΩ	±(1.0%+2)
Capacitance	40nF/400nF/4μF/40μF/400μF/4000μF	±(3.0%+5)
Frequency	10Hz-10MHz	±(0.1%+4)
Frequency Response	0.1-100kHz	45-400Hz
Duty Cycle	0.1%~99.9%	✓
Temperature (°C)	-40°C~1000°C	±(1.2%+3)
Temperature (°F)	-40°F~1832°F	±(1.2%+4)
Special Functions		
Auto/Manual Ranging		✓
Diode		✓
Continuity Buzzer		✓
Data Hold		✓
Max/Min Mode		✓
Display Backlight		✓
REL		✓
Sleep Mode	Around 15 Minutes	✓
Analogue Bar Graph	41	✓
RS232		✓
Input Protection		✓
Input Impedance for DC Voltage Measurement	Around 10MΩ	✓
Low Battery Display	≤7.5V	✓
Max Display	4000	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL CHARACTERISTICS

Power	9V Battery (6F22)
LCD Size	65 x 43mm
Product Colour	Red and Grey
Product Net Weight	370g
Product Size	180 x 87 x 47mm
Standard Accessories	Battery, Test Lead, English Manual, Multi-Purpose Socket RS232 Interface Cable, Software, Point Contact Temperature Probe
Optional Accessories*	USB Interface Cable
Standard Individual Packing	Gift Box
Standard Quantity Per Carton	20pcs
Standard Carton Measurement	465 x 335 x 345mm (0.054 CBM Per Standard Carton)
Standard Carton Gross Weight	12kg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้