

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การทำความเป็นแบบสุญญากาศ  
VACUUM REFRIGERATION**



**นาย อำนาจ ทักอินทร์  
นาย อศิคร บ่อผอ  
นาย อนุวัฒน์ มawangค์**

ร.พ.  
๘ ๖๘๖ ก  
๒๕๕๐

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 81777  
วัน,เดือน,ปี 24 ส.ย. 2551

.b..... 119 37385  
.i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การทำความเย็นแบบสุญญากาศ

## VACUUM REFRIGERATION



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทำความเย็นแบบสูญญากาศ

VACUUM REFRIGERATION

ผู้จัดทำ

1. นาย อำนาจ พิภอินทร์ รหัสประจำตัว 48015410
2. นาย อศิสร บ่อผล รหัสประจำตัว 48015449
3. นาย อนุวัฒน์ มวงศรี รหัสประจำตัว 48015450



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ธวัชชัย นาคพิพัฒน์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทำความเย็นแบบสูญญากาศ

นาย อำนาจ ฝึกอินทร์ รหัสประจำตัว 48015410

นาย อติสร บ่อผล รหัสประจำตัว 48015449

นาย อนุวัฒน์ มาวงค์ รหัสประจำตัว 48015450

ศศ. ธวัชชัย นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นแบบสูญญากาศ คือ เป็นกระบวนการลดความดันภายในระบบ โดยการดึงเอาไอสารทำความเย็นภายในระบบการทำความเย็นในห้องระเหย ( Flash Take ) ในกระบวนการทำความเย็นจะเริ่มต้นด้วยการทำให้สารตัวกลางในการทำความเย็นคือ น้ำ ฉีดพ่นโดยผ่าน Ejector ในสภาวะสูญญากาศซึ่งทำให้สารทำความเย็นระเหยกลายเป็นไอ และเนื่องจากสารตัวกลางในการทำความเย็นเมื่อฉีดพ่นเข้าไปในระบบแล้ว ก็จะทำให้สารตัวกลางเกิดฝอยละอองขนาดเล็กที่เล็กลง ก็จะทำให้อุณหภูมิภายในระบบต่ำลงเนื่องจากการดึงคู่ความร้อนแฝงออกไป ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีอุณหภูมิภายในลดลง ซึ่งโครงการนี้จะเป็นการศึกษาปัจจัยการทำงานของสารทำความเย็นแบบสูญญากาศ และสมรรถนะของการทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในระบบและประสิทธิภาพของการทำความเย็นที่ใช้น้ำและแอลกอฮอล์เป็นสารตัวกลางในการทำความเย็น ผลการทดลองได้อัตราการทำความเย็นและ C.O.P. ที่ดีพอสมควร

## VACUUM REFRIGERATION

Amnad Fugin

Adisorn Bophol

Anuwat Mawong

Assist. Prof. Tawatchai Nakpipat Advisor

### Abstract

The vacuum refrigeration system is the process of pressure reduction by pulling out vapor of working fluid from the flash tank by pump. The process of low temperature refrigeration begin by the evaporation of refrigeration at low pressure, it make some of the refrigeration vaporized and reduced temperature of the fluid in the flash tank due to pulling out of the latent heat. At the lower part of flash tank, liquid substance which has low temperature working fluid is use to produce cool air at evaporator. Due to the total heat of refrigerants was reduced and become to low temperature, it was circulated to heat exchanger and return back to flash tank again. This project was to study of the facture of vacuum refrigeration and its performance which was changed by pressure in flash tank and it's were compared between water and alcohol mixture. The satisfy of cooling capacity and performance are of trained.

### กิตติมากรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ธวัชชัย นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและเอาใจใส่ดูแลเสมอมา ปริญญาโทเล่มนี้จึงสามารถดำเนินการและสำเร็จลงไปได้ด้วยดีและขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ปริญญาโทที่คอยให้ความช่วยเหลือ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดมิได้คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ผู้ซึ่งอบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสในการศึกษา และเป็นกำลังใจให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคจนกระทั่งมีวันนี้เข้าพระเจ้าของพระคุณอันสูงประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



อำนาจ ฝึกอินทร์  
อดิสร บ่อผล  
อนุวัฒน์ มawangค์

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีการดำเนินการ โครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 ความหมายของการทำความเย็น	3
2.2 วิวัฒนาการของการทำความเย็นและปรับอากาศ	3
2.3 การประยุกต์ใช้งานการทำความเย็น	4
2.4 หลักการเบื้องต้นของการทำความเย็น	6
2.5 ขบวนการพื้นฐานของการทำความเย็น	6
2.6 ระบบการทำความเย็น	8
2.7 หน่วยและพื้นฐานทั่วไป	8
2.8 ระบบการทำความเย็นแบบใช้น้ำ	15
2.9 สุญญากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร	18
2.10 หน่วยสุญญากาศ	18
2.11 ระดับของสุญญากาศ	19
2.12 บี้มสุญญากาศ	23
2.13 ข้อจำกัดทางวิศวกรรม	24
2.14 ชนิดของ บี้มสุญญากาศที่เลือกใช้	28

## สารบัญ (ต่อ)

2.15	การเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศ	39
2.16	ท่อหรือสายสุญญากาศ	44
2.17	ความดันลดลงในท่อเนื่องจากความเสียดทาน	44
2.18	เสคสุญญเสียบในระบบท่อ	47
2.19	รายละเอียดของโครงสร้างของ P-h ไคอะแกรม	48
2.20	หลักการทํางานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	51
บทที่ 3	อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	55
3.1	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	55
3.2	วิธีการทดลอง	61
บทที่ 4	ผลการทดลอง	62
4.1	ผลการทดลองน้ำ R-718( Water )	62
4.2	ผลการทดลองของแอลกอฮอล์	67
บทที่ 5	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	73
5.1	วิเคราะห์ผลการทดลอง	73
5.2	สรุปผลการทดลอง	75
5.3	ข้อเสนอแนะ	77
	บรรณานุกรม	
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก.	
	ภาคผนวก ข.	
	ภาคผนวก ค.	

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (R-718)	16
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบกับหน่วยอื่น ๆ	19
ตารางที่ 2.3	แสดงค่าสูญญากาศของปั๊มต่าง ๆ	40
ตารางที่ 2.4	แสดงค่าความเร็วของน้ำในท่อ เป็นฟุต/วินาที	44
ตารางที่ 2.5	แสดงค่าความเร็วสูงสุดของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในท่อ เป็นฟุต/วินาที (Carrier-Handbook)	45
ตารางที่ 2.6	แสดงค่าความยาวสมมูลของวาล์วแบบต่างๆ เป็นฟุต	46
ตารางที่ 2.7	แสดงค่าความยาวสมมูลของข้อต่อแบบต่างๆ เป็นฟุต	46
ตารางที่ 2.8	แสดงค่าความยาวสมมูลของข้อต่อแบบต่างๆ เป็นฟุต	47
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองปริมาณน้ำในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)	62
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองของระบบโดยใช้น้ำ	62
ตารางที่ 4.3	ผลการคำนวณระบบโดยใช้น้ำ	53
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองปริมาณแอลกอฮอล์ในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)	67
ตารางที่ 4.5	ผลการทดลองของระบบโดยใช้อัลกอฮอล์	67
ตารางที่ 4.6	ผลการคำนวณระบบโดยใช้อัลกอฮอล์	68

## สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	การกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ	10
รูปที่ 2.2	แสดงความหมายของความดัน (ก) $1 \text{ kg/cm}^2$ (ข) $1 \text{ Pa}$ (ค) $1 \text{ Psi}$	12
รูปที่ 2.3	แสดงความหมายของความดันบรรยากาศ	13
รูปที่ 2.4	แสดงการใช้ Barometer วัดความดันบรรยากาศ	13
รูปที่ 2.5	แสดงระดับของความชื้นสัมพัทธ์	14
รูปที่ 2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นแฉะและความชื้นสัมบูรณ์	15
รูปที่ 2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำที่ใช้ อุณหภูมิน้ำเย็นที่ได้ และความชื้นสัมพัทธ์ของไอน้ำ	17
รูปที่ 2-8	แรงดันบรรยากาศคั่นให้ด้วยสุญญากาศแนบกับผนัง	18
รูปที่ 2.9	ช่วงความสามารถในการทำสุญญากาศของปั๊มแต่ละชนิด	20
รูปที่ 2.10	ช่วงเวลาของความเร็วในการปั๊มแต่ละชนิด	21
รูปที่ 2-11	บาโรมิเตอร์ใช้วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์	23
รูปที่ 2-12	ในถังสุญญากาศ ความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง	24
รูปที่ 2-13	กราฟแสดงขีดความสามารถ	26
รูปที่ 2.14	รูปประกอบสมการกำลังขับเคลื่อน	27
รูปที่ 2-15	ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเวน	28
รูปที่ 2-16	แสดงภาพตัดของ Rotating Vane pumps	29
รูปที่ 2.17	แสดงการทำงานของ Rotating Vane pumps	30
รูปที่ 2.18	Typical pumping speed pressure curve of rotating vane pump	32
รูปที่ 2.19	Principle of gas ballast pump and one way gas ballast valve	32
รูปที่ 2.20	Pumping speed curve of one and two stage rotary pump, without and with gas ballast	32
รูปที่ 2.21	Sliding Vane pump, with vanes sliding both in casing and rotor	35
รูปที่ 2.22	Sliding vane pump, with vane sliding in casing	35
รูปที่ 2.23	Mode of action of a sliding vane pump	36
รูปที่ 2.24	Rotating plunger pump	37
รูปที่ 2.25	Root' pump	37
รูปที่ 2-26	การทำงานของ Root's pump	38
รูปที่ 2-27	Typical pumping speed curve of Root's pump	38

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2-28	หลักการการทำงานของปั๊มแบบสกรู	39
รูปที่ 2-29	กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มสุญญากาศชนิดหนึ่ง	41
รูปที่ 2-30	ปั๊มแบบโรตารีเวนท์ที่มีขนาดกะทัดรัดแบบหนึ่ง	43
รูปที่ 2.31	แสดงวิธีการวัดความยาวท่อ	45
รูปที่ 2-32	โครงสร้าง P-h ไคอะแกรม	49
รูปที่ 2-33	โครงสร้าง P-h ไคอะแกรมแสดงความดันคงที่ อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรคงที่	49
รูปที่ 2-34	ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	51
รูปที่ 2.35	ไซโครเมตริกคาทของกระบวนการทำความเย็น	52
รูปที่ 3.1	ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของชุดทดสอบ	55
รูปที่ 3.2	บอร์ดแสดงวงจรการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	55
รูปที่ 3.3	ห้องระเหย	56
รูปที่ 3.4	ปั๊มสุญญากาศ	56
รูปที่ 3.5	ปั๊มสารทำความเย็น	57
รูปที่ 3.6	ถังเติมสารทำความเย็น	57
รูปที่ 3.7	มาตรวัดอัตราการไหล	58
รูปที่ 3.8	เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบคิจิคอล	58
รูปที่ 3.9	เกจวัดความดัน	59
รูปที่ 3.10	เกจวัดความดันสุญญากาศ	59
รูปที่ 3.11	ตัวกรองความชื้น	60
รูปที่ 3.12	แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์	60
รูปที่ 4.1	แสดงผลจากปริมาณน้ำต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ ( ไม่ผ่านระบบ )	64
รูปที่ 4.2	แสดงผลจากปริมาณน้ำต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ	64
รูปที่ 4.3	แสดงผลของ R.E. และ Win ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน	65
รูปที่ 4.4	แสดงค่า C.O.P. ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน	65
รูปที่ 4.5	แสดงค่า EER. ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน	66
รูปที่ 4.6	แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ ( ไม่ผ่านระบบ )	69
รูปที่ 4.7	แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ	69
รูปที่ 4.8	แสดงผลของ R.E. และ Win ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน	70
รูปที่ 4.9	แสดงค่า C.O.P. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน	70
รูปที่ 4.10	แสดงค่า EER. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศนับว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์มาก เช่น ตู้เย็นและตู้แช่ที่ใช้ตามบ้านเรือน เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเก็บรักษาและการถนอมอาหารไม่ให้เน่าเสียเร็ว เครื่องปรับอากาศที่ใช้ในอาคารที่อยู่อาศัย สำนักงาน ศูนย์การค้า โรงพยาบาล ใช้สำหรับปรับอากาศเพื่อความสะดวกสบายของคน นอกจากนี้ เครื่องปรับอากาศในรถยนต์และรถโดยสารปรับอากาศก็จะช่วยให้การเดินทางของคนมีความสบายมากขึ้น เพราะไม่ต้องหงุดหงิด อารมณ์เสียในขณะที่รถติดและอากาศร้อนจัดซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของคนให้สูงขึ้น

เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศยังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท เช่น ในโรงงานทอผ้า การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจะมีผลต่อคุณภาพของเส้นด้ายที่นำมาทอผ้า ในโรงงานผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากจะต้องการการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้ได้อย่างดีแล้ว การควบคุมความสะอาดของอากาศยังเป็นสิ่งสำคัญมาก ดังนั้นความต้องการทางด้านเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ จึงนับวันจะทวีมากขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อสร้างเป็นชุดทดลองระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบ

สุญญากาศโดยใช้สารทำความเย็นแต่ละชนิด

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้เป็นโครงการเกี่ยวกับการศึกษาระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ซึ่งโครงการนี้จะดำเนินการติดตั้งระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศขึ้นแล้วนำมาทดลองหาค่าต่างๆ เพื่อที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพของการทำความเย็น

