การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง สำหรับการสังเคราะห์วัสดุ

DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE VACUUM FURNACE FOR MATERIAL SYNTHESIS

ณัฐชยา เต่าพรมห์

ณัฐพร ไชยสายัณห์

ธิดาพร เรืองสุข

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง สำหรับการสังเคราะห์วัสดุ

DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE VACUUM FURNACE FOR MATERIAL SYNTHESIS

ณัฐชยา เต่าพรมห์
ณัฐพร ไชยสายัณห์
ธิดาพร เรืองสุข

b.0026582l
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE VACUUM FURNACE OR MATERIAL SYNTHESIS

NATCHAYA TAOPROM
NATTAPORN CHAISAYAN
THIDAPORN RUEANGSUK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OFTHE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงสำหรับการสังเคราะห์วัสดุ Development of High Temperature Vacuum Furnace for Material Synthesis
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐชยา เต่าพรมห์ รหัสนักศึกษา55051492 นางสาวณัฐพร ไชยสายัณท์ รหัสนักศึกษา55051494 นางสาวธิดาพร เรืองสุข รหัสนักศึกษา55051514
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ กรรมการ	
ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงสำหรับการสังเคราะห์วัสดุ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐชยา เต่าพรมห์ รหัสนักศึกษา 55051492
	นางสาวณัฐพร ไชยสายัณห์ รหัสนักศึกษา 55051494
	นางสาวธิดาพร เรืองสุข รหัสนักศึกษา 55051514
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการสังเคราะห์วัสดุ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ คือ 1) เพื่อออกแบบและติดตั้งระบบสุญญากาศ (ห้องสุญญากาศ, โรตารี่ปั๊ม และดิฟฟิวชันปั๊ม เป็นต้น) 2) เพื่อสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบด้วย วาริแอค, เอสซีอาร์, เทอร์โมคัปเปิล และเครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดตั้งโปรแกรมได้ 3) เพื่อติดตั้งระบบหล่อเย็นสำหรับห้องสุญญากาศ, ขั้วไฟฟ้า และดิฟฟิวชันปั๊ม จากนั้นทำการทดสอบทั้ง 3 ระบบที่พัฒนาแล้วเพื่อจัดทำรายละเอียดของเตาเผา ห้องสุญญากาศสามารถทำความดันได้ต่ำสุดที่ 1.6 มิลลิบาร์ โดยใช้เพียงโรตารี่ปั๊มเท่านั้น ซึ่งปัญหาของการรั่วไหล เกิดจากการกัดกร่อนของภาชนะสุญญากาศ เตาเผาสุญญากาศสามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 530 องศาเซลเซียส เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 575 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิเป็นความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง ระบบหล่อเย็นมีประสิทธิภาพสูงในการระบายความร้อนให้กับภาชนะสุญญากาศและขั้วไฟฟ้า โดยอุณหภูมิของเตาเผาสังเกตได้จากกล้องถ่ายภาพแบบอินฟาเรด ที่วัดอุณหภูมิได้ 40 องศาเซลเซียส ขณะใช้งานที่ 500 องศาเซลเซียส ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของเตาเผาสุญญากาศในการสังเคราะห์วัสดุ

คำสำคัญ : การสังเคราะห์วัสดุ เตาเผาสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of High Temperature Vacuum Furnace for Material Synthesis
Student	Miss Natchaya Taoprom Student ID 55051492
	Miss Nattaporn Chaisayan Student ID 55051494
	Miss Thidaporn Rueangsuk Student ID 55051514
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Dr.Aparporn Sakulkalavek

Abstract

In this project, the high temperature vacuum furnace was developed for a material synthesis. The objectives of this study were (i) designed vacuum component and installed vacuum system (vacuum chamber, rotary pump, and diffusion pump etc.), (ii) created temperature control system, consisting of variac, SCR, thermocouple, and temperature controller (iii) set up cooling system for vacuum chamber, heater electrodes, and diffusion pump. Their three developed systems were tested for doing the specifications. The vacuum chamber has a minimum pressure of 1.6 mbar by using only rotary pump. A problem of vacuum leakage was found due to the chamber corrosion. The vacuum furnace can rises the temperature up to 530 ^{o}C using a constant current of 575 A within 30 minutes. The relationship between the electrical current and temperature is linearly equation. The cooling system has a high performance to cold the chamber and heater electrodes. The temperature of the furnace, observed by IR camera, is below 40 ^{o}C during the operation temperature at 500 ^{o}C. These results show the efficiency of vacuum furnace for material synthesis.

Keywords : Material synthesis, Vacuum furnace

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเรื่อง การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงสำหรับการสังเคราะห์วัสดุเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก ผู้ที่ให้ความรู้ คำแนะในการนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้โครงงานพิเศษเล่มนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบพระคุณ ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การชี้แนะแนวทางต่างๆ ในการแก้ปัญหา การตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบต่างๆ ในระหว่างการทำงานของโครงงานพิเศษนี้ เพื่อให้โครงงานนี้ประสบผลสำเร็จสามารถนำมาใช้งานและพัฒนาต่อไปได้

ขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับอุปกรณ์ในการวิจัยและพัฒนาระบบของโครงงานพิเศษนี้ จนโครงงานพิเศษนี้สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจและใช้ทำการศึกษาวิจัยต่อ

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากโครงงานพิเศษนี้ คณะผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาความรู้ด้วยความรักและเมตตา

ณัฐชยา เต่าพรมห์
ณัฐพร ไชยสายัณห์
ธิดาพร เรืองสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูงประเภทต่างๆ	4
2.1.1 เตาถ่านธรรมดาแบบดั้งเดิม	4
2.1.2 เตาถ่านหิน	4
2.1.3 เตาน้ำมัน	4
2.1.4 เตาแก๊ส	5
2.1.5 เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง	5
2.1.6 เตาไฟฟ้า	6
2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ	9
2.2.1 เอสซีอาร์ (SCR)	9
2.2.2 ฮีตเตอร์ (Heater)	13
2.2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	21
2.2.4 การควบคุมแบบพีไอดี (PID)	26
2.3 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	32
2.3.1 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	32
2.3.2 เกจวัดความดัน (Pressure gauge)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบชิลเลอร์ (Chiller)	51
2.4.1 ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ หรือ Air Cooled Chiller	52
2.4.2 ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หรือ Water Cooled Chiller	54
2.4.3 ชิลเลอร์แบบดูดซึม หรือ Absorption Chiller	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	62
3.1 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	62
3.1.1 ปั๊มสุญญากาศ	63
3.1.2 การออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติม	64
3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ	64
3.1.2 การออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติม	65
3.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า	66
3.2.3 เทอร์โมคัปเปิล	66
3.2.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	67
3.2.5 เอสซีอาร์	68
3.2.6 วงจรควบคุมอุณหภูมิ	70
3.3 ระบบหล่อเย็น	70
3.3.1 ชิลเลอร์น้ำเย็น	71
3.3.2 ปั๊มน้ำ	72
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	74
4.1 ห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	74
4.1.1 ห้องสุญญากาศ	75
4.1.2 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	76
4.1.3 ขั้นตอนการสร้างสภาวะสุญญากาศ	77
4.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ	78
4.2.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power	80
4.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ	86
4.3 ระบบหล่อเย็น	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	2
2.1	แสดงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ	23
2.2	แสดงตัวอย่างช่วงการใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	23
2.3	แสดงผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบ PID ต่อการตอบสนองของระบบ	32
2.4	แสดงคุณสมบัติของ Diffusion pump fluids บางชนิด	44
3.1	แสดงคุณสมบัติของปั๊มน้ำที่ใช้	73
4.1	แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศตามรูปที่ 4.6	81
4.2	แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศตามรูปที่ 4.9	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวให้ความร้อน	7
2.2	แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์เป็นตัวให้ความร้อน	8
2.3	แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อแกรไฟต์เป็นตัวให้ความร้อน	9
2.4	แสดงโครงสร้างวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์	9
2.5	แสดงการจุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแส	10
2.6	แสดงการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี Anode Current Interruption	11
2.7	แสดงการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี Forced Commutation	12
2.8	แสดงการนำเอสซีอาร์ไปใช้ในการเปิด–ปิดหลอดไฟ	12
2.9	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ต้มน้ำยาเคมี	14
2.10	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ฮอตรันเนอร์	14
2.11	แสดงลักษณะของเซรามิคฮีตเตอร์	15
2.12	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์แท่ง	15
2.13	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ต้มน้ำแบบจุ่ม	16
2.14	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์อินฟาเรด	16
2.15	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์แผ่น	17
2.16	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์บอบบิ้น	17
2.17	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ทิวบูลาร์	18
2.18	แสดงลักษณะของเซอร์คูเรชั่นฮีตเตอร์	18
2.19	แสดงลักษณะของคอยล์ฮีตเตอร์	19
2.20	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์รัดท่อ	19
2.21	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ควอตซ์	20
2.22	แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ครีบ	20
2.23	แสดงการประยุกต์ใช้เทอร์โมคัปเปิลอย่างง่าย	21
2.24	แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ	22
2.25	แสดงเทอร์โมคัปเปิลรูปแบบต่างๆ	25
2.26	แสดงกราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)	27
2.27	แสดงกราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_d คงที่)	28
2.28	แสดงกราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)	29
2.29	แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.30	แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองของระบบ	31
2.31	แสดงส่วนประกอบหลัก Rotary Piston pump	33
2.32	แสดงการทำงานของ Rotary Piston Mechanical Pump	34
2.33	แสดง Rotary Vane, Oil–sealed Mechanical pump	35
2.34	แสดงส่วนประกอบ Rotary Vane, Oil–sealed Mechanical pump	36
2.35	แสดงสภาวะก๊าซจาก Vacuum chamber เข้าสู่ Inlet port	36
2.36	แสดงฟิล์มบางของน้ำมันทำหน้าที่ Seal	37
2.37	แสดงการใช้ในระบบสุญญากาศ Rotary piston pump, Rotary Oil–seal mechanical pump	38
2.38	แสดง Diffusion pump	39
2.39	แสดงองค์ประกอบ Diffusion pump	40
2.40	แสดง Fractionation	41
2.41	แสดง Back streaming	42
2.42	แสดงการบำรุงรักษา Diffusion pump	45
2.43	แสดง Baffles และ Traps	46
2.44	แสดงการทำงาน Baffles และ Traps	46
2.45	แสดงการทำงานของ Cryotrap	47
2.46	แสดงพิสัยของความดันสำหรับแต่ละชนิดของเกจทำงาน	48
2.47	แสดง Bourdon gauge	49
2.48	แสดงชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	52
2.49	แสดงหลักการทำงานของระบบทำน้ำเย็นชนิด Air Cooled Chiller	52
2.50	แสดงระบบการทำงานของระบบทำน้ำเย็นชนิด Air Cooled Chiller	53
2.51	แสดงชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	54
2.52	แสดงระบบการทำงานของชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	55
2.53	แสดงชิลเลอร์แบบดูดซึมชนิดต่างๆ	56
2.54	แสดงหลักการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม	58
2.55	แสดงวงจรการทำงานของระบบ Single Effect Absorption Refrigeration	58
2.56	แสดงวงจรการทำงานของระบบ Double Effect Absorption Refrigeration	60
3.1	แสดงลักษณะของห้องสุญญากาศ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.2	แสดงโรตารี่ปั๊มและดิฟฟิวชันที่ใช้ในงาน	63
3.3	แสดงแผนผังการต่อระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	63
3.4	แสดงการออแบบส่วนประกอบที่ได้ทำการออกแบบเพิ่มเติม	64
3.5	แสดงโครงสร้างของเตาเผาสุญญากาศ	65
3.6	แสดงลักษณะของลวดความร้อน	65
3.7	แสดงลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้	66
3.8	แสดงลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งาน	66
3.9	แสดงตำแหน่งการนำไปใช้งานของเทอร์โมคัปเปิล	67
3.10	แสดงชุดควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งาน	67
3.11	แสดงลักษณะของเอสซีอาร์ที่ใช้	68
3.12	แสดงแผนภาพวงจรจำลองการใช้งานเอสซีอาร์ เพื่อควบคุมการทำงานของลวดความร้อน	69
3.13	แสดงการต่อวงจรจำลองการใช้งานเอสซีอาร์ เพื่อควบคุมการทำงานของลวดความร้อน	69
3.14	แสดงแผนผังการต่อวงจรควบคุมอุณหภูมิ	70
3.15	แสดงแผนผังของระบบชิลเลอร์	71
3.16	แสดงชิลเลอร์น้ำเย็นที่ใช้ในงาน	71
3.17	แสดงปั๊มน้ำที่ใช้ในงาน	72
3.18	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของปั๊มน้ำที่ใช้	72
4.1	แสดงโครงสร้างของห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	74
4.2	แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ของห้องสุญญากาศ	75
4.3	แสดงส่วนประกอบและตำแหน่งของระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ	76
4.4	แสดงแผงผังควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิ	78
4.5	แสดงรูปถ่ายแผงควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิ	80
4.6	แสดงแผนผังส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power	81
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac	82
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศ กับกระแสไฟฟ้าขาออกจาก Variac	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	แสดงแผนผังส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power	83
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac	84
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศ กับกระแสไฟฟ้าขาออกจาก Variac	85
4.12	แสดงแผนผังการต่อการใช้งานของ Temperature controller	86
4.13	แสดงส่วนประกอบของระบบหล่อเย็น	88
4.14	แสดงแผนผังทางเดินน้ำของระบบหล่อเย็น	89
4.15	แสดงภาพถ่ายจากกล้องเทอร์โมสแกนที่อุณหภูมิห้อง	90
4.16	แสดงภาพถ่ายจากกล้องเทอร์โมสแกนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
SCR	เอสซีอาร์ หรือซิลิคอน คอนโทรล เร็คติไฟร์เออร์
IC	วงจรรวม
I_G	กระแสเกต
I_B	กระแสเบส
I_C	กระแสคอลเลคเตอร์
I_A	กระแสแอโนด
TR	ทรานซิสเตอร์
I_H	กระแสโฮลดิ้ง
S	สวิตซ์
A	แอโนด
K	แคโทด
G	เกต
VDC	หน่วยของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
PID	สัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์
MV(t)	ผลรวมสัญญาณขาออก
P_{out}	สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
I_{out}	สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
D_{out}	สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
K_p	อัตราขยายสัดส่วน หรือตัวแปรปรับค่าได้
K_i	อัตราขยายปริพันธ์ หรือตัวแปรปรับค่าได้
K_d	อัตราขยายอนุพันธ์ หรือตัวแปรปรับค่าได้
e(t)	ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา
$e(\tau)$	ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา
u(t)	ผลรวมสัญญาณขาออก
T_r	ช่วงเวลาขึ้น
T_p	เวลาของค่ายอด
M_p	โอเวอร์ชูตสูงสุด
T_s	เวลาเข้าที่
cfm	ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
rpm	รอบต่อนาที
psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
TC	เทอร์โมคัปเปิล
CFC	คลอโรฟลูออโรคาร์บอน
RT	1 ตันความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การให้ความร้อนกับวัสดุมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการกำจัดความชื้น สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆ หรือใช้เพื่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ นอกจากนี้ยังใช้เพื่อหลอมวัสดุนั้นได้อีกด้วย ในอดีตนั้นการให้ความร้อนจะใช้เตาเผา ซึ่งมีลักษณะรูปแบบที่ไม่มีฉนวนมาหุ้มกันความร้อน และยังใช้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ไม้ฟืน ทำให้ต้องมีการจัดหาทรัพยากรธรรมชาติมาเป็นเชื้อเพลิง และเนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง การใช้งานของเตาเผาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ และก่อให้เกิดมลภาวะต่ออากาศและสภาพแวดล้อมขึ้น อีกทั้งเตาเผาความร้อนดังกล่าวมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่คงที่ ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยนำลวดความร้อนมาเป็นแหล่งให้ความร้อนแทนเชื้อเพลิง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน ซึ่งทำให้ลวดความร้อนนั้นผลิตความร้อนออกมาให้แก่เตาเผา ทั้งนี้วิธีดังกล่าวจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและสิ่งแวดล้อม และยังมีการประยุกต์ใช้ฉนวนความร้อนเพื่อให้สามารถผลิตเตาความร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 1500 องศาเซลเซียส ได้ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้งานเตาความร้อนอุณหภูมิสูงกับงานบางชนิดจำเป็นต้องกระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะเกิดกับลวดความร้อนและวัสดุที่ต้องการเผา

ในปัจจุบันเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงจะมีราคาที่สูงซึ่งอยู่ในหลักล้านถึงสิบล้านบาท จึงทำให้มีการสนับสนุนงบวิจัยในการสร้างองค์ความรู้ จนสามารถประดิษฐ์เตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงได้เอง ซึ่งที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีภาชนะสุญญากาศที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงได้ โครงงานพิเศษนี้จึงได้สนใจและออกแบบระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็น เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง และนำไปใช้กับงานวิจัยอื่นๆ อันจะก่อให้เกิดประโยชน์กับภาควิชาฟิสิกส์และผู้สนใจต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบความคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็นให้กับเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาระบบและการทำงานของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง
2) ออกแบบห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ เพื่อให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน
3) ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดตั้งโปรแกรมข้อมูลได้และนำอุปกรณ์โซลิดสเตทมาทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิสูง
4) ออกแบบระบบหล่อเย็นให้กับภาชนะสุญญากาศ ขั้วไฟฟ้า และดิฟฟิวชันปั๊ม เพื่อช่วยระบายความร้อนในขณะใช้งาน

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ช่วงระยะเวลา									
	พ.ศ. 2558					พ.ศ. 2559				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาระบบและขั้นตอนการทำงานของระบบเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง	←	—	→							
ออกแบบระบบเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง			←	—	→					
จัดซื้ออุปกรณ์การสร้างเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง					←	—	—	→		
ทดสอบระบบการติดตั้งไฟฟ้า						←	→			
ทดสอบระบบทางเดินน้ำ							←	→		
ทดสอบระบบสภาวะสุญญากาศ								←	→	
ติดตั้งระบบเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ทดลองและวิเคราะห์ผลจากการทดลอง								←	—	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เข้าใจหลักการทำงานของระบบเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง
2) สามารถปรับระดับความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศในขณะใช้งาน
3) สามารถควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุปกรณ์โซลิดสเตทมาทำเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์
4) สามารถหล่อเย็นภาชนะสุญญากาศ ขั้วไฟฟ้า และดิฟฟิวชันปั๊ม เพื่อช่วยระบายความร้อนในขณะใช้งาน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูงประเภทต่างๆ

เตาที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีความหลากหลาย แต่ละประเภทมีลักษณะและการทำงานที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิทำงานที่แตกต่างกัน การพัฒนาเตาเผาให้ความร้อนชนิดต่างๆ เริ่มจากเตาถ่านไม้โกงกาง เตาถ่านโคก เตาน้ำมัน เตาแก๊ส และเตาไฟฟ้า โดยในปัจจุบันนี้นิยมใช้เตาไฟฟ้ามากที่สุด เพราะมีความสะดวกในการควบคุมระดับความร้อนที่สม่ำเสมอ (คงที่) สามารถกำหนดเวลาที่ต้องการได้แน่นอนกว่าเตาชนิดอื่นๆ

2.1.1 เตาถ่านธรรมดาแบบดั้งเดิม

เป็นเตาที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมครัวเรือน เตาเผาให้ความร้อนนี้จะต้องใช้ไฟแรงมาก ดังนั้น จึงต้องอาศัยเครื่องเป่าลมเข้าไปในเตา เพื่อช่วยให้ไฟติดดีและแรงถ่านที่ใช้จะเป็นถ่านไม้โกงกางจุดไฟอยู่ในเตา บริเวณปากเตาซึ่งจะใส่เบ้าทนไฟเข้าไปทำการเผา เวลาที่เป่าลมเข้าไปในเตาไฟจะแรงจนเกิดประกายไฟพุ่งออกมา

2.1.2 เตาถ่านหิน

ถ่านหินถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีแหล่งสำรองกระจายอยู่ทั่วโลกและปริมาณค่อนข้างมาก การขุดถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และถ่านหินราคาถูกกว่าน้ำมัน ถ่านหินส่วนใหญ่จึงถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้หม้อน้ำร้อนในกระบวนการผลิต เช่น การผลิตไฟฟ้าการถลุงโลหะ, การผลิตปูนซีเมนต์, การบ่มใบยาสูบ และการผลิตอาหาร เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น การทำถ่านสังเคราะห์ (Activated carbon) เพื่อดูดซับกลิ่น การทำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งแต่มีน้ำหนักเบา และการแปรสภาพถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Coal liquefaction) หรือเป็นแปรสภาพก๊าซ (Coal gasification) ซึ่งเป็นการใช้ถ่านหินแบบเชื้อเพลิงสะอาดเพื่อช่วยลดมลภาวะจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง ภายใต้กระบวนการแปรสภาพถ่านหิน จะสามารถแยกเอาก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นพิษ และสารพลอยได้ต่างๆ ที่มีอยู่ในถ่านหินนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น กำมะถันใช้ทำกรดกำมะถัน และแร่ยิปซัม แอมโมเนียใช้ทำปุ๋ยเพื่อเกษตรกรรม เถ้าถ่านหินใช้ทำวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

2.1.3 เตาน้ำมัน

การใช้เตาน้ำมันดีเซลก็เป็นวิธีการให้ความร้อนอีกแบบหนึ่งที่เหมาะสำหรับการเผาพลอยน้ำเงินโดยเฉพาะ เตาเผาควรเป็นเตาน้ำมันดีเซล เพราะไอของน้ำมันดีเซลมีคาร์บอนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้สภาวะภายในเตามีออกซิเจนน้อย การเผาแบบนี้นักวิชาการเรียกว่าการเผาแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reduction เตาน้ำมันมีข้อดีหลายอย่าง คือ ต้นทุนการทำเตาไม่แพง ซ่อมแซมง่าย การควบคุมอุณหภูมิของเตาไม่ยากนัก แต่ต้องคอยเฝ้าเตาและตรวจดูอุณหภูมิบ่อยๆ คอยปรับไฟ เตาชนิดนี้อุณหภูมิจะไม่นิ่งเหมือนเตาไฟฟ้า แต่ประสิทธิภาพการเผาไม่ได้แย่

2.1.4 เตาแก๊ส

เตาชนิดนี้จะใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในการผลิตความร้อน เช่น Propane, Acetylene และ Hydrogen เป็นต้น ปริมาณความร้อนหรืออุณหภูมิที่สามารถผลิตขึ้นได้ จะขึ้นกับชนิดของแก๊สโดยตรง ตัวอย่างเช่น ใช้ Acetylene ผสมกับ O_2 เป็นเชื้อเพลิง จะสามารถให้อุณหภูมิได้ถึง 3000 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ ต้องขึ้นอยู่กับขนาดและประสิทธิภาพของเตาที่ใช้ด้วยว่าเหมาะสมกับปริมาณเชื้อเพลิงหรือไม่ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิจะใช้ Pyrometer

ลักษณะโครงสร้างของเตา ตัวเตาจะทำจากดินเหนียวที่ผ่านการเผาแล้ว ภายในเตาจะเป็นช่องว่าง เพื่อบรรจุถ้วยใส่ชิ้นงาน (Crucible) โดยจะมีช่องรูสำหรับเพิ่มไฟที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านท่อแก๊สสู่ภายในเตา เพื่อให้ความร้อนโดยตรงแก่ถ้วยที่ใส่ชิ้นงาน ส่วนบนของเตาจะมีการเว้นช่องเป็นรูเพื่อระบายแก๊สออกจากตัวเตา ด้วยวิธีการนี้จะสามารถทำให้อุณหภูมิเท่ากันโดยรอบ

เตาชนิดนี้มีลักษณะการใช้ที่ควบคุมอุณหภูมิลำบาก เนื่องจากอุณหภูมินั้นจะขึ้นกับปริมาณของไฟที่พ่นเข้าไปโดยตรง จึงเป็นการยากที่จะควบคุมอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้มีความละเอียด ซึ่งโดยปกติแล้วจุดประสงค์ใหญ่ของเตาชนิดนี้ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก จึงทำให้ไม่มีความจำเป็นในการควบคุมอุณหภูมิที่ละเอียด

2.1.5 เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง

เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาในยุคต้นๆ เพื่อใช้ในการหลอมโลหะ เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้เกิดจากความคิดของนายเฟอร์รันติ (Ferranti) ซึ่งเป็นชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2430 ต่อมาชาวสวีเดน ชื่อ เจ. ลิน (Kjellin) ได้คิดค้นต่อจนสามารถใช้หลอมโลหะได้ที่เมืองไกซิง (Giysinge) ประเทศสวีเดน

ในปี พ.ศ. 2443 ได้มีการออกแบบใช้ระบบหม้อแปลงไฟฟ้า (A.C. transformer) ซึ่งตัวเตามีขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) อยู่ตรงกลางและตรงบริเวณที่จะหลอมโลหะจะเป็นขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil)

จากหลักการนี้ ก็ได้มีผู้คิดค้นหาวิธีการใหม่ๆ เพิ่มขึ้นอีกหลายท่าน และหลายบริษัท คือ ในปี พ.ศ. 2448 ชาวเยอรมนี ชื่อ รอชช์ลิงช์ (Roechling) และโรเดนฮาเซอร์ (Rodennauser) ได้คิดค้นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีเกรินวอล (Groenwall), ลินท์บลัด (Lind Blad), สตาลเฮน (Stalhane), ยอรช์ (Hjorth), ฟริ๊ก (Frick) พยายามทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้น บริษัทเอเจ๊ก (Ajex) และบริษัทเจนเนอรัล อิเล็กทริค (General Electric) ของสหรัฐอเมริกา, เบอร์เล็ค (Birlec) ของอังกฤษ, บีบีซี (BBC) ของสวิสเซอร์แลนด์, โอโดยยุกเกอร์ของเยอรมัน และฟูจิของญี่ปุ่น เป็นต้น ที่ได้มีส่วนร่วมในการพัฒนาเตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงสำหรับใช้ในงานด้านโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมจริงๆ คือในปี พ.ศ. 2468 ซึ่งใช้หลอมพวกทองแดงและโลหะผสมนิเกิล-เงิน ของบริษัท American Brass ส่วนเตาที่ใช้หลอมเหล็กกล้าแรกเริ่มในประเทศอังกฤษ ที่บริษัท Messrs. Egdgar Allen ที่เมือง Sheffield ในปี พ.ศ. 2470 ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการหลอมเหล็กด้วยเตาชนิดนี้

วิวัฒนาการล่าสุดคือราวในปี พ.ศ. 2520 ได้มีเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่า Solid state electronics เช่น SCR และไดโอด ซึ่งสามารถผลิตพลังงานและความถี่สูงได้ ความถี่ที่ผลิตขึ้นมาก็คือ 200 เฮิร์ต – 10 กิโลเฮิร์ต ตอนเริ่มแรกระบบ Solid state นี้ต้องใช้ชิ้นส่วนจำนวนหลายพันชิ้นมาประกอบถึงจะทำงานได้ ในช่วงนั้น SCR และไดโอดมีขีดจำกัดในการทำงาน ในปัจจุบันได้มีการผลิต IC, SCR และไดโอดที่ใช้งานที่ความถี่สูง และมีความสามารถในการใช้งานมากขึ้น ทำให้เตาสมัยใหม่เป็นระบบอัตโนมัติ SCR 1 ตัว สามารถทำงานได้ถึง 500 กิโลวัตต์ เมื่อระบบ Solid state electronic เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทำให้ระบบของเตาสมัยใหม่ไม่ยุ่งยาก และใช้งานง่าย ในปัจจุบันได้มีการผลิตเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงตั้งแต่ขนาดกำลัง 1 กิโลวัตต์ ถึง 20,000 กิโลวัตต์ ความถี่ตั้งแต่ 50 เฮิร์ต ถึง 10 กิโลเฮิร์ต

อย่างไรก็ตาม เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาเพื่อใช้ในการเผาพลอย และถูกนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยเป็นครั้งแรก ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำของบริษัท Inductoheat ประเทศออสเตรเลีย

2.1.6 เตาไฟฟ้า

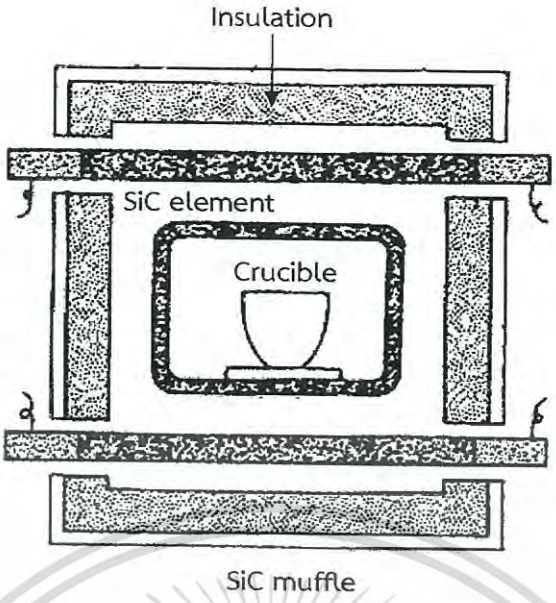
2.1.6.1 เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทาน (Resistance-heated Furnace)

เป็นเตาที่รู้จักกันดีและใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด เตาอุณหภูมิชนิดนี้จะใช้ลวดความร้อน (Heater) ที่มีความต้านทานสูงเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน และลวดความร้อนนั้นจะให้ความร้อนออกมา โดยที่ค่าความต้านทานของลวดความร้อนแต่ละชนิดจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ลวดความร้อนจะให้ได้ ซึ่งลักษณะของเตาจะเป็นระบบปิด ไม่มีควันเกิดขึ้น และสามารถให้ความร้อนได้อย่างคงที่ สม่ำเสมอ และต่อเนื่อง

2.1.6.2 เตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Muffle Furnace)

เตาประเภทนี้จะใช้ลวดความร้อนที่ทำด้วยแท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยจะให้อุณหภูมิได้ประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ลักษณะการใช้งานในช่วงแรกๆ ของระบบนี้ ต้องจ่ายความต่างศักย์ต่างๆ ก่อน ทั้งนี้เพื่อเตรียมขดลวด เมื่อขวดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ มีความต้านทานลดลงเล็กน้อย ดังนั้น ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าควรคำนึงถึงคุณสมบัตินี้ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



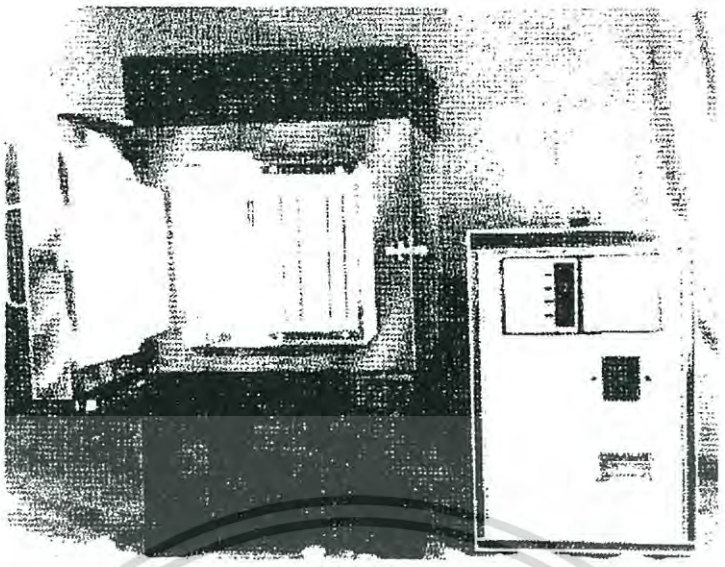
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวให้ความร้อน

ลักษณะโครงสร้างของเตาจะมีลักษณะเป็นกล่อง ภายในจะเป็นช่องว่างสำหรับวางวัสดุชิ้นงานในการทดลอง และมีช่องเปิดด้านหน้าเพื่อเป็นช่องทางในการบรรจุ ส่วนด้านท้ายจะมีช่องว่างเล็กน้อยสำหรับสอดเทอร์โมคัปเปิลเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ ถ้าลวดความร้อนแต่ละขดเกิดความเสียหายจะต้องทำการจัดเปลี่ยนใหม่ทั้งชุด ทั้งนี้ เนื่องจากว่าคุณสมบัติของลวดใหม่ที่เปลี่ยนเข้าไปแทนที่ไม่สามารถผลิตความร้อนได้ในอัตราเดียวกับขดลวดชุดเก่า สำหรับตัวเชื่อมระหว่างขั้วของขดลวดจะใช้แถบอะลูมิเนียมเชื่อมต่อขดลวดโดยตรง เตาความร้อนนี้จะให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาได้สูงในเวลาน้อยๆ ซึ่งหมายถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heat-up rate) เร็วมาก

2.1.6.3 เตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์ (Molybdenum Disilicide Box-Furnace)

เตาชนิดนี้ใช้ขดลวดความร้อนที่มีส่วนประกอบเป็นเซรามิก คือ Molybdenum Disilicide ซึ่งผลิตโดยบริษัท KANTHAL ประเทศสวีเดน สำหรับรุ่น KANTHAL SUPER สามารถให้อุณหภูมิถึง 1900 องศาเซลเซียส และมีความสะดวกในการใช้งานอย่างมาก ลักษณะโครงสร้างของลวดจะเป็นรูปตัวยู (U Shape) เป็นส่วนใหญ่ การติดตั้งขดลวดจะติดตั้งจากด้านบน โดยวางตามยาวในลักษณะแนวดิ่ง คุณสมบัติที่พิเศษของลวดชนิดนี้ คือ มีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิได้ในเวลาที่รวดเร็ว นั่นคือ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้เร็วมาก ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ การเปลี่ยนขดลวดยังสามารถทำการเปลี่ยนใหม่ได้ในแต่ละเส้น และการเชื่อมโยงระหว่างเส้น จะใช้แถบลวดเงินเชื่อมต่อระหว่างขั้วของเส้นลวด เช่นเดียวกับเส้นลวดชนิด Silicon Carbide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



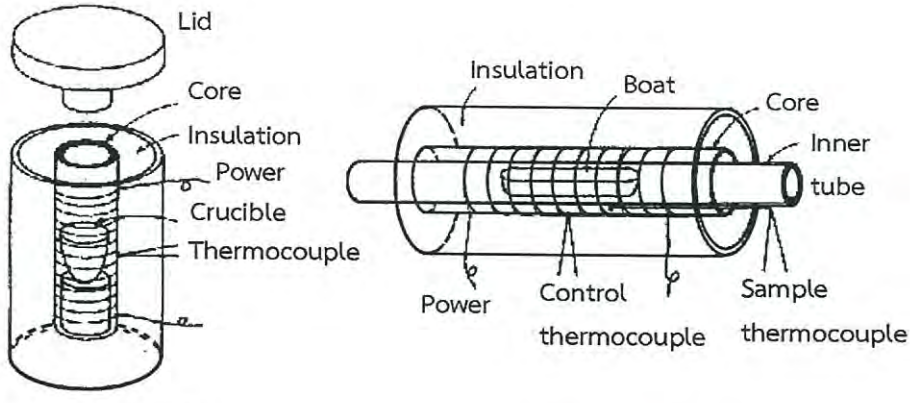
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์เป็นตัวให้ความร้อน

2.1.6.4 เตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อแกรไฟต์ (Graphite-tube Furnace)

โครงสร้างของเตาจะมีตัวให้ความร้อน (Heating element) เป็นสารคาร์บอนที่อยู่ในรูปแกรไฟต์ มีลักษณะเป็นท่อหรือทรงกระบอกกลวง ซึ่งจะมีช่องว่างกลวงอยู่ภายในสำหรับวางภาชนะทดลอง การจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องป้อนความต่างศักย์ที่ปลายแต่ละด้านของท่อทรงกระบอก ซึ่งเตาชนิดนี้สามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 3000 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.3 เป็นไดอะแกรมของเตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อแกรไฟต์เพียงแต่ขดลวดที่เป็นในรูปจะแทนด้วยท่อแกรไฟต์ เนื่องจากตัวผลิตความร้อนของเตานี้เป็นสารคาร์บอน ดังนั้น ขณะที่เตากำลังทำงานอยู่จะเกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอนเนื่องจากการรวมตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนกับสารคาร์บอน และอาจเกิดแก๊สไซยาโนเจนจากแก๊สไนโตรเจนที่อยู่รอบๆ เตาได้ ดังนั้น การใช้งานของเตาชนิดนี้จึงต้องมีการระบายอากาศบริเวณรอบเตาที่ดี เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สต่างๆ สำหรับภาชนะที่ใช้ทดลอง จะทำจากอลูมิน่าที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งเป็นสารทนความร้อนได้ถึง 1900 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าในกรณีที่ต้องการใช้งานสูงกว่านี้ ภาชนะทดลอง (Crucible) จะทำจากสาร Stabilized Zirconia ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้มากกว่า 2000 องศาเซลเซียส