ระบบทำความเย็นที่ติดตั้งนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ อันได้แก่ ห้องระเหย ที่ควบแน่น ป้อนสารทำความเย็น ป้อนสุญญากาศ เครื่องทำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงานโครงการนี้เป็นเพียงโครงการเริ่มต้น ที่จะทำการศึกษาหลักการทำงาน และทฤษฎีที่ว่า สารทำความเย็นสามารถระเหยได้ดีในความดันสุญญากาศ ว่าเป็นไปตามหลักทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์หรือไม่ ถ้าระบบ การทำความเย็นแบบสุญญากาศเป็นผลที่น่าพอใจแล้ว ก็จะมีการพัฒนาต่อไป เพื่อที่สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม

#### 1.4 วิธีการดำเนินการโครงการ

วิธีและขั้นตอนในการดำเนินงานโครงการนี้สามารถแบ่งออกได้หลักๆ เป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนแรกนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการทำงานเย็น ทฤษฎีสุญญากาศ ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้ ตลอดจนศึกษาการทำงานของระบบการทำงานเย็นแบบสุญญากาศว่าทำงานอย่างไร การคำนวณค่าต่างๆ ของระบบ ศึกษาโครงสร้างของ p - h โคออร์เดตของระบบการทำงานเย็นนี้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะอยู่ในบทที่ 2

หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีต่างๆ แล้วก็เริ่มทำการหาอุปกรณ์ที่ต้องใช้ติดตั้งชุดทดลอง เมื่อติดตั้งชุดทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ต้องมีการทดสอบระบบต่างๆ ว่าระบบเกิดรั่ว ก็ทำการติดตั้งส่วนนั้นใหม่หลังจากแก้ไขให้เรียบร้อยแล้วก็ทำการเดินระบบเพื่อทำการทดลอง รายละเอียดทั้งหมดนี้และวิธีการทดลองซึ่งจะอยู่ในบทที่ 3

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วก็นำผลที่ได้มาคำนวณ โดยส่วนนี้จะอยู่ในบทที่ 4 และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาสร้างเป็นกราฟ เพื่อที่จะศึกษา และเปรียบเทียบแต่ละสารทำความเย็น และแนวโน้มของระบบ

ในส่วนท้ายสุดจะเป็นเกี่ยวกับเรื่องการนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้ ข้อเสนอแนะในการดำเนินโครงการ รวมทั้งข้อปรับปรุงแก้ไข เพิ่มเติม อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้เพื่อให้ผลการทดลองของโครงการมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

#### 2.1 ความหมายของการทำความเย็น

**การทำความเย็น** คือการลดและรักษาระดับอุณหภูมิของเนื้อที่ว่างหรือเทหวัตถุต่างๆ ให้ต่ำกว่าปกติเช่น การทำความเย็นในตู้เย็น ตู้แช่ ห้องเย็น โรงน้ำแข็ง เป็นต้น ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับความหมายของคำว่า**การปรับอากาศ ( air conditioning )** จะมีความหมายถึงการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้เหมาะสมตามที่เรต้องการ รวมถึงการปรับสภาพอากาศให้มีความสะอาด มีการถ่ายเทหมุนเวียน และมีความชื้นที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสบาย เช่นที่ใช้ในระบบของเครื่องปรับอากาศในบ้าน สำนักงาน ที่ทำการ หรือโรงแรมรสบทต่างๆ รวมทั้งระบบปรับอากาศที่ใช้ช่วยในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ในโรงงานทอผ้า โรงงานยาสูบ โรงงานผลิตสบู่ โรงงานผลิตยารักษาโรค เป็นต้น

การเกิดความร้อนในเครื่องทำความเย็น รวมทั้งเครื่องปรับอากาศที่มีใช้กันอยู่ในทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นตู้เย็น ตู้แช่ เครื่องปรับอากาศรถยนต์ เครื่องปรับอากาศในบ้านหรือในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปก็ตาม มีหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดความร้อนเหมือนกันหมดคือ การทำให้สารซึ่งเป็นตัวกลางในการทำความเย็น (refrigeration) เปลี่ยนสถานะ เพราะขณะเปลี่ยนสถานะ สารทุกชนิดต้องการความร้อนแฝงเข้ามาช่วยเสมอ ดังนั้นถ้าเราทำให้สารนี้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จะเกิดการดูดความร้อนจากบริเวณที่ใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิลดลง จึงเกิดความร้อนขึ้น

#### 2.2 วิวัฒนาการของการทำความเย็นและปรับอากาศ

ในสมัยโบราณมนุษย์รู้จักการเก็บรักษาและถนอมอาหารไม่ให้เน่าเสียเร็วโดยการนำอาหารไปแช่น้ำแข็งหรือหมกหิมะไว้ตามธรรมชาติ วิธีนี้ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศแถบที่มีอากาศหนาวเย็น จนกระทั่งเมื่อประมาณ พ.ศ. 2343 ได้มีการตัดน้ำแข็งที่เกิดตามธรรมชาติในฤดูหนาวในแม่น้ำลำคลองไปเก็บไว้ในห้องที่มีฉนวนกันความร้อน โดยรอบเพื่อเอาไว้ใช้ในฤดูร้อน และมีการขนส่งน้ำแข็งก้อนโตๆ ที่ได้จากธรรมชาตินี้จากแถบที่มีอากาศหนาวไปใช้ในแถบที่มีอากาศร้อน เมื่อประมาณ 70 ปีที่ผ่านมา ชาวต่างประเทศที่มาอยู่ในประเทศไทยและประเทศในเอเชียยังต้องสั่งน้ำแข็งก้อนมาทางเรือจากประเทศอังกฤษหรือยุโรปเพื่อนำมาแช่เบียร์ดื่ม เพราะสมัยนั้นประเทศในเอเชียยังไม่รู้จักตู้เย็นหรือเครื่องทำความเย็น

น้ำแข็งได้ผลิตขึ้นสำเร็จเป็นครั้งแรกในการทดลองเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2363 แต่เป็นเพียงการทดลองเท่านั้น จนกระทั่งปี พ.ศ. 2377 จาacob เพอร์กินส์ (Jacob Perkins) วิศวกรชาวอเมริกันจึงได้ประดิษฐ์เครื่องความเย็นระบบคอมเพรสเซอร์อัดไอ (compression system) ขึ้นเป็นเครื่องแรกในโลกและต่อมาในปี พ.ศ. 2398 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ประดิษฐ์เครื่องทำความเย็นระบบแอบซอร์ปชัน (absorption system) ขึ้นโดยอาศัยหลักทฤษฎีของไมเคิล ฟาราเดย์ (Michale Faraday) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันได้ค้นพบไว้เมื่อปี พ.ศ. 2367

ตู้เย็นที่ใช้ในบ้านถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2453 ทั้งที่สามารถผลิตน้ำแข็งได้ตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2363 ในปี พ.ศ. 2456 เจ.เอ็ม.ลาร์เซน (J.M. Lasen) ได้ผลิตเครื่องทำความเย็นควบคุมด้วยมือขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2461 บริษัทเคลวินเตอร์ (Kelvinator Company) ได้ผลิตตู้เย็นซึ่งควบคุมได้โดยอัตโนมัติขึ้นเป็นครั้งแรก และผลิตออกจำหน่ายในสหรัฐอเมริกา ในปีนั้นสามารถจำหน่ายได้ประมาณ 67 ตู้ แต่ในระยะต่อมาขอการผลิตลดต่ำลงและในปี พ.ศ. 2463 มีการจำหน่ายไปแล้วเพียง 200 ตู้เท่านั้น

ราวต้นปี พ.ศ. 2463 อุตสาหกรรมการผลิตตู้เย็นที่ใช้ในบ้านเริ่มมีความสำคัญขึ้นและเป็นที่ยอมรับหลายในอเมริกาและยุโรป ต่อมาในปี พ.ศ. 2469 บริษัทเจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric) ได้เริ่มผลิตตู้เย็นออกจำหน่าย หลังจากทำการค้นคว้าทดลองมากกว่าสิบปี จึงได้ผลิตตู้เย็นที่ใช้มอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบเซอร์เมติกขึ้นเป็นครั้งแรก และในปี พ.ศ. 2470 บริษัทอิเล็กโทรลักซ์ (Electrolux) ได้ผลิตตู้เย็นแบบแอบซอร์ปชันควบคุมโดยอัตโนมัติขึ้นจำหน่ายในสหรัฐอเมริกา

ในอุตสาหกรรมการเก็บรักษาและถนอมอาหารสมัยใหม่ ได้ใช้วิธีการแช่ฟริชอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเครื่องทำความเย็นในระบบฟริชอย่างรวดเร็ว จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2466 สำหรับเครื่องปรับอากาศเครื่องแรกผลิตออกสู่ท้องตลาดในปี พ.ศ. 2470 และเครื่องปรับอากาศรถยนต์ถูกผลิตขึ้นในปี พ.ศ. 2483 แต่ในระยะนั้นยังไม่มี การเก็บสถิติที่แน่นอนของจำนวนรถยนต์ที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบนี้ แต่ก่อนที่สงครามโลกครั้งที่ 2 จะยุติประมาณได้ว่ารถยนต์ที่ติดตั้งเครื่องทำความเย็นเพื่อปรับอากาศอยู่ประมาณ 3,000 – 4,000 คัน

### 2.3 การประยุกต์ใช้งานการทำความเย็น

ในปัจจุบันเราอาศัยระบบทำความเย็นมาใช้งานในด้านต่างๆ มากมายได้แก่

1. การผลิตอาหาร ( food processing ) เช่น การผลิตนม ไอศกรีม ซึ่งต้องอาศัยการทำ ความเย็นในการทำพาสเจอร์ไรส์ ( pasteurization ) โดยการให้ความร้อนที่นมที่อุณหภูมิ ประมาณ 70-80 °c หลังจากนั้นนำมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2-3 °c เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รักษาคุณภาพของนมก่อนส่งไปจำหน่าย การผลิตไอศกรีม ก็จะต้องผ่านการพาสเจอร์ไรส์ และนำไปผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ  $-20$  ถึง  $-28^{\circ}\text{C}$  การผลิตไวน์และเบียร์ ในกระบวนการหมัก (fermentation) กระบวนการบ่ม (mellowing) จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิประมาณ  $5-15^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น

2. การเก็บรักษาอาหาร (food storage) ในการเก็บรักษาหรือถนอมอาหาร เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ให้มีอายุในการเก็บรักษาให้นานขึ้น เพื่อการบริโภคหรือเพื่อการจำหน่ายสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้ต่ำลง ซึ่งเป็นการลดอัตราการแพร่ขยายของแบคทีเรียต่างๆ ซึ่งสาเหตุให้อาหารเน่า เช่น อาจเก็บผักผลไม้ หรือเนื้อสัตว์ไว้ในสภาพอาหารสด (fresh food) จะต้องเก็บเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ต้องสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (freezing point) ซึ่งจะมีช่วงเวลาในการเก็บรักษาสั้นกว่าการเก็บในสภาพอาหารแช่แข็ง (frozen food) ซึ่งจะต้องนำผัก ผลไม้ หรือเนื้อสัตว์มาทำการแช่แข็งและเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

3. การผลิตในงานอุตสาหกรรม (industrial process) งานอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องอาศัยการทำความเย็นช่วยในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน โรงแยกแก๊ส โรงงานผลิตสบู่

4. การทำความเย็นเพื่อการขนส่ง (transportation refrigeration) เช่น ห้องเย็นที่ใช้ในเรือประมง ห้องเย็นที่ใช้ในเรือเดินทะเล ซึ่งในการขนส่งอาหารแช่แข็งไปจำหน่ายยังต่างประเทศ หรือรถห้องเย็นที่ใช้ขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งระหว่างโรงงานผลิตไปยังจังหวัดที่อยู่ห่างไกล ซึ่งทั้งหมดจะทำงานโดยอาศัยหลักการของระบบทำความเย็น

5. การปรับอากาศ (air conditioning) เป็นสาขางานหนึ่งซึ่งอาศัยการทำความเย็นมาประยุกต์ใช้มากที่สุด โดยจะทำงานร่วมกับระบบควบคุมความชื้น การกรองอากาศ ทำให้อากาศหมุนเวียน การระบายอากาศ เพื่อความสบายของคน เช่นที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศทั่วไป หรืองานปรับอากาศที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานทอผ้า โรงพิมพ์ โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานผลิตยา เป็นต้น

โครงการนี้ได้นำเทคนิคของการทำความเย็นอีกวิธีหนึ่งมาทำการดำเนินการในโครงการ ซึ่งก็คือการทำสุญญากาศ ซึ่งจะใช้ความรู้เบื้องต้นทางด้าน การทำความเย็นและวิธีต่างๆ ทางวิศวกรรมเป็นแนวทางที่ใช้ในโครงการนี้ เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของการทำความเย็น กำลังที่ใช้ของระบบการทำความเย็น แต่เนื่องจากการทำวิจัยครั้งนี้ ยังขาดแคลนในเรื่องของทุนทรัพย์ที่จะนำมาใช้จ่ายในระหว่างการทำโครงการนี้ จึงอาจเป็นผลทำให้การดำเนินงานในโครงการนี้ออกมาไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงหลักการทำงานแบบสุญญากาศที่มีผลต่อความดันและอุณหภูมิ ซึ่งความเป็นไปได้ อาจจะต้องมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 2.4 หลักการเบื้องต้นของการทำความเย็น

ระบบการทำความเย็น คือ การรักษาอุณหภูมิของสิ่งที่ต้องการทำความเย็นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบ ระบบการทำความเย็นที่ใช้ในงานจริงทุกระบบ จะทำการรักษาอุณหภูมิต่ำโดยการนำเอาความร้อนออกจากสิ่งที่ต้องการทำความเย็นขณะที่อุณหภูมิต่ำและนำความร้อนออกทิ้งขณะที่อุณหภูมิสูง โดยอาศัยสารตัวกลาง ( สารทำความเย็น ) เป็นตัวนำความร้อน

ดังนั้น จุดมุ่งหมายของขบวนการทำความเย็น คือ การทำให้สารทำความเย็นรับความร้อนเข้าสู่ตัวเองขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ และถ่ายเทความร้อนออกจากตัวขณะที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิของสิ่งที่ต้องการทำให้เย็นต่ำไว้

## 2.5 ขบวนการพื้นฐานของการทำความเย็น

### 2.5.1 การเพิ่มอุณหภูมิของสารตัวกลาง

ขบวนการดังกล่าว ทำได้โดยการผ่านน้ำยาที่มีอุณหภูมิต่ำมาสัมผัสกับสิ่งของ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นเช่น การนำอากาศเย็นเข้ามาภายในบ้าน เพื่อรับความร้อนจากผู้อยู่อาศัยและวัตถุต่างๆที่อยู่ภายในห้องออกไป

### 2.5.2 การทำให้สารตัวกลางเปลี่ยนสถานะ

ขณะที่สารตัวกลางเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหรือจากของเหลวเป็นไอ จะดูดความร้อนเข้าสู่ตัวเองปริมาณหนึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ “ ความร้อนแฝง ” ของสารทำความเย็นชนิดนั้นๆ ดังนั้นอาศัยหลักการของการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นนี้มาใช้ในระบบทำความเย็นได้

### 2.5.3 การทำให้ของเหลวขยายตัว

คุณสมบัติของของเหลวข้อหนึ่ง คือ ถ้าของเหลวมีการขยายตัวจะทำให้อุณหภูมิลดลง แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้ว ปริมาตรของของเหลวจะเพิ่มขึ้นได้โดยยาก ทั้งนี้เพราะของเหลวเป็นของไหลที่ไม่ยุบตัวตามความดันดังนั้นถึงแม้จะทำให้ความดันของของเหลวลดลงแล้วก็ตาม ปริมาตรของของเหลวจะเพิ่มขึ้นไม่มาก ซึ่งมีผลตามมาก็คือ อุณหภูมิของของเหลวจะลดลงไม่มากนัก แต่ถ้าให้ของเหลวมีการขยายตัว ขณะเดียวกันยอมให้ของเหลวที่กลายเป็นไอไปด้วยจะทำให้อุณหภูมิต่ำของเหลวที่ลดลงอย่างมากมาย ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการทำความเย็นด้วยการอัดไอ

#### 2.5.4 การทำให้แก๊สขยายตัว

ขณะที่ไอศกี๋มีการขยายตัว จะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น ในกระบวนการที่มีการไหลสม่ำเสมอ ถ้าสมมุติว่าขณะที่ไอศกี๋กำลังขยายตัวทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นและไม่มีการเกิดขึ้นหรือไม่ใช้งาน การเกิดขึ้นในระดับที่สูงเท่ากัน และการขยายตัวของไอศกี๋เกิดขึ้นแบบไอเซ็นทรอปิก ซึ่งสรุปได้ว่า ถ้าไอศกี๋มีการขยายตัวตามกระบวนการที่มีการไหลสม่ำเสมอจะทำให้อุณหภูมิก๊าซลดลง ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้ใช้เป็นพื้นฐานของการทำความเย็นด้วยอากาศหมุน ระบบการทำความเย็นแบบวัฏจักรอากาศ ซึ่งใช้มากในระบบทำความเย็นของเครื่องบินและระบบการทำความเย็นด้วยไอน้ำ

#### 2.5.5 ขบวนการทางแม่เหล็ก

สสารสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดตามคุณลักษณะการเป็นแม่เหล็ก คือสสารที่ไม่ถูกดูดโดยแม่เหล็กเรียกว่า นอนแม็กเนติก และสสารที่ถูกดูดโดยแม่เหล็กเรียกว่า พาราแม็กเนติก เกลือพาราแม็กเนติกเช่นกาโคลิเนียมซัลเฟต มีคุณสมบัติที่ใช้ทำอุณหภูมิต่ำ

กล่าวคือ เมื่อเกลือดังกล่าวถูกหล่อเย็นให้มีอุณหภูมิต่ำมาจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะเกือบไม่เกิดขึ้นเลย เมื่อนำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำนี้เข้าไปในสนามแม่เหล็กโมเลกุลจะเกิดการเรียงตัว แต่เมื่อนำเอาสนามแม่เหล็กออก โมเลกุลในเกลือจะกลับตัวเพื่อกลับสู่สภาวะแม่เหล็ก ซึ่งทำให้อุณหภูมิของเกลือลดลงได้อีก การทำความเย็นโดยวิธีการทางแม่เหล็กสามารถทำอุณหภูมิต่ำได้ถึง 0.001 องศาฟาเรนไฮด์ (-273.990 องศาเซลเซียส)

#### 2.5.6 ขบวนการทางไฟฟ้า

หลักการของเทอร์โมคัปเปิล ถ้าเชื่อมต่อขั้วทั้งสองของโลหะสองชนิดที่ต่างกันเข้าด้วยกันและทำให้ขั้วต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะทั้งสองนี้ได้ หลักการดังกล่าวนี้เรียกว่า “Peltier effect”

เมื่อนำหลักการดังกล่าวนี้ มาใช้งานในทางที่กลับกันทางทฤษฎีเดิม กล่าวคือ ถ้ามีการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรของโลหะทั้งสองนี้ จะทำให้ขั้วต่อโลหะข้างหนึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น และข้างหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำลง วิธีการดังกล่าวนี้เป็นหลักการของการทำความเย็นแบบเทอร์โมสแตติกส์

## 2.6 ระบบการทำความเย็น

มนุษย์รู้จักการทำความเย็นในระบบต่างๆ มาเป็นเวลายาวนาน บางระบบที่ใช้งานแล้ว ให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงก็จะถูกพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นเรื่อยๆ บางระบบถ้าใช้งานแล้วมีประสิทธิภาพในการให้ความเย็นต่ำก็จะถูกเลิกใช้ไป สำหรับในตอนนี้จะได้กล่าวถึงหลักการทำความเย็นในระบบต่างๆ ซึ่งอาจแบ่งได้หลายทางทั้งชนิดที่เป็นทางกลและไม่ใช้ทางกล ดังนี้

- 2.6.1 ระบบการทำความเย็นโดยใช้น้ำแข็ง
- 2.6.2 ระบบการทำความเย็นโดยใช้การระเหยตัวของน้ำ
- 2.6.3 ระบบการทำความเย็นโดยใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับ
- 2.6.4 ระบบการทำความเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้ง
- 2.6.5 ระบบการทำความเย็นโดยปล่อยน้ำยาให้ระเหยตัว
- 2.6.6 ระบบการทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.6.7 ระบบการทำความเย็นในระบบท่อลมวน
- 2.6.8 ระบบการทำความเย็นแบบสตีมเจ็ต
- 2.6.9 ระบบการทำความเย็นแบบแอบซอร์ปชัน
- 2.6.10 ระบบการทำความเย็นแบบคอมเพรสเซอร์อัดไอ

## 2.7 หน่วยและพื้นฐานทั่วไป

### 2.7.1 ขนาดของเครื่องทำความเย็น ต้นประสิทธิภาพสมรรถนะ และประสิทธิภาพการให้ความเย็น

ขนาดของเครื่องทำความเย็น จะบอกเป็น Btu/h ( หน่วยอังกฤษ ) , kcal/h ( หน่วยเมตริก ) ,

Kw ( หน่วย SI ) หรือบอกขนาดเป็นตัน โดย 1 ตันความเย็นมีค่า Btu/h ซึ่งมีที่มาจากคำจำกัดความคือ 1 TR ( ton of refrigeration ) = heat required to melt 1 U.S. ton of ice ( 2000 lb ) at 0°c per 24 h ซึ่งมีความหมายคือ 1 ตันความเย็น เป็นความเย็นที่ได้จากการเสียความร้อนไปใช้ในการหลอมละลายน้ำแข็งหนัก 1 ตัน ที่อุณหภูมิ 0°c หมดในเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงค่าโดยการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความร้อนแฝงของการหลอมละลายของน้ำแข็ง} &= 144 \quad \text{Btu/lb} \\
 \text{ฉะนั้น การละลายน้ำแข็งหมด 1 ตัน จะต้องใช้ความร้อน} &= \frac{2000 \times 144}{24} \quad \text{Btu/h} \\
 &= 12,000 \quad \text{Btu/h}
 \end{aligned}$$

หรือสรุปได้ว่า จะให้น้ำแข็งละลายหมดก่อน บริเวณรอบๆ จะต้องส่งความร้อนให้กับน้ำแข็งคิดเป็นปริมาณความร้อน 12,000 Btu/h หรือก็คือบริเวณนั้นจะเกิดความเย็นขึ้นคิดเป็นค่า 12,000 Btu/h และเราเรียกขนาดความเย็นที่เกิดขึ้นนี้ว่าความเย็นขนาด 1 ตัน

**สัมประสิทธิ์สมรรถนะ COP ( coefficient of performance )** คือค่าที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของการทำความเย็น โดยเป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างผลของความเย็นที่ได้ต่องานที่ให้ระบบ หรือ

$$cop = \frac{Q_c}{W_{net, in}}$$

**ตัวอย่างที่ 2.1** เครื่องทำความเย็นขนาด 39,000 บีทียู/ชั่วโมง ทำงานโดยใช้กำลังขับที่คอมเพรสเซอร์ 4,380

วัตต์ ( 1 วัตต์ = 3.413 บีทียู/ชั่วโมง )

$$\text{จาก } cop = \frac{Q_c}{W_{net, in}}$$

$$\text{จะได้ COP} = 2.6$$

**ประสิทธิภาพการให้ความเย็น - EER ( energy efficiency ratio )** เป็นค่าแสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทำความเย็น ซึ่งใช้อ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ ปัจจุบันในประเทศไทยโดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ( ศท. ) ซึ่งมีฐานะเป็นกองสังกัดสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ( สมอ. ) กระทรวงอุตสาหกรรม มีการทดสอบเพื่อรับรองมาตรฐานของเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศจากค่า EER ซึ่งมีหน่วยเป็นบีทียู/ชั่วโมง.วัตต์ ในระบบอังกฤษ หรือเป็นวัตต์/วัตต์ ( ไม่มีหน่วย ) ในระบบ SI โดยสัดส่วนดังกล่าวยังมีค่าสูงจะยิ่งแสดงถึงการประหยัดพลังงาน โดยมีการกำหนดระดับประสิทธิภาพออกเป็น 5 ระดับ ตัวอย่างที่ใช้กำหนดระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศจะกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ดังนี้

ระดับ (เบอร์)	ระดับประสิทธิภาพ	ค่า EER ( บีทียู/ชั่วโมง.วัตต์ )	ค่ากิโลวัตต์/ตัน
1	ต่ำ	$\geq 6.6$	$\leq 1.82$
2	พอใช้	$\geq 7.6$	$\leq 1.58$
3	ปานกลาง	$\geq 8.6$	$\leq 1.40$
4	ดี	$\geq 9.6$	$\leq 1.25$
5	ดีมาก	$\geq 11$	$\leq 1.13$

### รูปที่ 2.1 การกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ

ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำของเครื่องปรับอากาศสำหรับประเทศไทย กำหนดค่า EER ตั้งแต่ 8.6 (ระดับ 3) ขึ้นไป

$$\text{การหาค่า } EER = 3.1412 COP_R$$

ตัวอย่างที่ 2.2 ทดลองหาค่า EER ของเครื่องปรับอากาศขนาด 39,000 บีทียู/ชั่วโมง ซึ่งทำงานโดยใช้กำลังขาขนาด 4,380 วัตต์

$$\text{จาก } EER = 3.1412 COP_R$$

จะได้ EER = 8.9 บีทียู/ชั่วโมง.วัตต์ ระดับประสิทธิภาพปานกลาง (ระดับ 3)

2.7.2 ความหมายและข้อแตกต่างระหว่างปริมาตร ปริมาตรจำเพาะ ความหนาแน่น น้ำหนักจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ปริมาตร ( volume - v ) คือขนาดเนื้อที่ที่สารนั้นบรรจุอยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลว ปริมาตรของสารจะคงที่เสมอ แต่ก๊าซจะมีปริมาตรเปลี่ยนไปตามภาชนะที่บรรจุอยู่ เช่น น้ำของแข็งหรือของเหลวปริมาตร 1 ลิตร ไปใส่ในภาชนะ 10 ลิตร ก็ยังคงได้ปริมาตร 1 ลิตร แต่ถ้านำก๊าซ 1 ลิตร ไปไว้ภาชนะ 10 ลิตร ก๊าซจะขยายตัวจนมีปริมาตร 10 ลิตรได้

- มีหน่วยเป็น  $m^3$ ,  $ft^3$

ปริมาตรจำเพาะ ( specific volume - v ) คือปริมาตรของสารต่อหน่วยมวล

$$\text{- หาได้จากสมการ } v = \frac{v}{m} = \frac{1}{\rho}$$

- มีหน่วยเป็น  $\frac{m^3}{kg}$ ,  $\frac{ft^3}{lb_m}$

- ความหนาแน่นของก๊าซจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของของแข็งและของเหลวมาก เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซจะอยู่ห่างกัน

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Air}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