ส่วนในกรณีที่ท่อทรงกระบอกกลวงเกิดรอยแตกร้าวขณะที่เตาทำงานอยู่จะมีผลทำให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอบๆ เตารั่วไหลเข้าสู่ภายในเตา เกิดจากการรวมตัวในสภาวะอุณหภูมิสูง เป็นผลให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ดังนั้น ในการใช้งานของเตาชนิดนี้จึงควรระมัดระวังเรื่องการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการแตกร้าวของท่อทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เตาในแนวตั้ง (ข) เตาในแนวนอน

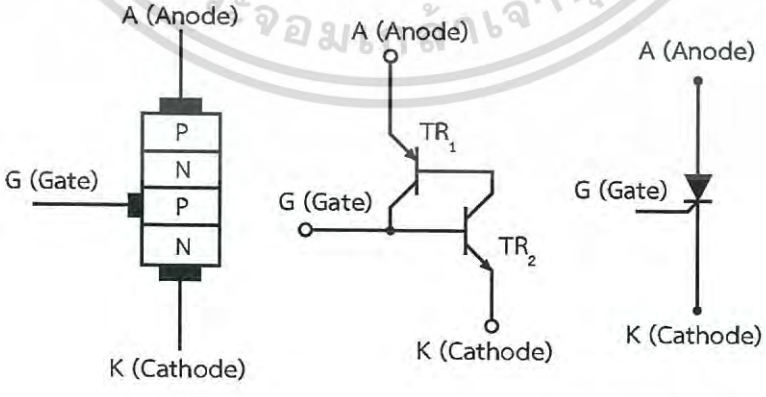
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อแกรไฟต์เป็นตัวให้ความร้อน

2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

2.2.1 เอสซีอาร์ (SCR)

2.2.1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์ (SCR) ชื่อเต็มคือ ซิลิคอน คอนโทรล เร็คติไฟร์เออร์ (Silicon Control Rectifier) เป็นอุปกรณ์โซลิดสเตท (Solid-state) ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิด (On-Off) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง อีกทั้งเอสซีอาร์ ยังจัดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไทริสเตอร์ (Thyristor) ข้อดีของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ คือ ไม่มีหน้าสัมผัสหรือเรียกว่าคอนแท็ค (Contact) ขณะเปิด–ปิด จึงไม่ทำให้เกิดประกายไฟที่หน้าสัมผัสจึงมีความปลอดภัยสูงซึ่งสวิตช์ธรรมดา คือ แบบกลไกที่มีหน้าสัมผัสจะไม่สามารถนำไปใช้ในบางสถานที่ได้ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์บางครั้งเรียกว่าโซลิดสเตทสวิตช์ (Solid State Switch)



ก) โครงสร้าง ข) วงจรสมมูล ค) สัญลักษณ์

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

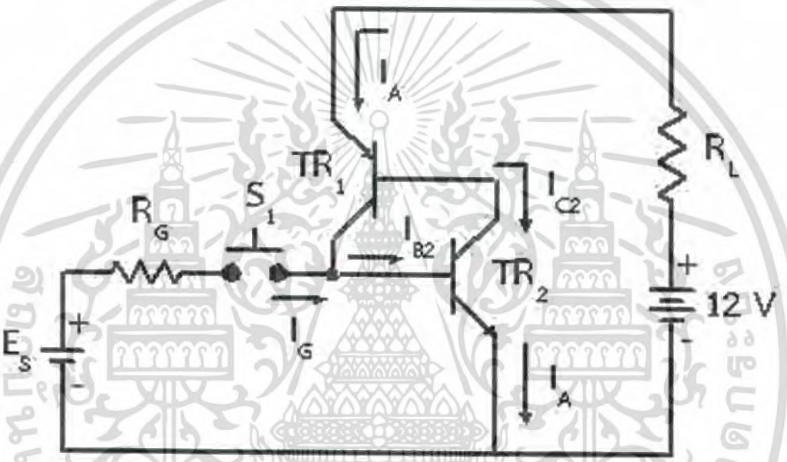
จากรูปที่ 2.4 ก. โครงสร้างของเอสซีอาร์ (SCR) ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ 4 ชิ้น คือ พี – เอ็น – พี – เอ็น (P – N – P – N) มีจำนวน 3 รอยต่อ มีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขา คือ

1) แอโนด (A : Anode)
2) แคโทด (K : Cathode)
3) เกต (G : Gate)

สภาวะการทำงานของเอสซีอาร์ (SCR) สามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 2 สภาวะ คือ

1) สภาวะนำกระแส เรียกว่า ON
2) สภาวะหยุดนำกระแส เรียกว่า OFF

2.2.1.2 สภาวะนำกระแสของเอสซีอาร์



รูปที่ 2.5 แสดงการจุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแส

พิจารณารูปที่ 2.5 การที่จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสสามารถทำได้โดยจุดชนวน เรียกว่าทริกเกอร์ (Trigger) ด้วยกระแสเกต (I_G) ให้แก่เอสซีอาร์ (SCR) และที่ขั้วแอโนด (A) และแคโทด (K) ได้รับไบอัสตรง คือ ที่แอโนดได้แรงดันบวก (+) และที่แคโทดได้รับแรงดันลบ (-) ทำให้เกิดกระแส I_{B2} ไหลเข้าขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ TR_2 ทำให้ TR_2 อยู่ในสภาวะนำกระแส (ON) จะเกิดกระแสคอลเลคเตอร์ (I_{C2}) ไหลผ่าน TR_2 ซึ่งก็คือกระแส I_{B1} ของทรานซิสเตอร์ TR_1 นั่นเอง ดังนั้น TR_1 จึงนำกระแสด้วย ค่าความต้านทานระหว่างขั้วแอโนด (A) และแคโทด (K) จึงมีค่าต่ำมากเป็นผลให้เกิดกระแสแอโนด (I_A) ไหลผ่านอีมิสเตอร์ของ TR_1 ไปออกที่อีมิสเตอร์ของ TR_2 สภาวะการทำงานของเอสซีอาร์เปรียบเสมือนสวิตช์ปิดวงจร

เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสแล้วไม่จำเป็นต้องคงค่ากระแสเกต (I_G) ไว้ตลอดไป สามารถลดค่ากระแสเกตให้เป็นศูนย์ ($I_G = 0$) หรือปลดกระแสเกตออกได้โดยที่เอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไปเพราะ I_{B2} ที่ไหลเข้าเบสของ TR_2 จะไหลมาจากคอลเลคเตอร์ของ TR_1 ดังนั้น ถึงแม้จะไม่มีกระแสเกตเอสซีอาร์ก็ยังคงนำกระแสต่อไปได้ ในสภาวะนำกระแสนี้ถ้าแหล่งจ่ายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

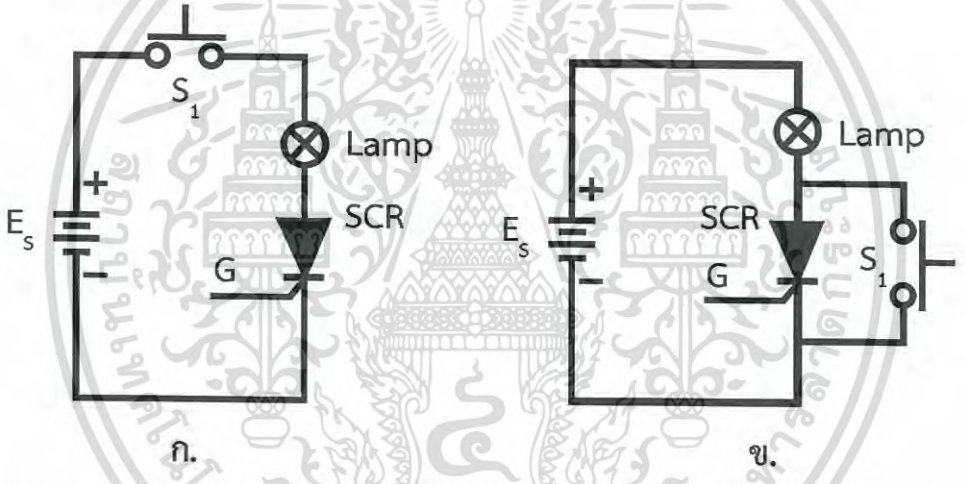
ไฟกระแสสลับสามารถจะบังคับให้เอสซีอาร์นำกระแสได้มากหรือน้อยได้โดยเลือกมุมจุดชนวนที่เกตให้เหมาะสม

2.2.1.3 สภาวะหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์

วิธีการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสมีหลักการ คือ ทำให้กระแสแอโนด (I_A) ลดลงจนต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง (I_H : Holding current คือ ค่ากระแสต่ำสุดที่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแส) หรือจึงจะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ซึ่งการที่จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระมี 2 วิธี คือ

1) แอโนดเคอเรนท์อินเทอรัพชั่น (Anode Current Interruption)

โดยการตัดกระแส I_A ไม่ให้ไหลผ่านแอโนดของเอสซีอาร์ วิธีง่ายๆ ดังรูปที่ 2.6 ก. โดยต่อสวิตช์อนุกรมแอโนด (A) ของเอสซีอาร์และเปิดสวิตช์เมื่อต้องการทำให้เอสซีอาร์หยุดทำงาน (Turn–Off) หรืออีกวิธีในรูปที่ 2.6 ข. โดยต่อสวิตช์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดของเอสซีอาร์ เป็นการเปลี่ยนทางเดินของกระแสแอโนด (I_A) ไม่ให้ไหลผ่านเอสซีอาร์

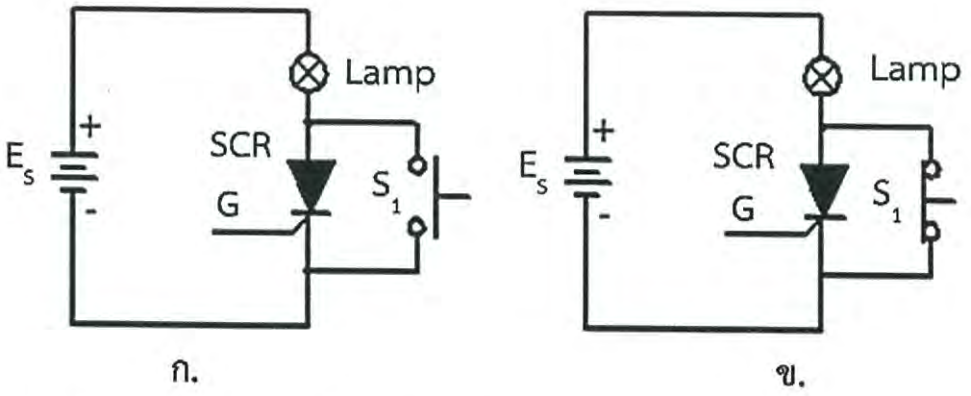


รูปที่ 2.6 แสดงการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี Anode Current Interruption

2) ฟอร์ชคอมมูเทชั่น (Forced Commutation)

วิธีนี้ทำได้โดยบังคับให้เอสซีอาร์ได้รับไบอัสกลับโดยใช้สวิตช์ขนานกับเอสซีอาร์เป็นตัวควบคุมการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ ดังรูปที่ 2.7 ถ้าสวิตช์เปิดวงจรเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสอยู่ แต่ถ้าสวิตช์ปิดวงจรเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส เนื่องจากได้รับไบอัสกลับตลอดเวลาที่สวิตช์ยังคงปิดอยู่ โดยระยะเวลาในการบังคับให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยให้ไบอัสกลับนี้จะต้องนานกว่าระยะเวลา Turn Off Time ซึ่งระบุไว้ในคู่มือโดยทั่วไปค่าเวลานี้จะน้อยมาก (ประมาณไมโครวินาที)

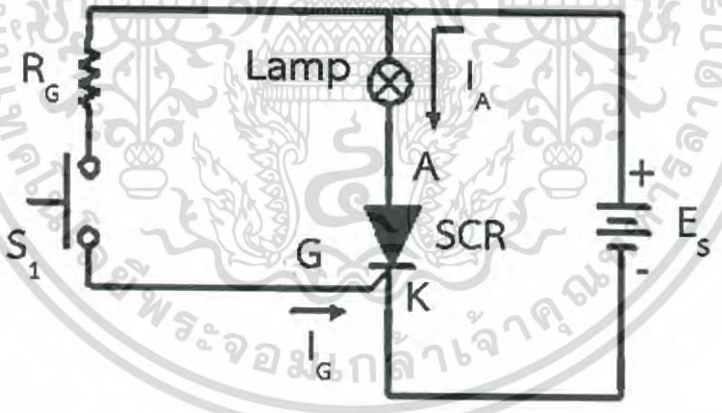
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี Forced Commutation

2.2.1.4 การนำเอสซีอาร์ไปใช้งาน

เอสซีอาร์สามารถนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง เช่น วงจรเรียงกระแสที่สามารถควบคุมได้ (Control Rectifier) แต่ส่วนมากจะนิยมนำไปใช้ในการควบคุมหลักๆ 2 ประการ คือ สภาวะนำกระแสและสภาวะหยุดนำกระแส เพื่อให้เกิดการทำงานและหยุดการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ตัวอย่างการนำเอสซีอาร์ไปใช้งานอย่างง่าย คือ การนำเอสซีอาร์ไปใช้ในการเปิด–ปิดหลอดไฟซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการนำเอสซีอาร์ไปใช้ในการเปิด–ปิดหลอดไฟ

ในขณะที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสภาวะเปิดวงจรเอสซีอาร์จะไม่นำกระแส เพราะว่าไม่มีกระแสไปจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ (I_G = 0) แรงดันตกคร่อมขาแอโนดและแคโทดมีค่าสูงมาก กระแส I_A จึงไม่สามารถไหลผ่านได้ หลอดไฟจึงไม่ติดสว่าง แต่ถ้าทำการสวิตช์ S_1 (On) จะมีกระแสไปจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ ทำให้เอสซีอาร์เกิดการนำกระแส ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาแอโนดและขาแคโทด ลดลงจนมีค่าต่ำมากมีกระแส I_A ไหลเข้าขาแอโนดและออกที่ขาแคโทดได้ครบวงจรเป็นผลให้หลอดไฟติดสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ฮีตเตอร์ (Heater)

ฮีตเตอร์มีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีการแสไหลผ่านขดลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทาน จะทำให้ลวดตัวนำร้อน และถ่ายเทความร้อนให้กับโหลด ดังนั้นลวดตัวนำความร้อนจะต้องมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้สูงสำหรับการผลิตฮีตเตอร์ โดยส่วนใหญ่ในตัวฮีตเตอร์จะมีผงฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (ยกเว้นฮีตเตอร์อินฟราเรด, ฮีตเตอร์รัดท่อ และฮีตเตอร์แผ่น) อยู่ภายในเพื่อทำหน้าที่กั้นระหว่างขดลวดตัวนำกับผนังโลหะของฮีตเตอร์ ซึ่งผงฉนวนนี้จะมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดีมาก แต่จะมีค่าความนำทางไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น ข้อควรระวังคือ ห้ามมีความชื้นในผงฉนวนนี้เด็ดขาด เพราะจะทำให้มีค่าความนำทางไฟฟ้าสูงขึ้น และอาจจะทำให้ฮีตเตอร์เกิดการลัดวงจรได้ หากพบว่าฮีตเตอร์มีความชื้น (ผลจากการวัดโดยใช้เครื่องมือทางไฟฟ้า) สามารถแก้ไขโดยการนำฮีตเตอร์ไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวฮีตเตอร์ ฮีตเตอร์ที่ดีควรผ่านการทดสอบหาค่าความเป็นฉนวนของฮีตเตอร์ เพื่อให้แน่ใจว่าในการนำไปใช้งาน จะไม่มีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากขดลวดตัวนำ ดังนั้น มาตรฐานการทดสอบความเป็นฉนวนของฮีตเตอร์ควรจะไม่ต่ำกว่า 1500 VDC และค่าความเป็นฉนวนต้องไม่ต่ำกว่า 500 เมกะโอห์ม โดยส่วนประกอบส่วนใหญ่ของฮีตเตอร์ มีดังนี้

2.2.2.1 ฉนวนแมกนีเซียมอกไซด์ (MgO) คุณสมบัติมีค่าความนำทางไฟฟ้าต่ำ แต่นำความร้อนได้ดีมาก ซึ่งทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดตัวนำฮีตเตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสรั่ว (Leak Current) จากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือ ห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาด เนื่องจากจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีการแก้ไขคือ การนำฮีตเตอร์ไปอบในเตาอบเพื่อไล่ความชื้น

2.2.2.2 แสตนเลส (Stainless) ที่นำมาใช้ในการผลิตฮีตเตอร์มีอยู่หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนี้

- Stainless 304 : ใช้ในงานที่ต้องการขึ้นรูปเพื่อการตกแต่งให้สวยงาม สามารถป้องกันสนิมได้อย่างดี
- Stainless 316 : ถูกออกแบบให้ป้องกันสนิมได้เป็นอย่างดี สามารถใช้ในงานอุตสาหกรรมหนัก และสถานที่ใกล้ทะเลที่มีความเป็นกรด-ด่างสูง
- Stainless 430 : เป็นแสตนเลสที่ใช้โครเมียมเป็นส่วนประกอบ 100% และมีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเบอร์300 ซึ่งแสตนเลสแบบนี้นิยมนำมาตกแต่งภายใน

2.2.2.3 ลวดฮีตเตอร์ (Heater) ซึ่งเรียกว่า ลวด Nikrothal 80 หรือ R80 โดยมีส่วนผสมของนิเกิล 80% และโครเมียม 20% ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส โดยมีคุณสมบัติเหนียว และทนความร้อนได้สูงถึง 1400 องศาเซลเซียส สามารถแบ่งประเภทของฮีตเตอร์ออกได้เป็น 14 ประเภท ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ฮีตเตอร์ต้มน้ำยาเคมี

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ต้มน้ำยาเคมี

ฮีตเตอร์ต้มน้ำยาเคมี ใช้สำหรับอุ่นหรือต้มของเหลวได้เกือบทุกประเภทที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสแตนเลส 316 (SUS 316) เช่น น้ำหรือน้ำมันและยังใช้อุ่นหรือต้มของเหลวที่เหนียวข้นได้หลากหลาย การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่อมเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีตเตอร์แบบเกลียวเข้าไป โดยตัวฮีตเตอร์ขนานกับพื้นถัง ควรระวังไม่ให้ส่วนของฮีตเตอร์โผล่พ้นของเหลวเนื่องจากจะทำให้ส่วนที่อยู่เหนือของเหลวร้อนจัดเกินไปทำให้อายุการใช้งานสั้น และเพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วถึง ควรติดตั้งใบพัดกวนของเหลวควบคู่กันด้วย

2) ฮีตเตอร์ฮอตรันเนอร์ (Hot Runner Heater)

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ฮอตรันเนอร์

ฮีตเตอร์ฮอตรันเนอร์ คือ ฮีตเตอร์ที่ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับท่อหัวฉีด ที่ติดกับแม่พิมพ์ เพื่อถ่ายเทความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วแท่งฮีตเตอร์ ฮีตเตอร์ฮอตรันเนอร์เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก และฝาพลาสติก สามารถกำหนดขนาดตามความต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เซรามิคฮีตเตอร์ (Ceramic Band Heater)

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของเซรามิคฮีตเตอร์

เซรามิคฮีตเตอร์ คือ ฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนได้สูง และต่อเนื่องเหมาะสำหรับเครื่องฉีดพลาสติก ที่ต้องการใช้อุณหภูมิสูง และใช้ต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ โครงสร้างทำจากเซรามิค อายุการใช้งานนาน ปลอดภัย สามารถกำหนดขนาดได้ตามความต้องการ รูปร่าง และลักษณะการใช้งาน เหมือนฮีตเตอร์รัดท่อ แต่ฮีตเตอร์เซรามิคใช้งานได้หนักกว่า หรืออุณหภูมิสูงกว่ามาก

4) ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater)

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์แท่ง

ฮีตเตอร์แท่ง คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้ในการอุ่น และให้ความร้อนให้แก่แม่พิมพ์, ชิ้นงานเหล็ก, หัวพ่นกาว, เครื่องพิมพ์ทอง หรือเครื่องรีดถุงพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใส่เกลียว เพื่อต้มน้ำเคมีกาวในท่อ หรือถาดได้ ฮีตเตอร์แท่งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ ไฮวัตต์เดนซิตี้ (High watt density) และโลววัตต์เดนซิตี้ (Low watt density) คนไทยเรียกสั้นๆ ว่า ฮีตเตอร์แท่งแบบไฮเดนและฮีตเตอร์แท่งแบบโลว์เดน

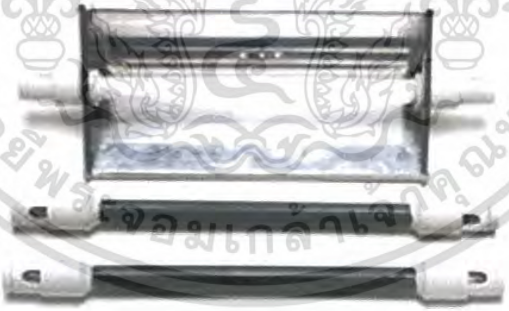
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ฮีตเตอร์ต้มน้ำแบบจุ่ม (Immersion Heater)

รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ต้มน้ำแบบจุ่ม

ฮีตเตอร์ต้มน้ำแบบจุ่ม คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้ให้ความร้อนกับของเหลว เช่น ต้มน้ำ หรืออุ่นน้ำมันของเหลวต่างๆ ทนต่อการกัดกร่อนของสนิม การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่อมเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีตเตอร์แบบเกลียวเข้าไป โดยตัวฮีตเตอร์ขนานกับพื้นถัง ขนาดของเกลียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นของฮีตเตอร์ ตามความเหมาะสมของกำลังวัตต์ และความยาวของฮีตเตอร์

6) ฮีตเตอร์อินฟาเรด (Infrared Heater)



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์อินฟาเรด

ฮีตเตอร์อินฟาเรด คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้ส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดไฟ สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อในจึงทำให้ประหยัดเวลาได้ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในงานอบแห้งต่างๆ เช่น อบสี, แลคเกอร์, กาว, เมล็ดพันธ์พืช, อีพรอกซี่ และใช้กับงานอุตสาหกรรมพลาสติก อบพลาสติกให้อ่อนตัวก่อนนำไปเข้าเครื่องเป่า เป็นต้น มีลักษณะเป็นท่อกลมเส้นตรงมีทั้งสีดำ (เซรามิค) สีขาว (แก้วควอตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ฮีตเตอร์แผ่น (Strip Heater)

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์แผ่น

ฮีตเตอร์แผ่น คือ ฮีตเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบเดียวกันกับฮีตเตอร์รัดท่อแต่รูปทรงจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหมาะสำหรับให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ สามารถระบุชนิดวัสดุที่ต้องการได้ รวมทั้งความยาว, แรงดัน และกำลังวัตต์ ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุผิวเรียบโดยใช้วิธียึดติดให้แน่นโดยการใช้นอตหรือการรัด วัสดุที่นำมาทำสามารถเลือกได้ทั้ง สแตนเลส และซิงค์ การต่อไฟได้ทั้งออกสาย, ขั้วนอต, เต๋า และออกปลั๊ก

8) ฮีตเตอร์บอบบิ้น (Bobbin Heater)

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์บอบบิ้น

ฮีตเตอร์บอบบิ้น คือ ฮีตเตอร์แบบจุ่มชนิดหนึ่ง ถูกออกแบบให้ความร้อนกับของเหลวสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ใช้ให้ความร้อนกับของเหลว เช่น งานชุบ งานแช่ในกรด หรือสารละลายวัสดุที่เป็นควอทซ์สำหรับกรดหรือสารละลายกัดกร่อนพิเศษและยังนำไปใช้อุ่นหรือต้มน้ำยาเคมี และของเหลวเกือบทุกชนิด ให้ความร้อนคงที่สม่ำเสมอ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีเกือบทุกประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) ฮีตเตอร์ท่อกลม หรือฮีตเตอร์เส้น หรือฮีตเตอร์ทิวบูลาร์ (Tubular Heater)

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ทิวบูลาร์

ฮีตเตอร์ท่อกลม หรือฮีตเตอร์เส้น หรือฮีตเตอร์ทิวบูลาร์ คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้ให้ความร้อนได้กับอากาศ และของเหลว และใช้ให้ความร้อนกับน้ำ เช่น งานอุ่น หรืองานต้ม และยังใช้สำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนในการอบ เช่น อบสี, อบชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์, อบไล่ความชื้น, อบใยผ้า, อบแม่พิมพ์, อบพลาสติก และอบอาหาร เป็นต้น มีวัสดุให้เลือกตามความเหมาะของงาน

10) เซอร์คูเรชั่นฮีตเตอร์ (Circulation Heater)

รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของเซอร์คูเรชั่นฮีตเตอร์

เซอร์คูเรชั่นฮีตเตอร์ เป็นเครื่องทำความร้อนระบบหมุนเวียนที่ใช้น้ำ, น้ำมัน, ลม และแก๊ส เป็นตัวพาความร้อนไปใช้ และยังให้ความร้อนของเหลว และก๊าซภายในท่อใช้สแตนเลสคุณภาพดีให้ความร้อนสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11) คอยล์ฮีตเตอร์ (Coil Heater)

รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของคอยล์ฮีตเตอร์

คอยล์ฮีตเตอร์ เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนในอากาศเหมาะสำหรับใช้งานในเตาอบให้ความร้อนกับชิ้นงาน สามารถวางบนฉนวนกันความร้อน เช่น Ceramic Fiber หรือ Ceramic Support Heater ออกแบบขนาดโวลต์ให้ถูกต้องจะทำให้อายุการใช้งานนานมากขึ้น

12) ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater)

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์รัดท่อ

ฮีตเตอร์รัดท่อ เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนกับท่อหรือถังทรงกระบอก เช่น เครื่องฉีดพลาสติกให้การตอบสนองเกือบจะทันทีที่ใช้คู่กับอุณหภูมิควบคุมให้ความร้อนและส่งผ่านความร้อนได้เร็วขึ้น ทนต่อการปนเปื้อนของการล้นจากพลาสติกหรือวัสดุอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13) ฮีตเตอร์อุ่น–ต้มน้ำยาเคมี หรือฮีตเตอร์ควอตซ์

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ควอตซ์

ฮีตเตอร์อุ่น–ต้มน้ำยาเคมี หรือฮีตเตอร์ควอตซ์ คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้อุ่นหรือต้มของเหลว น้ำยาเคมีให้ความร้อนคงที่สม่ำเสมอไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีทุกประเภทเหมาะสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ ที่มีการอุ่น หรือให้ความร้อนกับสารเคมี แบบควอทซ์ใช้อุ่นหรือต้มของเหลว เช่น น้ำยาเคมีได้ทุกชนิด แบบสแตนเลส ใช้อุ่นหรือต้มของเหลวที่เหนียวข้นได้หลายชนิด เช่น กาว และยางมะตอย เป็นต้น

14) ฮีตเตอร์ครีบ (Fin Heater)

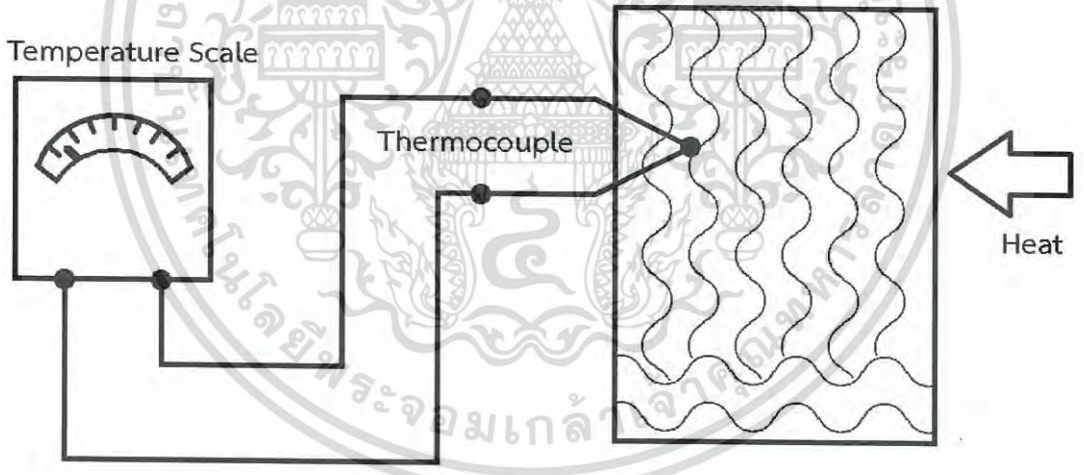
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะของฮีตเตอร์ครีบ

ฮีตเตอร์ครีบ ใช้ใส่ในเตาอบ สามารถให้ค่าความร้อนได้สูง (วัตต์สูง) กว่าฮีตเตอร์ทั่วๆ ไปที่ไม่มีครีบ เพราะครีบช่วยให้ระบายความร้อนสู่เตาอบได้ดี ใช้ในเตาอบขนมปัง ซาลาเปา หรือเตาอบแบบสายสะพาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในประเภท Active Transducer คือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจวัดโดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอก ดังนั้น จึงสามารถใช้ได้โดยตรงในเครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิหรือเครื่องควบคุมต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ เทอร์โมคัปเปิลยังเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิมาก ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นต่อเข้าด้วยกันที่ปลายข้างหนึ่งซึ่งใช้เป็นจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะใช้เป็นเอาต์พุตจะถูกนำไปต่อกับมิเตอร์หรือวงจรอื่นๆ ในขณะที่ปลายของเส้นลวดที่ต่อเข้าด้วยกันนี้เรียกว่า รอยต่อร้อน (Hot junction) ส่วนปลายอีกข้างจะเรียกว่า รอยต่อเย็น (Clod junction) เมื่อนำเอาปลายด้านที่เป็นรอยต่อร้อนไปวัดอุณหภูมิจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่จุดรอยต่อเย็นและแรงดันที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าของอุณหภูมิที่ทำการวัด เนื่องจากคุณสมบัติในการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า จึงสามารถจัดได้ว่าเทอร์โมคัปเปิลเป็น Thermoelectric Transducer ชนิดหนึ่ง โดยรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นถึงวงจรอย่างง่ายสำหรับการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตาอบ



รูปที่ 2.23 แสดงการประยุกต์ใช้เทอร์โมคัปเปิลอย่างง่าย

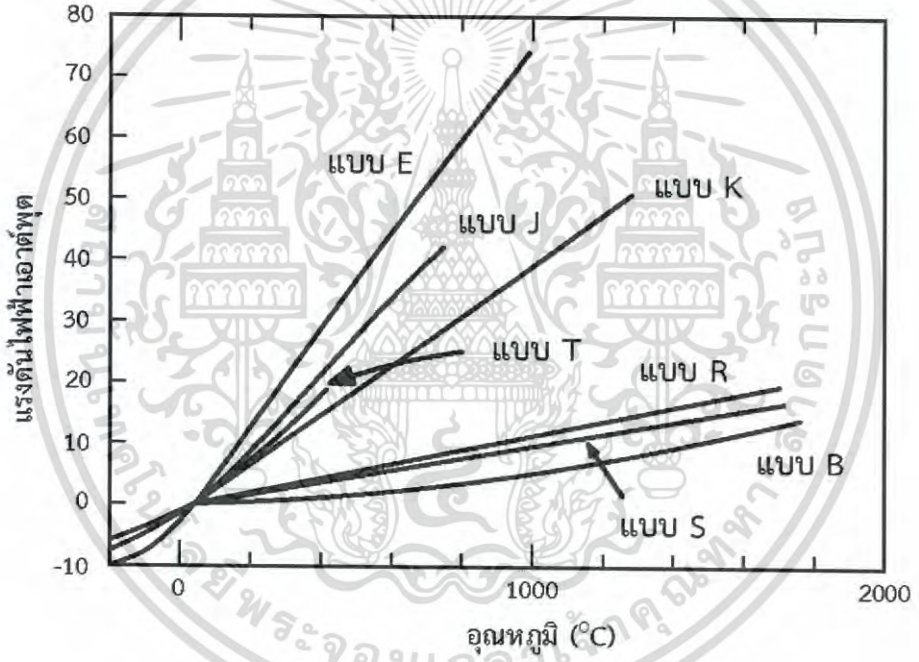
เมื่อรอยต่อร้อนของเทอร์โมคัปเปิลได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่รอยต่อเย็นยังมีอุณหภูมิที่คงที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดรอยต่อทั้งสองจุดนี้จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ค่าของกระแสไฟฟ้าที่มิเตอร์แสดงนี้สามารถจะปรับเทียบให้เป็นค่าที่อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Standard thermocouple) หมายถึง เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ผู้ผลิตทุกรายกำหนดส่วนผสมของคู่สายเทอร์โมคัปเปิลเป็นมาตรฐานเหมือนกัน สามารถใช้ตารางเทียบมาตรฐานที่หาได้ทั่วไป

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบ non-standard หมายถึง เทอร์โมคัปเปิลที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้เฉพาะงานมีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างไปจากแบบมาตรฐาน ตารางการสอบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะจัดหามาให้กับเทอร์โมคัปเปิลตัวนั้น ซึ่งต้องเก็บรักษาตารางสอบเทียบอย่างดี

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานมี 7 แบบ ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลแบบ S R B J K T และ E สามารถพิจารณาชนิดของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานจากชนิดของโลหะตัวนำที่ทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ ที่อุณหภูมิ (Temperature) ต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ

ส่วนใหญ่วัสดุตัวนำที่ใช้ประกอบร่วมกันเป็นเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะได้แก่โลหะจำพวก Iron–Constantan, Copper–Constantan, Chromel–Alumel และ Platinum/Rhodium–Platinum ซึ่งการแบ่งชนิดของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานนั้นจะพิจารณาจากชนิดของวัสดุตัวนำที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และอุณหภูมิในช่วงใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด ตลอดจนเอาต์พุตเฉลี่ยในหน่วย mV (มิลลิโวลต์) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละแบบ โดยชื่อแรกของโลหะตัวนำ หมายถึง ขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์เป็นบวก (+) และชื่อหลังมีศักย์เป็นลบ (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ

มาตรฐาน	ชนิดของวัสดุตัวนำ
Type K	Nickel Chromium/Nickel Aluminium
Type J	Iron/Constantan
Type T	Copper/Constantan
Type E	Nickel Chromium/Constantan
Type N	Nicrosil/Nisil
Type R	Platinium 13%/Rhodium
Type S	Platinium 10%/Rhodium
Type B	Platinium 30%/Rhodium
	*** Constantan: copper 60% + Nickel 40%

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างช่วงการใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน

Type	ส่วนผสม	ช่วงอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ (mV)
		°C	°F	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-02.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม - 10% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อะลูเมล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358

2.2.3.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแบบอื่นๆ เมื่อวัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขเดียวกัน แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่าแบบ S และ R เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1750 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับแบบ S และ R ไม่เหมาะกับสภาวะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง (Reduzing) ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิง (Oxidizing) และสภาวะเฉื่อย ให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (linearity) ดี

2.2.3.2 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง และในสภาวะงานเฉื่อย (Inert) คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆ ได้ง่ายๆ นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ –50 ถึงประมาณ 1700 องศาเซลเซียส หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด ใช้ในการสอบเทียบ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74 องศาเซลเซียส) จนถึงจุดแข็งตัวของทองแดง (1064.43 องศาเซลเซียส) ตามมาตรฐาน IPTS68 ต้องใช้ท่อป้องกันในทุกสภาวะบรรยากาศ ไม่เหมาะกับงานที่มีปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง งานที่เป็นสุญญากาศ (Vacuum) งานที่มีไอโลหะ เช่น สังกะสี ตะกั่ว งานที่มีไอของอโลหะ เช่น จำพวกอาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส เพราะจะมีอายุการใช้งานสั้นลง

2.2.3.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบ R มีคุณสมบัติที่คล้ายกับแบบ S แต่แบบ R ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่สูงกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว โดยสามารถวัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง -50 ถึงประมาณ 1700 องศาเซลเซียส ใช้งานได้ดีในสภาวะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ไม่เหมาะกับงานที่มีสภาวะแบบกัดกร่อน ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ และไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ

2.2.3.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบ J ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดี นิยมใช้กับงานทั่วไป ราคาไม่แพง เหมาะสำหรับใช้งานที่เป็นสุญญากาศงานที่ งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760 องศาเซลเซียส นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ไม่เหมาะกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส หากวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5% ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