**น้ำหนักจำเพาะ ( specific weight )** คือน้ำหนักของสารต่อหน่วยปริมาตร

- หาได้จากสมการ  $\gamma = \frac{w}{v} = \frac{mg}{v} = \rho g$

- มีหน่วยเป็น  $\frac{N}{m^3}, \frac{kg_f}{m^3}, \frac{lb_f}{ft^3}$

**ความถ่วงจำเพาะ ( specific gravity - s )** คือความหนาแน่นของสารกับความหนาแน่นของน้ำที่ 4 °C

- หาได้จากสมการ  $S = \rho_{\text{substance}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{substance}} / M_{\text{H}_2\text{O}}$  ซึ่งมีปริมาตรเท่ากัน

- ถ้าสารใดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 สารนั้นจะลอยน้ำ ถ้ามากกว่า 1 สารนั้นจะจม

น้ำ

- ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย

- ความถ่วงจำเพาะของน้ำ = 1

### 2.7.3 ความหมายและข้อแตกต่างระหว่างความดันเกจและความดันสัมบูรณ์

**ความดัน ( pressure - P )** คือค่าแรงที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่

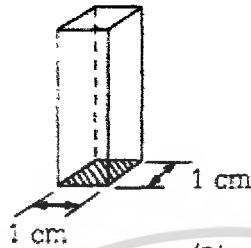
- หาได้จากสมการ  $P = \frac{F}{A}$

- มีหน่วยเป็น  $\frac{N}{m^2}, \frac{kg_f}{m^2}, \frac{lb_f}{in^2}$

- ความดัน  $1 \frac{N}{m^2} = 1 \text{ pa} [1 \text{ pa} = 1 \text{ Pascal}]$

$$\left[ 1 \text{ bar} = 10^5 \frac{N}{m^2} = 10^5 \text{ pa} \right]$$

force (weight) = 1 kg<sub>f</sub>



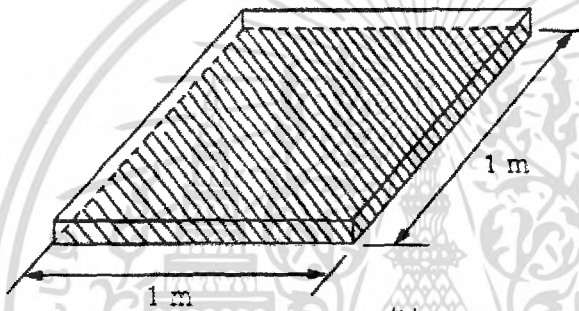
(ก)

bottom surface area :

$$1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} = 1 \text{ cm}^2$$

$$\frac{1 \text{ kg}_f}{1 \text{ cm}^2} = 1 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$$

force (weight) : 1 N



(ข)

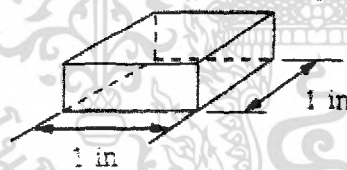
bottom surface area :

$$1 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$$

pressure :

$$\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$$

force (weight) = 1 lb<sub>f</sub>



(ค)

bottom surface area :

$$1 \text{ in} \times 1 \text{ in} = 1 \text{ in}^2$$

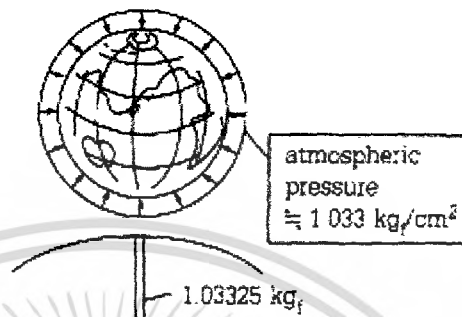
pressure :

$$\frac{1 \text{ lb}_f}{1 \text{ in}^2} = 1 \text{ lb}_f/\text{in}^2 = 1 \text{ psi}$$

รูปที่ 2.2 แสดงความหมายของความดัน (ก) 1 kg/cm<sup>2</sup> (ข) 1 Pa (ค) 1 Psi

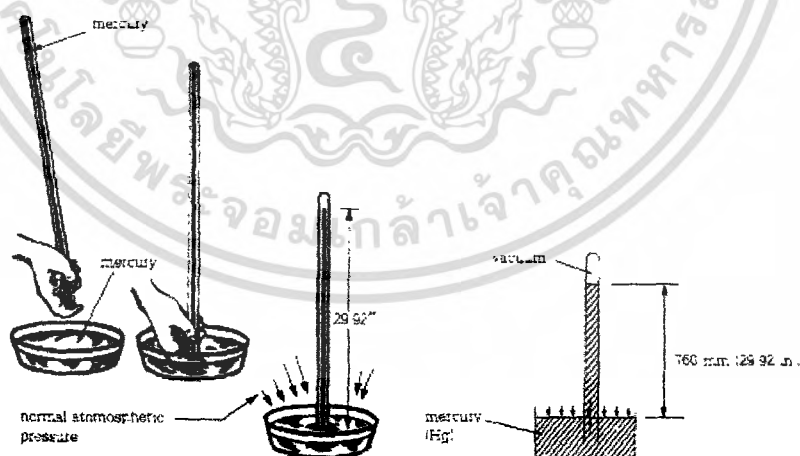
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันบรรยากาศ ( atmospheric pressure –  $p_{atm}$  ) คือความดันที่เกิดจากน้ำหนักของอากาศในบรรยากาศกระทำต่อพื้นผิวโลก



รูปที่ 2.3 แสดงความหมายของความดันบรรยากาศ

- เครื่องมือใช้วัดความดันบรรยากาศคือ “ barometer ” ซึ่งวัดความดันบรรยากาศโดยเทียบกับความสูงของปรอท



รูปที่ 2.4 แสดงการใช้ Barometer วัดความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

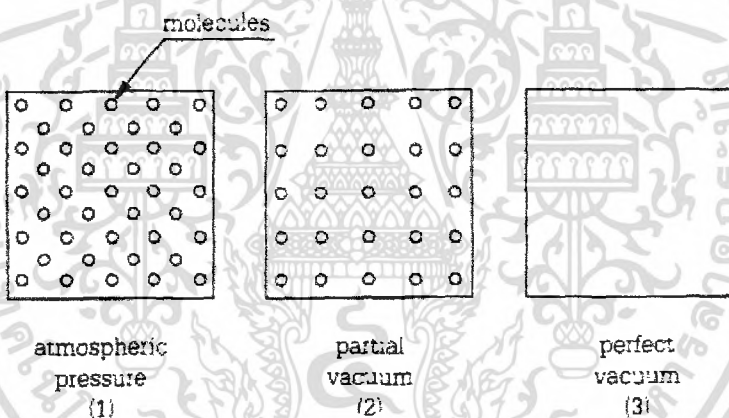
- ค่าความดันบรรยากาศ = 1 atm = 760 mm.Hg = 29.92 in.Hg = 14.7 psia  
 = 0 psig = 1.033 kg/cm<sup>3</sup> = 1.013 bar = 101.3 kPa

สุญญากาศ ( vacuum ) คือความดันที่มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. สุญญากาศบางส่วน ( partial vacuum ) คือความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แต่ยังไม่เป็นสุญญากาศสมบูรณ์ ยังสามารถทำการลดความดันลงได้อีก

2. สุญญากาศสมบูรณ์ ( perfect vacuum ) คือความดันซึ่งไม่สามารถลดค่าลงได้อีกไม่ว่าใช้วิธีการใดๆ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า absolute vacuum

ค่าสุญญากาศสมบูรณ์ = 0 mm.Hg = 0 in.Hg = 0 psi  
 = 0 kg/cm<sup>2</sup> = 0 pa



รูปที่ 2.5 แสดงระดับของความดันสุญญากาศ

ความดันเกจ ( gauge pressure -  $p_g$  ) คือความดันที่แสดงโดยเกจวัดความดัน ซึ่งถูกปรับแต่งให้อ่านค่าเป็นศูนย์ที่ความดันบรรยากาศ โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น  $kPa = \frac{kg_f}{cm^2}$ ,  $psig$

ความดันสัมบูรณ์ ( absolute pressure -  $p_{abs}$  ) คือความดันที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด

ซึ่งมีค่า = ความดันบรรยากาศ + ความดันเกจ

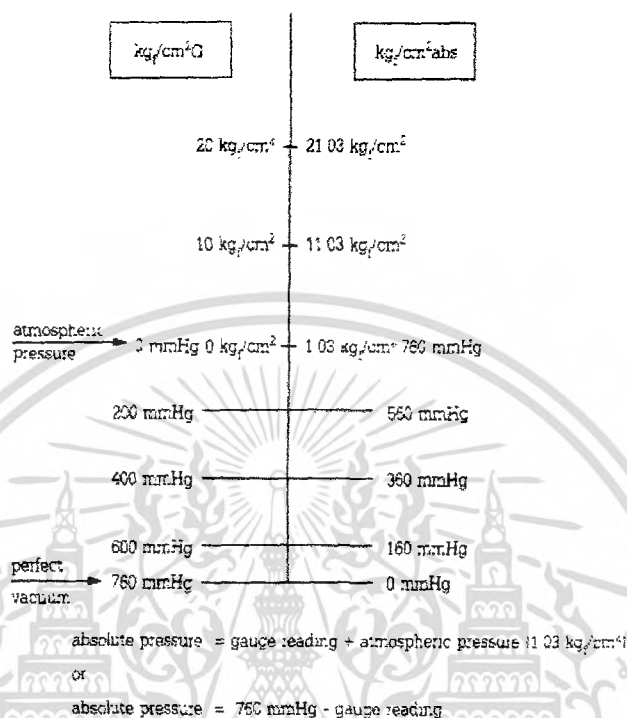
$$P_{abs} = P_{atm} + P_g$$

หรือ =  $P_{atm} - P_{vac}$  เมื่อความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

- มีหน่วยเป็น  $kPa, kg_f / cm^2 abs, psia$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ระบบการทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำ ( stem jet refrigeration system )



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันเกจและความดันสัมบูรณ์

### หลักการทํางาน

- ใช้น้ำเป็น refrigerant ( R - 718 )
- ใช้ไอน้ำความดันประมาณ 30 - 150 psig แล้วลดความดันในเครื่องระเหย ( evaporator หรือ flash tank ) ลงเหลือประมาณ 0.12 psia ซึ่งทำให้จุดเดือดของน้ำลดลงเหลือ 40° F ( 4° c ) น้ำในเครื่องระเหยส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอและจะดูดความร้อนออกจากน้ำส่วนที่เหลือทำให้น้ำในเครื่องระเหยมีอุณหภูมิลดลงเหลือ

$$40^{\circ} F - 50^{\circ} F (4^{\circ} c - 10^{\circ} c)$$

ซึ่งเราเรียกน้ำส่วนนี้ว่า chilled water และน้ำเย็นนี้จะถูกส่งไปเข้าคอยล์เย็น เพื่อสร้างความเย็นให้กับระบบปรับอากาศต่อไป

- เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ไอน้ำภายใต้ความดันเป็นจำนวนมากเพื่อทำให้เกิดความเย็น และต้องใช้ น้ำเป็นจำนวนมากในการช่วยให้ไอน้ำควบแน่นในคอนเดนเซอร์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เฉพาะในระดับปรับอากาศขนาดใหญ่คือ 100 ตันขึ้นไป

- สามารถทำอุณหภูมิได้ต่ำสุดประมาณ  $40^{\circ}F (4^{\circ}C)$  เพราะถ้าต่ำกว่านี้ เช่นที่  $0^{\circ}C$  นี้ที่ใช้เป็น refrigerant จะแข็งตัว จึงใช้ได้เฉพาะการทำความเย็นในระบบปรับอากาศเท่านั้น

### ข้อสังเกต

ความสามารถในการสร้างความเย็น ถ้าทำให้น้ำในเครื่องระเหยเป็นไอไปได้ 1% จะสามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เหลือทั้ง 99% มีอุณหภูมิลดลงได้ประมาณ  $10^{\circ}F$  เสมอ เช่น น้ำที่ผ่านเครื่องระเหยจำนวน 100 ปอนด์ ถ้าทำให้เป็นไอไปเพียง 1 ปอนด์ จะทำให้น้ำส่วนที่เหลือในเครื่องระเหยทั้ง 99 ปอนด์ มีอุณหภูมิลดลง  $10^{\circ}F$

ตัวอย่างที่ 2.3 ถ้าในเครื่องระเหยจำนวน 100 ปอนด์ อยู่ภายใต้ความดัน  $0.12 \text{ psia}$  กลายเป็นไอน้ำจำนวน 1 ปอนด์ จงหาอุณหภูมิของน้ำส่วนที่เหลือในเครื่องระเหยว่า จะลดลงเท่าใด

### ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (R-718)

Thermodynamic Properties of Water (Refrigerant 718) at Saturation												
Fahr. Temp. (F)	Absolute Pressure Pa		Specific Volume, cu ft per lb			Enthalpy, Btu per lb			Entropy, Btu per (lb) (F)			
	lb/Sq In.	In. Hg	Sat. Liquid $v_f$	Evap. $v_g$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Evap. $s_{fg}$	Sat. Vapor $s_g$	
33	0.092227	0.18778	0.01602	3180.5	3180.5	1.01	1074.59	1075.60	0.00205	2.1811	2.1831	
34	0.095999	0.19546	0.01602	3061.7	3061.7	2.01	1074.03	1076.04	0.00409	2.1755	2.1796	
35	0.099908	0.20342	0.01602	2947.8	2947.8	3.02	1073.46	1076.48	0.00612	2.1700	2.1761	
36	0.10396	0.21166	0.01602	2838.7	2838.7	4.02	1072.90	1076.92	0.00815	2.1644	2.1725	
37	0.10815	0.22020	0.01602	2734.1	2734.1	5.03	1072.33	1077.36	0.01018	2.1589	2.1691	
38	0.11249	0.22904	0.01602	2633.8	2633.8	6.03	1071.77	1077.80	0.01220	2.1535	2.1657	
39	0.11699	0.23819	0.01602	2537.6	2537.6	7.04	1071.20	1078.24	0.01422	2.1480	2.1622	
40	0.12164	0.24767	0.01602	2445.4	2445.4	8.04	1070.64	1078.68	0.01623	2.1426	2.1588	
41	0.12646	0.25748	0.01602	2356.9	2356.9	9.05	1070.06	1079.11	0.01824	2.1372	2.1554	
42	0.13145	0.25763	0.01602	2272.0	2272.0	10.05	1069.50	1079.55	0.02024	2.1318	2.1520	
43	0.13660	0.27813	0.01602	2190.5	2190.5	11.05	1068.94	1079.99	0.02224	2.1265	2.1487	
44	0.14194	0.28899	0.01602	2112.3	2112.3	12.06	1068.37	1080.43	0.02423	2.1211	2.1453	
45	0.14746	0.30023	0.01602	2037.3	2037.3	13.06	1067.81	1080.87	0.02622	2.1158	2.1420	
46	0.15317	0.31185	0.01602	1965.2	1965.2	14.06	1067.24	1081.30	0.02850	2.1105	2.1387	
47	0.15907	0.32387	0.01602	1896.0	1896.0	15.06	1066.68	1081.74	0.03018	2.1052	2.1354	
48	0.16517	0.33629	0.01602	1829.5	1829.5	16.07	1066.11	1082.18	0.03216	2.0999	2.1321	
49	0.17148	0.34913	0.01602	1765.7	1765.7	17.07	1065.55	1082.62	0.03413	2.0947	2.1288	
50	0.17799	0.36240	0.01602	1704.3	1704.3	18.07	1064.99	1083.06	0.03610	2.0895	2.1256	
51	0.18473	0.37611	0.01602	1645.4	1645.4	19.07	1064.42	1083.49	0.03806	2.0842	2.1223	

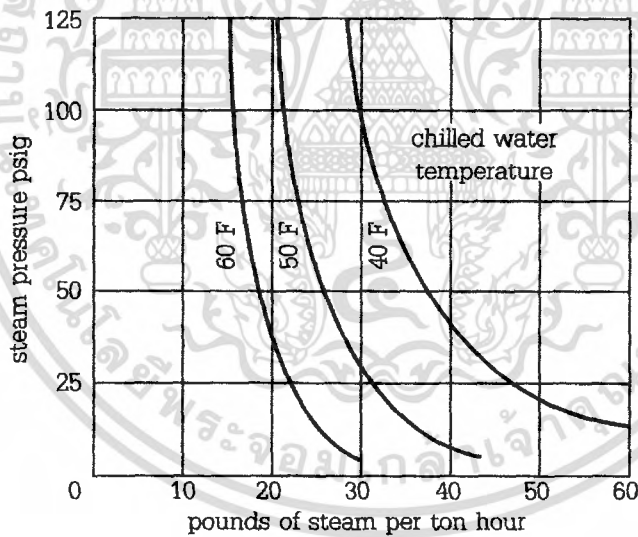
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (R-718) น้ำที่ความดัน 0.12 psia จะมีจุดเดือดที่ 40 °F (boiling point) และมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ( $h_g$ ) = 1070 Btu/lb นั่นคือ การที่น้ำในเครื่องระเหยกลายเป็นไอ 1 ปอนด์ จะดูดความร้อนจากน้ำส่วนที่เหลือในเครื่องระเหยไป 1070 Btu

**ผลที่เกิดขึ้น**

จาก 1 Btu คือปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิ ลดลง 1°F ฉะนั้นความร้อน 1070 Btu จะทำให้น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิลดลง 1070 °F หรือถ้าเป็นน้ำ 99 ปอนด์ จะทำให้อุณหภูมิลดลง  $= \frac{1070}{99} = 10.7^\circ F$

**สรุป** ถ้าในเครื่องระเหยกลายเป็นไอไป 1 ปอนด์ อุณหภูมิของน้ำที่เหลือทั้ง 99 ปอนด์ จะลดลง ประมาณ 10 °F เสมอ

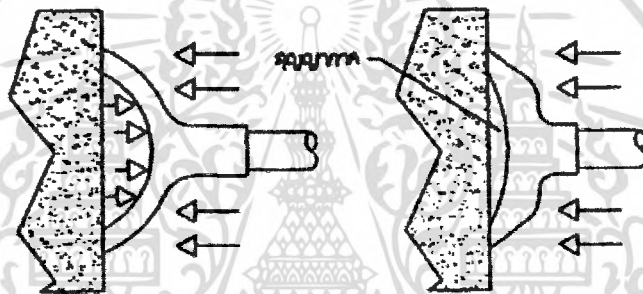


**รูปที่ 2.7** กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำที่ใช้ อุณหภูมิน้ำเย็นที่ได้ และความสิ้นเปลืองไอน้ำ

**ตัวอย่างการใช้งาน** ถ้าต้องการอุณหภูมิในเครื่องระเหย 40°F ถ้าใช้ไอน้ำที่มีความดัน 100psig จากกราฟจะต้องใช้ไอน้ำผ่านหัวฉีดคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 30 ปอนด์/ชั่วโมง ต่อความเย็นที่ได้ 1 ตัน

## 2.9 สุญญากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร

ในระบบลมอัดอากาศที่เพิ่มมากขึ้นจะเป็นตัวทำให้เกิดแรงในการทำงาน แต่ในระบบสุญญากาศนั้นจะได้แรงทำงานจากแรงดันบรรยากาศ โดยแรงดันจากลมถูกลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีระดับต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศที่อยู่รอบๆ ทำให้ได้แรงดันที่มากกว่า สามารถนำไปใช้งานได้ ในรูปที่ 2-2 แสดงหลักการพื้นฐานของด้วยสุญญากาศจะทำให้ความดันทั้งด้านในและด้านนอกเท่ากัน แต่เมื่อดันด้วยสุญญากาศให้แนบกับผนังอากาศที่อยู่ด้านในจะถูกดันออกสู่ภายนอก ทำให้ความดันลดลง เมื่อถึงตอนนี้ความดันบรรยากาศที่มีค่าสูงกว่าก็จะดันให้ตัวด้วยแนบกับผนัง ในอุตสาหกรรมจริงๆ แล้วเครื่องมือที่ใช้งานเปรียบเสมือนกับภาชนะที่ถูกปิด ส่วนปั๊มสุญญากาศก็จะทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบทำให้เกิดความแตกต่างของความดันขึ้น



รูปที่ 2.8 แรงดันบรรยากาศดันให้ด้วยสุญญากาศแนบกับผนัง

ตัวอย่างภาชนะปิดในงานต่าง ๆ ในระบบการเดิมของเหลวก็คือตัวขวดหรือภาชนะบรรจุ เมื่อเกิดสุญญากาศขึ้นภายในภาชนะบรรจุ เมื่อเกิดสุญญากาศขึ้นภายในแล้วแรงดันบรรยากาศจะดันให้ของเหลวหรือผงวัสดุที่ต้องการไหลเข้าสู่ภาชนะในระบบนิวเมติกคอนเวเยอร์ ภาชนะปิดก็คือตัวเก็บ (Storage tank) และการใช้งานในงานยกภาชนะปิดก็คือด้วยสุญญากาศนั่นเอง

## 2.10 หน่วยสุญญากาศ

หน่วยที่นิยมใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศคือนิวปรอท (Mercury, in-Hg) รูปที่ 2-6 แสดงให้เห็นบารอมิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วที่ภายในถูกดูดอากาศออก (สุญญากาศ) ปลายเปิดส่วนอีกด้านหนึ่งเปิดให้จมลงในภาชนะบรรจุปรอทที่เปิดสู่บรรยากาศภายนอก ความดันหรือน้ำหนักที่เกิดจากบรรยากาศจะพยายามออกแรงกระทำกับผิวหน้าของปรอท และดันให้ปรอทเข้าสู่หลอดแก้วสูง 29.92 นิ้ว (760 มม.) ที่ระดับน้ำทะเล ดังนั้นจึงได้ค่ามาตรฐานของค่าความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลเป็น 29.92 นิ้วปรอท ซึ่งเมื่อเปลี่ยนหน่วยแล้วมาตรฐานนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 14.69 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในตารางที่ 2-1 ได้แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบค่าความเป็นสุญญากาศในหน่วยต่าง ๆ โดยที่จุดความดันบรรยากาศมีค่าเป็น 0 นิ้วปรอท (14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในทางกลับกันที่จุดอ้างอิง 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้วสมบูรณ์ (psia) จะเป็นจุดที่เรียกว่าสุญญากาศสมบูรณ์ ( Perfect vacuum ) ส่วนมากแล้วบนหน้าปัดของเกจวัดความดันจะแสดงค่าความดันที่ 0 แต่ในระบบของสุญญากาศนั้นค่าความดันจะต่ำกว่า 0 หรือมีค่าลบ ซึ่งเป็นตัวแสดงความแตกต่างระหว่างความดันของระบบสุญญากาศกับแรงดันบรรยากาศ

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบกับหน่วยอื่น ๆ

ที่ความดันสมบูรณ์

ทอร์ ( mmHg )	200	400	600	760	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000			
ความดันบรรยากาศ	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	
	ค่าความดันเป็นลบ						ค่าความดันเป็นบวก							
ความสูงของปรอท	-800	-600	-400	-200	0	200	400	600	800	1000	1200	1400		
ความสูงของน้ำ	-10	-8	-6	-4	-2	2	4	6	8	10	12	14	16	18
ความดันแกจ	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8

2.11 ระดับของสุญญากาศ ( Degree of Vacuum )

ระดับของสุญญากาศสามารถแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้เป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับสูง และระดับสูงที่สุด ในปัจจุบันนี้ การทำให้ถึงเก็บสุญญากาศมีความดันลดลงจนความดันบรรยากาศลดลงไปถึงระดับสุญญากาศระดับสูง ( High Vacuum ) หรือสุญญากาศระดับที่สูงที่สุด ( Ultrahigh Vacuum ) นั้น ยังไม่มีปั๊มชนิดใด ๆ ที่ใช้เพียงตัวเดียวแล้วสามารถกระทำได้ ยังคงต้องใช้ปั๊มหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน ถึงแม้ว่า ปั๊มสุญญากาศโดยทั่ว ๆ ไป จะใช้ในการทำให้จำนวนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของก๊าซมีจำนวนลดลงแต่หลักการทำงานในปั๊มแต่ละชนิดเพื่อที่จะให้ความดันต่ำ นั้นจะแตกต่างกัน หลักการของ Vacuum pumping อาจจะใช้หลักการเดียวกันหรือหลาย ๆ หลักการดังต่อไปนี้

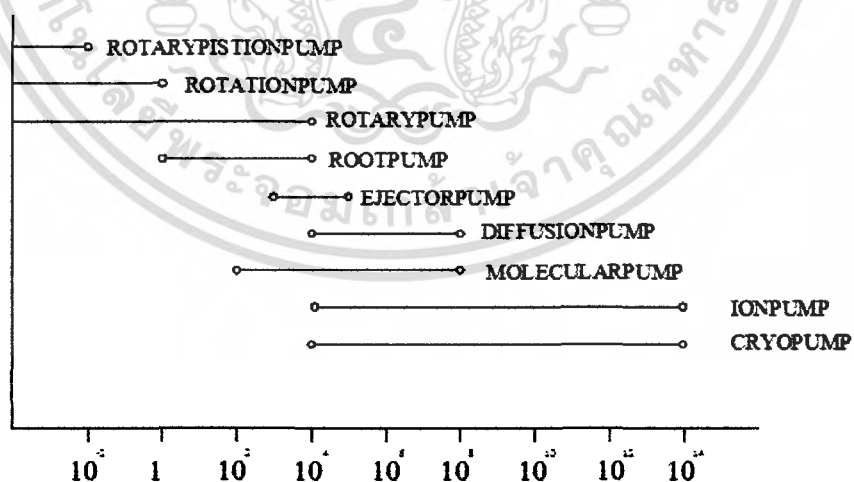
1. Compression – Expansion ของก๊าซ เช่นใน piston pumps, liquid column or liquid ring pumps, root's pumps
2. Drag by viscosity effect เช่นใน vapor ejector pumps
3. Drag by diffusion effects เช่นใน vapor diffusion pumps
4. Molecular drag เช่นใน molecular pumps
5. Ionization effects เช่นใน ion pumps
6. Physical or Chemical sorption เช่นใน sorption pumps, cryopumps และ guttering process

หลักในการเลือกปั๊มที่สำคัญดังนี้

1. ความดันต่ำสุด
2. ช่วงความดัน
3. ความเร็วรอบของปั๊ม
4. ความดันที่ส่งออก

ช่วง Ultra-high Vacuum จะมี Parameters เพิ่มอีก 2 ตัว คือ

1. ความสามารถในการเลือกใช้ได้
2. ส่วนประกอบของก๊าซที่เหลือ

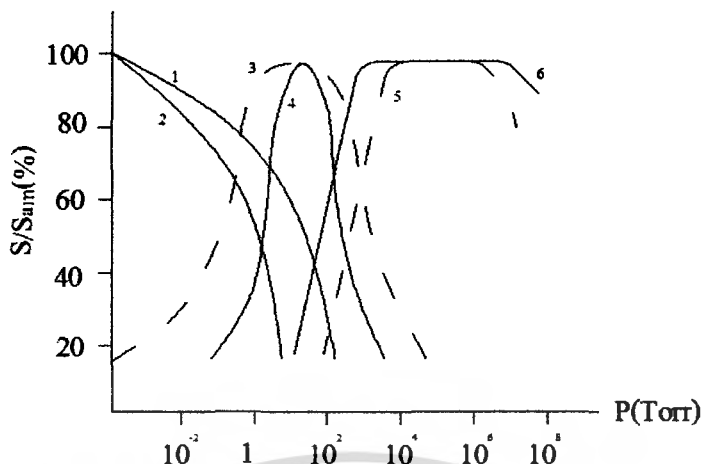


รูปที่ 2.9 ช่วงความสามารถในการทำสุญญากาศของปั๊มแต่ละชนิด

- ความดันต่ำสุดที่ปั๊มจะทำได้ ณ ตำแหน่งทางเข้าของมัน ค่าความดันต่ำสุดนี้

สามารถพิจารณาได้จากการรั่วในตัวปั๊มเอง หรือจากความดันไอของของไหลที่ใช้ในปั๊มนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ช่วงเวลาของความเร็วในการปั๊มแต่ละชนิด

1. Single stage rotation-vane pump    2. Single stage gas ballast pump    3. Root pump  
4. Ejector pump    5. Diffusion pump    6. Molecular pump

- ช่วงความดันของปั๊ม ก็คือ ช่วงที่ความเร็วรอบของปั๊มตัวนั้นยังมีประโยชน์อยู่ ปั๊มแบบเดียวกันแต่ขนาดต่างกันหรือออกแบบสร้างแตกต่างกัน ก็จะทำให้ Pressure Range ที่ต่างกัน รูปที่ 2-3 แสดงถึง Pressure Range ของปั๊มชนิดต่างๆ กันและค่า Lowest Pressure ที่ปั๊มแต่ละชนิดสามารถทำได้

- ความเร็วรอบนี้จะไม่คงที่แต่จะเป็นฟังก์ชันของความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งเป็นการ Plot ระหว่างค่าความเร็วรอบกับค่าความดันของปั๊มต่างชนิดกัน จะเป็นว่ามีอยู่ 2 แบบ คือ ในตอนเริ่มแรกความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความดันลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุด Maximum แล้วจะเริ่มลดลงไปเรื่อยๆ เช่น Diffusion pump, Root pump เป็นต้น แบบที่ 2 pumping จะสูงสุดในตอนเริ่มต้น แล้วค่อยลดลงเมื่อความดันลดลงเรื่อยๆ เช่น Rotary pumps เป็นต้น

- ความดันทางออก ( Exhaust Pressure ) พิจารณาจากกรณีนี้ เราอาจแบ่งปั๊มสุญญากาศได้เป็น 3 จำพวก คือ

1. ปั๊มที่ Exhaust atmosphere โดยทั่วไป จะเรียกว่า roughing หรือ backing pumps Roughing คือ การดูดอากาศจากระดับ Atmosphere Pressure ใน Chamber ออกไปจนกระทั่ง Chamber มีความดันอยู่ในระดับ Acceptable Operating Pressure Backing Pumps คือ ปั๊มที่ทำหน้าที่รักษาระดับของความดันที่ทางออกของปั๊มอีกตัวหนึ่งให้มีความดันในระดับที่ปั๊มตัวนั้นสามารถทำงานได้ ปั๊มที่ทำหน้าที่ดังกล่าวข้างต้นก็ได้แก่ พวก Mechanical Rotary Pump Ejector Pumps ข้างต้น

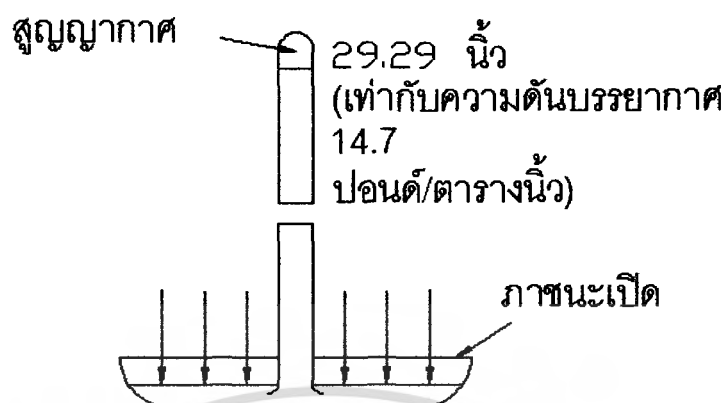
2. ปัมป์ที่ Exhaust ไปที่ Sub – Atmosphere Pressure Pumps ชนิดที่ต้องการ Backing Pumps มาช่วยในการ Exhaust ไปยัง atmosphere Pumps พวกนี้ได้แก่ Diffusion Pumps, Root Pumps และ Molecular Drag Pumps

3. ปัมป์ที่ใช้กับพวกก๊าซและไอน้ำภายใน Vacuum system โดยไม่ต้องการ Outlet Pumps พวกนี้ ได้แก่ ionization pumps และ Sorption Pumps

รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะทั่ว ๆ ไป ของ Laboratory Vacuum System ซึ่ง Process Chamber ถูกรักษาไว้ด้วยความดันต่ำ ๆ โดย Pumping system ที่ประกอบด้วย ปัมป์ 3 ตัวต่อแบบอนุกรมกัน ดังนี้ 3-Stage Diffusion Pumps ที่ถูก Back ด้วย Root's Pumps แล้วถูก Back อีกต่อหนึ่งด้วย Rotary piston Pumps

โดยมีการทำงานดังนี้ Rotary Piston Pumps จะเป็นตัวดูดอากาศออกจากระบบไปสู่ Atmosphere ทำให้ความดันในระบบลดลงไปได้ถึง  $10^{-1}$  Torr จากนั้นมันก็จะทำหน้าที่ตัวรองรับให้กับ Diffusion Pump ซึ่ง Diffusion Pumps จะสามารถทำให้ความดันในระบบลดลงไปได้ถึงต่ำกว่า  $10^{-5}$  Torr หากเป็นถึงสุญญากาศที่ไม่มีกร๊ว แต่ถ้าหากมีกร๊ว (Outgassing) มันก็จะสามารถรักษาระดับความดันไว้ได้ที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-4}$  Torr

ส่วนความดันสมบูรณ์ในระบบสุญญากาศ ( Absolute pressure ) ในหน่วยปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นค่าความดันที่สูงกว่าจุดสุญญากาศสมบูรณ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันบรรยากาศ ค่าความดันเกจ ( 14.7 Psi ) นอกจากนี้ยังมีหน่วยวัดค่าสุญญากาศอื่น ๆ อีก คือ ทอร์ Torr และ ไมครอน micron ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศที่สูงมาก คือใกล้ ๆ จุดสุญญากาศสมบูรณ์ หนึ่งทอร์มีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 760 ของค่าความดันบรรยากาศมาตรฐานส่วนหน่วยที่เล็กยิ่งกว่านี้ก็คือ 1 ไมครอน ( micron ) เท่ากับ 0.001 ของทอร์

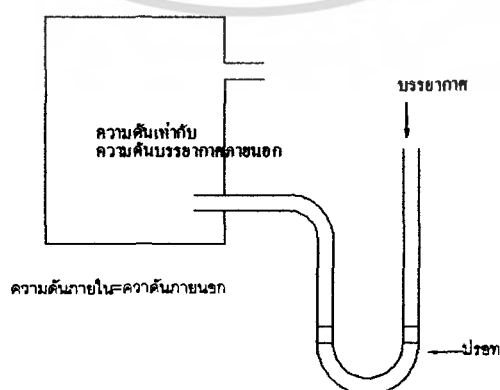


รูปที่ 2.11 บาร์มิเตอร์ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศ

อากาศจากความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อัดให้มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อยเพิ่มปล่อยออกไป หากเรานำเอาถังใบหนึ่งที่ปิดบังมาต่อท่อเข้ากับปั๊มนั้น อากาศในถังจะถูกดูดออกไปเรื่อย ๆ ทำให้ความดันภายในลดลง ซึ่งหมายถึงเกิดสภาวะสุญญากาศนั่นเอง การคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับปั๊มทั้งสองชนิดดังกล่าวจึงเหมือนกันทุกอย่าง แต่วิธีการสรรหานิคของปั๊มสุญญากาศที่เหมาะสมกับงานนั้นต่างออกไปเป็นคนละเรื่องเลย

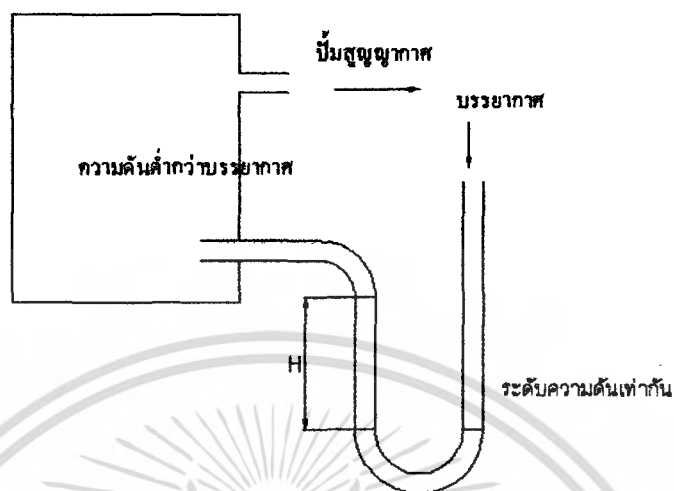
## 2.12 ปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศ คือ ปั๊มอัดอากาศแบบหนึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศจากความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อัดให้มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อปล่อยออกไป หากเรานำเอาถังใบหนึ่งที่ปิดบังมาต่อท่อเข้ากับปั๊มนั้น อากาศในถังจะถูกดูดออกไปเรื่อย ๆ ทำให้ความดันภายในลดลง ซึ่งหมายถึงเกิดสภาวะสุญญากาศนั่นเอง



### ก. ก่อนเป็นสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ข. หลังเป็นสุญญากาศ

รูปที่ 2.12 ในอสุญญากาศ ความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง

### 2.13 ข้อจำกัดทางวิศวกรรม

ข้อมูลที่เราจะนำมาใช้ตัดสินว่าปั๊มสุญญากาศตัวใด แบบไหน มีขีดความสามารถเฉพาะตัวที่จะทำสุญญากาศได้ระดับใด ( Pump Rating ) นั้นมีอยู่สามประการ

ประการแรก คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะ ( Vacuum Rating ) ซึ่งหมายถึงปริมาณความดันที่ปั๊มจะเอาออกไปจากถังเพื่อให้ในถังมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศมากที่สุดที่มันจะทำได้

ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะบอกค่าสุญญากาศสูงสุดที่ปั๊มจะทำได้เป็นความสูงของปรอทเป็นนิ้ว หรือมิลลิเมตร ( in-Hg, mm-Hg ) ความดันที่เกิดจากความสูงของปรอทดังกล่าวคือ ความดันที่หายไปเนื่องจากถูกปั๊มดูดออกจากเริ่มแรกมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นยังทำความดันให้ต่ำลงมาก ๆ ได้ ( สุญญากาศ ) ค่านี้ก็จะยิ่งมาก

จากรูปที่ 2-7 เมื่อภายในถังสุญญากาศความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง เพื่อให้การระบุค่านี้ชัดเจนและกะทัดรัดยิ่งขึ้น เขาจึงกำหนดให้ความสูงของปรอทนี้เป็นค่าที่บอกระดับความเป็นสุญญากาศ ( Degree of Vacuum) เพราะความดันบรรยากาศมีมาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลปานกลางมีค่า 29.92 นิ้ว-ปรอท จึงมีค่าจาก 0 ถึง 29.92 ยิ่งค่านี้มีมากก็แสดงว่าเป็นสุญญากาศมาก ตรงกับความรู้สึกของคนทั่ว ๆ ไป

ผู้ผลิตบางรายก็บอกค่าสุญญากาศจำเพาะ ( Vacuum Rating ) เป็นเปอร์เซ็นต์ของสุญญากาศสมบูรณ์ สำหรับเครื่องที่ทำสุญญากาศได้สูงมาก ๆ ( High-Vacuum ) เขาจะใช้หน่วยทอร์ ( Torr ) เพื่อบอกค่าความดันให้ชัดเจนยิ่งขึ้น 1 ทอร์ มีค่า 1 ต่อ 760 ของความดันบรรยากาศมาตรฐานระบุ 1 มม.ปรอท มีความดันเท่ากับ 10000000014 ทอร์ ดังนั้น จึงถือได้ว่าความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 760 ทอร์ ในสภาวะความดันต่ำกว่ามาก ๆ ( สุญญากาศสูง ) เมื่อต่ำกว่า 1 ทอร์ เขาจะบอกตัวเลขยกกำลัง 5,000,000 ทอร์ ปัมสุญญากาศแบบลูกสูบหรือแบบไดอะแฟรม อาจทำสุญญากาศได้สูงถึง 28 -28.5 นิ้ว-ปรอท จิตความสามารถนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและชนิดเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการทำความร้อนด้วย โดยเฉพาะชนิดที่มีการเสียดสีของชิ้นส่วนภายใน เช่น ปัมแบบเวน จะทำสุญญากาศได้สูงขึ้นกว่าปกติ หากจัดให้เดิน ๆ หยุด ๆ เป็นช่วง ๆ เช่น 10 นาที หยุด 10 นาที เพื่อให้มีเวลาได้อ่านได้ถ่ายเทความร้อนออกไปจนอุณหภูมิต่ำลง อาจทำสุญญากาศได้สูงกว่าเดิมถึง 30 -60 เปอร์เซ็นต์

ค่าสุญญากาศจำเพาะเหล่านี้คิดคำนวณจากความดันบรรยากาศมาตรฐาน 29.92 นิ้ว-ปรอท ( 760 มม.ปรอท ) ถ้าหากความดันบรรยากาศ ณ ที่ใช้งานต่ำกว่านี้จะทำให้ค่าสุญญากาศที่เครื่องจะทำให้ลดลงด้วยโดยคำนวณได้จากสูตร

$$V_s = V_o ( Pa/29.92 ) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_s$  คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะ เมื่อแก้ความดันบรรยากาศแล้ว นิ้วปรอท