2.2.3.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า ทนอุณหภูมิได้ถึง 1300 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้ 1) สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย (Inert) ได้ดีกว่าแบบอื่นๆ สามารถใช้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ได้ ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ (ยกเว้นการใช้งานในช่วงเวลาสั้น) ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์ หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.6 เทอร์โมคัปเปิลแบบ T เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในย่านต่ำ เช่น การวัดอุณหภูมิในห้องเย็น (Cold storage) และตู้แช่แข็ง (Freezer) มีเสถียรภาพในการวัดที่ดี การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิง รีดิวซิงและงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี สามารถทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนและมีความชื้นได้ดี เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่นๆ หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 370 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดออกไซมาก ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง (ทำให้ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำเปลี่ยนไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย) เมื่อใช้งานไปนานๆ ในช่วง 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสีจะเพิ่มประมาณ 10% ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (แต่ก็ปรับปรุงได้จากวงจรปรับสภาพสัญญาณ)

2.2.3.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ E มีคุณสมบัติคล้ายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แต่ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูงกว่า มีย่านอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -250 องศาเซลเซียส ถึง 870 องศาเซลเซียส

หากจำเป็นต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมแต่อยู่ในย่านอุณหภูมิใช้งาน เช่น การใช้งานในสภาวะกัดกร่อน หรือมีความชื้นสูง ควรป้องกันเทอร์โมคัปเปิลด้วยโพรบ (Probe) หรือ ปลอกโลหะ (Metal sheath/Protective sheath) ซึ่งเรียกว่า ชีตเทอร์โมคัปเปิล (Sheath thermocouple) เพื่อใช้สัมผัสกับตัวกลางใดๆ ที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยไม่เกิดการเสียหาย ช่วยยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในกระบวนการ ได้แก่ หัวเชื่อมต่อ (Connecting head/Junction box/Terminal box) (บางครั้งเรียกว่า หัวกะโหลก) ซึ่งอุปกรณ์นี้สามารถป้องกันน้ำและฝุ่นละอองได้ วัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อมต่อ ได้แก่ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป และเบคาไลท์ (Bakelite) เหมาะสำหรับการใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูงพิเศษ เป็นต้น ลักษณะตัวอย่างของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งานในอุตสาหกรรมแสดงในรูปที่ 2.25

รูปที่ 2.25 แสดงเทอร์โมคัปเปิลรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การควบคุมแบบพีไอดี (PID)

PID controller (ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพึ่งผ่านพ้นไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ PID บางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

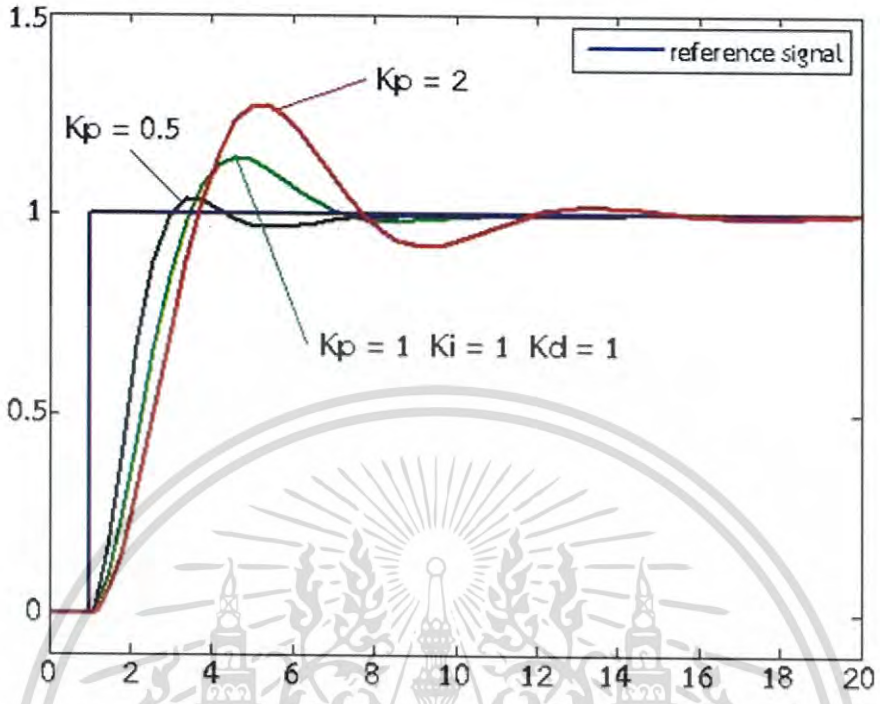
ทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการที่ 2.1

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \qquad (2.1)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.1 สัดส่วน Proportional Control Action (P-Action)



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาดการตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วนเทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$P_{out} = K_p e(t) \qquad (2.2)$$

เมื่อ P_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

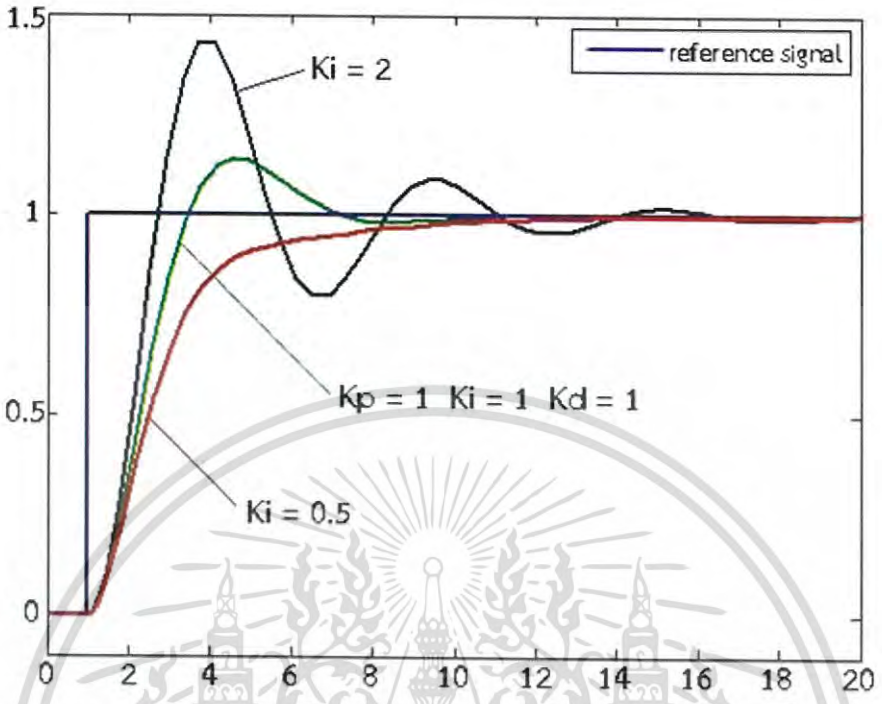
K_p : อัตราขยายสัดส่วน หรือตัวแปรปรับค่าได้

e(t) : คือค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้ามผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.2 ปริพันธ์ Integral Control Action (I-Action)



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_d คงที่)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ K_i เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ (2.3)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau)d\tau \qquad (2.3)$$

เมื่อ I_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

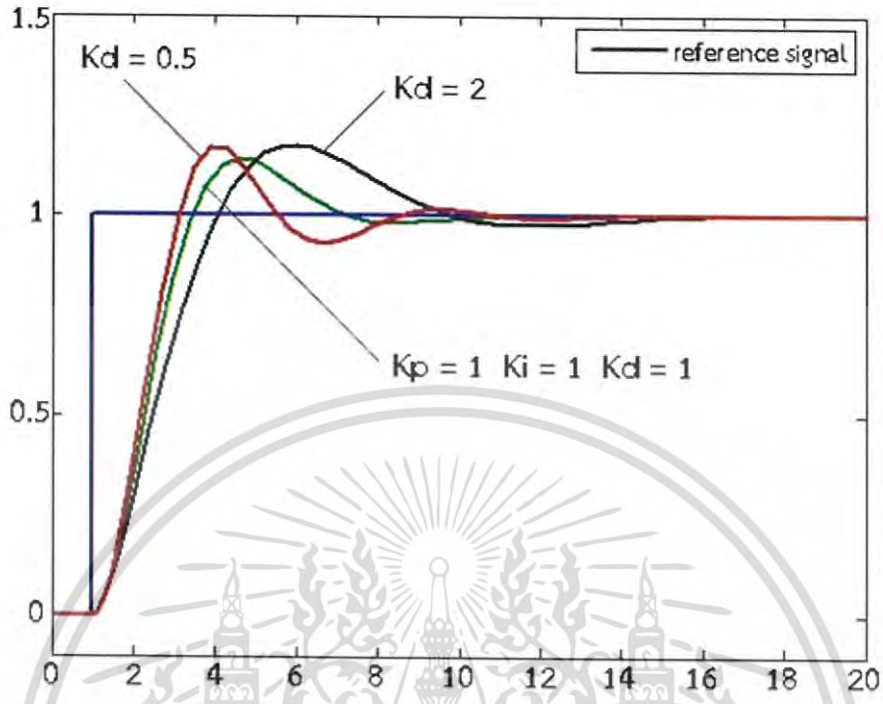
K_i : อัตราขยายปริพันธ์ หรือตัวแปรปรับค่าได้

$e(\tau)$: คือค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.3 อนุพันธ์ Derivative Control Action (D-Action)



รูปที่ 2.28 แสดงกราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความ ผิดพลาดทุกๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาด ของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ K_d เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \qquad (2.4)$$

เมื่อ D_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

K_d : อัตราขยายอนุพันธ์ หรือตัวแปรปรับค่าได้

e(t) : คือค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

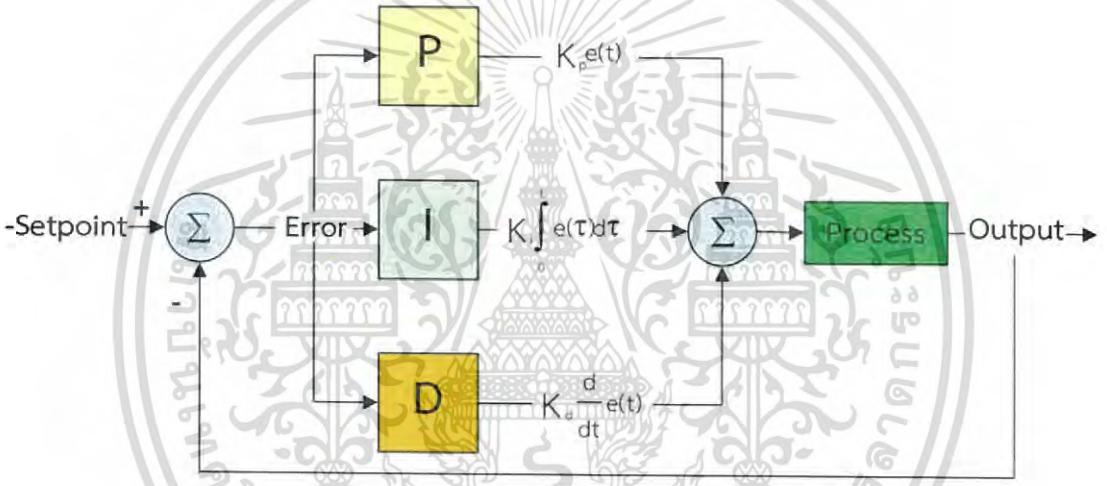
เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้ จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ ซึ่งลักษณะการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในเทอมของเวลาได้ ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \qquad (2.5)$$

และจากสมการที่ (2.5) สามารถแสดงในรูปของไดอะแกรมของการประยุกต์ใช้หลักการควบคุมแบบ PID ในการปรับค่าเกนของตัวควบคุมดังรูปที่ 2.29 นอกจากนี้ยังสามารถนำไปทำงานร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้และชดเชยค่าความไม่แน่นอนและวิธี Conventional Boundary Layer Technique (BL technique) ได้



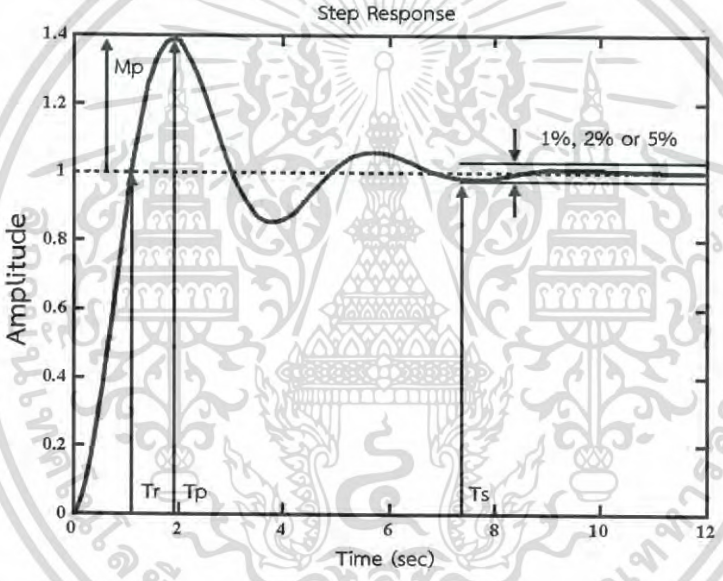
รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2.29 ระบบควบคุมจะเริ่มพิจารณาจากเอาต์พุตของกระบวนการซึ่งอาจจะเป็นอุณหภูมิ หรือความดัน เป็นต้น เอาต์พุตจะถูกวัดและแปลงสัญญาณโดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อแปลงปริมาณทางกายภาพที่วัดได้ไปเป็นปริมาณที่ต้องการ เช่น ปริมาณทางไฟฟ้า จากนั้นค่าที่วัดได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปให้ตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมกระบวนการต่อไป ขั้นตอนทั้งหมดนี้จะทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าอินพุตกับค่าที่วัดได้มีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ส่วนประกอบหนึ่งที่ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญของระบบควบคุมอัตโนมัติ คือ ตัวควบคุม (Controller) ซึ่งมีมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้งาน แต่ตัวควบคุมที่ยังคงได้รับความนิยมอย่างสูงนับจากอดีตจนถึงปัจจุบันก็คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) สาเหตุที่ทำให้ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ก็เนื่องจากความเรียบง่ายของโครงสร้างตัวควบคุม และความสามารถในการลดค่าความผิดพลาดได้หลายชนิดในตัวควบคุมเดียว ปัญหาของ การใช้งานตัวควบคุมแบบ PID ก็คือค่าเกนของตัวควบคุมซึ่งมีอยู่ด้วยกันถึง 3 ตัวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_p, K_i และ K_d ควรจะมีค่าเป็นเท่าใดจึงจะเหมาะสมกับกระบวนการนั้นๆ ในทางทฤษฎีแล้วค่าเกนเหล่านี้ จะสามารถหาได้อย่างถูกต้อง ถ้าทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ แต่ในทางปฏิบัติการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในอุตสาหกรรมไม่ใช่เรื่องง่าย อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และเซนเซอร์ที่จะต้องนำมาวัดตัวแปรต่างๆ ก็มีราคาแพง

2.2.4.4 ผลการตอบสนองของระบบ กระบวนการ หรือระบบ เมื่อได้รับอินพุตก็จะต้องมีการตอบสนองออกมาเป็นเอาต์พุต ซึ่งรูปแบบการตอบสนองนั้นก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของอินพุตที่ใส่เข้าไป ในการนิยามตัวแปรต่างๆ ในการตอบสนองของระบบ มักจะนิยมป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นแล้วดูผลการตอบสนองของระบบพลศาสตร์ โดยทั่วไปเมื่อได้รับอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นก็จะมีการตอบสนองเป็นดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองของระบบ

จากรูปที่ 2.30 พารามิเตอร์ต่างๆ สามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้

1) ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time, T_r) หมายถึง ช่วงเวลาที่ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มจาก 10% จนถึง 90% หรือจาก 5% ถึง 95% หรือจาก 0% ถึง 100% ดังนั้นการกำหนดช่วงเวลาขึ้นจำเป็นต้องบอกด้วยว่าวัดโดยใช้ช่วงเวลาไหน

2) เวลาของค่ายอด (Peak Time, T_p) หมายถึง เวลาที่สัญญาณผลการตอบสนองมีค่าสูงสุดค่าแรกของผลการตอบสนองนั้นๆ

3) โอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum Overshoot, M_p) หมายถึง ค่าการตอบสนองสูงสุดที่วัดจากสถานะอยู่ตัวสุดท้าย (Final Steady State) การบอกค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดมักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เวลาเข้าที่ (Settling Time, T_s) หมายถึง เวลาที่ผลการตอบสนองลดลงจนเริ่มเข้าไปอยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งจะวัดเทียบกับค่าสุดท้ายของผลการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวสุดท้าย (Final Steady State) ค่าที่นิยมกำหนดสาหรับช่วงนี้มักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น 1%, 2% หรือ 5% เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 แสดงผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบ PID ต่อการตอบสนองของระบบ

ค่าเกน	ช่วงเวลาขึ้น (T_r)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (M_p)	เวลาเข้าที่ (T_s)	ค่าความผิดพลาด ณ สถานะอยู่ตัว
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนแปลงน้อยมาก	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงจนหมดไป
K_d	เปลี่ยนแปลงน้อยมาก	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

จากตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบพีไอดีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองของระบบ ซึ่งจะพบว่าค่าเกน K_p จะทำให้ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ลดลง และลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัว แต่ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดได้ ค่าเกน K_i จะมีหน้าที่หลักในการลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดไปแต่การเพิ่มค่าเกน K_i มากเกินไปก็จะทำให้ผลการตอบสนองชั่วครู่ของระบบเสียไปได้ส่วนค่าเกน K_d มีหน้าที่หลักในการลดโอเวอร์ชูตสูงสุดลง และทำให้ผลการตอบสนองชั่วครู่ของระบบดีขึ้น

2.3 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

2.3.1 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

การเลือกใช้ปั๊มที่เหมาะสมสำหรับงานในระบบสุญญากาศเป็นสิ่งจำเป็น ปั๊มสุญญากาศมีหลายชนิด มีทั้งปั๊มที่เอาโมเลกุลของก๊าซออกจากแชมเบอร์ (Chamber) จริงและชนิดที่จับหรือเปลี่ยนโมเลกุลของก๊าซไปเป็นรูปอื่น เช่น ของแข็งแล้วยึดติดกับผนังของปั๊ม ไม่ว่าจะเป็นปั๊มชนิดใดก็ตาม จุดประสงค์หลักของปั๊มสุญญากาศ คือ การลดจำนวนโมเลกุลของก๊าซภายในแชมเบอร์นั่นเอง พิสัยการทำงานของแต่ละชนิดของปั๊มไม่เหมือนกัน บางชนิดทำงานที่ความดันบรรยากาศ (760 ทอร์) จนถึงความดันระดับมิลลิทอร์ เช่น ปั๊มเชิงกล (Mechanical pumps) เป็นต้น โดยปกติแล้วไม่มีปั๊มสุญญากาศชนิดใดที่ทำงานที่ทุกระดับความดัน

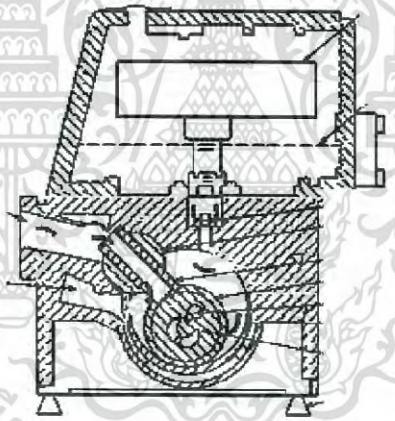
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 Rotary Piston Mechanical Pump

Rotary Piston Mechanical Pump หรือ Rotary Piston Oil Sealed Mechanical Pump หรือที่เรียกง่ายๆ ว่า Rotary Piston Pump ซึ่งปั๊มชนิดนี้จะทำการปั๊มอากาศออก โดยปล่อยให้อากาศไหลสู่ปั๊ม (Viscous flow) แล้วอัดและขับอากาศออกเชิงกลโดยการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ Rotary Piston Pump มีหลายขนาดมี Pumping speed ประมาณ 1,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาทีหรือมากกว่า

- ส่วนประกอบหลัก

Rotary Piston pump ประกอบด้วยลูกสูบทรงกระบอกกลวงที่มีลูกเบี้ยวที่มีศูนย์กลางไม่ตรงกัน (Eccentric cam) ขับให้ลูกสูบทำงานกระบอกสูบนี้อยู่ภายใน Stator chamber (ดูรูปที่ 2.31 ประกอบ) ลูกสูบมี Sliding vane ด้านบนหรือ Pistol slide chamber มี valve ให้อากาศออก (Exhaust valve) อยู่ใต้น้ำมันที่มีความดันไอต่ำ (Low vapor pressure oil) และน้ำมันนี้ยังช่วยหล่อลื่นปั๊มและ Seal ที่วางระหว่าง Rotor (Piston) กับ Stator (Stator chamber)



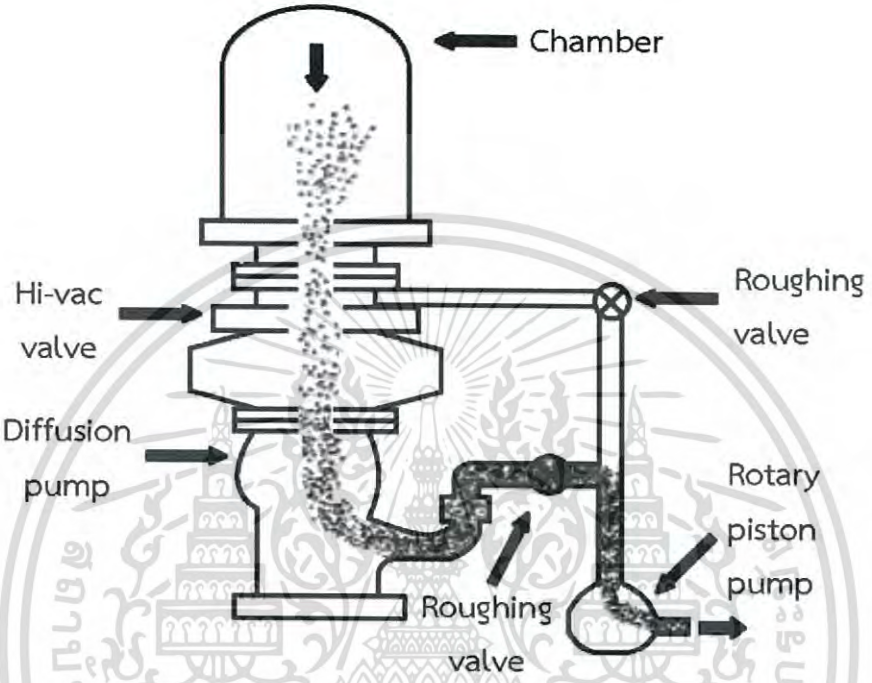
รูปที่ 2.31 แสดงส่วนประกอบหลัก Rotary Piston Pump

- การทำงานของ Rotary Piston Mechanical Pump

เมื่อลูกเบี้ยวหมุนจะทำให้ลูกสูบ (Rotor) ที่อยู่ภายใน Stator (Stator chamber) หมุนดังนั้นก๊าซที่มาสู่ Sliding vane หรือ Pistol slide จะถูกอัดโดยลูกสูบและถูกบังคับให้ออกไปทาง Discharge valve และท่ออากาศออก (Exhaust port) ปั๊มชนิดนี้ดูเหมือนว่าจะซับซ้อนในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นวิธีที่หยาบหรือง่ายที่สุดวิธีหนึ่งของปั๊มสุญญากาศทางอุตสาหกรรม ปั๊มชนิดนี้หากได้รับการบำรุงรักษาและใช้งานอย่างถูกวิธีแล้วอาจมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี หรือมากกว่า เนื่องจากมีการเคลื่อนที่เชิงกลของลูกสูบปั๊มชนิดนี้จะขับเคลื่อนด้วยสายพาน (Belt driven) ความร้อนที่เกิดจากการอัดก๊าซเพื่อขับอากาศออก และความร้อนที่เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขัดสีระหว่าง Rotor และ Stator ไม่เป็นปัญหาแก่ปั๊มเพราะมีที่ว่างระหว่าง Rotor และ Stator ประมาณ 2 – 3 ส่วนในพัน (1000) ของนิ้ว (2/1000 หรือ3/1000 นิ้ว) ที่ว่างนี้ทำให้ขีดจำกัดความดันที่ปั๊มชนิดนี้จะเข้าถึงคือประมาณ 10 ทอร์ ปั๊มชนิดนี้สามารถใช้เป็น Roughing pump หรือ Fore pump (Baking pump) เพื่อปั๊มอากาศที่ออกมาจาก High vacuum pumps ได้



รูปที่ 2.32 แสดงการทำงานของ Rotary Piston Mechanical Pump

- การบำรุงรักษา

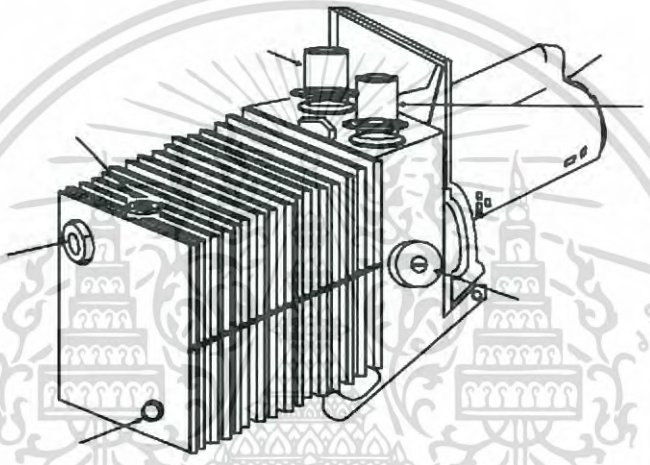
ตัวชี้วัดที่ดีที่สุดของการทำงานปกติของปั๊ม ส่วนใหญ่คือ การดูว่า Vacuum Pump สามารถเข้าถึงความดันต่ำสุดปกติ (Normal ultimate pressure) หรือ Base pressure ของมันหรือไม่การทดสอบนี้ทำได้โดยการแยก Pump inlet ออกจากที่ที่มี Gas loads มาก ขณะที่อัด Inlet pressure ด้วย Gauge ที่เชื่อถือได้การตรวจสอบสภาพน้ำมัน เช่น มีสารที่มี Vapor pressure สูงเจือปนหรือไม่ตรวจสอบความเสียหาย การสึกหรอ รวมทั้งการรั่วไหลจะช่วยลดปัญหาได้ การเพิ่มขึ้นของ Ultimate pressure เช่น ระดับน้ำมัน (Oil level) หรือมีสารที่มี Vapor pressure สูงในน้ำมัน เป็นต้น การมีสารที่มีความดันไอสูง เช่น มีน้ำปนอยู่กับน้ำมัน การเติมน้ำมันอาจไม่เกิดประโยชน์ ทางที่ดีควรเปลี่ยนน้ำมันใหม่ ถ้าน้ำมันมีลักษณะเป็นฟองสีขาวปรากฏที่กระจกส่องดูระดับน้ำมัน (Oil–level sight glass) ให้เปิด Gas ballast valve ประมาณครึ่งชั่วโมงหรือมากกว่านั้น เพื่อทำความสะอาดน้ำมันเนื่องจาก Rotary Pistol Pump ใช้สายพานในการขับลูกสูบ ดังนั้น สายพานควรอยู่ในสภาพที่เหมาะสมไม่ควรตึงหรือหย่อนเกินไป ตรวจสอบการสึกหรอเป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วผู้ใช้ควรศึกษาจากคู่มือการใช้งานจากผู้ผลิต (Manufacture's instruction หรือ Manual)

2.3.1.2 Rotary Vane, Oil–Sealed Mechanical Pump

ปั๊มชนิดนี้เอาอากาศออกโดยการอัดและขับออกสู่ความดันบรรยากาศภายนอกโดยตรง ใช้สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศให้ได้ Roughing หรือ Fore pressure ที่ต่ำกว่า Rotary Pistol Pump (ประมาณ 10^{-3} ทอร์) เนื่องมาจากความเสียดทานที่มาจากใบพัดที่หมุนเลื่อนได้ (Sliding vane) ปั๊มชนิดนี้จึงมีขนาดไม่ใหญ่นัก ขนาดใหญ่ที่สุดมีอัตราการปั๊มประมาณ 150 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (cfm) ขนาดเล็กที่สุดน้อยกว่า 1 cfm



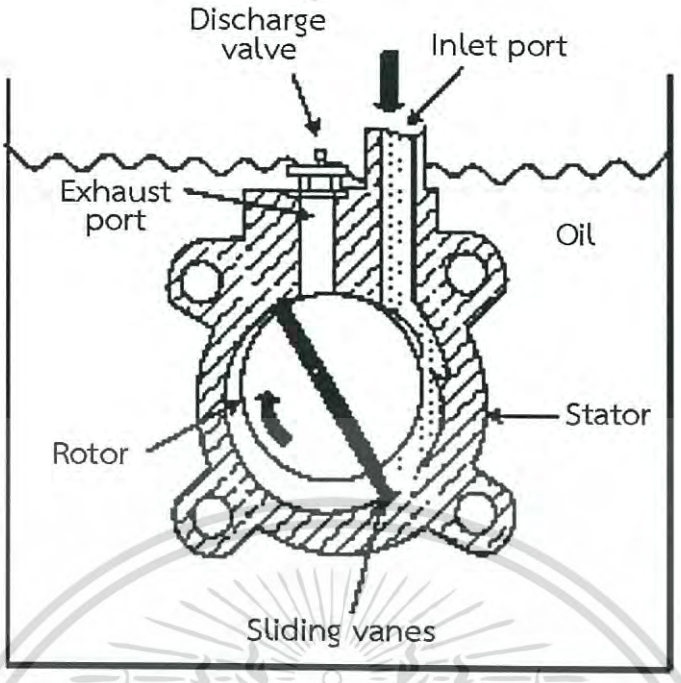
รูปที่ 2.33 แสดง Rotary Vane, Oil–sealed Mechanical Pump

Pump module จุ่มแช่ไว้ในอ่างน้ำมัน (Oil bath) น้ำมันชนิดที่ใช้เป็นน้ำมันที่ได้เอาสารที่ปนเปื้อนและมีความดันไอสูงออกไป น้ำมันของปั๊มชนิดนี้ทำหน้าที่ ดังนี้ ระบายความร้อนออกจากปั๊ม, หล่อลื่น (Lubricates), ซีล (Seal) ออกจากความดันบรรยากาศ, เปิดวาล์ว (Second–stage exhaust valve) ที่ความดัน Inlet ต่ำ

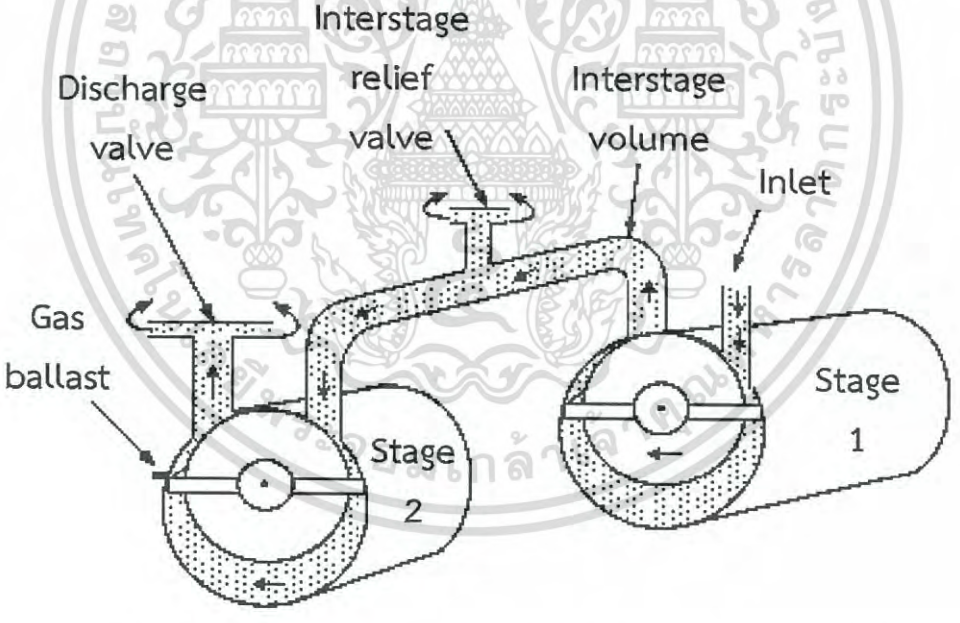
- ส่วนประกอบ

Rotary Vane, Oil–sealed Pump ประกอบด้วย Housing หรือ Stator, Offset rotor ที่มีใบพัดติดสปริง (Spring–loaded vane) ท่ออากาศเข้า (Intake port) และท่ออากาศออก (Exhaust port) ที่มี Discharge valve และอาจมี Ballast valve pump rotor อาจขับโดยสายพาน หรือมอเตอร์โดยตรง ถ้าชนิดขับโดยสายพานจะมีอัตราจาก 250 ถึง 400 รอบต่อนาที (rpm) ส่วนชนิดขับโดยใช้มอเตอร์โดยตรงมีอัตราประมาณ 1,725 รอบต่อนาที ปั๊มชนิดนี้ส่วนใหญ่มี 2 stages เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศที่ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



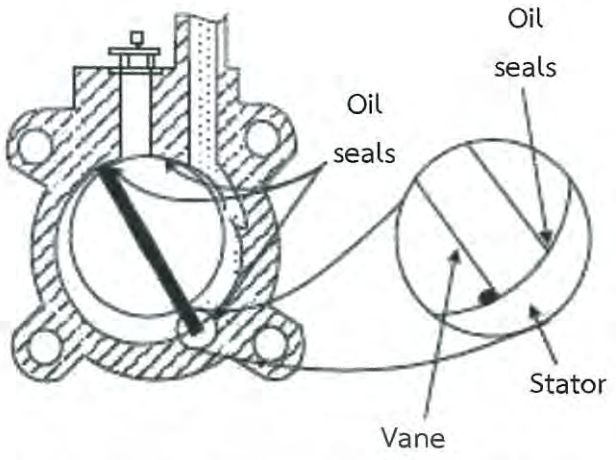
รูปที่ 2.34 แสดงส่วนประกอบ Rotary Vane, Oil-sealed Mechanical Pump



รูปที่ 2.35 แสดงสภาวะก๊าซจาก Vacuum chamber เข้าสู่ Inlet port

ก๊าซจาก Vacuum chamber เข้าสู่ Inlet port และถูก Sliding vane กวาดและอัดก๊าซ การอัดก๊าซทำให้เกิดความดันเอาชนะความดันบรรยากาศและทำให้ Spring-loaded discharge valve เปิดและก๊าซที่ถูกอัดนี้จะถูกขับออกสู่บรรยากาศ ปั๊มชนิดนี้สามารถนำเอาก๊าซออกจาก Chamber ได้มากกว่า 99.9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 แสดงฟิล์มบางของน้ำมันทำหน้าที่ Seal