$V_o$  คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะค่าเดิมที่ผู้ผลิตระบุ นิ้วปรอท

Pa คือ ค่าความดันบรรยากาศ ณ ที่ใช้งาน นิ้วปรอท

ตัวอย่างที่ 1 Root Blower เครื่องหนึ่งมีค่าสุญญากาศจำเพาะ 22 นิ้วปรอท นำไปใช้งานโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งตั้งอยู่ที่ราบสูง สูงจากระดับน้ำทะเล 1,580 ฟุต (ความดันบรรยากาศ 28.42 นิ้วปรอท) จะมีค่าสุญญากาศจำเพาะเปลี่ยนไปจาก 22 (  $28.42/29.92$  ) เป็น 20.90 นิ้วปรอท

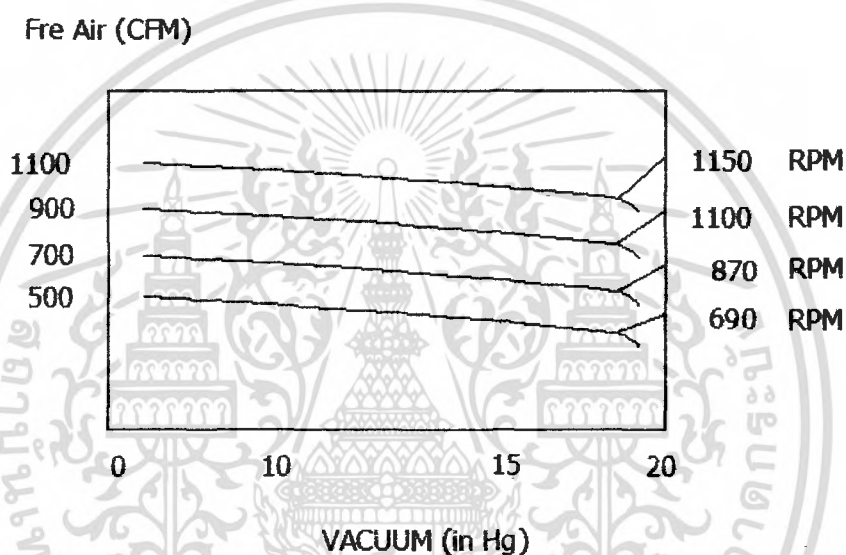
เปอร์เซ็นต์ของสุญญากาศสมบูรณ์ =  $29.92 / 100(H)$

ระดับความดันบรรยากาศ

ระดับความดันในถัง (ความดันเป็นศูนย์)

H นิ้วปรอท มี 29.92 นิ้วปรอท

ข้อมูลสำหรับระบุขีดความสามารถของปั๊มสุญญากาศ ประการที่สองคือ อัตราการอากาศออก (Flow Rate หรือ Capacity) มีหน่วยเป็น ลบ.ฟุตต่อนาที (cfm) หรือลิตรต่อชั่วโมง (L/h) ปริมาณอากาศดังกล่าวเป็นปริมาณอิสระ คือปริมาณที่ได้จากการคำนวณโดยคิดสมมติว่าหากมันมีความดันและอุณหภูมิมาตรฐานแล้วมันจะมีปริมาตรเท่าไร ไม่ใช่ปริมาตร ณ ความดันก่อนถูกดูดเข้าปั๊ม ค่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) และความดันขาเข้า ผู้ผลิตที่ดีและเชื่อถือได้ควรมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ เช่น รูปที่ 2-8 เพื่อที่ว่าผู้ใช้จะสามารถเลือกได้ถูกต้อง



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงขีดความสามารถ

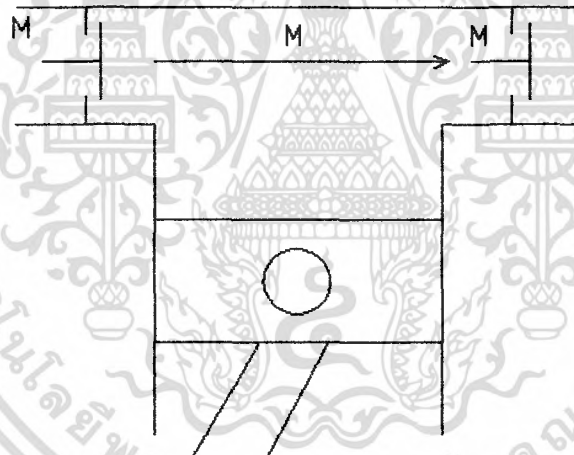
ข้อจำกัดขีดความสามารถข้อสุดท้ายได้แก่ กำลังงานสำหรับการขับเคลื่อน เพื่อให้ได้สถานะสองประการดังกล่าวมาแล้วตามที่ระบุ หากเปรียบเทียบกับเครื่องอัดอากาศแล้วจะพบว่าปั๊มสุญญากาศต้องการพลังขับเคลื่อนน้อยกว่ามาก เพราะเมื่อกำลังดูดอากาศออกด้วยอัตราสูง ผลต่างความค้ำคานคู่กับด้านปล่อยมีค่าน้อย ( ในกรณีที่เพิ่มการเดินเครื่องสุญญากาศ ) เมื่อทำสุญญากาศได้สูงแล้ว ผลต่างความดันปั๊มมากแต่ปริมาตรอากาศที่ถูกดูดผ่านสุญญากาศกลับมีน้อย กำลังงานสำหรับขับเคลื่อนซึ่งเป็นสัดส่วนกับผลคูณระหว่างมวลอากาศและผลต่างความดันจึงมีค่าไม่มาก

จากรูปที่ 2-14

$$\text{กำลังขับเคลื่อน} = m(P-p)/J \quad (2.2)$$

เมื่อ  $m$  = อัตราอากาศที่ถูกดูดผ่านลูกสูบ  
 $P, p$  = ความดันขาเข้าและความดันขาออก ตามลำดับ  
 $J$  = ค่าคงที่ใด ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของปั๊ม

หรืออธิบายให้เข้าใจง่าย ๆ ได้ว่า ปั๊มสุญญากาศเอาอากาศเพียงให้มีความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อจะได้ปล่อยออกไปได้เท่านั้น แทนที่จะต้องอัดให้ได้ความดันสูง ๆ เช่น 60 ถึง 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 2.14 รูปประกอบสมการกำลังขับเคลื่อน

ข้อมูลทั้ง 3 ประกาศดังกล่าวแล้วจะปรากฏในแผนภูมิแสดงลักษณะการทำงาน (Performance Chart) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสุญญากาศ อัตราการดูดออกปริมาตรเชิงกล และประสิทธิภาพรวมเพื่อหาขนาดของปั๊มและกำหนดสภาวะขณะทำงานที่เหมาะสมที่สุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

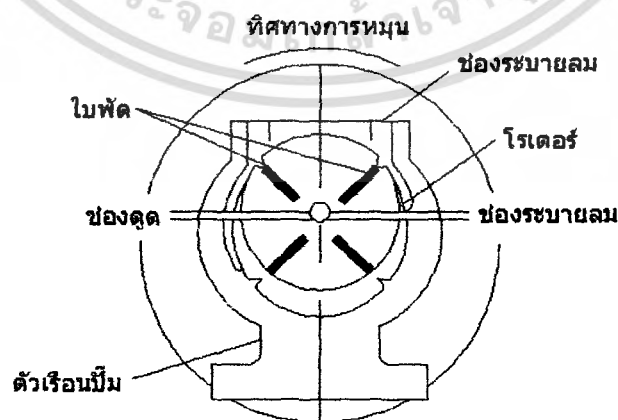
## 2.14 ชนิดของปั๊มสุญญากาศที่เลือกใช้

ปั๊มสุญญากาศ คือ ปั๊มที่อัดอากาศแบบหนึ่ง ดังนั้นปั๊มสุญญากาศจึงมีแบบต่าง ๆ ทุกแบบเท่าที่ปั๊มอัดอากาศจะมี

ปั๊มสุญญากาศมีทั้งแบบคูด-อัด (Positive Displacement) และแบบคูดเหวี่ยงหรือไดนามิก (Non-positive displacement or Dynamic) มีขนาดปริมาณของห้องที่อัดคงที่ เช่น ปั๊มแบบลูกสูบ ปั๊มแบบโรตารีเวน ปั๊มแบบโหลบ (loper rotor) และสกรูส่วนปั๊มแบบคูดเหวี่ยงจะทำการคูดอากาศ โดยวิธีเปลี่ยนพลังงานศักย์ให้เป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) คูดอากาศออกจากระบบ ปั๊มพวกนี้มีอัตราการไหลที่สูงแต่จะให้ระดับสุญญากาศไม่มากนัก ปั๊มแบบนี้ เช่น ปั๊มแรงเหวี่ยงแบบหลายสเตจ และปั๊มรีเจนเนอเรทีฟโบลเวอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### ปั๊มแบบโรตารี (Rotary vane pumps)

ปั๊มแบบนี้จะเหมือนกับเครื่องคูดอากาศ ดังแสดง ตามรูปที่ 2-12 จะมีเพลาสวมอยู่ในกระบอกปั๊มและเมื่อใบพัดหมุนจะคูดเอาอากาศออกจากช่องทางเข้าไปออกที่ของพอร์ตทางออกทำให้เกิดสุญญากาศขึ้นมาที่ช่องทางเข้า ปั๊มชนิดนี้นับว่ามีอัตราการคูดอากาศสูงมาก ปั๊มมีขนาดกะทัดรัดค่าใช้จ่ายต่ำ ต้องการทอร์คที่ใช้สำหรับเริ่มเดินปั๊มต่ำ ระดับความสั่นสะเทือนขณะเดินเครื่องและเสียงรบกวนต่ำมาก อัตราการไหลของอากาศเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถทำสุญญากาศที่สูง ๆ ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้นสามารถเดินปั๊มได้แบบเดิน ๆ หยุด ๆ ส่วนข้อจำกัดของการใช้ปั๊มแบบนี้ คือ อุณหภูมิและการระบายความร้อน ความสามารถในการสุญญากาศของปั๊มแบบนี้ ชนิดแสดงเดี่ยวนั้นคือ 28 นิ้วปรอท แต่ถ้ามีการหล่อลื่นและระบายความร้อนที่ดีจะเพิ่มระดับสุญญากาศได้ 1 นิ้วปรอท

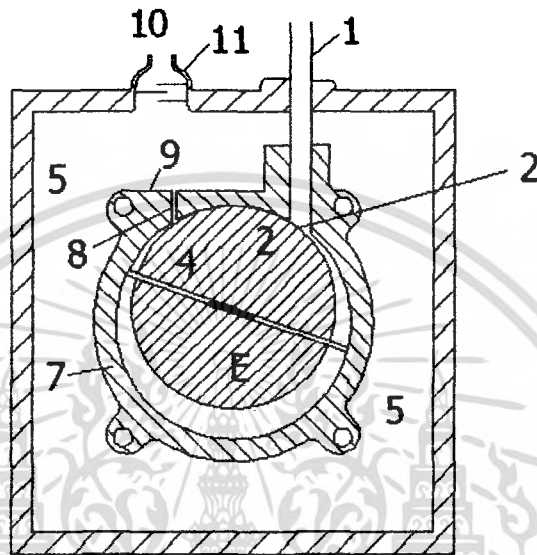


รูปที่ 2.15 ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) Rotating – Vane pumps

Rotating – Vane pumps หรือโดยทั่วไปเรียกว่า Rotating pumps ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ Stator และ Rotor ดังแสดงในรูปที่ 2-13 และ 2-14

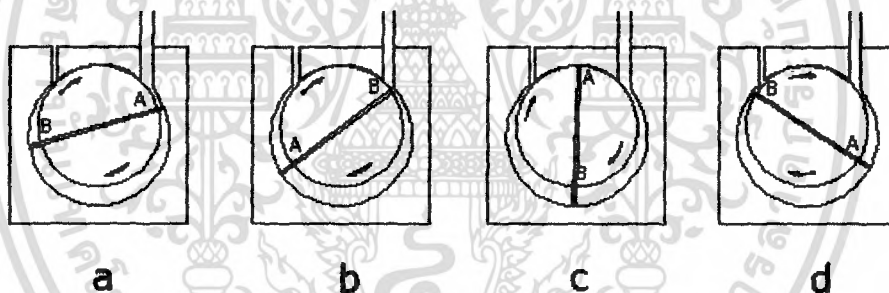


รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดของ Rotating Vane pumps

1. Inlet Tube 2. Inlet Port 3. Top seat 4. Vanes 5. oil 6. Rotor 7. Stator
8. Exhaust Port 9. Exhaust flaps valve with backing plate 10. oil splash baffles

Stator เป็นส่วนที่อยู่ข้างใน ทำด้วย Steel เป็นรูปทรงกระบอกที่หลายทั้ง 2 ปีกด้วยแผ่นเหล็กซึ่งจะเป็นตัวยึดแกนของ Rotor ด้วยตัว stator จะถูกเจาะเป็นช่องทางเข้าและทางออก ช่องทางเข้าจะต้องอยู่กับระบบสุญญากาศและโดยปกติมักจะมี ตัวกรองฝุ่นละออง ( Dust Filter ) อยู่ด้วย ส่วนทางออกจะมีวาล์วซึ่งอาจจะเป็นแผ่นโลหะที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะที่อยู่ข้างใน 2 แผ่น หรืออาจจะเป็นแผ่นอื่นออกมา ( Neoprene ) ซึ่งจะอยู่ระหว่าง Stator กับ Metal Backing Plate ดังแสดงในรูปที่ 2-14