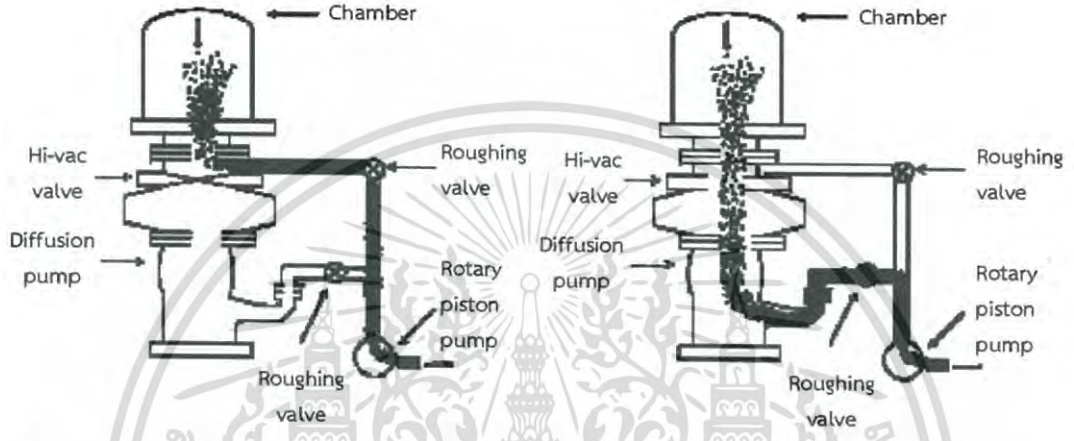
ฟิล์มบางของน้ำมันทำหน้าที่ Seal ขั้นสุดท้ายระหว่าง Sliding vane กับ Stator ดังนั้น Base หรือ Ultimate pressure บางส่วนขึ้นอยู่กับความดันไอของน้ำมันที่ใช้ Seal ถ้าน้ำมันมีน้ำหรือสารที่มีความดันไอสูงปนเปื้อนอยู่จะทำให้ไม่สามารถเข้าถึง Ultimate pressure น้ำมันมีส่วนสำคัญมากในปั๊มชนิดนี้ น้ำมันที่สกปรกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปั๊มชนิดนี้ทำงานได้ไม่ดี การใช้จุดเด่นของ Gas ballast ของปั๊มสามารถช่วยในการทำความสะอาดน้ำมันที่สกปรก ไอของสารที่สามารถควบแน่นได้ เช่น ไอน้ำจะก่อให้เกิดปัญหา การเปิด Gas ballast valve จะทำให้มีอากาศเข้ามาระหว่างจังหวะอัด (Compression cycle) ซึ่งการเปิดนี้เป็นสาเหตุให้ Exhaust valve เปิดในแต่ละจังหวะไอสารที่ควบแน่นได้ (Condensable vapors) จะถูกกวาดออกไปก่อนที่จะควบแน่น (Condense) สู่ภายในปั๊ม เมื่อ Oil-sealed pump ทำงานที่ความดันต่ำ มีแนวโน้มว่าจะมีไอของน้ำมัน (Oil vapor) ย้อนกลับเข้าสู่ Roughing line ไอน้ำมันนี้จะเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบสุญญากาศและอาจเกิดการปนเปื้อนใน Chamber และจะมีการไหลย้อนกลับมากถ้าภายใน Roughing line มีสถานะ การไหลเชิงโมเลกุล (Molecular flow) หรือความดันต่ำพอหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กพอ การไหลย้อนกลับของไอน้ำ มันสามารถควบคุมได้โดยการใช้ Trap ที่เหมาะสมในท่อ Trap ชนิดหนึ่งคือ Molecular sieve trap ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในส่วนของการบำรุงรักษา (Maintenance section) จำไว้เสมอว่า ถ้าได้กลิ่นน้ำมันใน Vacuum chamber มีแนวโน้มที่จะมาจาก Oil-sealed mechanical pump

- การใช้ในระบบสุญญากาศ

เช่นเดียวกับ Rotary Piston Pump, Rotary Oil-seal Mechanical Pump สามารถใช้งานได้ 2 ทางคือใช้ปั๊ม Chamber ที่ไม่ต้องการความเป็นสุญญากาศมากนัก (Rough chamber) หรือ Chamber ที่ต้องการความดันประมาณ 10^{-2} – 10^{-3} ทอร์ เช่น เครื่องเคลือบผิวตัวอย่าง (Sputter coater) เป็นต้น ใช้ทำงานร่วมกับ Vacuum pumps อื่นๆ เช่น Diffusion และ Turbomolecular pumps ในฐานะที่เป็น Fore pump (Backing pump)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก Diffusion และ Turbomolecular pumps ไม่สามารถนำก๊าซออกสู่ความดันบรรยากาศได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องใช้ Mechanical pumps เป็น Backing pump กล่าวคือ Diffusion และ Turbomolecular pumps จะนำก๊าซออกมาใส่ Mechanical pumps จากนั้น Mechanical pumps compress ก๊าซเหล่านั้น และขับออกสู่บรรยากาศ เมื่อ Mechanical pumps ถูกใช้เพื่อนำก๊าซที่ออกมาจากปั๊มอื่นออกสู่ภายนอกอีกครั้ง จะเรียก Mechanical pumps นี้ว่า Fore pumps หรือ Backing pump



รูปที่ 2.37 แสดงการใช้ในระบบสุญญากาศ Rotary Piston Pump, Rotary Oil–seal Mechanical Pump

- การบำรุงรักษา

สิ่งสำคัญในการบำรุงรักษาปั๊มชนิดนี้ คือ การตรวจสอบระดับของน้ำมัน สีของน้ำมัน เพื่อเติมน้ำมันหรือเปลี่ยนถ่ายน้ำมันแล้วแต่กรณี ถ้าน้ำมันมีสีปกติแต่ต่ำกว่าระดับปกติจะต้องเติมน้ำมัน แต่ถ้าน้ำมันมีสีขาวหรือฟองอาจเปิดสวิตซ์ให้ปั๊มทำงานขณะที่เปิด Gas ballast valve ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดน้ำมัน (Purge the oil) เมื่อใช้ไปเป็นเวลานานส่วนประกอบบางส่วนอาจสึกหรอจำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซ่อม ซึ่งสามารถดูได้จากคู่มือการใช้งานหรือเวปไซต์ของบริษัทผู้ผลิต เพื่อหาอะไหล่มาทดแทนชิ้นส่วนที่ชำรุด เมื่อจำเป็นต้องให้ Vacuum chamber ปราศจากน้ำมัน จึงจำเป็นต้องมี Molecular sieve trap ซึ่ง Trap ชนิดนี้จะป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำมัน (Oil back streaming) ไปสู่ Vacuum chamber โดย Trap นี้จะจำกัดการไหลของก๊าซทำให้มี Conductance น้อยลง เพื่อเป็นการขับไล่ไอน้ำมันหรือไอน้ำควรเผาอบ (Bake) Trap ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะๆ นอกจากนี้ยังมี Trap ชนิดอื่นๆ อีก โดยปกติจะประกอบด้วยชุดของทองเหลือง ทองแดงเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) หรือแก้ว โปรดระวังว่า Trap อาจเป็นแหล่งก่อให้เกิดการสะสมน้ำมันถ้าขาดการเอาใจใส่ ผู้ใช้ควรทำความสะอาดหรือเปลี่ยน Trap ใหม่เป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 Oil Diffusion Pump

Diffusion Pump หรือ Oil Diffusion Pump หรือเรียกง่ายๆ ว่า Diffusion Pump หรือ Vapor jet pump คือ High vacuum pump จะใช้ pump ชนิดนี้ใน Vacuum system ที่มี Throughput gas load มาก Diffusion pump จะไม่ทำงานที่ความดันบรรยากาศและไม่นำโมเลกุลของก๊าซสู่บรรยากาศโดยตรง และเริ่มทำงานหลังจากที่ Mechanical pump ได้เอาอากาศออกไปแล้วประมาณ 99% หรือเริ่มต้นทำงานที่ความดันประมาณ 10^{-3} ทอร์ ซึ่งเป็นช่วงที่ก๊าซมีการไหลแบบ Molecular flow ดังนั้นการทำงานของ Diffusion จำเป็นต้องมี Backing pump หรือ Fore pump มาต่อเพื่อทำโมเลกุลที่ Diffusion ออกมาทางด้านหลังและทิ้งออกไปสู่บรรยากาศภายนอกอีกครั้งหนึ่ง

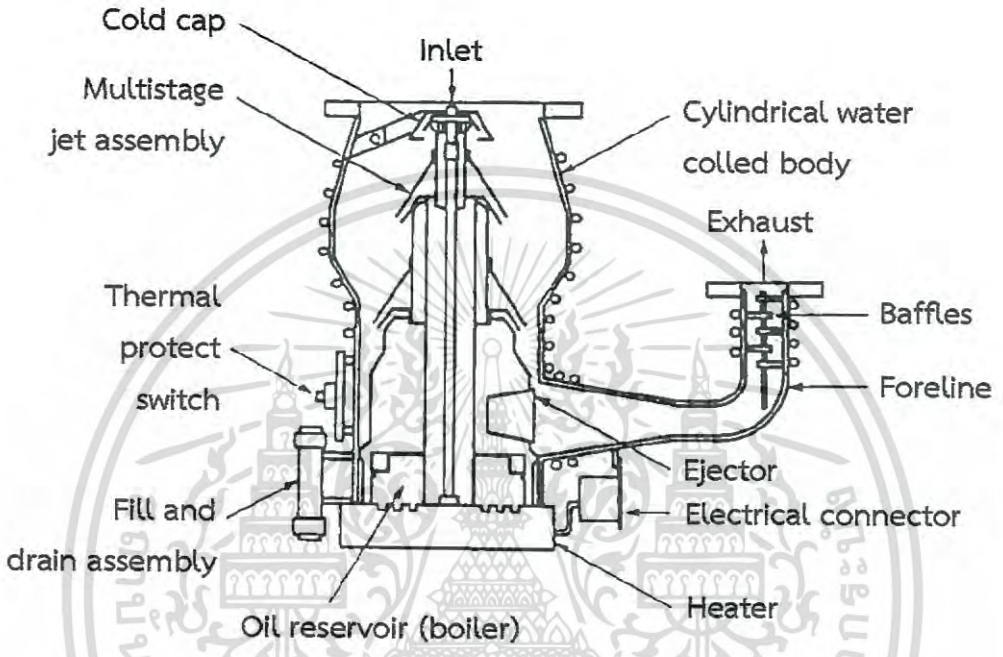
รูปที่ 2.38 แสดง Diffusion Pump

- องค์ประกอบ

หัวใจสำคัญของ Diffusion Pump คือ Multistage jet assembly โดย Jet assembly คือ กลุ่มของทรงกระบอกที่มีศูนย์กลางรวมกัน ปลายบนของทรงกระบอกเหล่านี้มีลักษณะคล้ายหมวกที่มีช่องเล็กๆ ซึ่งช่องเล็กๆ นี้จะทำให้ไอน้ำมันพุ่งออกมาในทิศทางลง อาจมี Cold cap ติดอยู่ที่ปลายบนสุดของ Jet assembly ซึ่ง Cold cap นี้ช่วยไม่ให้ไอน้ำมันของ pump แพร่ไปสู่ Vacuum chamber ซึ่ง Boiler/Heater ที่อยู่ส่วนล่างของ pump ทำหน้าที่ต้มน้ำมันให้ร้อนและกลายเป็นไอน้ำมันหรือสารอื่นๆ เช่น Organic liquid หรือปรอท แต่น้ำมันจะถูกใช้โดยทั่วไป นอกจากนี้แล้วยังมีส่วนที่ทำให้ไอน้ำมันเย็นและควบแน่นที่พันรอบผนังของ pump เรียกว่า อาจเป็นการทำให้เย็นโดยอากาศหรือน้ำก็ได้ (Water หรือ Air-cooled body) ด้านบนของ Heater จะเป็นอ่างน้ำมัน หลายยี่ห้อหรือหลายรุ่นจะมีที่เติมน้ำมันและที่เทน้ำมันทิ้ง ด้านบนของ pump จะมีทางเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโมเลกุลของอากาศเข้ามาเรียกว่า Inlet (อากาศจาก Vacuum pump เคลื่อนที่ผ่าน Inlet เข้าสู่ Diffusion pump โดย Molecular flow) ซึ่ง Inlet จะมีขนาดกว้างพอๆ กับขนาดของ Chamber ด้านล่างจะมีท่ออากาศออก (Exhaust) จาก Diffusion pump นี้จะต่อกับ Foreline (เพื่อต่อเข้ากับ Backing pump หรือ Fore pump ซึ่งเป็น Mechanical pump เช่น Rotary vane pump อีกครั้งหนึ่ง)



รูปที่ 2.39 แสดงองค์ประกอบ Diffusion Pump

- หลักการทำงาน

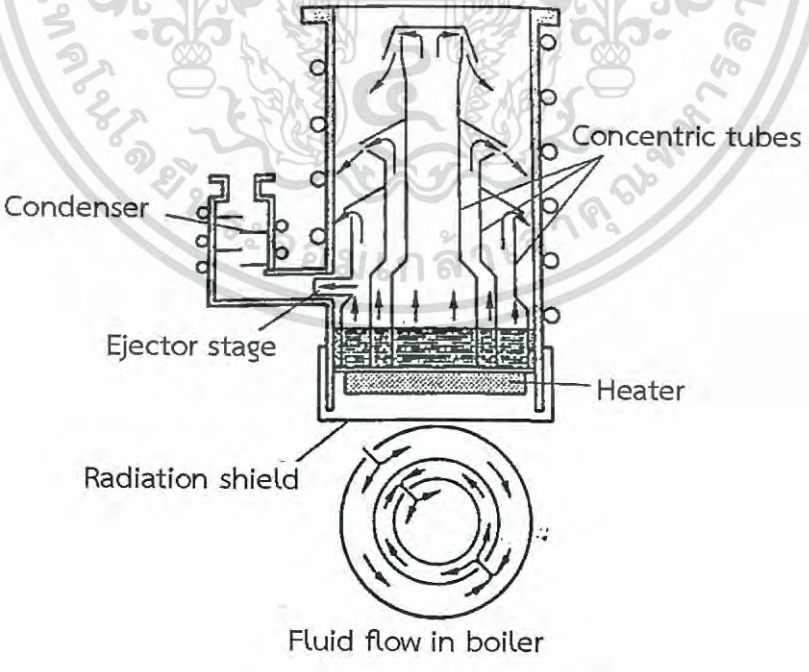
Diffusion Pump ทำงานโดยการต้มน้ำมันให้เดือด ไอน้ำมันจะเคลื่อนที่ขึ้นภายใน Jet assembly และออกมาทางช่องรูเล็กๆ เรียกว่า Jet nozzle จากหลักการของ Bernoulli เมื่อโมเลกุลของไอน้ำมันเคลื่อนที่จากทรงกระบอกที่ใหญ่แล้วออกมาทาง Jet nozzle ที่เล็กๆ แล้วจะทำให้โมเลกุลไอน้ำมันที่หลุดออกมาจาก Jet nozzle มีอัตราเร็วสูงมาก อัตราเร็วของโมเลกุลไอน้ำมันที่ออกมาจะมีอัตราเร็วประมาณ 750 ไมล์ต่อชั่วโมง หรือ 1,200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (Supersonic speed) ไอของน้ำมันวิ่งชนผนังของ pump และที่ผนังจะมีท่อน้ำช่วยให้ผนังเย็นตัว ดังนั้นเมื่อโมเลกุลของน้ำมันชนผนังจะเย็นตัว และควบแน่นกลายเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านล่าง เพื่อการต้มให้เดือดกลายเป็นไออีกครั้งหนึ่ง การปั๊มโมเลกุลของก๊าซเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของน้ำมันที่มีขนาดใหญ่หนัก และความเร็วสูงชนโมเลกุลของก๊าซที่เคลื่อนที่ลงมาทาง Inlet สู่ pump โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนจะเคลื่อนที่ลงและถูกอัดโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไอน้ำมันอัตราเร็วสูง โดยการอัดโมเลกุลของหลายๆ stages ทำให้เกิดความดันสูง (ประมาณ 10^{-3} ทอร์) และโมเลกุลของก๊าซเหล่านี้ถูกปั๊มออกไปทาง Foreline โดย Mechanical pump นอกจาก Jet assembly ที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ Diffusion pump สมัยใหม่ได้เอา Ejector stage รวมเข้าด้วย Ejector stage ช่วยในการเอาโมเลกุลของก๊าซออกจากตัว pump และเอาโมเลกุลของก๊าซเข้าไปสู่ Foreline การทำเช่นนี้ทำให้เกิดความดันสูงขึ้นใน Foreline และมีผลให้ Mechanical fore pump (Mechanical pump ที่ต่อติดกับท่อ Foreline) ทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการนำเอาโมเลกุลของก๊าซออกไป Diffusion pump ที่มี Ejector stage โดยทั่วไปแล้วจะมี Baffle ใน Foreline เพื่อช่วยป้องกันการสูญเสียไอน้ำมันไปสู่ Fore pump

- Fractionation

Diffusion pump บางชนิดถูกออกแบบ เพื่อใช้ในกระบวนการกลั่นบางส่วนอย่างง่าย (Simple fractional distillation process) ที่ช่วยทำให้ไอน้ำมันที่ควบแน่นบริสุทธิ์ กระบวนการนี้เรียกว่า Fractionation รูปที่ 2.40 แสดง pump ที่มี Fractionating ไอน้ำมันควบแน่นกลายเป็นของเหลวและกลับสู่ Boiler จากผนังทำให้เกิดการไหลของน้ำมันจากด้านรอบนอกสู่ศูนย์กลาง เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนก็จะเกิดไอตลอดเวลา เมื่อนานๆ ไปน้ำมันจะสลายตัวและเกิดการปนเปื้อนหรือเรียกว่า Lighter fraction และอาจมากขึ้นเรื่อยๆ อาจเป็นเหตุให้อัตราการปั๊มลดลง จำเป็นต้องปล่อยน้ำมันทิ้งและเติมใหม่ การออกแบบพิเศษจำเป็นต้องกระทำเพื่อลด Lighter oil fraction ดังนี้ Boiler และ Jet assembly ถูกออกแบบเพื่อแยก Fractions เมื่อ Fractions เกิดขึ้น Fractions เหล่านี้จะถูกปั๊มออกไปกับก๊าซอื่นๆ การทำให้น้ำบริสุทธิ์จะคงอยู่เสมอพื้นที่ผิวมากของแผ่นกระจายความร้อนเพื่อลดการก่อตัวของ Lighter oil fractions



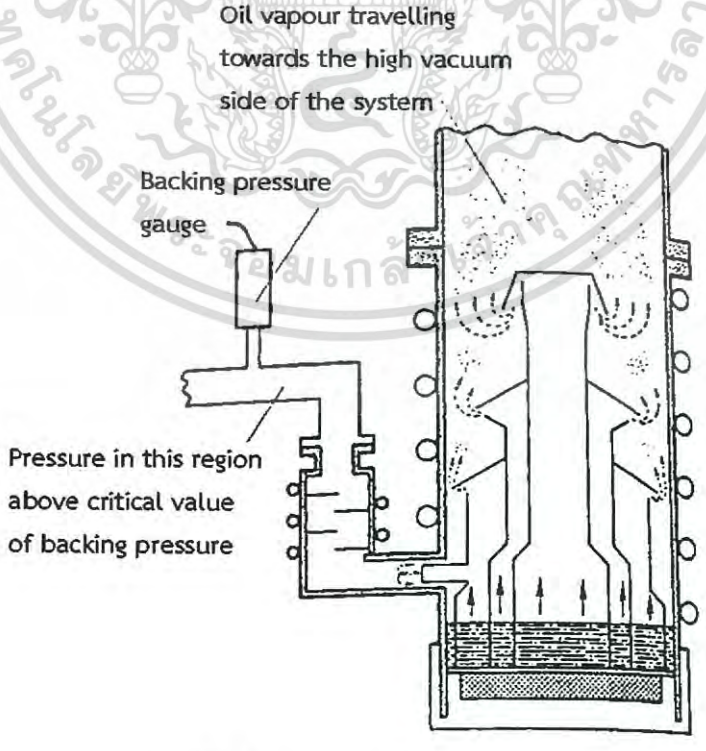
รูปที่ 2.40 แสดง Fractionation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ในการออกแบบท่อทรงกระบอกที่อยู่ในแนวดิ่งของ Jet assembly จะแยกไอน้ำมันจาก First stage ออกจากอันอื่นๆ การออกแบบเช่นนี้ก็เพื่อรับประกันว่าน้ำมันที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุด เข้าถึงศูนย์กลางของ Boiler และถูกทำให้เป็นไอ ขับขึ้นสู่ First-stage (Top stage) ไอของน้ำมันที่มีความบริสุทธิ์น้อยถูกขับขึ้นสู่ Lower stages

- Back streaming

อาจเกิดขึ้นกับ Diffusion pump ซึ่งหมายถึง ไอน้ำมันเคลื่อนที่ผิดทิศทางไปยัง Vacuum chamber มีวิธีหลายอย่างที่จะลดจำนวน Back streaming ตาราง 2.4 แสดงให้เห็นว่า Cryotraps และส่วนประกอบอื่นที่ใส่เข้าไปใน Diffusion pump มีผลต่ออัตรา Back streaming อาจสังเกตว่าอัตราการปั๊มจะลดลงเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ควบคุม Back streaming หลักการทำงานของอุปกรณ์ลด Back streaming จะบรรยายในหัวข้อถัดไปหากมี Back streaming เกิดขึ้นจำเป็นต้องทำความสะอาดระบบสุญญากาศ ไอของน้ำมันจะติดอยู่ใน Vacuum chamber back streaming มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น การเปิด High vacuum valve ที่ความดันสูง การสูญเสียการทำงานของ Mechanical fore pump ซึ่งเป็นเหตุจากสายพานขาด มอเตอร์ไม่ทำงาน หรืออาจเกิดจากการเปิด valve ผิดพลาดขั้นตอนซึ่งทำให้เกิด Overpressure ใน Foreline นอกจากนี้แหล่งอื่นของน้ำมันที่อาจเข้าไปใน Vacuum chamber คือ Mechanical pump หรือ Fore pump เมื่อ Mechanical pump ทำงานในพิสัยของ Molecular flow ไอน้ำอาจเข้าสู่ท่อและเข้าสู่ Chamber



รูปที่ 2.41 แสดง Back streaming

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diffusion pump ไม่สามารถนำเอาก๊าซออกสู่บรรยากาศได้โดยตรง Diffusion pump จะอัดก๊าซที่เคลื่อนที่ลงมา (แบบ Molecular flow) จนทำให้ก๊าซมีความดันในพิสัย มิลลิทอร์ ส่งออกทาง Foreline valve แล้วส่งออกสู่ Mechanical pump ซึ่งทำหน้าที่ปั๊มอากาศที่ออกมาจาก Diffusion อีกครั้งหนึ่งเพื่อขับสู่ภายนอกที่ความดันบรรยากาศ ถ้าให้ Diffusion pump ทำงานที่ความดันบรรยากาศอาจเป็นผลเสียต่อไอน้ำมัน น้ำมันอาจเกิดไฟไหม้หรือระเบิดได้รวมทั้งเกิดการปนเปื้อนกับไอน้ำมันทำให้การทำงานและอัตราการปั๊มลดลงไปมาก ดังนั้น ความดันในท่อ Foreline จะต้องต่ำกว่าความดันที่มากที่สุดที่ Foreline จะทนได้ (Maximum tolerable pressure)

- Maximum Tolerable Foreline Pressure

Maximum Tolerable Foreline Pressure คือ ตัววัดความสามารถของ Diffusion pump ที่ปั๊มก๊าซต้านกับความดันภายนอกที่ท่อ Foreline ถ้าความดันในท่อ Foreline สูงเกินค่านี้ ไอน้ำมันและโมเลกุลของก๊าซจะถูกโมเลกุลของก๊าซที่มีความดันในท่อ Foreline สูงกว่าผลักให้ย้อนกลับไอน้ำมันจะทำให้ Vacuum chamber สกปรกและทำให้ความดันใน Chamber สูงขึ้น Critical fore pressure คือ อีกเทอมหนึ่งที่ใช้ในการบรรยาย Maximum tolerable pressure ถ้าความดันที่ท่อ Foreline สูงเกินไปไอน้ำมันจะไหลย้อนกลับหรือไหลขึ้นบน (ไหลเข้าสู่ Vacuum chamber) ดังนั้น แทนที่จะปั๊มก๊าซออกมา Diffusion pump ทำให้เกิดการปนเปื้อนใน Chamber เนื่องจากไอน้ำมันถูกผลักดันให้เคลื่อนที่ขึ้นในทิศทางที่ผิด ในทางเทคนิค เรียกสิ่งนี้ว่า Dumping ด้วยเหตุนี้ Mechanical pump ที่มีขนาดเหมาะสมที่จะทำหน้าที่เป็น Backing pump สำหรับ Diffusion pump จำเป็นต้องใช้เพื่อที่จะปั๊มก๊าซออกจากท่อ Foreline และทำให้ความดันที่ท่อ Foreline อยู่ในระดับที่เหมาะสม Pumping speed ของ Diffusion pump โดยปกติอยู่ในหน่วยลิตรต่อวินาที อัตรานี้คงที่ที่ความดันต่ำกว่า 1 มิลลิทอร์ อย่างไรก็ตาม ที่ความดันต่ำกว่า 1 ลิตรของก๊าซประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลน้อยกว่าหนึ่งลิตรที่ความดันสูง ดังนั้น กระบวนการปั๊มจะช้าลงเรื่อยๆ และในที่สุดระบบจะเข้าถึงความดันต่ำที่สุดหรือ Ultimate pressure เมื่อจำนวนโมเลกุลที่ถูกปั๊มออกไปจาก Chamber โดยก่อนหน้านี้โมเลกุลเหล่านี้ไม่อยู่ใน Gas phase เช่น โดยกระบวนการ Outgassing หรือ Virtual leak จากผิวภายใน Chamber

- Diffusion Pump Fluids

Diffusion pump fluids และ oils มีความสำคัญในการกำหนด Ultimate pressure ที่จะเข้าถึงได้โดย Diffusion pump ที่ Inlet น้ำมันสำหรับ Diffusion pump ถูกสังเคราะห์ให้มีความดันไอต่ำมากๆ (Very low vapor pressure) ที่อุณหภูมิทำงาน ตารางข้างล่างนี้แสดงคุณสมบัติของ Diffusion pump fluids บางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของ Diffusion pump fluids บางชนิด

Trade name	Chemical name	Vapor pressure at 20 °C (Torr)	Viscosity at 20 °C (Cs)	Ultimate pressure (Torr)
Octoil	Diethy hexyl phthalate	10^{-7}	75	10^{-5} - 10^{-7}
DC-704	Tetraphenyl tetramethyl Trisiloxane	10^{-8}	47	$5x10^{-6}$ - 10^{-9}
Apiezon C	Paraffinic hydrocarbon	$4x10^{-9}$	295	$5x10^{-5}$ - 10^{-7}
DC-705	Pentaphenyl trimethyl Trisiloxane	$5x10^{-10}$ (25 °C)	170 (25 °C)	$5x10^{-6}$ - 10^{-9}
Santovac-5	Mixed five-ring polyphenyl ether	$1.3x10^{-9}$ (25 °C)	2500 (25 °C)	10^{-9}
Neovac SY	Alkyldiphenyl ether	< $1x10^{-8}$	250 (25 °C)	10^{-9}
Fomblin25/9	Perfluorinated polyether	$2x10^{-9}$	270	$2x10^{-8}$
Krytox 1625	Perfluoro polyether	$2x10^{-9}$	250	$2x10^{-8}$

- การใช้งานในระบบสุญญากาศ

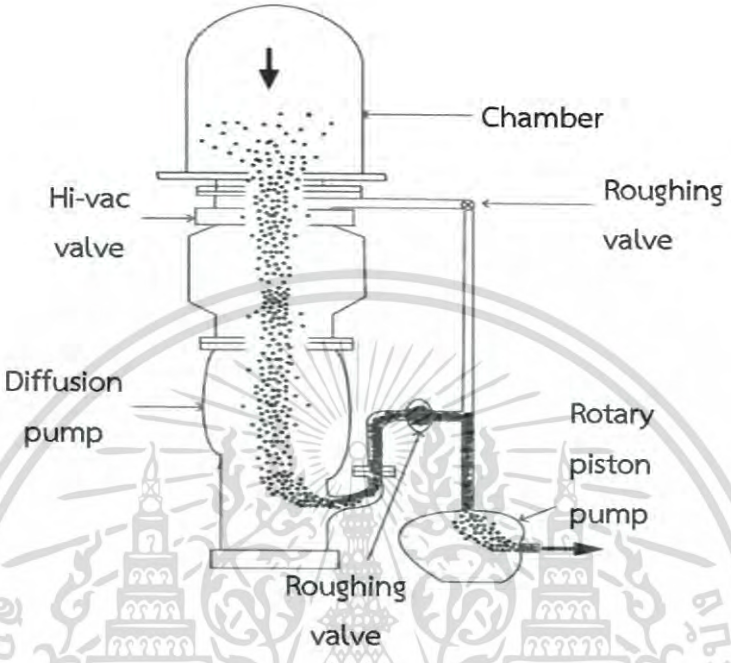
Diffusion pump ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับ High vacuum systems จะใช้งาน (Operation) การเปิด–ปิด Valve ระบบสุญญากาศ

- การบำรุงรักษา

ถ้าใช้งาน Diffusion pump อย่างถูกต้อง การบำรุงรักษาเป็นสิ่งง่าย เมื่อแยกส่วนหรือถอดส่วนต่างๆ ออกจากกัน O–ring ที่ใช้แล้วควรเปลี่ยนอันใหม่ สิ่งที่ควรระวังเป็นพิเศษ คือ ถ้าใช้ Diffusion pump ปั๊มก๊าซพิษในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิด เช่น CdS เป็นต้น สารพิษเหล่านั้นอาจปนเปื้อนในน้ำมัน จำเป็นต้องทิ้งน้ำมันในที่ที่ถูกออกแบบไว้ สำหรับทิ้งสารพิษและน้ำมัน เพื่อความปลอดภัยและรักษาสิ่งแวดล้อม การทำความสะอาดจำเป็นต้องแยกส่วนประกอบทั้งหมดออก ผิวภายในและชิ้นส่วนต้องทำความสะอาด ล้างเพื่อขจัดคราบหรือฟิล์ม

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสาร ตามคำแนะนำในคู่มือจากบริษัทผู้ผลิต O-ring อันใหม่ควรหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นก่อนประกอบกลับคืนชิ้นส่วนประกอบต่างๆ จะต้องไม่มีน้ำหรือไอน้ำเกาะติด เมื่อประกอบแล้วจะต้องเติมน้ำมันใหม่ที่สะอาดเข้าสู่ Diffusion pump

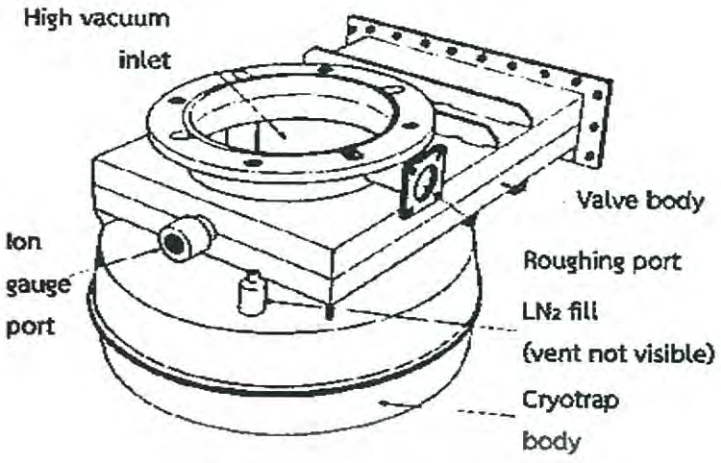


รูปที่ 2.42 แสดงการบำรุงรักษา Diffusion pump

2.3.1.4 Baffles และ Traps

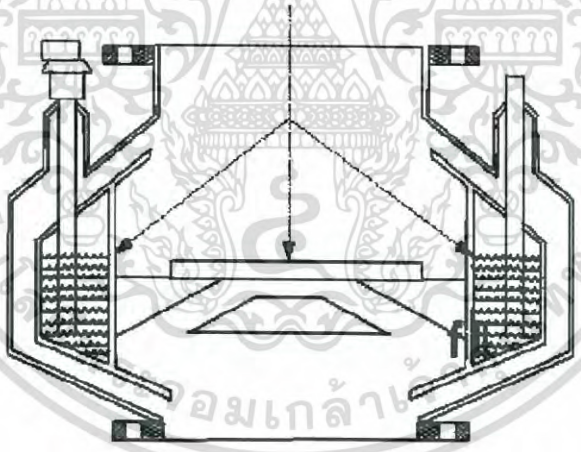
Baffles และ Traps ไม่ใช่ pump แต่เป็นอุปกรณ์เสริม โดยมีจุดประสงค์เพื่อลด Back streaming หรือป้องกันไอน้ำมันจาก pump ไหลย้อนไปสู่ Vacuum chamber และทำให้ Condensable gases ควบแน่น Baffle คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแถวของพื้นผิวที่เย็นจำนวนมากที่ติดตั้งไว้เหนือ Inlet ของ Diffusion pump ผิวของ Baffle อาจถูกหล่อเย็นด้วยน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ที่ไหลอยู่ภายใน วัตถุประสงค์ของการใช้ Baffle คือ เพื่อควบแน่นไอสาร Back streaming ให้กลับสู่ pump อุณหภูมิของ Baffle จะต้องต่ำกว่าผิวภายใน Vacuum chamber โดยทั่วไปยิ่งอุณหภูมิของ Baffle ยิ่งต่ำประสิทธิภาพของ Baffle ยิ่งดี และยังผลให้ความดันภายใน Vacuum chamber ลดลง Trap และ Cryotrap ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า Baffle มากๆ โดยทั่วไป Trap ทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน หรือ -196 องศาเซลเซียส) สามารถควบแน่น Back streaming จาก Diffusion pump, Outgassing จาก Vacuum chamber ซึ่งโดยประมาณ 90% ของ Outgassing load คือ ไอน้ำซึ่งสามารถถูกปั๊มออกไปด้วยวิธี Cryopumped โดย Trap รูปข้างล่างแสดง Baffle และ Trap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.43 แสดง Baffles และ Traps

Cryotrap หรือ Liquid nitrogen cold trap มีอ่างไนโตรเจนเหลวและพื้นที่ผิว Baffling ไนโตรเจนเดือดและกลายเป็นไอออกทาง Vent port เนื่องจากไนโตรเจนเหลวมีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ผิวของ Trap เย็นจัดมาก Cryotrap ยังมีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า Open–loop refrigeration system เนื่องจากมันมี Coolant vent สู่บรรยากาศ

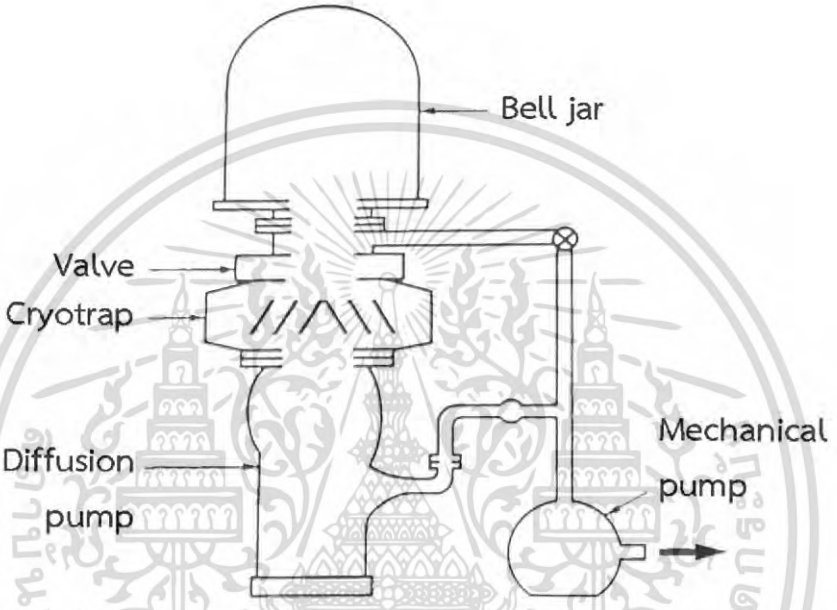


รูปที่ 2.44 แสดงการทำงาน Baffles และ Traps

Cryotrap ทำงานโดยทำให้ก๊าซเย็นจัด ควบแน่นบนผิวที่เย็นจัดของมัน Cryocondensation ที่มีประสิทธิภาพนี้ช่วยเอาโมเลกุลออกจาก Vacuum chamber และช่วยควบแน่นไอน้ำมันจาก Diffusion ไม่ให้ Back streaming เข้าสู่ Vacuum chamber ไนโตรเจนเหลวควรเติมหลังจาก Roughing pressure ประมาณ 50 มิลลิทอร์ หรือน้อยกว่าที่ความดันนี้ไอน้ำและก๊าซได้ถูกปั๊มออกเป็นส่วนใหญ่ mean free path ของก๊าซที่เหลือจะยาวเพียงพอที่จะสร้าง Insulating vacuum (แยก Vacuum chamber ออกจาก Trap) ถ้าไนโตรเจนถูกเปิดสู่ความดันสูงกว่า 100 มิลลิทอร์ ไอน้ำและก๊าซที่เหลืออยู่มากจะควบแน่นและกลายเป็นน้ำแข็งเกาะบนผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trap น้ำแข็งที่เกาะบนผิวของ Trap จะเป็นฉนวนแยกผิวเย็นจัดของ trap ออกจากก๊าซ (ก๊าซไม่ได้รับความเย็นจัด -196 องศาเซลเซียส ที่ผิวของ Trap เพราะมีน้ำแข็งเกาะแล้ว) ทำให้ลดประสิทธิภาพการทำงาน (ลด Pumping action) ของ Cryotrap ในทางตรงกันข้าม ถ้า Chamber ถูก pump ปั๊มก๊าซส่วนใหญ่ออกไปเกือบหมด (ออกไปประมาณ 99.99% ที่ 10^{-3} ทอร์ หรือเหลือ 0.01%) ดังนั้น Cryotrap จะทำหน้าที่ต่อในการ Trapping ก๊าซส่วนน้อยที่เหลือ (แต่สำคัญ) ที่เป็น Condensable gases อย่างมีประสิทธิภาพ

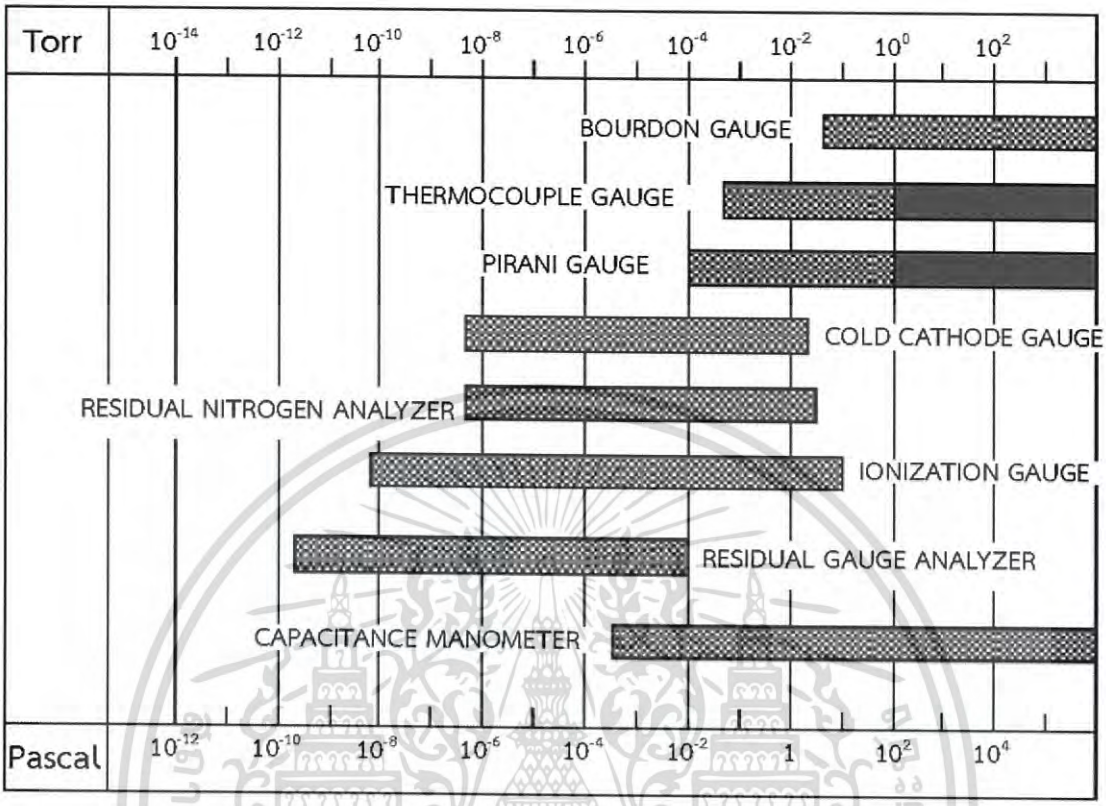


รูปที่ 2.45 แสดงการทำงานของ Cryotrap

โดยปกติแล้ว Cryotrap ถูกใช้ร่วมกับ Diffusion pump (หรือ High และ Ultrahigh vacuum pump systems) บางทีการใช้ Cryotrap ใน roughing line เพื่อลดไอน้ำมันของ Mechanical pump ที่แพร่เข้าสู่ Work chamber อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีการป้องกันไอน้ำมันแพร่จาก Mechanical pump นี้ การใช้ Molecular sieve trap อาจได้ผลดีกว่า ถ้า Cryotrap ไม่ถูกทำให้เย็น หรือไม่ได้เติมไนโตรเจนเหลว ผิวของ Trap จะอุ่นขึ้นเป็นเหตุในการปลดปล่อยก๊าซที่ควบแน่นที่ผิวทำให้ความดันภายในระบบเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิวของ Trap เพิ่มขึ้นอีกอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในระบบ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ ควรปิด valve ระหว่าง Work chamber กับ Cryotrap ถ้ามีความเป็นไปได้ที่ผิวของ Cryotrap จะมีการอุ่นขึ้น (อุณหภูมิสูงขึ้น) Cryotrap จำเป็นต้องได้รับการเติมไนโตรเจนเหลวก่อนที่จะมีการอุ่นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 เกจวัดความดัน (Pressure gauge)



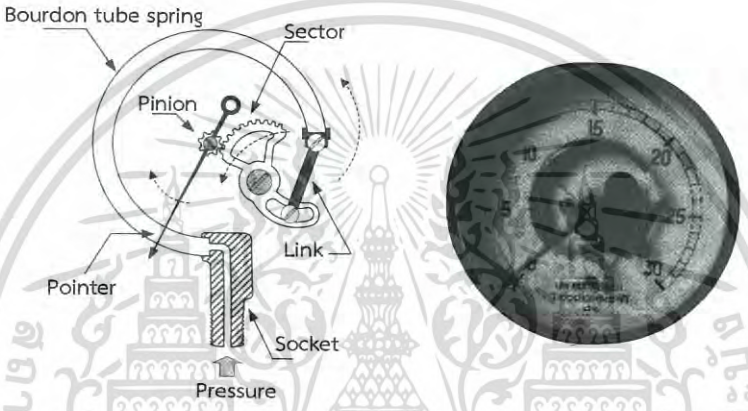
รูปที่ 2.46 แสดงพิสัยของความดันสำหรับแต่ละชนิดของเกจทำงาน

เทคโนโลยีสุญญากาศเกี่ยวข้องกับพิสัยของความดัน ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับขนาดประมาณ (Order of magnitude) 15 จาก 760 ทอร์ ถึง 10^{-12} ทอร์ การเปลี่ยนแปลงระดับขนาดของความดันที่มากขนาดนี้ไม่มี transducer ใดๆ ที่จะทำงานได้ตลอดพิสัยความดันนี้ เช่นเดียวกับ vacuum pump ดังนั้น การที่จะวัดความดันในพิสัยกว้าง จำเป็นที่จะต้องใช้เกจหลายตัว อย่างน้อยที่สุดต้องมีสองตัวหนึ่งตัวในพิสัย 760 ทอร์ ถึง 10^{-3} ทอร์ และอีกตัวหนึ่งในช่วง 10^{-4} – 10^{-12} ทอร์ ยิ่งระบบเป็นสุญญากาศดีเท่าไร การวัดความดันที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งจะยากขึ้นเท่านั้น เมื่อความดันต่ำลงมากจำนวนของก๊าซจะเหลือน้อยมาก ดังนั้น การวัดความดันโดยตรง (Direct gauge) จากนิยามของความดันจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่มีค่าน้อยเกินไปที่จะวัดได้โดย Transducer ใดๆ อย่างไรก็ตาม เราสามารถวัดความดันที่ความดันที่ความดันต่ำ หรือเมื่อมีก๊าซน้อยได้โดยการวัดคุณสมบัติของก๊าซที่เปลี่ยนไป รูปที่ 2.46 แสดงพิสัยของความดันสำหรับแต่ละชนิดของเกจทำงาน เฉพาะเกจวัดความดันที่เป็นที่นิยมใช้สำหรับความดัน 760 – 10^{-3} ทอร์ Bourdon gauge, Capacitance manometer, Thermocouple gauge และ Pirani gauge สำหรับความดัน 10^{-4} – 10^{-12} ทอร์ Ionization gauge และ Residual gas analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 Bourdon gauge

Bourdon gauge ประกอบไปด้วย ท่อโลหะที่โค้ง และอาจมีฟันเฟือง (Gear) และกระเดื่อง (Lever) ติดกับเข็ม ปลายด้านที่ติดกับเข็มเป็นปลายปิด อีกด้านหนึ่งเป็นปลายเปิดสู่ Vacuum chamber ที่จะวัด ดังรูปที่ 2.47 เมื่อก๊าซมีความดันกระทำจะทำให้ส่วนโค้งเบนไป การเบนไปของส่วนโค้งจะถ่ายไปยังเข็มวัดโดยผ่านทางกระเดื่องและฟันเฟือง หน้าปัด Meter scale ของ Bourdon gauge แต่ละผู้ผลิตอาจไม่เหมือนกัน scale อาจถูก calibrated เป็น 0 - 15 psi หรือ 0 - 760 ทอร์ อย่างไรก็ตาม ถ้าความดันต่ำกว่า 10 ทอร์ อาจไม่สามารถเชื่อถือได้ ความละเอียดของ Bourdon gauge ประมาณ 0.2 ทอร์



รูปที่ 2.47 แสดง Bourdon gauge

ค่าความดันที่อ่านได้จาก Bourdon gauge เป็นค่าความดันสัมพัทธ์ เนื่องจากเป็นการเทียบความดันภายในท่อเทียบกับความดันภายนอกท่อ แต่เนื่องจากความดันภายนอกเปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปโดยทั่วไปเปลี่ยนไปมาประมาณ ±10%

2.3.2.2 Capacitance manometer

Capacitance manometer เป็นเกจชนิดหนึ่งที่สามารถวัดความดันในพิสัยของ rough vacuum สามารถวัดความดันสัมบูรณ์ หรือความดันสัมพัทธ์ ขึ้นอยู่กับชนิดของเกจ เป็นเกจวัดความดันที่วัดความดันได้จากความดันบรรยากาศ 760 ทอร์ จนถึง ความดัน 10^{-4} ทอร์ ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ Sensing unit ซึ่งประกอบไปด้วย Diaphragm ที่เป็นโลหะสำหรับให้ถูกกับก๊าซที่เราจะวัดความดัน สำหรับการวัดความดันสัมบูรณ์ อีกด้านหนึ่ง (ด้านอ้างอิง) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่ถูกบิด (Sealed) ใน High vacuum cavity นอกจากนี้ ยังมี Processing unit ที่ทำหน้าที่ประมวลผลของสัญญาณจาก Sensing unit ที่ความดันบรรยากาศ จะมีโมเลกุลก๊าซจำนวนมากชนกับไส้ลวดความร้อน โมเลกุลของก๊าซจะนำความร้อนออกไปจากไส้ลวดความร้อน ปริมาณของความร้อนที่ออกไปจะเกี่ยวข้องกับจำนวนโมเลกุลของก๊าซใน Vacuum chamber ที่ความดันสูงมีโมเลกุลก๊าซมาก ความร้อนจะถูกลำเลียงออกไปมาก ดังนั้น ไส้ลวดความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เย็นกว่า) TC ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้น้อยกว่า เมื่อเราปั๊มก๊าซออกไปจะมีจำนวนโมเลกุลก๊าซน้อยไปชนกับไส้ลวดความร้อน ความร้อนจะถูกลำเลียงออกไปน้อย ดังนั้น ไส้ลวดจะมีอุณหภูมิสูงกว่า (ร้อนกว่า) TC ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้มากกว่า สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะถูกแปลงไปเป็นความดัน ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (แรงเคลื่อนไฟฟ้า) ไม่ได้แปรผันเป็นเชิงเส้นโดยตรงกับปริมาณก๊าซ (ความดัน) ดังนั้น สเกลความดันบน TC gauge จึงไม่ใช้เชิงเส้น TC gauge หยุดทำงานเมื่อความดันประมาณ 10^{-3} ทอร์ เพราะว่า การสูญเสียความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสี (Radiation) มีมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการนำความร้อนและการพาความร้อน เมื่อเทียบกับ gauges ชนิดอื่นๆ TC gauge มีเวลาที่ตอบสนองมาก เนื่องจากไส้ลวดความร้อนจะต้องใช้เวลาในการทำให้ร้อนขึ้นหรือเย็นลงเมื่อความดันเปลี่ยน

- การบำรุงรักษา

ถ้าหน่วยตรวจวัด (Sensing unit) หรือหัวเกจสกปรก เราสามารถล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น เมทานอล หรืออะซีโตน อย่างไรก็ตาม สามารถเปลี่ยนอันใหม่ได้ เมื่อทำความสะอาดหรือเปลี่ยน TC gauge เราควรปรับการอ่านให้ถูกต้อง วิธีทำง่ายๆ คือเมื่อมั่นใจว่าระบบสะอาดและไม่มีการรั่ว และเมื่อเราได้ปั๊มๆ อากาศออกไปนานไปพอสมควรด้วย Mechanical pump และ Diffusion หรือ Turbomolecular pump ประมาณต่ำกว่า 10^{-3} ทอร์ (เช่น 10^{-4} ทอร์) แล้วปรับการอ่าน TC gauge เป็นศูนย์ (ทำเช่นเดียวกับการอ่านมัลติมิเตอร์ เมื่อไม่มีความต้านทานให้ปรับ 0 โอห์ม แต่ความจริงไม่ใช่ 0 โอห์ม เพราะสายวัดมีความต้านทานอยู่หลายโอห์มขึ้นอยู่กับขนาดและความยาว) หาก Thermocouple ขาด อาจต่อเชื่อมลวด Thermocouple โดยวิธี Spot weld จากนั้นทำการปรับศูนย์ที่มิเตอร์เกจดังที่ได้อธิบายผ่านมา

2.3.2.3 Pirani gauge

Pirani gauge ทำงานคล้ายกับ Thermocouple gauge สามารถใช้วัดความดันได้ดีในช่วง 2 - 10^{-3} ทอร์ เนื่องจากการออกแบบที่ซับซ้อนและมีขนาดที่ใหญ่กว่า Pirani gauge มีราคาแพงกว่า Thermocouple gauge

- หลักการทำงาน

ใน Pirani gauge ก๊าซโมเลกุลทำความร้อนออกไปจากไส้ลวดความร้อนเช่นเดียวกันกับ Thermocouple gauge ในเกจชนิดนี้ เราอาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของไส้ลวดความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน อุณหภูมิเปลี่ยนมีสาเหตุมาจากปริมาณก๊าซ (ความดัน) เปลี่ยน สรุปได้ง่ายๆ คือ อากาศมาก (ความดันมาก) ความร้อนจะถูกนำออกไปมาก อุณหภูมิของไส้ลวดจะมีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ความต้านทานไส้ลวดจะต่ำ ในทางตรงข้าม ถ้าอากาศน้อย (ความดันต่ำ) ความร้อนจะถูกนำออกไปน้อย อุณหภูมิของไส้ลวดจะสูง ดังนั้น ความต้านทานไส้ลวดจะสูง การออกแบบประกอบด้วย วงจรบริดจ์ หนึ่งในสี่ของตัวต้านทาน คือ ไส้ลวดความร้อน ซึ่งเปิดให้ติดกับ Vacuum chamber ที่จะวัดความดันในวงจรบริดจ์ที่สมดุล การไหลของกระแสในเส้นทางที่ 1 เท่ากับเส้นทางที่ 2 กัลวานอมิเตอร์ที่วางศูนย์กลางชี้ศูนย์ เมื่อปริมาณอากาศถูกปั๊มออกไปมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันต่ำลง การพาความร้อนลดลง ทำให้ลวดร้อนมากขึ้น นั่นคือ ความต้านทานของลวดมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดความไม่สมดุลของความต่างศักย์ที่กัลวานอมิเตอร์ และทำให้เกิดกระแสไหล กระแสถูก calibrate ไปสู่ความดัน

- การบำรุงรักษา

การบำรุงรักษา ได้แก่ การทำความสะอาดการปรับค่า การเปลี่ยนไส้ลวดความต้านทานโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการปรับสมดุลเมื่อเปลี่ยนหัวเกจใหม่ (ปรับสมดุลที่ Balance meter) รายละเอียดควรศึกษาได้จากคู่มือการใช้ที่ผู้ผลิตให้มาพร้อมเกจกับหน่วยควบคุม

2.4 ระบบชิลเลอร์ (Chiller)

ชิลเลอร์ คือ เครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ที่มีหน้าที่ในการผลิตน้ำเย็นหรือปรับอุณหภูมิน้ำเย็นและส่งไปยังเครื่องปรับอากาศที่มีอยู่ในห้องต่างๆ ของอาคารแต่ละอาคาร

หลักการทำงานของชิลเลอร์ คือ จะนำสารทำความเย็น (ก๊าซเย็นความดันต่ำ) โดยอยู่ในสภาวะไออิ่มตัวมาอัดที่ตัว Compressor จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดโดยเครื่องอัด จนมีสภาวะเป็นไอร้อน (Superheated vapor) มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นสารทำความเย็นจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อถ่ายเทความร้อนออกทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่มีความดันสูง จากนั้นของเหลวอิ่มตัวความดันสูงจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ขยายตัว (อุปกรณ์ลดแรงดัน) สารทำความเย็นจะมี 2 สถานะ คือ ของเหลวและก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ หลังจากนั้นจะผ่านเข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ทำให้สารทำความเย็นรับความร้อนจากการโหลดนั้นๆ และกลายสภาพเป็นไออิ่มตัว ซึ่งวัฏจักรการทำความเย็นจะดำเนินเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ หมุนเวียนเป็นวงจรเช่นนี้ตลอดเวลา จึงทำให้ชิลเลอร์สามารถผลิตน้ำเย็นได้อย่างต่อเนื่อง จึงสามารถส่งน้ำเย็นนี้ไปจ่ายให้เครื่องปรับอากาศที่อยู่ตามอาคารต่างๆ ที่ไกลจากเครื่องชิลเลอร์ได้ ซึ่งเครื่องชิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของระบบปรับอากาศทั้งหมดที่ใช้พลังงานสูงมากถึง 52%

ปัจจุบันชิลเลอร์รุ่นใหม่ๆ จะถูกออกแบบและพัฒนาให้มีค่ากิโลวัตต์ต่อตันของการทำความเย็นต่ำกว่าชิลเลอร์รุ่นเก่าจึงทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่ารุ่นเก่าประมาณ 20% - 30% และอีกอย่างหนึ่ง ชิลเลอร์รุ่นใหม่ ส่วนใหญ่จะใช้สารทำความเย็นจำพวกที่ไม่มีสาร CFC ที่จะทำลายชั้นบรรยากาศของโลกได้อีกด้วย

ชิลเลอร์แบ่งตามการระบายความร้อนออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

1) ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ หรือ Air Cooled Chiller

2) ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หรือ Water Cooled Chiller

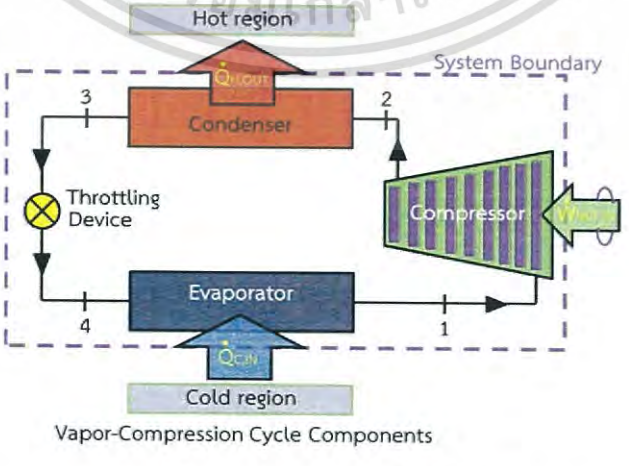
3) ชิลเลอร์แบบดูดซึม หรือ Absorption Chiller เป็นชิลเลอร์ที่ทำความเย็นโดยการดูดซึมโดยใช้พลังงานจากไอเสียของไอน้ำในกระบวนการทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ หรือ Air Cooled Chiller

รูปที่ 2.48 แสดงชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

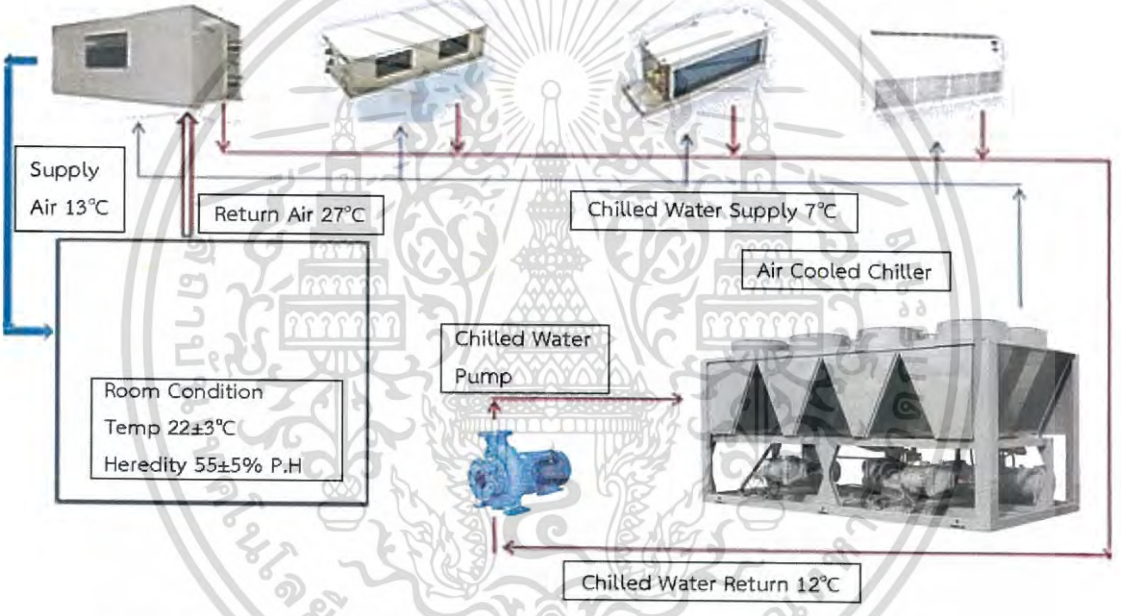
Air Cooled Chiller คือระบบทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ มีขนาดตั้งแต่ 5 - 200 ตัน ความเย็น (1 ตันความเย็น เท่ากับ 12,000 บีทียูต่อชั่วโมง) อุปกรณ์หลักในเครื่องจะประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ วาล์วลดแรงดัน อีวาพอเรเตอร์สำหรับคอมเพรสเซอร์ที่ใช้กับชิลเลอร์ประเภทนี้จะมีหลายชนิด ได้แก่ ชนิดลูกสูบ (Reciprocating) ชนิดสกอลล์ (Scroll) ชนิดสกรู (Screw) ขึ้นอยู่กับว่าผู้ผลิตจะเลือกใช้ประเภทใด การติดตั้งและการบำรุงรักษาไม่ยากมากเมื่อเทียบกับ ชิลเลอร์อีก 2 ประเภท และประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งมากกว่า แต่แนะนำว่าจะต้องวางตัวเครื่องไว้ภายนอกอาคารบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก ชิลเลอร์ประเภทนี้ไม่นิยมใช้เครื่องที่มีขนาดใหญ่จนเกินไป (ไม่ควรเกิน 100 ตัน) เพราะหากเปรียบเทียบในด้านพลังงานและการลงทุนแล้วพบว่า การใช้ชิลเลอร์ชนิด Water Cooled Chiller มีความคุ้มค่าในด้านพลังงานมากกว่า และคุ้มค่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบในระยะยาว



รูปที่ 2.49 แสดงหลักการทำงานของระบบทำน้ำเย็นชนิด Air Cooled Chiller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของระบบทำน้ำเย็นชนิด Air Cooled Chiller วงจรในตัวเครื่องอุปกรณ์หลักประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) และวาล์วลดแรงดัน (Expansion Valve) การทำงานของวัฏจักรอัดไอจะมีหลักการเดียวกับ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) แต่สำหรับชุดอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) จะต่างกันตรงที่ กรณีเครื่องปรับอากาศแยกส่วนตัวคอยล์เย็นหรือ อีวาพอเรเตอร์ จะเป็นชนิดครีบ (Finned Tube Evaporator) และใช้อากาศกลับน้ำยาในการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ถ้ากรณีชิลเลอร์ชุดอีวาพอเรเตอร์ จะเป็นชนิดเปลือกและท่อ (Shell and Tube Evaporator) หรือเพลทฮีตและใช้น้ำยาแลกเปลี่ยนความร้อนกลับน้ำเย็นด้านกลับ (Chilled Water Return) และส่งน้ำเย็นไปใช้ในระบบ



รูปที่ 2.50 แสดงระบบการทำงานของระบบทำน้ำเย็นชนิด Air Cooled Chiller

อุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย

- Air Cooled Chiller
- Chilled Water pump
- Chilled Water Piping & Insulation
- Indoor unit or Load
- Electrical control & Supply
- Make up water system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของระบบเริ่มจากน้ำเย็นที่กลับมาจากการใช้งานแล้ว (Chilled Water Return) มีอุณหภูมิประมาณ 12 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำถูกปั๊มน้ำเย็น (Chilled Water Pump) ส่งน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) น้ำก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นและมีอุณหภูมิที่ต่ำลง เหลือประมาณ 7 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะถูกส่งไปใช้งานที่เครื่องส่งลมเย็น (Air Handling unit) เครื่องจักร (Machine) หรือโหลดความร้อนประเภทอื่นๆ โดยมีวาล์วควบคุมอัตโนมัติทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำเย็นให้สอดคล้องกับภาระการทำความเย็นซึ่งจะทำงานร่วมกับ เทอร์โมสตัทหรือชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) หลังจากผ่านโหลดความร้อนแล้ว น้ำจะส่งกลับมายังชิลเลอร์ก่อนถูกลดอุณหภูมิและส่งไปใช้งานอีกครั้ง เพื่อให้ระบบดำเนินการอย่างต่อเนื่อง

2.4.2 ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หรือ Water Cooled Chiller

รูปที่ 2.51 แสดงชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

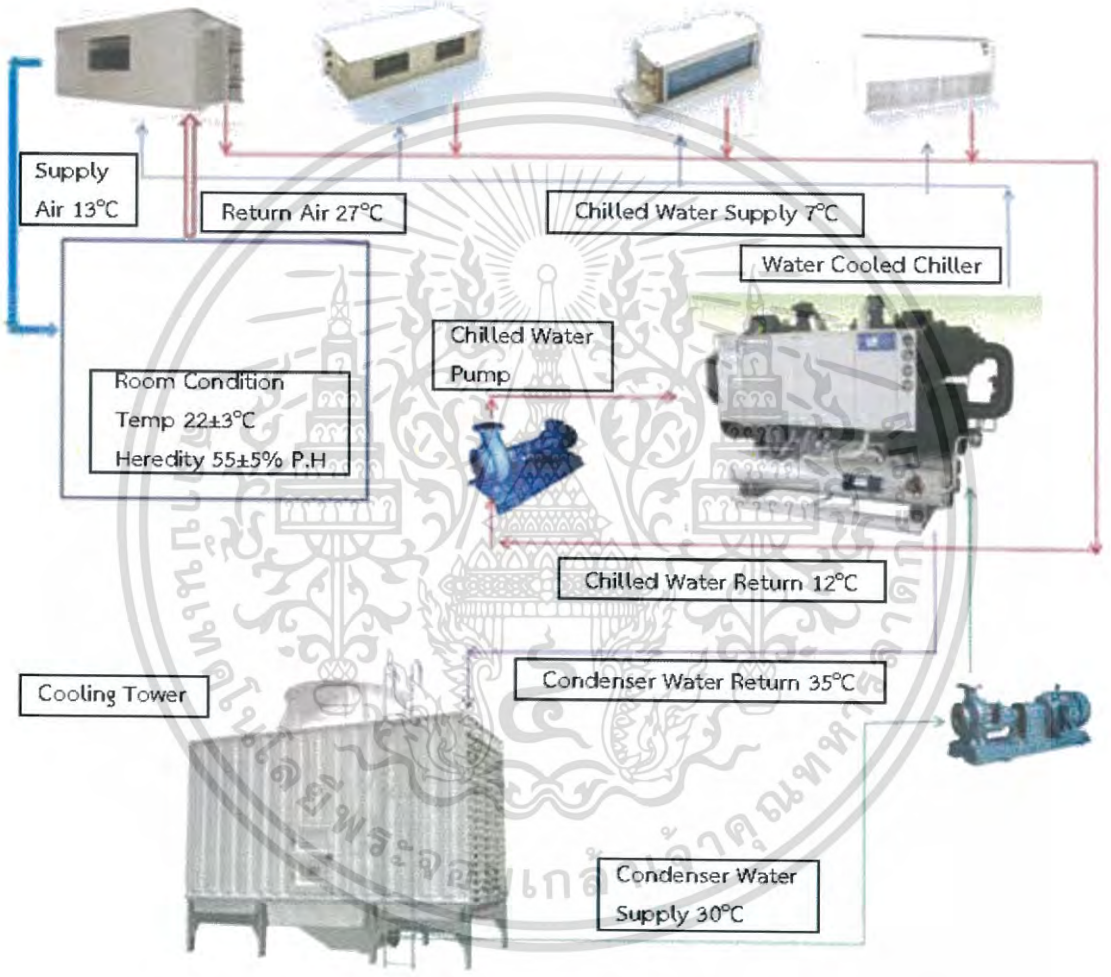
ชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หรือ Water Cooled Chiller คือ เครื่องทำน้ำเย็นชนิดที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ หากดูภายนอกอาจดูต่างจาก Air Cooled Chiller อยู่เหมือนกัน แต่วงจรการทำงานของอุปกรณ์ใกล้เคียงกัน ต่างกันตรงที่ไม่มีแผงระบายความร้อนใหญ่ๆ และไม่มีพัดลมระบายความร้อนที่ตัวเครื่อง เครื่องทำน้ำเย็นชนิดนี้สามารถวางภายในอาคารหรือห้องปิดได้ ไม่จำเป็นต้องวางนอกอาคาร เนื่องจากการระบายความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำด้านคอนเดนเซอร์ (Condenser) และถูกส่งไปยังหอระบายความร้อน (Cooling tower) ที่อยู่ภายนอกอาคาร

ในส่วนระบบจุดเด่นของระบบนี้จะเป็นเรื่องการประหยัดพลังงาน เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบมากกว่าชิลเลอร์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ และปัจจุบันก็มีการพัฒนาทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น สามารถเลือกใช้ได้ทั้งรุ่นธรรมดาทั่วไป (Standard Type) และประหยัดพลังงานแบบต่างๆ เช่น รุ่นที่มีอีวาพอเรเตอร์แบบเปียก (Flooded Evaporator) หรือรุ่นที่ใช้ Inverter ควบคุมการสตาร์ท ซึ่งแต่ละแบบก็มีประสิทธิภาพและ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประหยัดพลังงานที่แตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาในเรื่อง ราคา วัตถุประสงค์ และความคุ้มค่าในการใช้งานด้วย

ในแง่การติดตั้งและการบำรุงรักษาจะมีขั้นตอนที่ยากกว่าชนิด Air Cooled Chiller เล็กน้อยเนื่องจากมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเพิ่มขึ้นมา และจะต้องมีระบบเติมสารเคมีอัตโนมัติ (Chemical Feed) เพิ่มเติมด้วย เพื่อป้องกันตระกัน และทำหน้าที่ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.52 แสดงระบบการทำงานของชิลเลอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

อุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย

- Water Cooled Chiller
- Chilled Water pump & Condenser pump
- Chilled Water Piping & Insulation
- Indoor unit or Load
- Condenser Water Piping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cooling Tower
- Electrical control & Supply
- Make up water & Chemicals feed system

หลักการทำงานของชิลเลอร์ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled Chiller) วงจรด้านน้ำเย็น (Chilled Water Cycle) จะเหมือนกับชนิด Air Cooled Chiller ทุกประการ สิ่งที่ต่างกันคือ ที่ตัวเครื่องชิลเลอร์อุปกรณ์ระบายความร้อน (Condenser) จะเป็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยน้ำที่ผ่านคอนเดนเซอร์จะถูกถ่ายเทความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปกติจะประมาณ 35 องศาเซลเซียส และจะถูกส่งไประบายความร้อนที่หอระบายความร้อน (Cooling Tower) หลังระบายความร้อนอุณหภูมิจะลดลงเหลือประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนจะถูกส่งกลับมาระบายความร้อนให้ชุดคอนเดนเซอร์ (Condenser) เพื่อให้ระบบดำเนินการอย่างต่อเนื่อง

2.4.3 ชิลเลอร์แบบดูดซึม หรือ Absorption Chiller

(ก) Single Effect (ข) Double Effect (ค) Direct-Fired

รูปที่ 2.53 แสดงชิลเลอร์แบบดูดซึมชนิดต่างๆ

Absorption Chiller คือ ระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม ที่เป็นที่นิยมมาจนถึงปัจจุบัน คือ ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอหรือระบบทำความเย็นที่มี Compressor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นให้เปลี่ยนสถานะและเกิดความเย็นขึ้น ตามหลักการของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ โดยคอมเพรสเซอร์จะต้องอาศัยพลังงานในรูปไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่มาเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานกลและขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ เพื่อให้เกิดการอัดไอ แต่จะต้องใช้พลังในการขับเคลื่อนระบบค่อนข้างมาก จึงทำให้เกิดการคิดค้น ระบบที่ประหยัดพลังงานกว่าขึ้นมาเป็นทางเลือกในปัจจุบัน ซึ่งก็คือระบบทำความเย็นชนิดดูดซึม

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมสามารถใช้แหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนระบบโดยอาศัยความร้อนจากการเผาไหม้ ไอเสียเครื่องยนต์ ไอน้ำ น้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือความร้อนทิ้งในรูปแบบต่างๆ ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้ แหล่งความร้อนและความร้อนทิ้งในรูปแบบต่างๆ ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หม้อไอน้ำในโรงงานที่มีไอน้ำเหลือใช้ หรือก่อนเข้าระบบคอนเดนเซต ของหม้อไอน้ำ
- หม้อไอน้ำสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเฉพาะ
- ก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ หรือ ก๊าซไอเสียที่ออกจากการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ
- ไอน้ำความดันต่ำที่ปล่อยทิ้งของกังหันไอน้ำ (Steam Turbine)
- น้ำร้อนจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์

หลักการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

กระบวนการที่ 1 การระเหย (Evaporation)

สารทำความเย็น (Refrigerant) ที่ความดัน 0.798 กิโลปาสคาล จุดเดือด 4 องศาเซลเซียส จะทำหน้าที่ดูดความร้อนจากน้ำเย็นที่ไหลกลับ (Chilled Water Return) อุณหภูมิประมาณ 12 - 14 องศาเซลเซียส จากภาระต่างๆ มาใช้เป็นความร้อนแฝง เพื่อเปลี่ยนสภาพสารทำความเย็นของน้ำให้กลายเป็นไอ ไหลเข้าสู่กระบวนการที่ 2 (Absorption) ส่วนน้ำเย็น (Chilled Water) ที่ผ่านกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้สารทำความเย็น จะลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 5 – 7 องศาเซลเซียส และจะถูกนำไปใช้งานต่อไป

กระบวนการที่ 2 การดูดซึม (Absorption)

สารดูดซึมเข้มข้นจะถูกฉีดเข้าไปทำหน้าที่ดูดซับไอสารทำความเย็น เพื่อรักษาความดันในอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) ให้ได้ 0.798 กิโลปาสคาล ซึ่งจะทำให้กระบวนการที่ 1 เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง กระบวนการดังกล่าวข้างต้นจะทำให้สารดูดซึมเข้มข้นเปลี่ยนสภาพ เป็นสารดูดซึมเจือจางและจะถูกส่งเข้าไปในกระบวนการที่ 3 ต่อไป

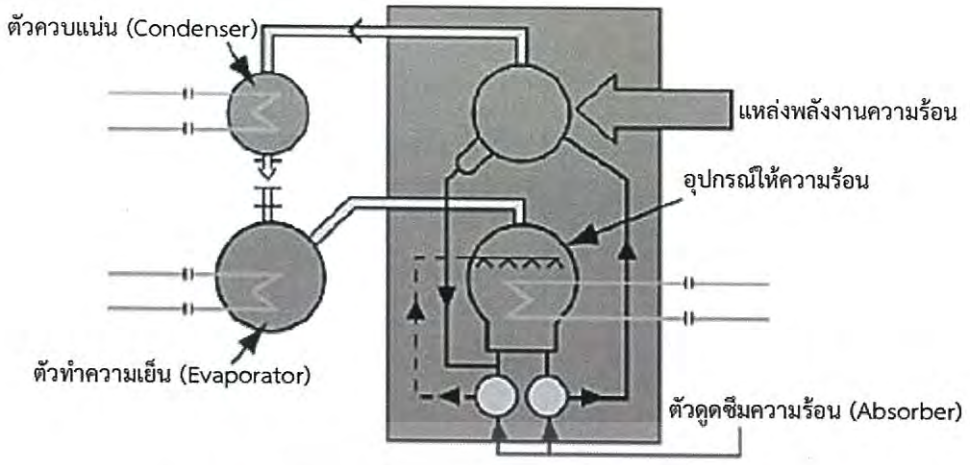
กระบวนการที่ 3 การผลิตสารทำความเย็น (Generation)

สารดูดซึมที่เจือจางที่ถูกส่งผ่านเข้าไปในอุปกรณ์ให้ความร้อน (Generator) จะถูกความร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้แยกตัวออกจากสารทำความเย็น และเปลี่ยนสภาพจากสารดูดซึมแบบเจือจางกลับสู่สารดูดซึมเข้มข้นอีกครั้งหนึ่ง ก่อนจะถูกส่งกลับไปทำหน้าที่ดูดซึมไอสารทำความเย็นในกระบวนการที่ 2 ต่อไป

กระบวนการที่ 4 การควบแน่น (Condensation)

ไอสารทำความเย็นที่ถูกแยกออกจากสารดูดซึมจะถูกทำให้เย็น โดยน้ำจากหอระบายความร้อน (Cooling Tower) ทำให้เกิดการควบแน่นสภาพเป็นของเหลวแล้วไหลกลับไปยังกระบวนการที่ 1 เพื่อให้วงจรดำเนินการอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.54 แสดงหลักการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

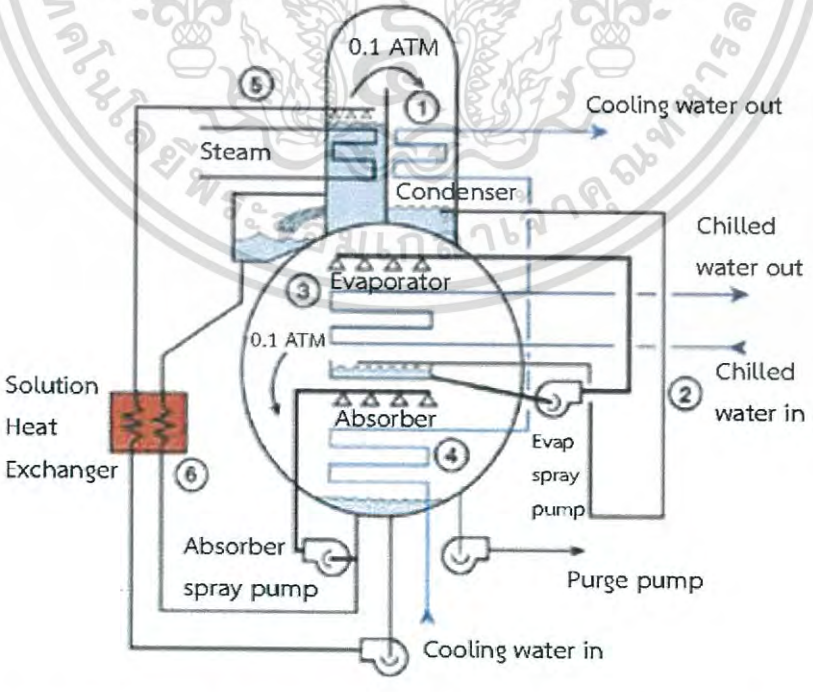
ประเภทของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.4.3.1 Single Effect (State)

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมแบบชั้นเดียว สามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบคือ

1) การใช้ไอน้ำที่ความดัน 0.8 - 1.5 kg/cm^2 (78.5-147.1 กิโลปาสคาล) เรียกระบบนี้ว่า Single Effect Steam Fires Absorption Chiller

2) การใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 130 – 150 องศาเซลเซียส เรียกระบบนี้ว่า Single Effect Hot Water Fired Absorption Chiller



รูปที่ 2.55 แสดงวงจรการทำงานของระบบ Single Effect Absorption Refrigeration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.55 ในถังความดันสูงเมื่อสารทำความเย็นที่อยู่ในอุปกรณ์ให้ความร้อน (Generator) ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอจะกระจายไปสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) ที่อยู่ในถังเดียวกัน (จุดที่ 1) จากนั้นจะถูกทำให้กลายเป็นของเหลว เมื่อของเหลวจากเครื่องควบแน่น (Condenser) ไหลลงสู่ถังความดันต่ำ (จุดที่ 2) ซึ่งจะถูกทำให้กลายเป็นไออีกครั้งในเครื่องระเหย (Evaporator) แล้วจะกระจายไปสู่เครื่องดูดซับความร้อน (Absorber) ซึ่งจากการกลายเป็นไอในเครื่องระเหย (Evaporator) (จุดที่ 3) ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่มีภาระทำความเย็น (Chilled Water Return) มาสู่การทำความเย็น โดยการอัดสารความเย็นและพ่นให้เป็นฝอย (Evaporator Spray Pump) ลอยอยู่เหนือท่อน้ำเย็นเครื่องระเหยลมเย็น (Evaporation) จะทำให้น้ำที่มีภาระทำความเย็นที่อยู่ในท่อมีอุณหภูมิลดลง ไอของสารทำความเย็นที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจนกลายเป็นไอแล้วจะกระจายไปสู่เครื่องดูดซึมความร้อน (Absorber) (จุดที่ 4) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องละเหยคือ ใช้เครื่องพ่นสารดูดกลืนให้เป็นฝอย (Absorber Spray Pump) เพื่อดูดไอสารทำความเย็นที่อยู่เหนือท่อน้ำหล่อเย็น เมื่อสารดูดซึมผสมกับสารทำความเย็นแล้วจะเป็นสารละลายเจือจางและมีความร้อนออกมา ซึ่งความร้อนนี้จะถ่ายเทไปยังน้ำหล่อเย็นแล้วนำไปทิ้งหอระบายความร้อน (Cooling Tower) โดยน้ำหล่อเย็นจะได้รับความร้อนจากเครื่องดูดซึมก่อน (เพราะมีอุณหภูมิต่ำกว่า) แล้วจะส่งไปยังเครื่องควบแน่นตามลำดับ

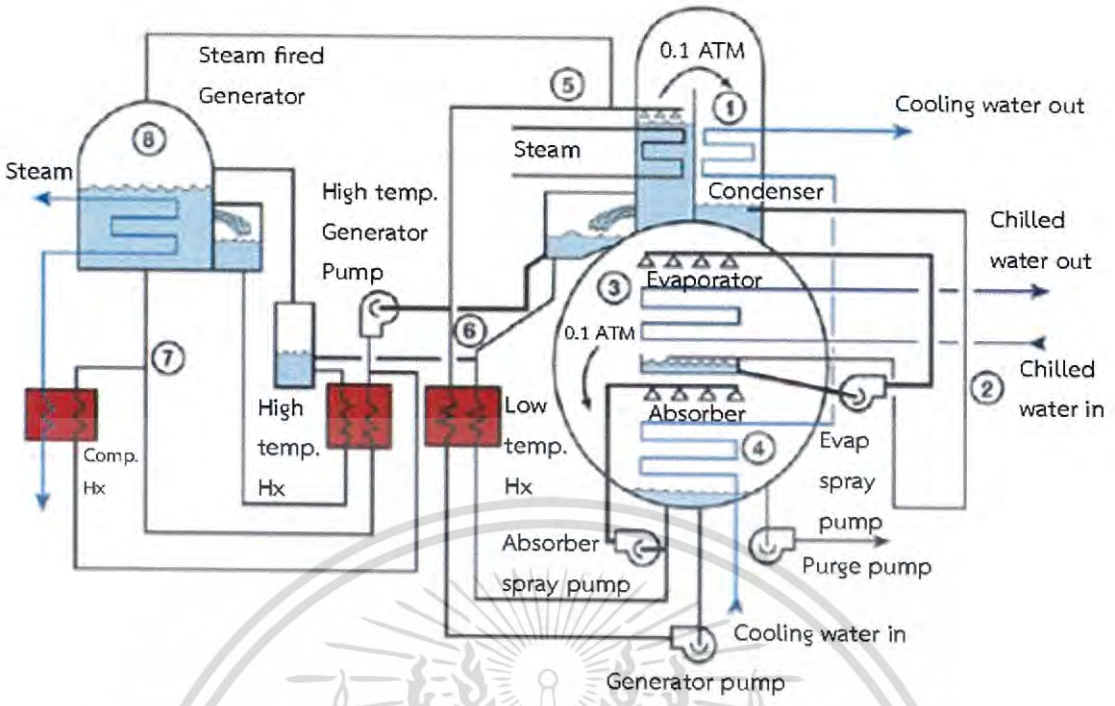
ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียวจะมีการนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) (มาใช้งานจุดที่ 6) เพื่อถ่ายเทความร้อนจากสารละลายเข้มข้นอุณหภูมิสูงไปสู่อุปกรณ์ให้ความร้อน (Generator) เพื่อเริ่มวัฏจักรทำงานต่อไป (จุดที่ 5)

2.4.3.2 Double Effect (State)

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมแบบสองชั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบคือ

1) การใช้ไอน้ำที่ความดัน 8 kg/cm^2 (784.5 กิโลปาสคาล) เรียกระบบนี้ว่า Double Effect Steam Fires Absorption Chiller
2) การใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 180 – 200 องศาเซลเซียส เรียกระบบนี้ว่า Double Effect Hot Water Fired Absorption Chiller
3) การใช้ความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง Direct-Fired Absorption Chiller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.56 แสดงวงจรการทำงานของระบบ Double Effect Absorption Refrigeration

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น (Double Effect) ถูกออกแบบมาเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลง โดยการลดปริมาณความร้อนที่ต้องการด้วยการใช้พลังงานความร้อนในอุปกรณ์ให้ความร้อน (Generator) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากรูปแสดงการทำงาน จะเห็นว่ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Generator) (จุดที่ 8) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) (จุดที่ 7) เพิ่มขึ้นมาจากระบบทำความเย็นแบบชั้นเดียวอีกชุดหนึ่ง

หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น คือการทำงานโดยมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Generator) 2 ชุด โดยอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่สองจะใช้สำหรับควบแน่นไอสารทำความเย็นจากอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่หนึ่ง ส่วนประกอบจะมีถังแรงดันที่แตกต่างกันอยู่ 3 ถัง และความดันของไอน้ำที่ถูกป้อนให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนในชุดที่หนึ่ง ซึ่งจะมีค่าความดันปานกลาง (1,000 กิโลปาสคาล โดยประมาณ) โดยจะถูกใช้แทนไอน้ำความดันต่ำ (120 กิโลปาสคาล) ที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบชั้นเดียว

สารละลายดูดซึมจากอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่หนึ่งจะผ่านไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายเจือจางที่กลับไปยังอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่หนึ่ง สารละลายจะผ่านไปยังอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่สอง ซึ่งจะรับความร้อนจากไอสารทำความเย็นที่ออกมาจากอุปกรณ์ให้ความร้อนชุดที่หนึ่งโดยกระบวนการควบแน่น สารละลายจะถูกส่งต่อไปยังถังความดันที่สอง และสารทำความเย็นจะกลายสภาพเป็นไปอีกครั้ง เมื่อเข้าสู่ถังความดันที่สองจะถูกควบแน่นในเครื่องควบแน่น (Condenser) และจะเข้าสู้ระบบต่อไปจนครบวัฏจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายในการทำความเย็น

- แอมโมเนีย–น้ำ
- ลิเธียมโบรไมด์–น้ำ

ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้ระบบทำน้ำเย็นประเภทต่างๆ

1. Air cooled chiller ระบบทำน้ำเย็นชนิดนี้ มีข้อดีคือ ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง ส่งน้ำไปในบริเวณที่ต้องการได้ไกล การติดตั้งไม่ซับซ้อนมากนัก การบำรุงรักษาไม่ยากมาก และงบลงทุนประหยัดกว่าอีกสองแบบ แต่มีข้อเสียคือ จะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าอีกสองแบบ และตำแหน่งวางเครื่องจะต้องมีอากาศถ่ายเทได้สะดวก

2. Water cooled chiller ระบบทำน้ำเย็นแบบที่สองนี้ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และหากเปรียบเทียบกับ Air cooled chiller ภาพรวมทั้งระบบจะประหยัดพลังงานมากกว่าและหากมองในแง่ความคุ้มค่าในระยะยาวแล้ว คุ้มกว่าแบบแรกแต่ในการเลือกใช้งานนั้นจะต้องคำนึงถึงเรื่องของขนาดการทำความเย็นซิลเลอร์ (RT) ควรจะมีขนาดการทำความเย็นรวมทั้งระบบ ควรมากกว่า 100 ตัน ขึ้นไป เนื่องจากจะคืนทุนเร็วกว่า แต่หากขนาดทำความเย็นไม่มากการใช้ Air cooled chiller จะดีกว่า

3. Absorption chiller ระบบทำน้ำเย็นชนิดดูดซึม ประหยัดพลังงานกว่าสองแบบแรก และยังสามารถนำไอน้ำและความร้อนทิ้งที่เหลือใช้มาเป็นตัวให้พลังงานและทำให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน และได้ความเย็น จากหลักการดูดซึม แต่จะมีความซับซ้อนมากกว่าในด้านการออกแบบติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษา อย่างไรก็ดี หากมีการติดตั้งและใช้งานดูแลอย่างถูกวิธี จะทำให้ได้รับความคุ้มค่าเป็นอย่างมาก เพราะหากเป็นระบบทำน้ำเย็นขนาดใหญ่ 100 ตันขึ้นไป จะทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้า ได้ปีละหลายล้านบาท ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ ใช้สารทำความเย็นและสารดูดซึมที่ไม่มีสาร CFC จึงไม่ทำลายโอโซน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในเนื้อหาบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการศึกษาและพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง ซึ่งในระบบมีส่วนประกอบที่ได้นำมาศึกษาและพัฒนาต่อ โดยจะได้นำมาอธิบายดังต่อไปนี้ คือ การออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมและระบบต่างๆ ของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง ได้แก่ ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็น วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบต่างๆ ซึ่งจะอธิบายคุณลักษณะ และคุณสมบัติของวัสดุอุปกรณ์นั้นๆ ด้วย จากนั้นทำการทดสอบการทำงานของระบบต่างๆ ของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงที่พัฒนาขึ้น

3.1 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

ในการเผาไหม้ในเตาเผาอุณหภูมิสูงมีการควบคุมและสร้างบรรยากาศภายในเตา โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ช่วยในการควบคุม ลดการระบายอากาศออกจากเตาเผา เพื่อลดสิ่งเจือปน เช่น สิ่งสกปรกที่มากับอากาศอย่างฝุ่นละออง ไอน้ำในบรรยากาศ เป็นต้น โดยสิ่งเหล่านี้เมื่อเกิดการเจือปนในเตาเผาอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยากับวัสดุที่เผาเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น และอาจทำปฏิกิริยากับลวดความร้อน ทำให้ลวดความร้อนให้ความร้อนได้ไม่เต็มประสิทธิภาพหรือเกิดการเสื่อมสภาพ เตาเผาลักษณะนี้จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความบริสุทธิ์เพื่อให้สามารถปรับปรุงวัสดุได้ตามที่ต้องการ

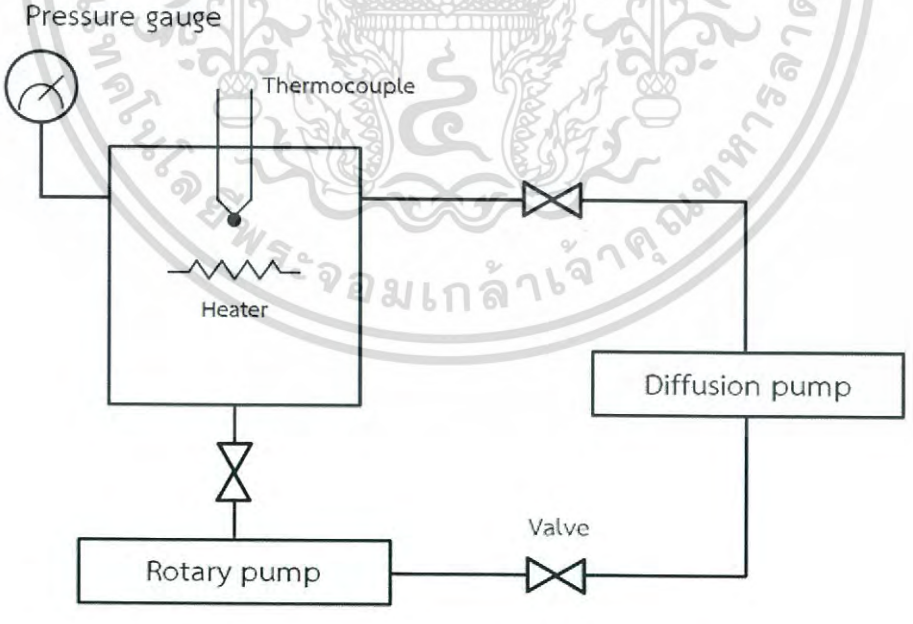
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ปั๊มสุญญากาศ

การสร้างสภาวะสุญญากาศในระบบนี้ได้ใช้ โรตารี่ปั๊ม (Rotary pump) และดิฟฟิวชันปั๊ม (Diffusion pump) ในการควบคุมและสร้างสภาวะสุญญากาศ มีช่วงการใช้งานที่ความดันระดับต่างกัน คือโรตารี่ปั๊มมีช่วงการใช้งานที่ $10^{3} - 10^{-3}$ และดิฟฟิวชันปั๊มมีช่วงการใช้ที่ $10^{-2} - 10^{-10}$

รูปที่ 3.2 แสดงโรตารีปั๊มและดิฟฟิวชันที่ใช้ในงาน

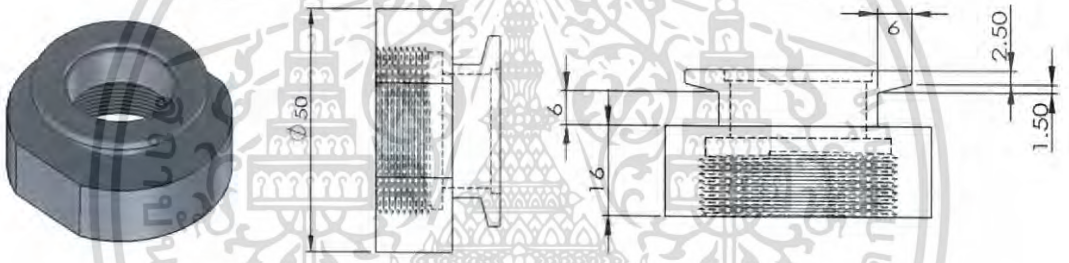


รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการต่อระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติม

เนื่องจากโครงงานพิเศษนี้เป็นการปรับปรุงและพัฒนาจากเครื่องมือเดิมที่มีอยู่ โดยเครื่องมือที่ศึกษามีชิ้นส่วนที่ไม่ครบสมบูรณ์ และเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญ เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบชิ้นส่วนชิ้นนี้ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.00 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่เป็นท่อเกลียวมีขนาด 32.84 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็นคอขวดมีขนาด 24.00 มิลลิเมตร และส่วนที่เป็นปากท่อมีขนาด 26.00 มิลลิเมตร มีความสูง 26.00 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุที่เป็นสแตนเลส เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อน มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ มีความง่ายต่องานประกอบ หรือแปรรูป มีความทนทาน มีความปลอดภัยและถูกสุขลักษณะ ชิ้นส่วนนี้จะต่อเข้ากับเตาเผาและโรตารี่ปั๊ม ซึ่งมีส่วนช่วยให้โรตารี่ปั๊มสูบอากาศออกจากเตาเผาได้ เพื่อทำให้บรรยากาศในเตาเผามีความสะอาดมากขึ้น ไม่ส่งผลต่อวัสดุที่นำมาเผาและลวดความร้อนภายใน

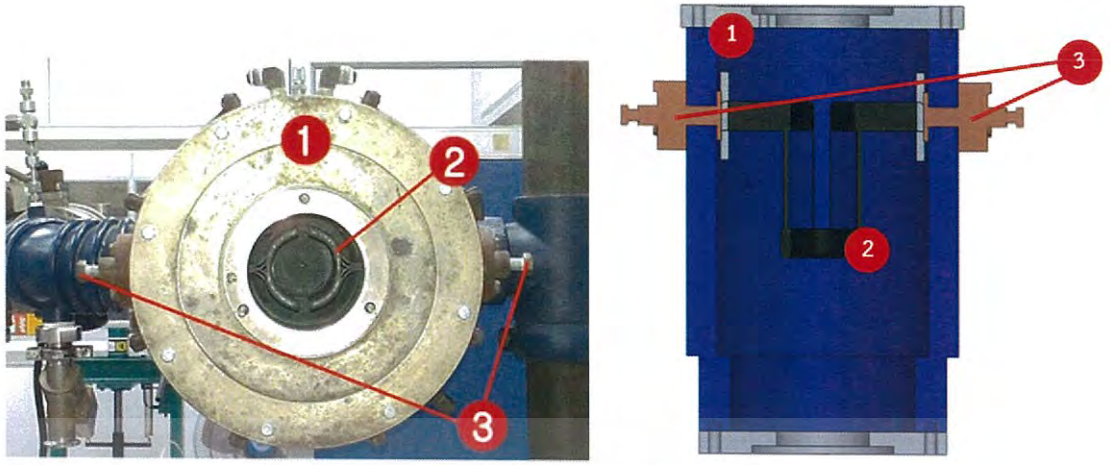


รูปที่ 3.4 แสดงการออแบบส่วนประกอบที่ได้ทำการออกแบบเพิ่มเติม

3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

การพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นเตาเผาชนิดเตาไฟฟ้า ซึ่งภายในภาชนะสุญญากาศจะมีลวดความร้อน โดยการเกิดความร้อนของเตาชนิดนี้อาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าที่ติดกับภาชนะสุญญากาศให้กับลวดความร้อน กระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านลวดความร้อนดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศขึ้น โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ลวดความร้อนจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถกำหนดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ลวดความร้อน รูปของโครงสร้างระบบเตาเผาอุณหภูมิสูงแสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของเตาเผาสุญญากาศ

จากรูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของระบบของเตาเผาอุณหภูมิสูง มีดังนี้

หมายเลข 1 คือ ภาชนะสุญญากาศ

หมายเลข 2 คือ ลวดความร้อน

หมายเลข 3 คือ ขั้วไฟฟ้า

3.2.1 ลวดความร้อน

ลวดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศต่อกับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านนอก ลวดความร้อนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง สำหรับสอดภาชนะใส่สารไว้ด้านล่าง มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 65 มิลลิเมตร สูง 160 มิลลิเมตร ตัวลวดมีการถักเป็นตาข่ายมีระยะห่างเป็นรูขนาดเล็ก

รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

การทำงานของลวดความร้อนภายในเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงนั้น เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะแปลงแรงดันไฟฟ้าจากขนาด 220 โวลต์ ไปเป็น 13 โวลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ลวดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น

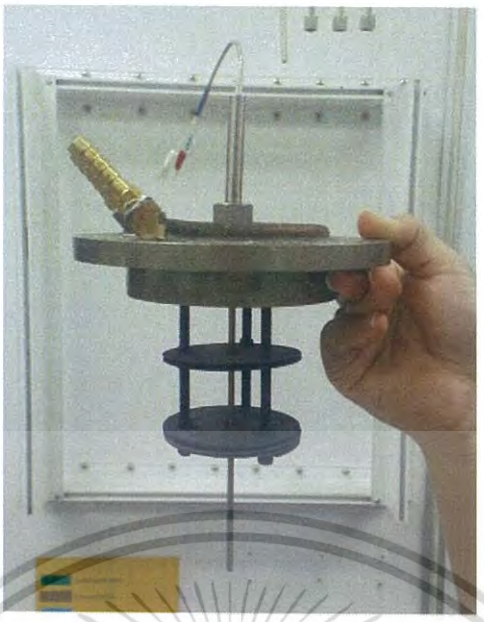
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้

3.2.3 เทอร์โมคัปเปิล

ในการวัดอุณหภูมิได้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -250 ถึง 1300 องศาเซลเซียส โดยมีลักษณะการใช้งานคือ มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้ 1) สามารถใช้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้

รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งการนำไปใช้งานของเทอร์โมคัปเปิล

3.2.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

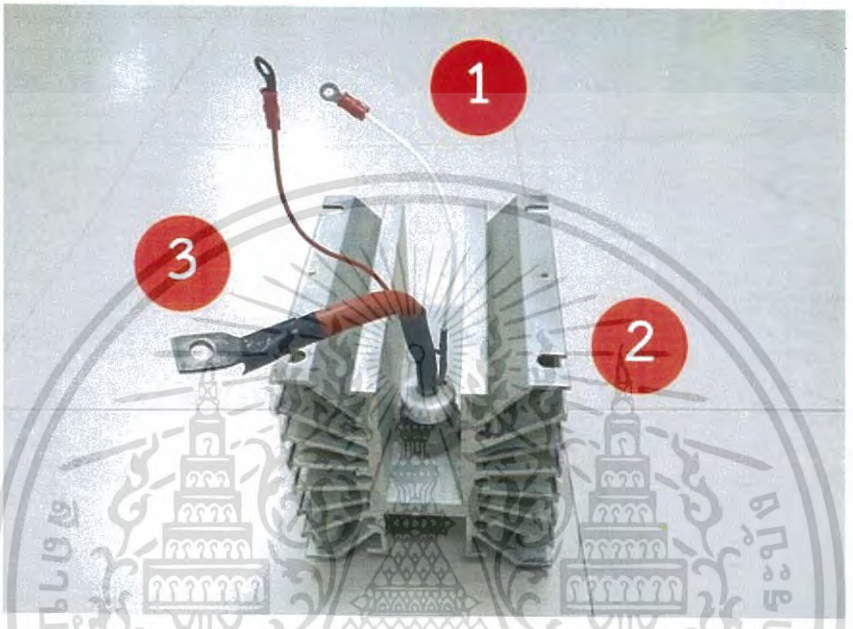
ชุดควบคุมอุณหภูมิ หรือ Temperature controller ที่นำมาใช้ในงานนี้ คือ ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CN-Q2MTC-500 หน้าจอแสดงผลมีขนาด 48×48 มิลลิเมตร มีการตรวจวัดข้อมูลอย่างรวดเร็วที่ 250 มิลลิวินาที มีการแสดงผลที่ง่ายต่อการบันทึกผล สามารถดูสถานะได้จากระยะไกล ด้วยหน้าจอแสดงผลที่มีสีของข้อมูลที่ต่างกัน 3 สี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

รูปที่ 3.10 แสดงชุดควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 เอสซีอาร์

ในโครงงานพิเศษนี้ ได้นำเอสซีอาร์มาใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าโดยทำหน้าที่เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดความร้อน 2 ตัว และได้ทำการศึกษาระบบดังกล่าว โดยมีการจำลองต่อวงจรขึ้นมา เพื่อศึกษาการทำงานของการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยเอสซีอาร์



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของเอสซีอาร์ที่ใช้

จากรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของเอสซีอาร์ที่ใช้ในงาน โดยขาของเอสซีอาร์ มีดังนี้

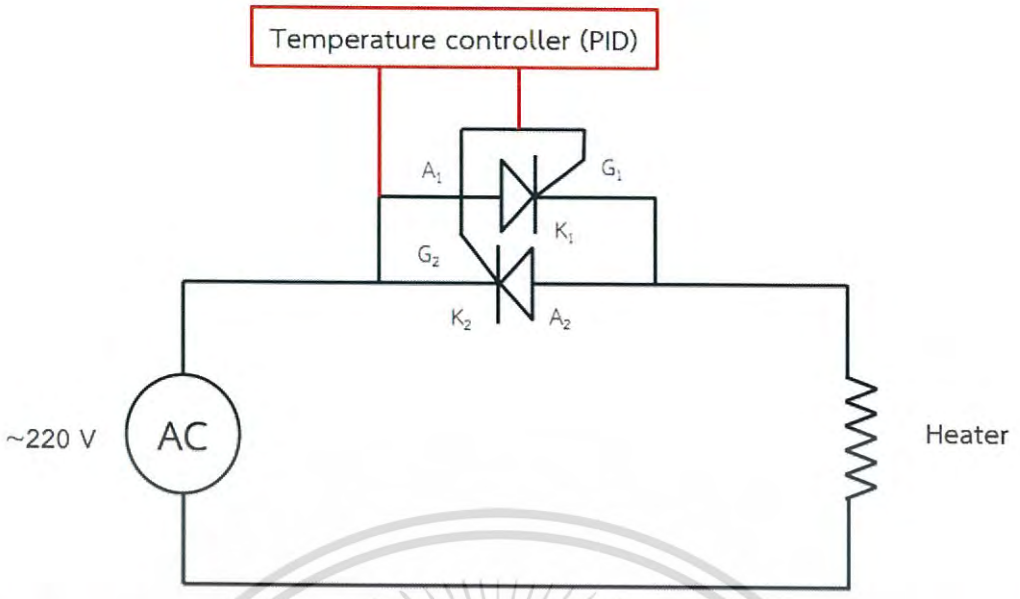
หมายเลข 1 คือ ขาเกต (G : Gate) สายไฟสีขาว

หมายเลข 2 คือ ขาแอโนด (A : Anode) ฮีตซิงค์

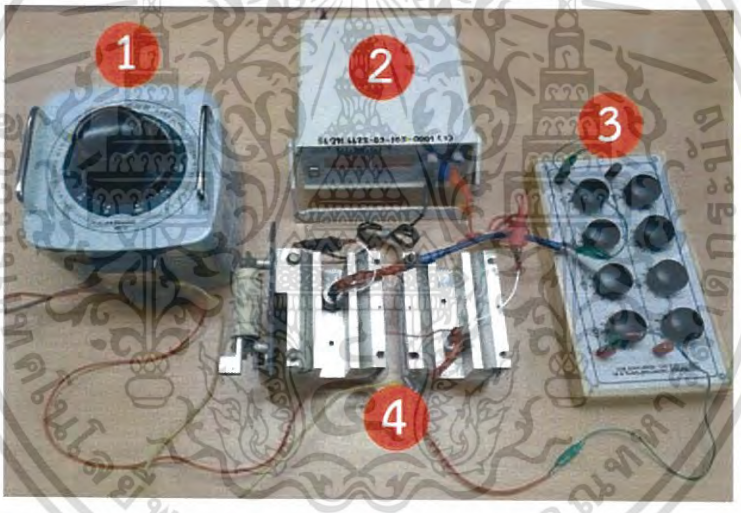
หมายเลข 3 คือ ขาแคโทด (K : Cathode) สายไฟสีแดง

ในการศึกษาการทำงานของวงจรที่ใช้เอสซีอาร์ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับลวดความร้อนได้มีการต่อวงจรจำลองโดยมีลักษณะ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพวงจรจำลองการใช้งานเอสซีอาร์เพื่อควบคุมการทำงานของลวดความร้อน



รูปที่ 3.13 แสดงการต่อวงจรจำลองการใช้งานเอสซีอาร์เพื่อควบคุมการทำงานของลวดความร้อน

จากรูปที่ 3.13 แสดงวงจรจำลองการใช้งานเอสซีอาร์เพื่อควบคุมการทำงานของลวดความร้อนซึ่งแทนการใช้งานของอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ แทนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

หมายเลข 2 เพาเวอร์ซับพลาย แทนสัญญาณจาก Temperature Controller

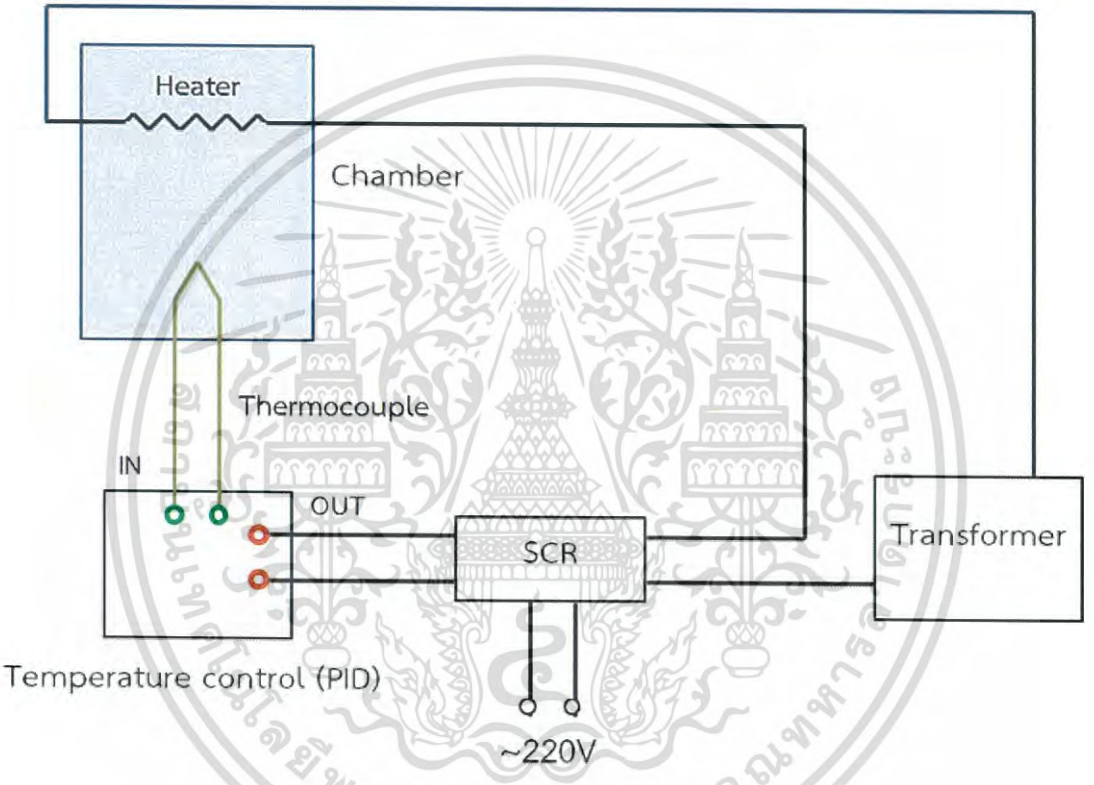
หมายเลข 3 ตัวต้านทานปรับค่าได้ แทนลวดความร้อน

หมายเลข 4 เอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 วงจรควบคุมอุณหภูมิ

การทำความร้อนของลวดความร้อนมีการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำ กระแสไฟฟ้าสูงจึงได้นำหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากเดิม 220 โวลต์ ไปเป็น 13 โวลต์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น จากนั้นจะเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับลวดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศ จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผ่านเอสซีอาร์ 2 ตัว ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ และสามารถตั้งอุณหภูมิได้ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ

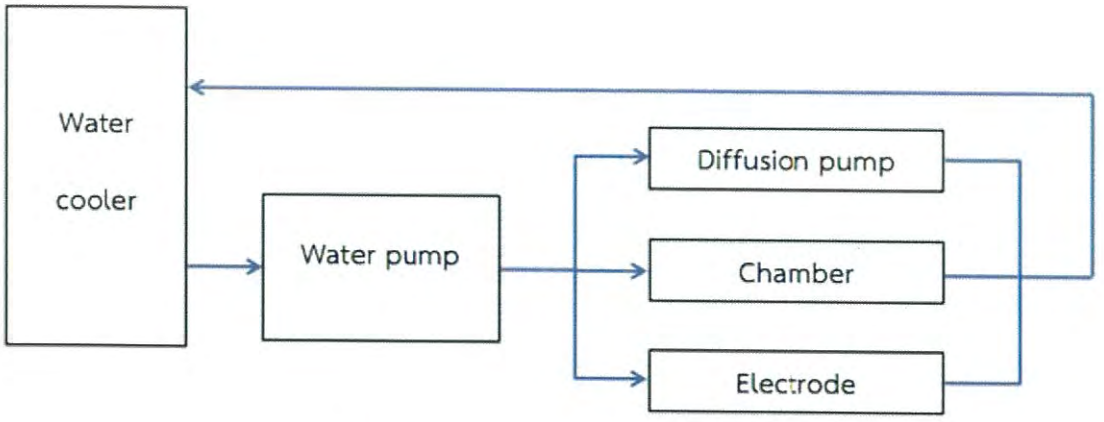


รูปที่ 3.14 แสดงแผนผังการต่อวงจรควบคุมอุณหภูมิ

3.3 ระบบหล่อเย็น

ในการใช้งานเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง มีการควบคุมระดับความดันให้อยู่ในระดับสุญญากาศ จึงมีการใช้ยางโอริงปิดตามข้อต่อต่างๆ เนื่องจากความสามารถของยางโอริงไม่สามารถทนความร้อนได้สูง และลวดความร้อนในภาชนะสุญญากาศมีอุณหภูมิสูงมากจนสามารถแผ่รังสีความร้อนออกมาสู่บรรยากาศภายนอกภาชนะได้ ทำให้อากาศภายนอกมีอุณหภูมิสูง อีกทั้งขั้วไฟฟ้าและสายไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมต่อกับลวดความร้อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในปริมาณมากๆ ส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้นด้วยเช่นกัน และดิฟฟิวชันมีความร้อนจากไอน้ำมัน และหากเกิดความร้อนมากเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้นั้น จึงจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงแผนผังของระบบชิลเลอร์

3.3.1 ชิลเลอร์น้ำเย็น

ชิลเลอร์น้ำเย็นที่ใช้เป็นชิลเลอร์ที่ประดิษฐ์สร้างขึ้นเอง มีขนาด 485×660×1,270 มิลลิเมตร บริเวณที่บรรจุน้ำด้านในมีขนาด 325×500×435 มิลลิเมตร มีปุ่มปรับระดับทำความเย็นได้ 7 ระดับ และสามารถทำอุณหภูมิได้ต่ำสุด 5 องศาเซลเซียส

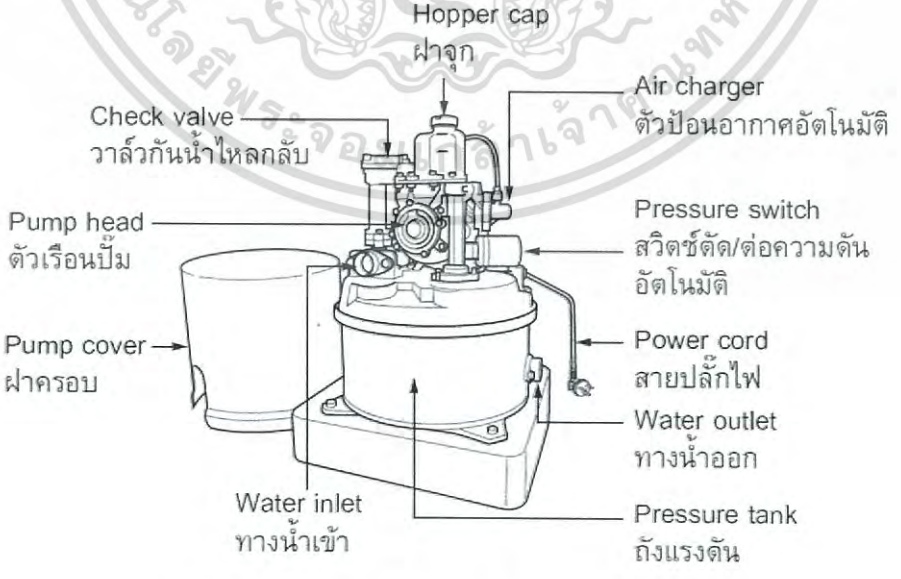
รูปที่ 3.16 แสดงชิลเลอร์น้ำเย็นที่ใช้ในงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ปั๊มน้ำ

ในการระบายความร้อนให้ได้ทันเวลา เพื่อระบายความร้อนให้กับภาชนะสุญญากาศและดิฟฟิวชันปั๊มที่มีความร้อนสูง และน้ำที่ส่งขึ้นไปเพื่อระบายความร้อนให้กับภาชนะสุญญากาศมีระดับน้ำที่สูงกว่าชิลเลอร์ และมีระยะทางในการไหลของน้ำพอสมควร น้ำที่ออกจากชิลเลอร์จำเป็นต้องมีแรงดันที่สูงจึงได้นำปั๊มน้ำมาใช้ในการส่งน้ำ ปั๊มน้ำที่ใช้ในงานนี้เป็นปั๊มน้ำยี่ห้อ HITACHI รุ่น WT-P100GX2 ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.17 แสดงปั๊มน้ำที่ใช้ในงาน



รูปที่ 3.18 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของปั๊มน้ำที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของปั๊มน้ำที่ใช้

รุ่น			WT-P100GX2
มอเตอร์	ชนิด		SINGLE PHASE CONDENSER-RUN
	กำลังของมอเตอร์ (วัตต์)		100
	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)		220
	ความถี่ (เฮิร์ต)		50
ปั๊ม	ระยะดูด (เมตร)	ปกติ	7
		สูงสุด	8
	ระยะส่งน้ำแนวตั้ง (เมตร)		12
	ปริมาณน้ำที่ 12 เมตร (ลิตร/นาที)		25
	สวิตช์ความดัน (กิโลปาสคาล)	เปิด	140
		ปิด	180
	ท่อดูด (ม.ม. (นิ้ว))		20 (3/4)
	ท่อจ่าย (ม.ม. (นิ้ว))		20 (3/4)

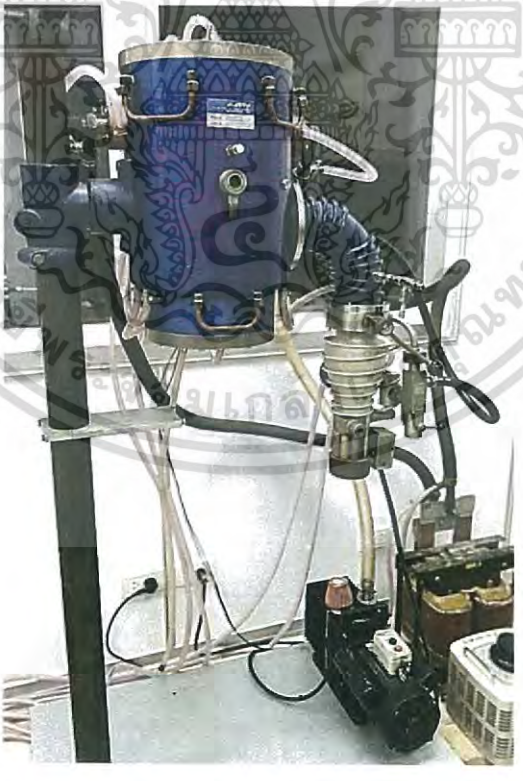
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการอธิบายส่วนประกอบและการทดสอบการทำงานของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงที่ได้ทำการออกแบบสร้างและพัฒนา โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้ ห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

การออกแบบและการสร้างภาชนะสุญญากาศมีการเลือกใช้วัสดุในการสร้างโดยคำนึงถึงความทนทานต่อสภาวะแรงดันสุญญากาศอากาศและอุณหภูมิสูง อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงรูปทรงซึ่งต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะของการใช้งาน อีกทั้งภายในระบบจำเป็นต้องมีความสะอาด ไม่มีสิ่งปนเปื้อนแก่วัสดุที่นำมาสังเคราะห์ งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถนำไปใช้กับงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป

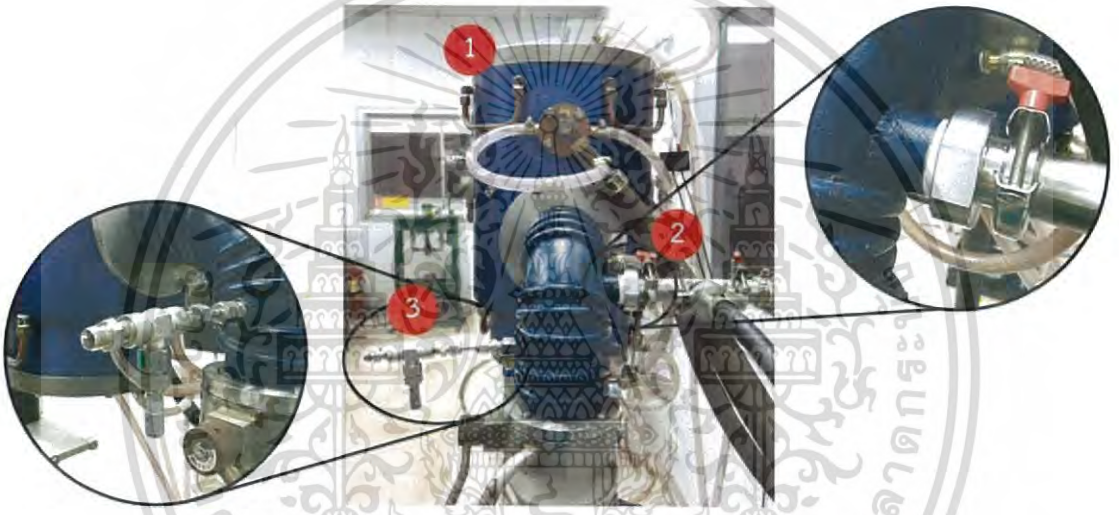


รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของห้องสุญญากาศและระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ห้องสุญญากาศ

ห้องสุญญากาศที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นมานั้นได้คำนึงถึงเงื่อนไขของการใช้งานในส่วนของงานวิจัยและการพัฒนาส่วนอื่นๆ ต่อไป โดยมีการประยุกต์ให้สามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ โดยการทำข้อต่อเชื่อม ซึ่งปลายท่ออีกด้านจะต่อเข้ากับห้องสุญญากาศซึ่งเป็นระบบเก่า ขณะที่ปลายอีกด้านจะมีขนาดมาตรฐานสามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ รวมทั้งช่องทางการเพิ่มแก๊สในระบบ ซึ่งในบางงานวิจัยจำเป็นต้องมีการใส่แก๊สเข้าไปในระบบขณะใช้งานเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงด้วย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโดยหรือลดการเกิดปฏิกิริยาโดยการใส่ก๊าซเฉื่อย งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการออกแบบโครงสร้างเพิ่มเติม และจัดหาอุปกรณ์เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ของห้องสุญญากาศ แสดงดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของห้องสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของห้องสุญญากาศ มีดังนี้

หมายเลข 1 คือ ภาชนะสุญญากาศ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 290.00 มิลลิเมตร สูง 412.00 มิลลิเมตร หนา 36.25 มิลลิเมตร ภายในภาชนะสุญญากาศเป็นที่สำหรับใส่สารตัวอย่าง และฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนกับสารตัวอย่าง บริเวณด้านข้างมีท่อที่มีลักษณะคล้ายข้องอติดอยู่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 90.00 มิลลิเมตร สูง 20.00 มิลลิเมตร บริเวณนี้ใช้สำหรับเป็นตัวเชื่อมกับปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในระบบ

หมายเลข 2 คือ ข้อต่อแปลงขนาดที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงกับระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ได้แก่ ดิฟฟิวชันปั๊ม และโรตารี่ปั๊ม โดยมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.00 มิลลิเมตร ภายในแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่เป็นท่อเกลียวในจะขันเข้ากับบริเวณท่องอที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศ ส่วนที่เป็นคอขวด

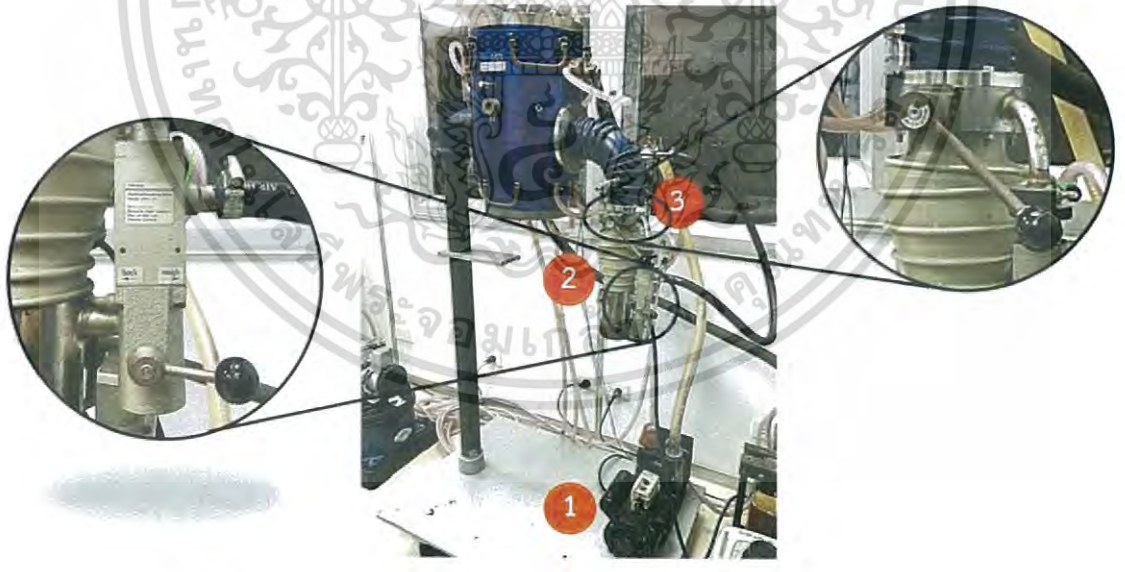
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างกลางสำหรับเพื่อให้มีที่ยึดจับกับแคมป์ล็อค และส่วนสุดท้ายคือบริเวณปากท่อใช้สำหรับต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40.00 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน

หมายเลข 3 คือ ท่อที่สามารถต่อเข้ากับท่อแก๊สเพื่อใส่เข้าไปยังภายในห้องสุญญากาศ โดยจะใช้สำหรับงานวิจัยที่ต้องการเพิ่มแก๊สในการทดลองในระหว่างการเผา ซึ่งท่อนี้จะต่อออกมาจากบริเวณท่องอที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศ

4.1.2 ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

ในการสร้างสภาวะสุญญากาศของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงเครื่องนี้จะใช้ปั๊ม 2 ชนิด ประกอบด้วยโรตารี่ปั๊มและดิฟฟิวชันปั๊ม ซึ่งปั๊มทั้งสองชนิดนี้มีพิสัยการทำงานในช่วงความดันที่แตกต่างกัน โดยที่โรตารี่ปั๊มจะมีพิสัยการทำงานที่ช่วงความดันบรรยากาศลดลงไปถึง 10^{-3} มิลลิบาร์ และดิฟฟิวชันปั๊มมีพิสัยการทำงานที่ช่วงความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ ถึง 10^{-10} มิลลิบาร์ งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสร้างสภาวะสุญญากาศได้ที่ความดันฐาน 1.6 มิลลิบาร์ ผ่านโรตารี่ปั๊มเพียงตัวเดียว เนื่องจากระบบที่พัฒนาและปรับปรุงนั้นยังมีบางส่วนที่สามารถรั่วซึมได้ ทำให้อากาศที่อยู่ภายนอกสามารถไหลผ่านเข้าไปยังภายในห้องสุญญากาศได้ จึงทำให้ไม่สามารถสร้างสภาวะสุญญากาศด้วยดิฟฟิวชันปั๊มเพื่อให้ได้ความดันตามที่ต้องการ รูปที่ 4.3 แสดงการติดตั้งปั๊มสุญญากาศทั้ง 2 ชนิด เข้ากับเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.3 แสดงส่วนประกอบและตำแหน่งของระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงส่วนประกอบของระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ มีดังนี้

หมายเลข 1 คือ โรตารี่ปั๊ม โดยโรตารี่ปั๊มมีพิสัยในการทำงานที่ช่วงความดันบรรยากาศลดลงไปถึง 10^{-3} มิลลิบาร์ ในการสร้างสภาวะสุญญากาศของระบบจะต้องทำการเปิดโรตารี่ปั๊มเป็นอันดับแรก เพื่อทำการปั๊มอากาศออกจากห้องสุญญากาศก่อน จนถึงช่วงที่ดิฟฟิวชันปั๊มสามารถทำงานได้

หมายเลข 2 คือ ดิฟฟิวชันปั๊ม การทำงานของดิฟฟิวชันปั๊มมีพิสัยการทำงานที่ช่วงความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ ถึง 10^{-10} มิลลิบาร์ โดยที่บริเวณด้านบนของดิฟฟิวชันปั๊มนั้นจะประกอบด้วยวาล์ว 2 ชนิด คือ roughing valve และ backing valve ซึ่งมีหน้าที่ต่างกัน คือ roughing valve จะเปิดขณะที่โรตารี่ปั๊มทำงานเพียงตัวเดียว โดยเป็นการปั๊มอากาศจากห้องสุญญากาศผ่านดิฟฟิวชันปั๊ม และ backing valve จะเปิดขณะที่มีการปั๊มอากาศโดยใช้ดิฟฟิวชันปั๊มและโรตารี่ปั๊มทำงานร่วมกัน เป็นการปั๊มอากาศออกจากห้องสุญญากาศโดยใช้ดิฟฟิวชันปั๊ม จากนั้นจึงส่งต่อไปยังโรตารี่ปั๊มเพื่อปล่อยอากาศออกสู่ความดันบรรยากาศภายนอก

หมายเลข 3 คือ high vacuum valve จะติดอยู่ที่ดิฟฟิวชันปั๊ม ซึ่งอยู่ระหว่างท่องอที่ต่อกับห้องสุญญากาศและดิฟฟิวชันปั๊ม

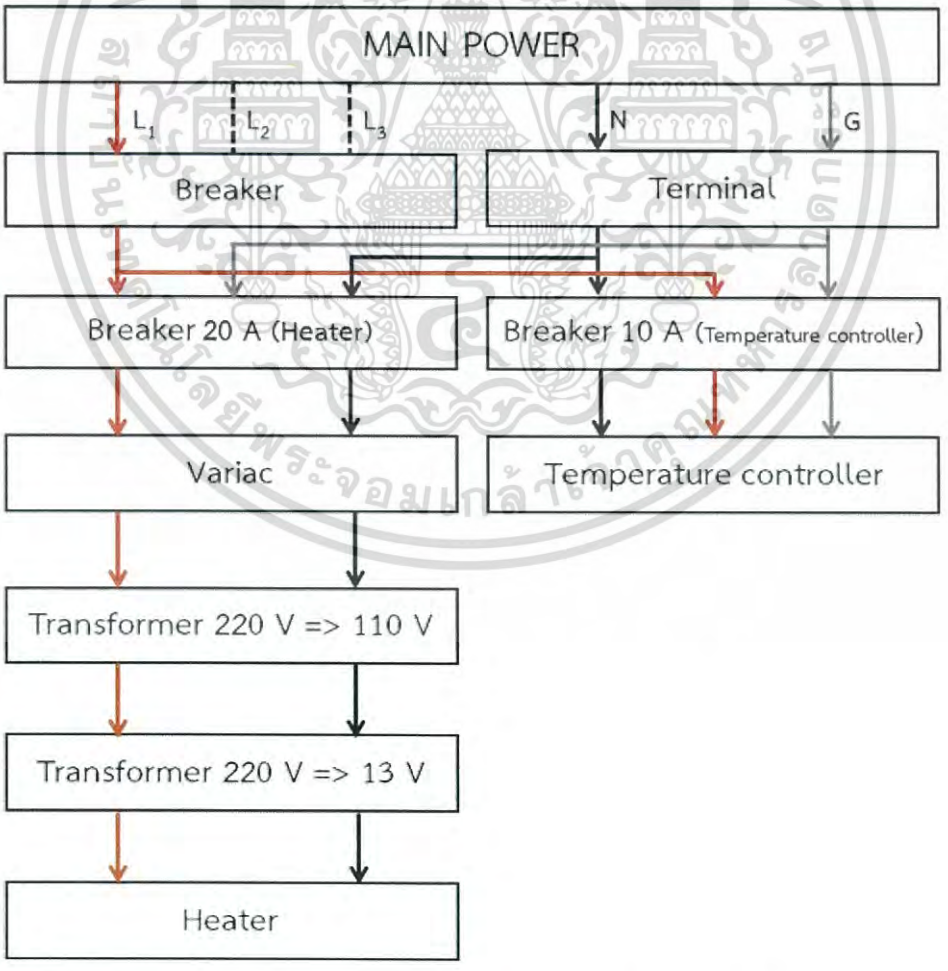
4.1.3 ขั้นตอนการสร้างสภาวะสุญญากาศ

1. ตรวจเช็คส่วนประกอบต่างๆ ของห้องสุญญากาศให้ปิดสนิทเรียบร้อย
2. เปิดโรตารี่ปั๊มเพื่อทำการปั๊มอากาศออกจากห้องสุญญากาศ
3. เปิด backing valve เพื่อทำการปั๊มอากาศออกจากดิฟฟิวชันปั๊ม
4. จากนั้นเปิดระบบหล่อเย็นให้แก่ดิฟฟิวชันปั๊ม จึงทำการเปิดฮีตเตอร์ของดิฟฟิวชันปั๊ม เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ดิฟฟิวชันปั๊มและเป็นการป้องกันความร้อนที่สามารถแผ่ออกมาภายนอก
5. ทำการปิด backing valve จากนั้นเปิด roughing valve เพื่อให้โรตารี่ปั๊มปั๊มอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ
6. เมื่อความดันภายในห้องสุญญากาศมีค่าประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์ ให้ทำการเปิด high vacuum valve และดิฟฟิวชันปั๊ม จากนั้นปิด roughing valve และเปิด backing valve เพื่อให้ดิฟฟิวชันปั๊มปั๊มอากาศออกจากห้องสุญญากาศตามความดันที่ต้องการ อากาศที่ปั๊มจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศผ่านโรตารี่ปั๊ม
7. เมื่อใช้งานเสร็จทำการปิดดิฟฟิวชันปั๊ม โรตารี่ปั๊ม และเปิดวาล์วเพื่อให้อากาศเข้าสู่ภายในห้องสุญญากาศ ตามลำดับ โดยวาล์วดังกล่าวจะอยู่บริเวณท่อที่ใช้สำหรับใส่แก๊สเข้าไปยังห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ภายในภาชนะสุญญากาศมีลวดความร้อนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของเตาเผานี้ โดยอาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ ไปเป็น 13 โวลต์ เพื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น จากนั้นจะส่งผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านนอกภาชนะสุญญากาศ ซึ่งภายในจะเชื่อมต่อกับลวดความร้อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดความร้อนจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นกับลวดความร้อนและภายในห้องสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงนี้สามารถทำได้ 2 ระบบคือ Constant power และ Temperature control และเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิ จึงได้จัดทำแผงควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและความปลอดภัยของผู้ใช้งาน เนื่องจากในการทำงานของเครื่องมีการใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ดังนั้น จึงทำการติดตั้งเบรกเกอร์สำหรับกรณีฉุกเฉินเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์มากเกินไป สามารถทำการสับสวิตซ์ลงทันทีเพื่อหยุดการทำงานของระบบได้อย่างรวดเร็ว แผนผังและรูปถ่ายแผงควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 แสดงแผงผังควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงแผนผังควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย Main power ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักให้แก่อุปกรณ์ต่างๆ จาก Main power จะมีทางเดินไฟที่เรียกว่า Line 3 ทาง สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิจะใช้เพียงทางเดินไฟ 1 ทาง ซึ่งจะผ่าน Breaker ก่อน แล้วจึงถูกส่งไปยังอุปกรณ์ต่อไป ในส่วนของ Neutral และ Ground จะต่อกับ Terminal เพื่อความสะดวกในการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากการใช้งานในแต่ละส่วนนอกจากจะต้องต่อทางเดินไฟฟ้าแล้วยังจำเป็นต้องต่อ Neutral และ Ground ร่วมด้วย เป็นการเสริมความปลอดภัย กรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่ไม่ปกติขึ้น เช่น กรณีที่สาย Neutral ขาดหรือจุดต่อหลวม จะส่งผลให้มีศักย์ไฟฟ้าขึ้นในสาย Neutral ซึ่งในสภาวะปกติ สาย Neutral จะไม่มีศักย์ทางไฟฟ้า หรือมีค่าเป็น 0 โวลต์ ทำให้เราสามารถสัมผัสตัวนำสาย Neutral ได้โดยที่ไม่ถูกไฟดูด แต่ถ้าเกิดกรณีไม่ปกติจะทำให้มีศักย์ไฟฟ้าในสาย Neutral ระบบที่เชื่อมต่อ Neutral และ Ground เข้าด้วยกัน จะช่วยนำศักย์ไฟฟ้าที่มีลงดิน ทำให้สาย Neutral มีศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 โวลต์ อยู่ตลอดเวลา สามารถลดความเสี่ยงในการใช้ไฟฟ้า ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดความร้อน (Heater) จาก Breaker ตัวที่หนึ่งจะส่งผ่านไปยัง Breaker ตัวที่สองที่มีข้อจำกัดของกระแสไฟฟ้าที่สามารถไหลผ่าน Breaker ตัวที่สองได้เพียง 20 มิลลิแอมแปร์ เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานรวมทั้งเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ในระบบ จากนั้นจึงต่อเข้ากับ Variac เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ลวดความร้อน และสามารถทำการลดแรงดันไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดความร้อนด้วยการต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ที่สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 110 โวลต์ และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าอีกครั้งโดยการเพิ่มหม้อแปลงไฟฟ้าอีกหนึ่งตัวซึ่งจะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 13 โวลต์ จากนั้นจึงต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าซึ่งต่ออยู่กับลวดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศ การใช้งาน Temperature Controller จะใช้งานผ่าน Breaker ที่มีข้อจำกัดของกระแสไฟฟ้าที่สามารถไหลผ่าน Breaker ได้ที่ 10 มิลลิแอมแปร์ ก่อนจะเข้าสู่อุปกรณ์ Temperature Controller เพื่อความสะดวกในการเปิด-ปิดการใช้งาน รวมทั้งป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับ Temperature Controller อันเนื่องมาจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์มากเกินไป

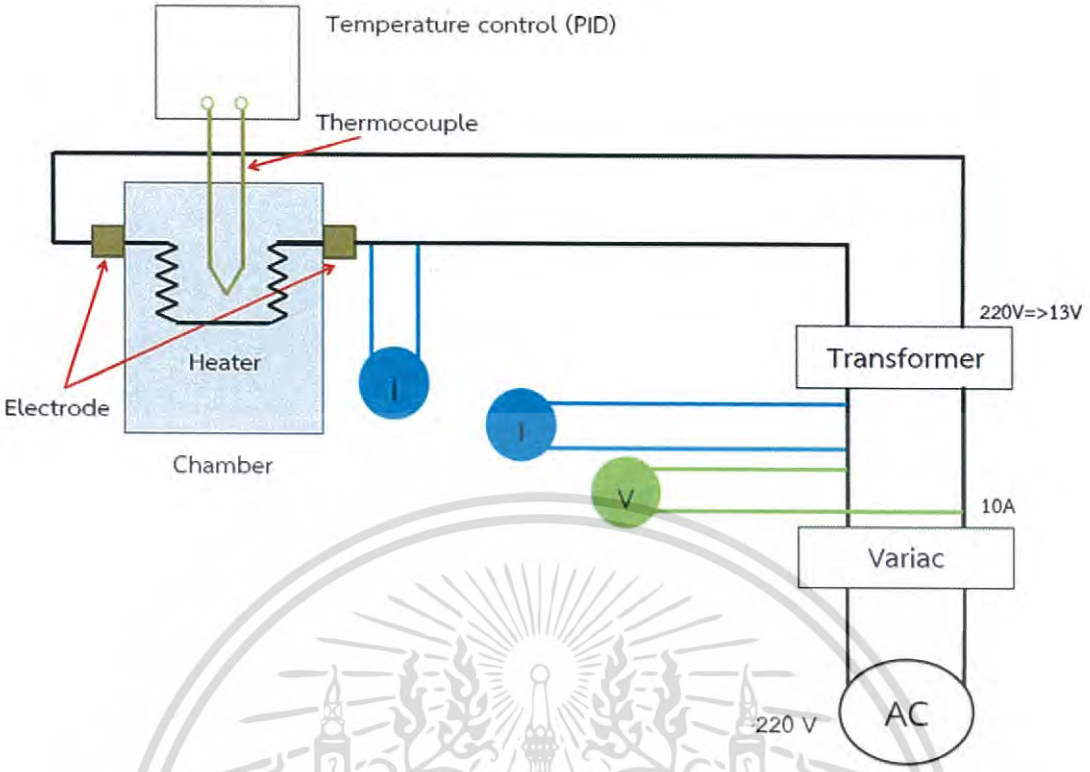
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงรูปถ่ายแผงควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิ

4.2.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power

ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power เป็นการควบคุมอุณหภูมิโดยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ลวดความร้อนคงที่ ในการตรวจวัดอุณหภูมิจะทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งภายในภาชนะสุญญากาศจากทางด้านบน เนื่องจากข้อจำกัดของความยาวของเทอร์โมคัปเปิล รวมทั้งตำแหน่งของลวดความร้อน ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดดังกล่าวมีความเหมาะสมมากที่สุด และการวัดอุณหภูมิมีลักษณะเป็นการแผ่รังสีความร้อนไปยังเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นจึงทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดได้ โดยในป้อนกระแสแต่ละค่าใช้เวลา 15 นาที ซึ่งมีแผนผังแสดงการทดลองแบบ Constant power ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงแผนผังส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power

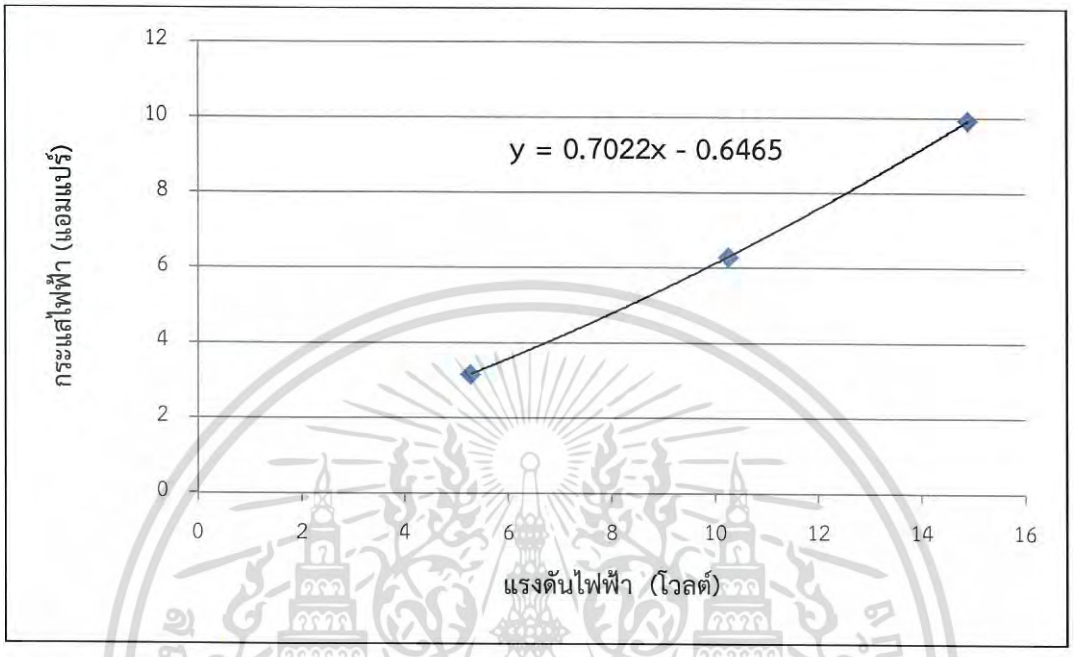
จากรูปที่ 4.6 แผนผังส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power ประกอบด้วยแหล่งจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ นำมาต่อเข้ากับ Variac ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบตามค่าที่ต้องการ ซึ่งในการตรวจวัดจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบในตอนเริ่มต้น จากนั้นทำการลดแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน (Heater) โดยต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 13 โวลต์ จากนั้นจึงทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าก่อนจะไหลผ่านลวดความร้อน โดยการวัดที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อกับลวดความร้อนภายในภาชนะสุญญากาศ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศตามรูปที่ 4.6

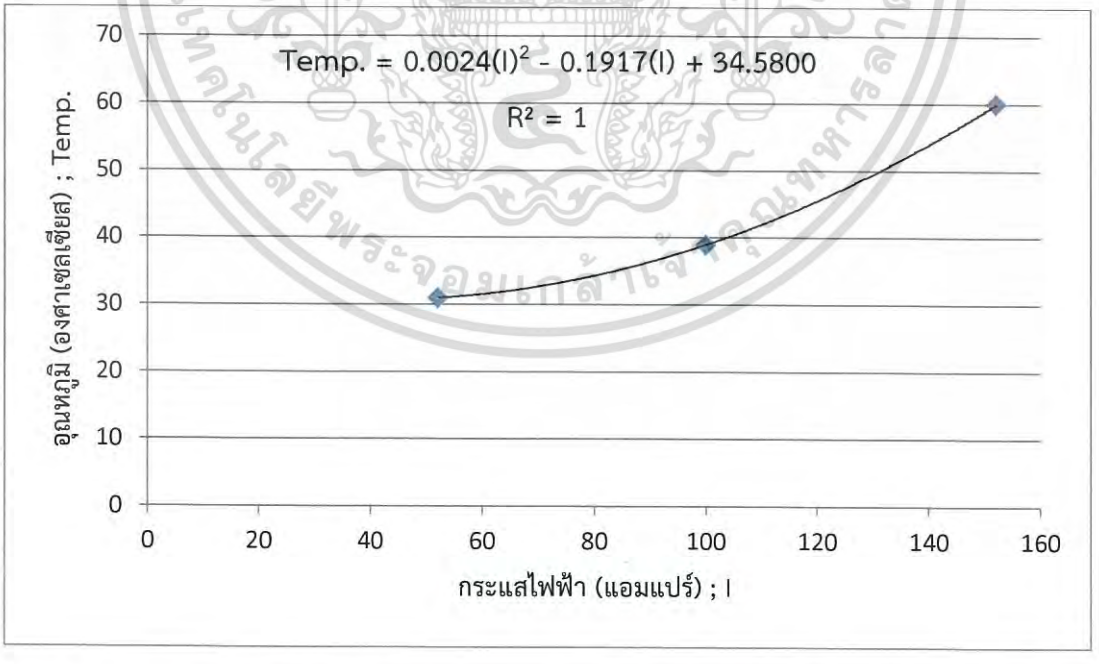
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) : ขาออกจาก Variac	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) : ขาออกจาก Variac	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) : บริเวณขั้วไฟฟ้า	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) : ภายในภาชนะสุญญากาศ
5.27	3.17	52.2	31
10.25	6.31	97.5	39
14.90	9.94	174.1	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศกับกระแสไฟฟ้าขาออกจาก Variac พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้



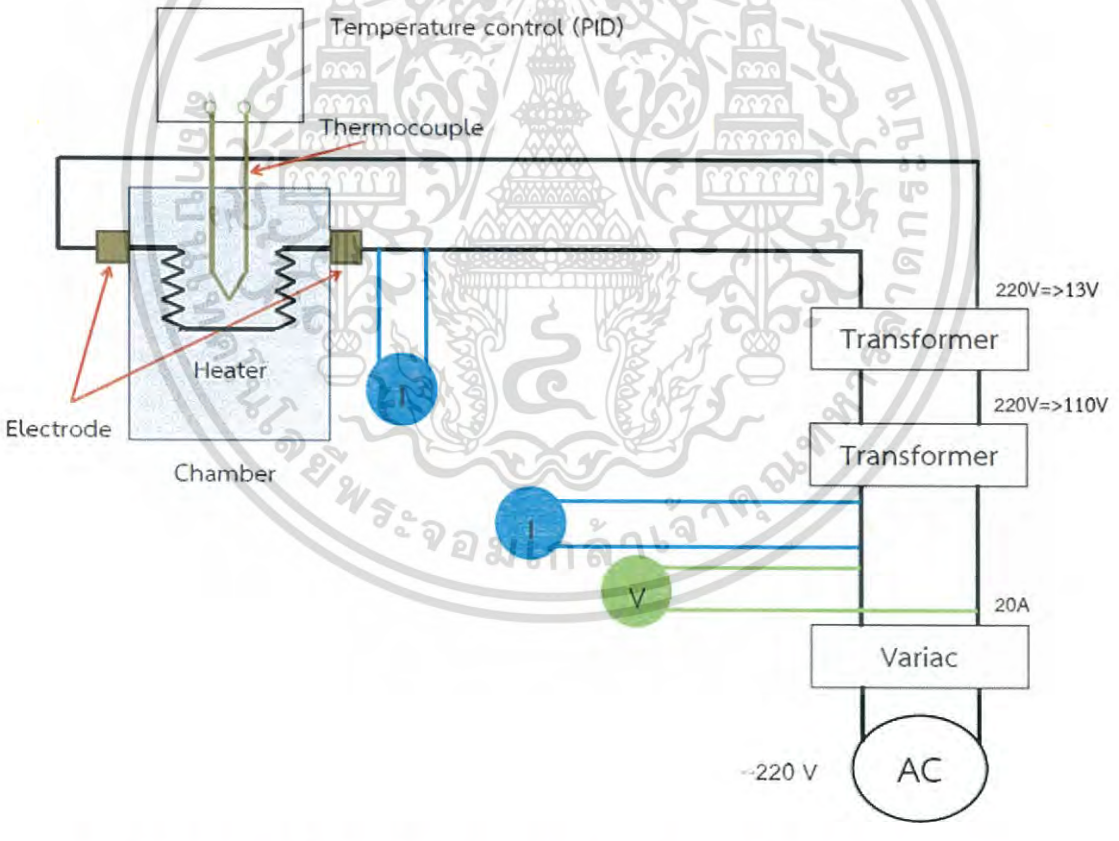
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศกับกระแสไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศกับกระแสไฟฟ้าขาออก ทำให้สามารถคาดคะเนอุณหภูมิที่แปรผันกับกระแสไฟฟ้าได้ จึงทำการกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ทำการทดลอง และแทนค่าลงในสมการความสัมพันธ์ Temp. = $0.0024(I)^2 - 0.1917(I) + 34.5800$ เพื่อดูค่าของกระแสไฟฟ้าที่จะต้องทำการจ่ายให้กับลวดความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ แต่จากการทดลองข้างต้น Variac ที่ใช้มีข้อจำกัด คือ สามารถให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุตได้ไม่เกิน 10 แอมแปร์ จึงได้มีการเปลี่ยน Variac ที่มีคุณสมบัติในการให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุตได้มากขึ้นถึง 20 แอมแปร์ และเพิ่มหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ทำการลดแรงดันไฟฟ้าลงก่อนที่จะเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการแปลงขนาด 220 โวลต์ ไปเป็น 13 โวลต์ โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งซึ่งมีการแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ ไปเป็น 110 โวลต์ เข้ามาช่วย เพื่อช่วยในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามาจะวางอยู่ระหว่าง Variac และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิม แต่จับเวลาในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแต่ละค่าเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังต่อไปนี้



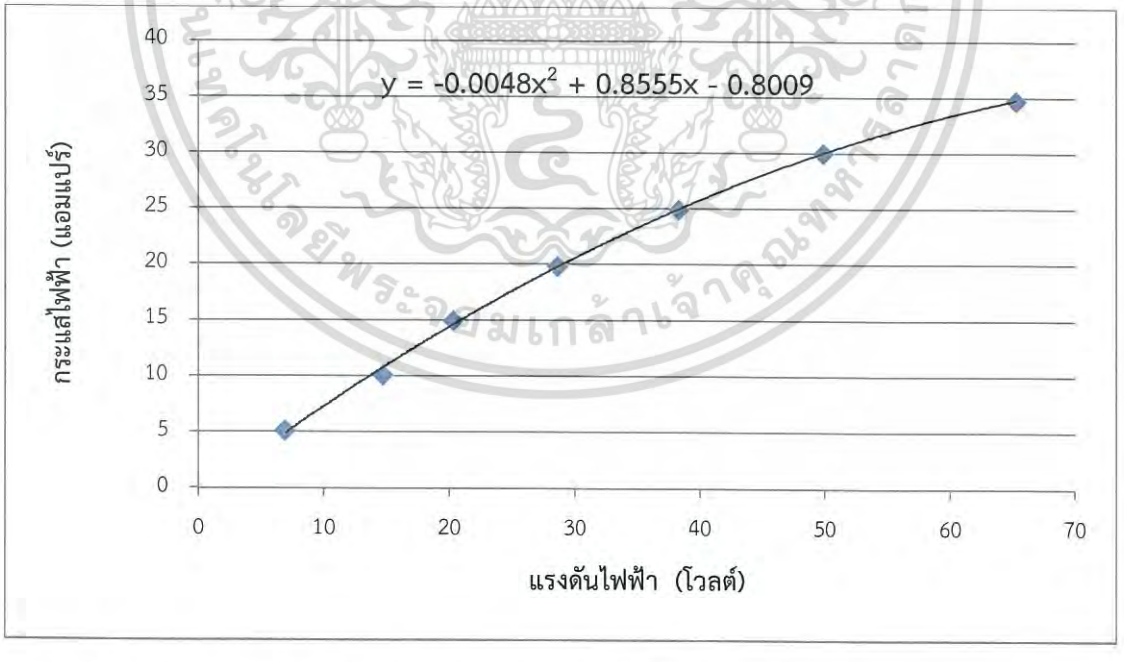
รูปที่ 4.9 แสดงแผนผังส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศตามรูปที่ 4.9

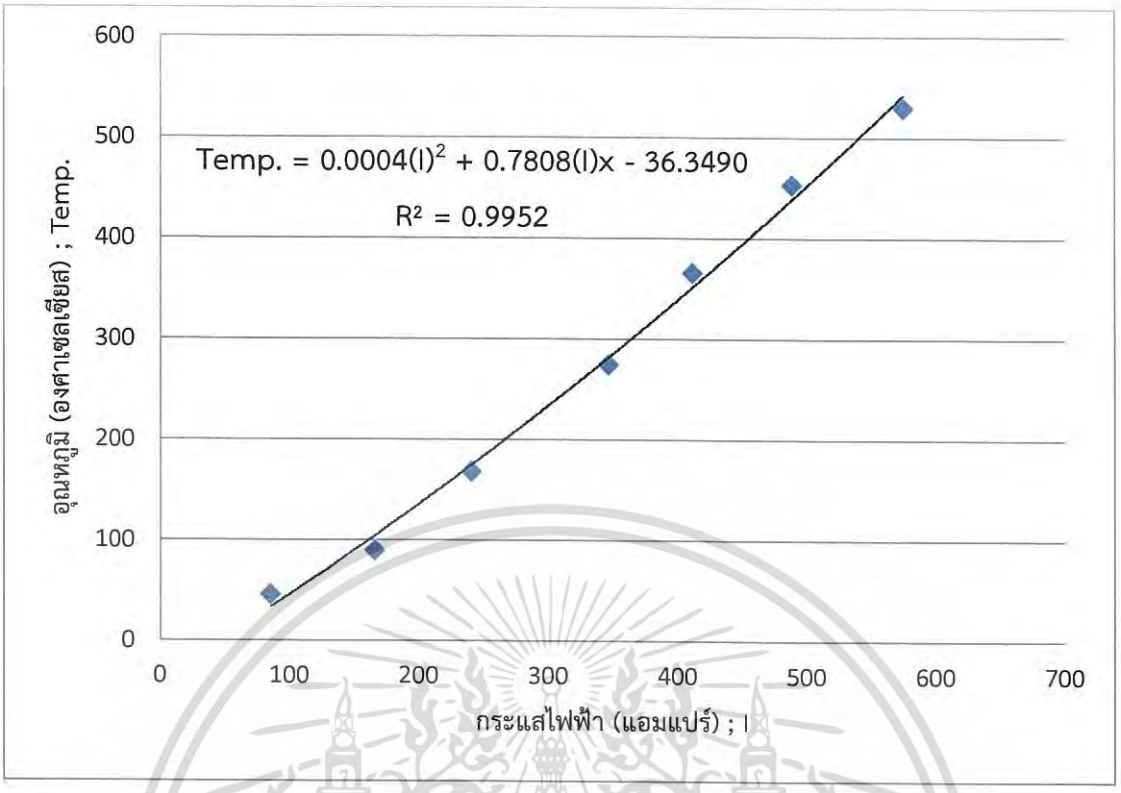
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) : ขาออกจาก Variac	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) : ขาออกจาก Variac	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) : บริเวณขั้วไฟฟ้า	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) : ภายในภาชนะสุญญากาศ
6.97	2.74	85.8	46
14.77	5.32	166.0	90
20.35	8.13	241.0	168
28.65	11.10	374.0	275
38.35	12.97	412.0	366
49.90	16.15	489.0	453
65.30	18.01	575.0	530

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.2 มาพล็อตกราฟ หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ภายในภาชนะสุญญากาศกับกระแสไฟฟ้าขาออกจาก Variac แสดงดังนี้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก Variac

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศกับกระแสไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้า

ขั้นตอนการใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Constant power สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป

1. เปิดสวิตซ์เบรกเกอร์ที่ Main power และเบรกเกอร์ที่ต่อมาจาก Main power จากนั้นจึงเปิดเบรกเกอร์ของ Temperature controller และลวดความร้อนที่แผงควบคุม ตามลำดับ

2. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ Variac ให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการ และทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผ่านไปยังลวดความร้อน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ขดลวดสามารถสร้างความร้อนได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Temp.} = 0.0004(I)^2 + 0.7808(I) - 36.3490$$

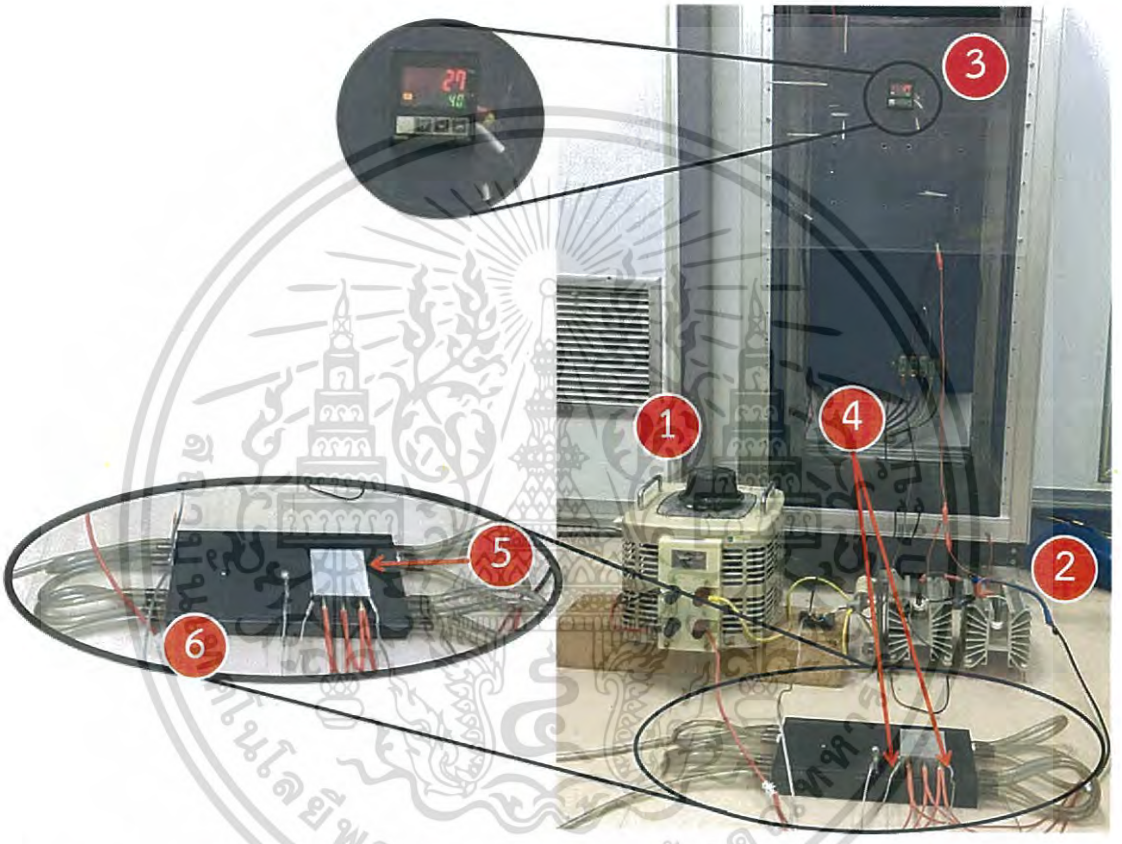
3. อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศที่เทอร์โมคัปเปิลทำการวัดได้นั้น จะแสดงผลที่หน้าจอของ Temperature controller

4. เมื่อใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิเสร็จแล้ว ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ Variac ให้เป็นศูนย์ จากนั้นทำการปิดที่เบรกเกอร์ของ Temperature controller และลวดความร้อน ต่อมาปิดเบรกเกอร์ที่ต่อออกมาจาก Main power และเบรกเกอร์ที่ Main power ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

ในการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติให้คงที่โดยอาศัย Temperature controller ได้มีการจำลองระบบโดยการต่อเอสซีอาร์เพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังลวดความร้อน ซึ่งจะใช้เอสซีอาร์สองตัวในการควบคุม เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับได้ ทั้งนี้รูปแบบการต่อเอสซีอาร์ทั้งสองเข้ากับระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีลักษณะเหมือนกับไตรแอค แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 แสดงวงจรจำลองการใช้เอสซีอาร์ต่อเข้ากับระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ Temperature controller

หมายเลข 1 คือ Variac ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมารถให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุตสูงที่สุด 20 มิลลิแอมแปร์

หมายเลข 2 คือ เอสซีอาร์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะต่อขนานกลับทิศทางกัน เพื่อใช้งานสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสัญญาณเอาท์พุตที่ออกมาจาก Temperature controller จะเป็นขั้วบวกและลบ โดยที่ขั้วบวกจะไปทริกสัญญาณที่ขาเกตของเอสซีอาร์ทั้งสองตัว และที่ขั้วลบจะทริกสัญญาณที่ขาแอโนดของเอสซีอาร์ที่ต่อกับ Variac เมื่อมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาท์พุตจาก Temperature controller สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงาน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังลวดความร้อนได้

หมายเลข 3 คือ Temperature controller เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิ หากอุณหภูมิที่วัดได้ในปัจจุบันยังไม่ถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ Temperature controller จะจ่ายสัญญาณเอาท์พุตไปทริกที่เอสซีอาร์ แต่เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดไว้ ก็จะหยุดจ่ายสัญญาณไปที่เอสซีอาร์ และจะทำการเปิด-ปิดสัญญาณเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่

หมายเลข 4 คือ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

หมายเลข 5 คือ ลวดความร้อนทดสอบ

หมายเลข 6 คือ ฮีตซิงก์ ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับฮีตเตอร์ ซึ่งมีระบบหล่อเย็นช่วยให้ระบายความร้อนได้เร็วขึ้น

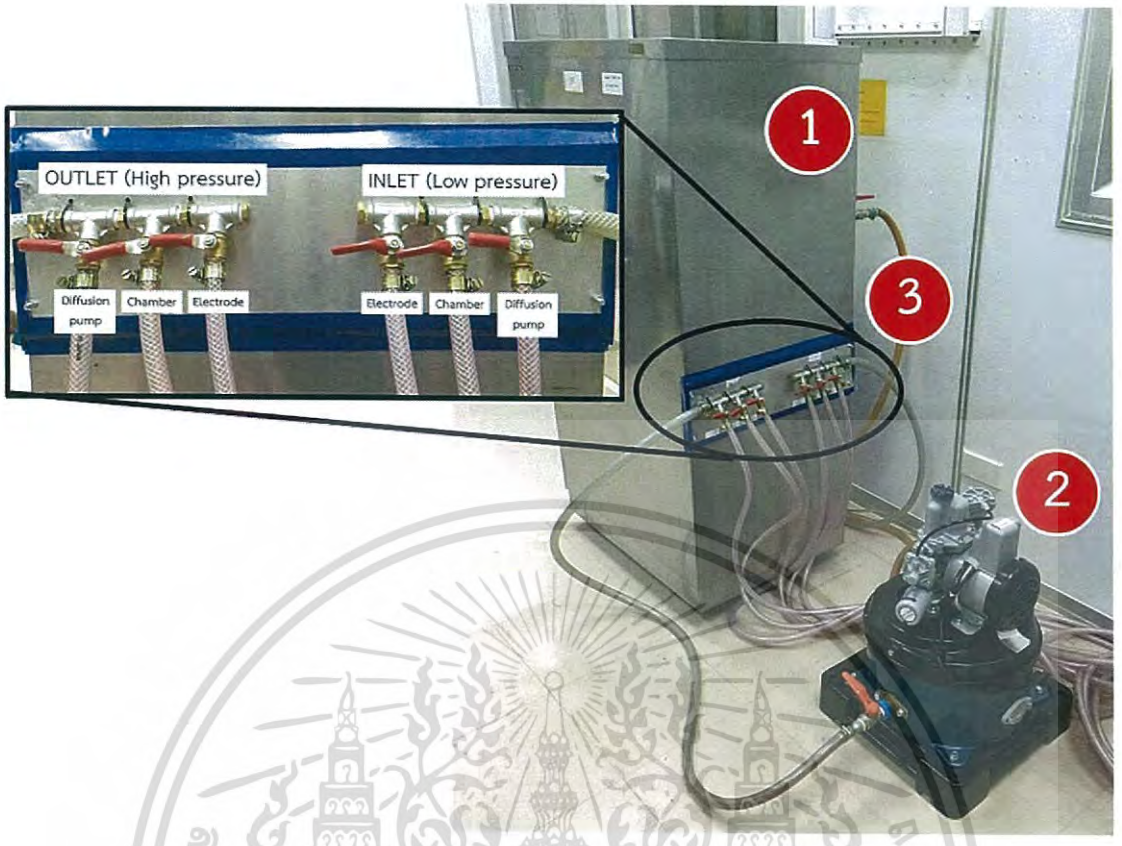
ขั้นตอนการใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ Temperature controller สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป

1. เปิดสวิตช์ที่เบรกเกอร์ Main power เบรกเกอร์ Temperature controller และที่เบรกเกอร์ที่ต่อเข้ากับ Variac ตามลำดับ
2. ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยไปตั้งที่ Temperature controller จะขึ้นหน้าเจอแสดงผล SV คือ ค่าอุณหภูมิที่เราตั้งไว้ และ PV คือ ค่าอุณหภูมิปัจจุบัน
3. เมื่ออุณหภูมิยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ Temperature controller จะจ่ายเอาท์พุตเพื่อไปทริกสัญญาณที่เอสซีอาร์ เพื่อที่จะควบคุมการจ่ายกระแสให้กับฮีตเตอร์ และเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้แล้ว Temperature controller จะหยุดจ่ายเอาต์พุต ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังฮีตเตอร์
4. เมื่อใช้งานเสร็จแล้วให้ปรับแรงดันไฟฟ้าไปที่ศูนย์ และปิดสวิตช์ที่เบรกเกอร์
5. ทำการหล่อเย็นฮีตเตอร์ให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง
6. ปิดเบรกเกอร์ของ Temperature controller และที่ Main power

4.3 ระบบหล่อเย็น

ในการใช้งานเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็น เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศในขณะที่ใช้งานมีอุณหภูมิที่สูงมาก และกระแสที่จ่ายไปยังขั้วไฟฟ้า (Electrode) มีค่าสูงมาก ทำให้เกิดความร้อนขึ้น เพื่อป้องกันการแผ่ความร้อนจากภาชนะสุญญากาศ การเสื่อมสภาพของยางโอริงตามข้อต่อต่างๆ การเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อื่นๆ รวมทั้งเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน จึงได้ทำการติดตั้งชิลเลอร์แบบระบายความร้อน เพื่อช่วยในการระบายความร้อน ส่วนประกอบของระบบหล่อเย็น แสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงส่วนประกอบของระบบหล่อเย็น

จากรูปที่ 4.13 แสดงส่วนประกอบของระบบหล่อเย็น ดังนี้

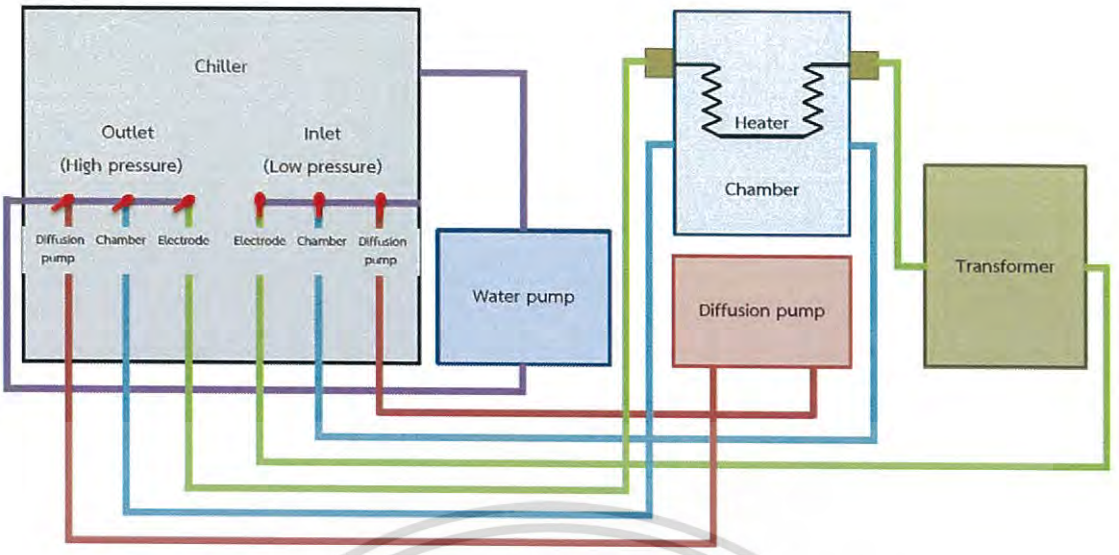
หมายเลข 1 คือ ชิลเลอร์ ทำหน้าที่ในการสร้างน้ำเย็น บริเวณถังบรรจุน้ำซึ่งมี compressor ในการทำความเย็น และระบายความร้อนด้วยอากาศ ระดับในการทำความเย็น สามารถทำความเย็นได้ถึง 7 ระดับ

หมายเลข 2 คือ ปั๊มน้ำ ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มแรงดันในการส่งน้ำไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้น้ำเย็นที่ถูกสร้างขึ้นถูกส่งไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว และหมุนเวียนกลับเข้ามาในชิลเลอร์อีกครั้ง ช่วยทำให้การระบายความร้อนเป็นไปอย่างทันท่วงที

หมายเลข 3 แผงวาล์วน้ำของระบบชิลเลอร์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ทางน้ำเข้าและทางน้ำออกจากชิลเลอร์ ซึ่งจะส่งน้ำไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ห้องสุญญากาศ (Chamber), ขั้วไฟฟ้า (Electrode) และดิฟฟิวชันปั๊ม (Diffusion pump)

แผนผังทางเดินน้ำทั้งหมดของระบบหล่อเย็นแสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงแผนผังทางเดินน้ำของระบบหล่อเย็น

น้ำเย็นที่ออกจากชิลเลอร์จะไหลผ่านปั๊มน้ำเพื่อเพิ่มแรงดันน้ำ ทำให้น้ำเย็นไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง จากนั้นน้ำจากปั๊มน้ำจะผ่านไปยังแผงวาล์วน้ำทาง Outlet (แรงดันสูง) น้ำจะถูกส่งไปยังห้องสุญญากาศ (Chamber), ขั้วไฟฟ้า (Electrode) และดิฟฟิวชันปั๊ม (Diffusion pump) โดยที่ขั้วไฟฟ้าจะมีสายไฟขนาดใหญ่ซึ่งต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) มีความจำเป็นในการระบายความร้อนเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณมาก จากนั้นน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ จะไหลกลับเข้ามายังแผงวาล์วน้ำทาง Inlet (แรงดันต่ำ) และเข้าสู่ชิลเลอร์เพื่อทำความเย็นอีกครั้งและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

ผลการทดสอบระบบหล่อเย็นจะนำเสนอในรูปแบบของการแผ่รังสีความร้อนของภาชนะสุญญากาศและขั้วไฟฟ้า ในขณะที่ใช้งานเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกภาพผ่านกล้องเทอร์โมสแกน ซึ่งสามารถบอกค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่กล้องได้ทำการโฟกัส ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็นในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ โดยทำการบันทึกภาพบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง และพื้นผิวภายนอกของห้องสุญญากาศ แสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายจากกล้องเทอร์โมสแกนที่อุณหภูมิห้อง โดยรูป (ก), (ข) แสดงบริเวณขั้วไฟฟ้า และ (ค) แสดงบริเวณพื้นผิวภายนอกของห้องสุญญากาศ

รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายจากกล้องเทอร์โมสแกนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยรูป (ก), (ข) แสดงบริเวณขั้วไฟฟ้า และ (ค) แสดงบริเวณพื้นผิวภายนอกของห้องสุญญากาศ

ขั้นตอนการใช้งานระบบหล่อเย็นให้กับภาชนะสุญญากาศ

1. เสียบปลั๊กปั๊มน้ำและชิลเลอร์ พร้อมทั้งปรับระดับอุณหภูมิด้านหลังชิลเลอร์เป็นเบอร์ 7 เปิดเครื่องไว้นานประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิน้ำในชิลเลอร์ให้เย็น โดยอุณหภูมิน้ำที่ได้มีค่าประมาณ 5 องศาเซลเซียส (พิจารณาการปรับระดับการทำความเย็นของชิลเลอร์น้ำตามความเหมาะสมของอุณหภูมิเตาเผาสุญญากาศที่ใช้งาน)

2. เมื่อเริ่มทำการทดสอบ ทำการเปิดวาล์วบริเวณชิลเลอร์ ปั๊มน้ำ และวาล์วที่แผงวาล์วทางน้ำฝั่ง Inlet ทั้งหมด (ได้แก่ Chamber, Electrode และ Diffusion pump)

3. จากนั้นทำการเปิดวาล์วน้ำทางฝั่ง Outlet ทั้งหมด เพียงเล็กน้อย เป็นการตรวจสอบว่าน้ำจากชิลเลอร์ไหลผ่านห้องสุญญากาศ ขั้วไฟฟ้า และดิฟฟิวชันปั๊มหรือไม่

4. หากน้ำไหลไม่เต็มสายยางให้เปิดวาล์วเพิ่มอีก แต่จะต้องไม่เปิดมากเกินไปจนมอเตอร์ของปั๊มน้ำไม่มีการตัด (หยุดการทำงาน) เพราะหากมอเตอร์ของปั๊มน้ำไม่มีการตัดจะทำให้มอเตอร์ไหม้เกิดความเสียหายแก่ปั๊มน้ำได้

5. เมื่ออุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น น้ำที่ไหลผ่านจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย สามารถตรวจสอบคร่าวๆ ได้ที่ผิวของภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หากผิวของภาชนะสุญญากาศร้อนขึ้นให้เปิดวาล์วน้ำทาง Outlet เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยในการระบายความร้อนได้เร็วขึ้น

7. หากภาชนะสุญญากาศร้อนเกินไปหรือเย็นเกินไปจนมีไอน้ำเกาะ ให้พิจารณาการปรับวาล์วน้ำ หรือการปรับอุณหภูมิของชิลเลอร์ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

8. เมื่อทำการทดสอบเสร็จ ทำการเปิดวาล์วทิ้งไว้จนกว่าอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศจะอยู่ในระดับอุณหภูมิปกติ (อุณหภูมิห้อง)

9. จากนั้นทำการปิดวาล์วน้ำทั้งหมดที่ Inlet และ Outlet รวมทั้งปั๊มน้ำด้วย

10. ถอดปลั๊กชิลเลอร์และปั๊มน้ำให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยการพัฒนาเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงสำหรับประยุกต์ใช้ในการวิจัยด้านสังเคราะห์วัสดุ โดยสามารถออกแบบสร้าง พัฒนาและปรับปรุงห้องสุญญากาศ ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็น ซึ่งคณะผู้วิจัยได้พัฒนาจากอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ จากนั้นได้ทำการทดสอบการทำงานของเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูง โดยได้มีการทดสอบระบบสร้างสภาวะสุญญากาศ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหล่อเย็น โดยสามารถสรุปเป็นหัวข้อ ได้ดังนี้

- ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศสามารถทำความดันได้ต่ำที่สุดที่ 1.6 มิลลิบาร์
- ปริมาณของอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศที่ลวดความร้อนสามารถทำได้แปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าในรูปแบบของสมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง
- อุณหภูมิสูงสุดของลวดความร้อนที่สามารถทำได้โดยวัดจากการแผ่รังสีภายในห้องสุญญากาศ คือ 530 องศาเซลเซียส ขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้า 575 แอมแปร์
- ขณะที่ภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ภาชนะสุญญากาศมีการแผ่ความร้อนออกมาภายนอกเพียง 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีระบบหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงสามารถใช้งานในการสังเคราะห์วัสดุได้เบื้องต้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในการสร้างสภาวะสุญญากาศ การจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน และระบบหล่อเย็นที่ช่วยในการระบายความร้อนให้แก่เตาเผาสุญญากาศเครื่องนี้ ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อได้ในอนาคต ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเตาเผาสุญญากาศที่สูงขึ้น เพื่อให้เกิดประโยชน์และสามารถนำไปใช้กับงานวิจัยอื่นๆ ในการสังเคราะห์วัสดุ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบสร้างสภาวะสุญญากาศที่ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงขึ้นมานั้นยังมีบางจุดที่รั่วซึมได้ ทำให้อากาศภายนอกสามารถไหลเข้าไปในห้องสุญญากาศได้ จึงส่งผลทำให้ไม่สามารถสร้างสภาวะสุญญากาศตามค่าความดันที่ต้องการได้
2. ความร้อนที่ลวดความร้อนสามารถทำได้ มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ แต่เนื่องจากข้อจำกัดอุปกรณ์ในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เตาเผาสุญญากาศเครื่องนี้ทำได้คือ 530 องศาเซลเซียส ในการพัฒนาต่อในอนาคตเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุญญากาศอุณหภูมิสูงเครื่องนี้สามารถหาอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงขึ้น ลวดความร้อนก็จะสามารถทำความร้อนที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการสังเคราะห์วัสดุได้หลายชนิดมากขึ้น

3. ในการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติโดยใช้เอสซีอาร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ประสบปัญหาในการควบคุม เนื่องจากไม่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ได้ ทำให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์นั้นทำงานตลอดเวลา อาจเพราะมีไฟฟ้ารั่วไหลจากเบรกเกอร์ที่ใช้ในการควบคุม Variac ทำให้มีสัญญาณไปทริกส์ที่เอสซีอาร์ตลอดเวลา ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ได้ หรือเอสซีอาร์ที่ใช้อาจจะเสียหาย
4. เมื่อลวดความร้อนทำให้ภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ระบบหล่อเย็นควรมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้ชิลเลอร์ที่สามารถจุปริมาตรน้ำได้มากขึ้น และการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำภายในชิลเลอร์ จะทำให้สามารถระบายความร้อนได้ดีกว่า
5. ในการเปิดระบบหล่อเย็น ควรให้อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำเกาะบริเวณภายนอกห้องสุญญากาศ ขั้วไฟฟ้า เนื่องจากอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] เจ้าของร้าน (นามแฝง) (2558). **หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมคัปเปิล thermocouple.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.pballtechno.com/article/หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมคัปเปิลthermocouple วันที่ค้นข้อมูล 3 พฤศจิกายน 2558.

[2] ชวนากร จรดรัมย์ และธีระพันธ์ ศรีแจ่ม. 2555. "การศึกษาตัวควบคุมแบบรวมชนิดPID สำหรับการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมเชิงตรรกะ รุ่น SIEMENS S7-300" โครงงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[3] นวภัทรา หนูนาค และทวีพล ซื่อสัตย์. 2555. **การวัดและเครื่องมือวัด การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Measurement and Instrumentation).** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

[4] บริษัท ไทยอพอลโล เทค จำกัด. **งานด้านระบบทำน้ำเย็น (Chiller system).** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thaiapollo.com/index.php/service/mechanical-engineering-division/2-uncategorised/39-chiller-system-page-2 วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2558.

[5] บริษัท พลิค คอร์ปอเรชั่น จำกัด. **ฮีตเตอร์ (Heater).** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.pliccorp.com/thermoplic/th/heater.html วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[6] บริษัท สุพรีมไลนส์ จำกัด. (2558). **ฮีตเตอร์ (Heater).** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.เทอร์โมคัปเปิล.com/สาระความรู้—เทอร์โมคัปเปิล/heater—ฮีตเตอร์.html วันที่ค้นข้อมูล 3 พฤศจิกายน 2558.

[7] บริษัท โอ.อี. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. (2554). **Chiller คืออะไร?.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.oe-engineering.com/knowledge1/31/new_detail/ วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2558.

[8] พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ, มงคล ราชนิยม, วิยะพล พัฒนะเศรษฐกุล และสถาพร จันทน์หอม. 2543. "การพัฒนาเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบปรับบรรยากาศได้สำหรับการเผาพลอย" มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[9] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนวภัทรา หนูนาค. (2553). **Standard thermocouple / เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6810/standard-thermocouple-เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน วันที่ค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] มนตรี ไล้สมบูรณ์. (2550). **เครื่องมือวัดความดัน Pressure Instrumentation.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.bookclubman.com/pressure%20example-1.htm วันที่ค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2558.

[11] มีเจริญการช่าง. **ฮีตเตอร์.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.ฮีตเตอร์.com วันที่ค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2558.

[12] แมมโบ้ลายไทย (นามแฝง). (2557). **การเผาพลอย.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=711&Itemid=0 วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[13] วิกิพีเดีย. (2557). **ระบบควบคุมพีไอดี.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://th.wikipedia.org/ wi ki/ระบบควบคุมพีไอดี วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[14] วิกิพีเดีย. (2558). **ถ่านหิน.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : https://th.wikipedia.org/wiki/ถ่านหิน วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[15] วินัย เมฆอรียะ. (2554). **การเผาเก่าพลอยสีน้ำเงิน.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.เผาพลอย.com/2011/09/blog-post_787.html วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[16] วิศรุต ศรีรัตนะ. (2554). **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ ในงานอุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[17] สมบูรณ์ สารสิทธิ, ประดุจฤดี สารสิทธิ, อำพล ศิริพันธ์ และวิลาวัณย์ จินวรรณ. 2547. "การพัฒนาอิฐฉนวนความร้อนและสร้างเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาทนอุณหภูมิสูงโดยใช้วัสดุเซรามิกส์ในจังหวัดนครศรีธรรมราช" คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.

[18] สุวัฒน์ หนูศีรี. (2552). **เอสซีอาร์ (SCR) สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.neutron.rmutphysics.com/physicsboard/forum/index.php?topic=819.0 วันที่ค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2558.

[19] อานนท์ บุณยะรัตเวช และคณะ. 2551. "การวิจัยและพัฒนาเตาอุณหภูมิสูงสำหรับเผลาพลอย." หน้า 22-27. ใน **การสัมมนาเรื่องการพัฒนาอัญมณีไทยสู่แบรนด์สากล.** กรุงเทพฯ : องค์การทหารผ่านศึก.

[20] Amarin Gems & Jewelry. (2554). **การเผาพลอย.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://amaringems.com/index.php?route=information/information&information_id=20 วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

[21] nan ketsarin muangmoon. (2557). **High Vacuum Pumps.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://documents.tips/documents/chapter-4-558448b1b560b.html วันที่ค้นข้อมูล 19 ตุลาคม 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การใช้งาน Temperature controller ของยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CN-Q2MTC-500 มีการต่อขั้วไฟฟ้าต่างๆ เพื่อการใช้งานตามแผนผังดังต่อไปนี้

รูปที่ ก1 แสดงแผนผังการต่อขั้วไฟฟ้าในการใช้งาน Temperature controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

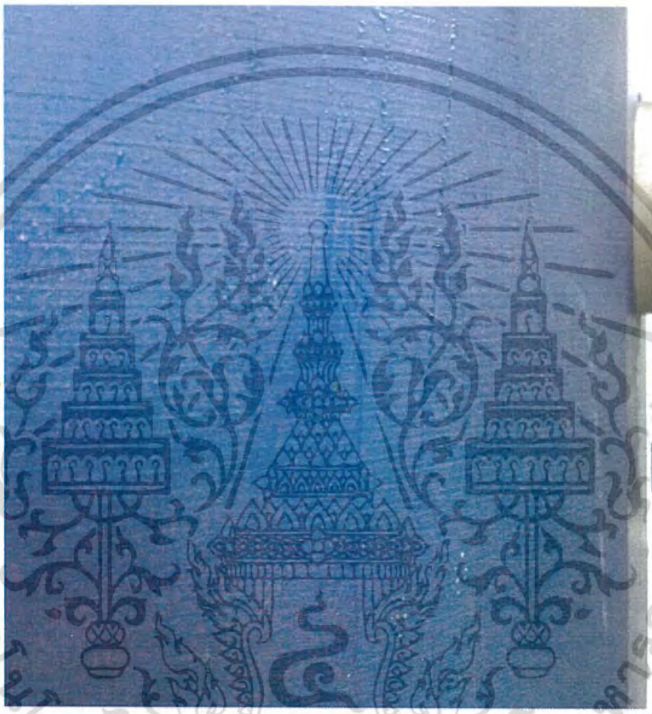
ในการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิบริเวณภายในห้องสุญญากาศสูงประมาณ 400 องศาเซลเซียส ลวดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลที่อยู่ภายในห้องสุญญากาศมีลักษณะเป็นสีส้มแดง ซึ่งสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนผ่านช่องชัตเตอร์ที่อยู่บริเวณด้านหน้าของภาชนะสุญญากาศ แสดงให้เห็นว่าบริเวณภายในห้องสุญญากาศเกิดความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงมากจนทำให้ลวดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนสี

รูปที่ ข1 แสดงลักษณะภายในห้องสุญญากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดสอบระบบหล่อเย็น พบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำจากชิลเลอร์มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ และในสภาพแวดล้อมที่มีไอน้ำในอากาศมาก จะทำให้เกิดหยดน้ำขึ้นบริเวณผิวของห้องสุญญากาศ ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน รวมถึงบริเวณขั้วไฟฟ้าที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดความร้อนที่อยู่ภายในห้องสุญญากาศ สำหรับขั้วไฟฟ้าจึงเป็นข้อควรระวังในขณะใช้งานเตาเผาสุญญากาศอุณหภูมิสูงนี้



รูปที่ ค1 แสดงหยดน้ำที่เกาะอยู่บริเวณผิวของห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้