Rotor จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กรูปทรงกระบอกติดตั้งบนเพลาขับแกนกลาง ( Axis ) ของมันจะขนานกับแกนกลางของดังรูปที่ 2-13 และ 2-14 โดยไม่ทับกัน แต่ตัวมันจะไปแตะกับพื้นผิวด้านบนของ stator แนวสัมผัสเรียกว่า Top seal ดังแสดงในรูปที่ 2-13 บนพื้นของ Rotor ที่ตรงกันข้ามในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางจะถูกเจาะเป็นช่องตลอดแนวความยาวของ Rotor เพื่อใช้เป็นซี่ใบพัด ( Vanes ) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กค้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีสปริงเป็นตัวยึดระหว่างใบพัดทั้งสองนี้ เพื่อที่ว่าด้านปลายของใบพัดทั้งสองจะแตะกับผนังของ stator เป็นอย่างดี ตลอดเวลาของการเคลื่อนที่ไป ทั้งนี้ stator แปะ rotor จะจุ่มอยู่ในน้ำมันเหมาะสมตลอดเวลา



รูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของ Rotating Vane pumps

รูปที่ 2-15 แสดงการทำงานของปั๊ม ดังนี้ เมื่อใบพัด A เคลื่อนที่ผ่านช่องทางเข้าดังรูปที่ 2-15 a เมื่อใบพัด A เคลื่อนที่ไป ปริมาตรที่อยู่ระหว่าง Stator, Top seal, Rotor และใบพัด A ก็จะเพิ่มขึ้น นั่นคือก๊าซจะเข้ามาในตัวปั๊มมากขึ้น ก็ทำให้ความดันในระบบลดลง ใบพัดจะหมุนไปจนกระทั่ง ใบพัด B ผ่านช่องทางเข้าดังรูปที่ 2-15 b ปริมาตรของก๊าซส่วนที่จะถูกดูดออกไปจะถูกตัดขาดออกจากระบบ เมื่อใบพัดหมุนต่อไปจนกระทั่ง ใบพัด A ผ่านตำแหน่ง Top seal ดังรูปที่ 2-15 c ในสภาวะนี้ก๊าซ จะกระจายอยู่ในบริเวณระหว่างใบพัด B กับ Top seal เมื่อหมุนต่อไปก๊าซเหล่านี้จะถูกอัดจนกระทั่งมีความดันมากพอที่จะไปดันให้ วาล์วทางออกเปิด ความดันนี้จะมีค่าประมาณ 850 ทอร์ ดังนั้นก๊าซจะถูกปล่อยออกไปจากปั๊มทางช่องทางออกดังรูปที่ 2-15 d

จะเห็นได้ว่าการหมุน 1 รอบของ Rotor ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดโดยปั๊มจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของปริมาตรที่แสดงในรูป 2-15 b เราเรียก อัตราส่วนการดูด ( Pump Displacement )  $S_d$

ถ้าให้  $V$  เป็นปริมาตรของบริเวณระหว่างไบพัต A และ B ในรูปที่ 2-15 b และ  $n$  เป็นความเร็วรอบ ( โดยปกติมีค่าประมาณ 350 – 700 rpm )  
จะได้ว่า

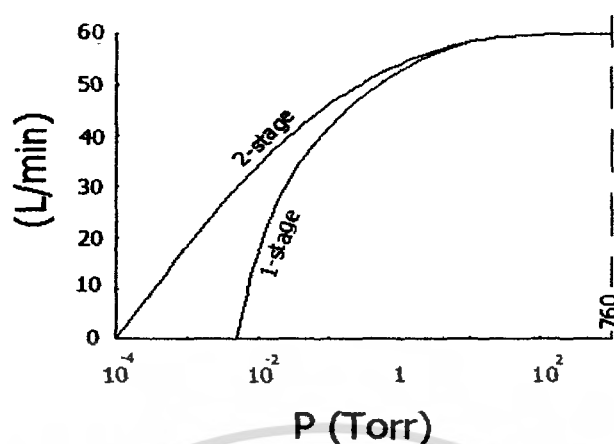
$$S_d = 2Vn$$

ในทางทฤษฎี ค่าความดันต่ำสุดที่จะได้จากปั๊มนี้อจะเป็นการพิจารณาจากก๊าซที่ถูกอัดเข้าไปในปริมาตรเล็กๆ ที่จำกัดซึ่งเรียกว่า Load Volume เท่านั้น เมื่อความดันของระบบที่ต้องถึงระดับอัดตัวสูงสุดความดันของก๊าซจะมีค่าน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นก๊าซเหล่านี้จะไม่ถูกปล่อยออกจากปั๊ม ผลก็คือ กระกระจายและอัดก๊าซปริมาณเล็กน้อยหลาย ๆ ครั้ง ก็ยังไม่มีผลต่อการลดความดันของระบบได้อีกต่อไป เราเรียกอัตราส่วนระหว่างความดันทางออก กับความดันทางเข้าว่า อัตราส่วนการอัดอากาศของปั๊ม ดังนั้น ถ้าต้องการทำให้ระบบมีความดันอยู่ในช่วงของ  $10^{-2}$  Torr ปั๊มที่จะใช้ต้องมีค่า การอัดอากาศอยู่ในช่วงของ  $10^{-5}$  Torr

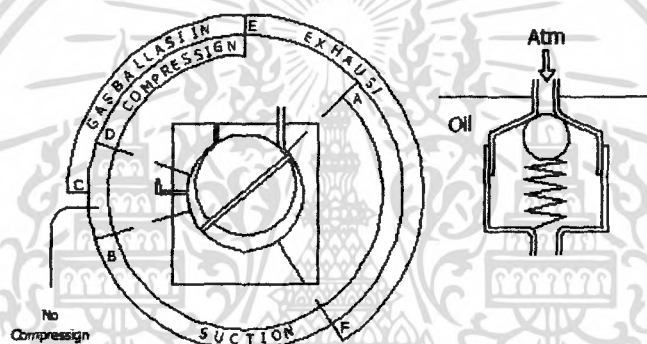
ค่าความดันต่ำสุด ( Lowest or ultimate pressure ) ที่ได้จากปั๊มโรตารีสเตจแรกจะประมาณ  $5 \times 10^{-3}$  Torr ถ้าวัดโดยใช้ Meleod gauge ( permanent gas pressure ) แต่จะเป็น  $10^{-2}$  Torr ถ้าวัดด้วย Pirani gauge ( total pressure ) การวัดค่าความดันได้สูงขึ้นนี้เนื่องจากความดันไอหรือการฟุ้งกระจายของน้ำมันในปั๊มการต่อ rotor – stator system 2 ระบบที่เหมือนกันเข้าด้วยกันสามารถทำได้ 2 แบบคือ

การต่อแบบขนานจะได้ค่าเป็น 2 เท่า แต่ได้สูญญากาศสูงที่สุด ( Ultimate pressure ) เหมือนกับระบบเดียว

การต่อแบบอนุกรมจะได้ค่าเท่ากันแต่ให้ความเร็วในการปั๊มที่บริเวณความดันต่ำ ๆ สูงกว่า ดังแสดงรูปที่ 2-16 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณความดันสูงประมาณ 760 Torr ค่าความเร็วในการปั๊ม คงที่ ความเร็วสูงสุดและไม่มีแตกต่างระหว่าง 1 stator และ 2 stator แต่ความเร็วจะลดลงอย่างเห็น ได้ชัดที่บริเวณความดันต่ำและกลายเป็นศูนย์ที่ค่าสูญญากาศสูงที่สุด



รูปที่ 2.18 Typical pumping speed pressure curve of rotating vane pump



รูปที่ 2.19 Principle of gas ballast pump and one way gas ballast valve

ในกรณีที่ใช้ Rotary pump ไปปั๊มพวกไอที่ควบแน่นได้ เช่น ไอน้ำจะถูกอัดและความดันของมันจะเพิ่มขึ้นดังนั้นจะเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเป็นของเหลวผสมกับปั้มน้ำมันและเมื่อน้ำมันไหลไปรอบ ๆ ในปั้มน้ำมันก็จะพาเอาของเหลวที่ปะปนอยู่เหล่านี้ไปด้วยจนถึงทางด้านความดันต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหยของความดันเหล่านี้ ซึ่งมีผลทำให้ไปจำกัดความดันต่ำสุดที่ควรจะได้เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เหล่านี้ จึงได้มีการนำ gas ballast valve ดังแสดงในรูปที่ 2-17 มาใช้ gas ballast นี้ จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของอากาศที่เข้ามาในปั้มในสภาวะที่ปั้มอยู่ในช่วงการอัดอากาศส่วนนี้จะเข้าผสมกับไอน้ำ ซึ่งจะมีความดันเท่ากับระดับของ Ejection pressure ก่อนที่ไอน้ำจะเกิดการกลั่นตัวหลักการการทำงานของ gas ballast ได้แสดงในรูปที่ 2-21

- $P_t$  คือ ความดันทั้งหมด  
 $P_v$  คือ ความดันบางส่วนของไอ  
 $P_g$  คือ ความดันบางส่วนของที่คงตัวของอากาศที่ทางเข้าของปั๊ม  
 $P_s$  คือ ความดันไออิ่มตัว  
 $P_c$  คือ ความดันที่ใช้ดันวาล์วทางออก  
 $S$  คือ ความเร็วในการปั๊มที่ทางเข้า  
 $S_0$  คือ อัตราความเร็วที่ผ่านเข้ามา  
 $T$  คือ อุณหภูมิของปั๊ม  
 $T_0$  คือ อุณหภูมิภายนอก  
 $C_r$  คือ อัตราส่วนการอัดอากาศ

จะได้ว่า

$$C_r = P_g / (P_v + P_g) \quad (2.3)$$

ในระหว่างภาวะของการอัดนี้ ค่า  $P_v$  ที่มากที่สุดที่จะเป็นไปได้โดยไม่เกิดการกลั่นตัวเป็นน้ำของไอน้ำจะเป็นไปตามสมการ

$$C_r = P_g / P_v \quad (2.4)$$

และจากสมการ (2.7) และ (2.8)

$$\begin{aligned} P_v + P_v &= P_s (P_v + P_g) \\ &= P_v P_s + P_s P_g \\ P_v (P_v - P_g) &= P_s P_g \\ P_v &= (P_s + P_g) / (P_s + P_g) \end{aligned} \quad (2.5)$$

**Ex.** ถ้าปั๊มมีอุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส  $P_s = 150$  Torr และ  $P_0 = 1.4$  atm จงหาค่า  $P_v$

$$P_c = 1.4 \text{ atm} = 1.4 \times 760 \approx 1060 \text{ Torr}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_v &= (P_s + P_g) / (P_0 + P_s) \\ &= [150 / (1060 - 150)] P_g \\ &= 0.155 P_g \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

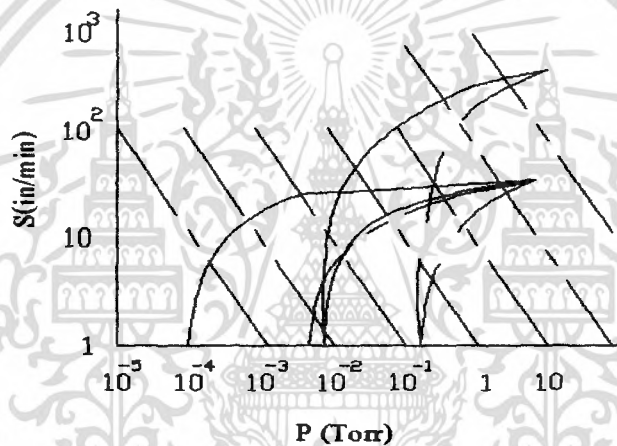
นั่นคือ ภายในปั๊มจะกลั่นตัวเป็นน้ำ เมื่อความดันบางส่วนของไอน้ำที่ตำแหน่งทางเข้ามีค่าเกิน 16 % ของความดันอากาศที่ทางเข้าปั๊มนั้น ถ้าใช้ gas ballast ด้วยจะได้ว่า

$$P_v = [P_g P_g + P_g P_b (S_b/S)] / (P_c - P_g) \quad (2.6)$$

$$S_b = S/S_b [(P_c P_v / P_g) - P_v - P_g] \quad (2.7)$$

แต่ถ้าพิจารณาถึง Vapor Content ของ gas ballast ( $P_n$ ) และอุณหภูมิ T และ  $T_0$  ด้วยแล้วค่า  $P_v$  ในสมการ (2.10) จะต้องเป็น

$$P_v = (P_g/S)(T/T_0) \{ [P_g S + (P_b - P_g)/S_b] / (P_c - P_g) \} - S_b P_n / P_g \quad (2.8)$$



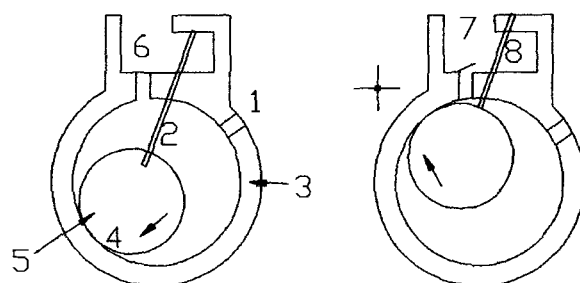
รูปที่ 2.20 Pumping speed curve of one and two stage rotary pump, without and with gas ballast

การใช้ gas ballast นี้จะทำให้ความดันของปั๊มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-18 แต่ข้อเสียอันนี้ในการปฏิบัติแล้วไม่สำคัญนักเพราะว่า เราจะเปิด gas ballast เฉพาะในตอนเริ่มต้นของการปั๊มเท่านั้น เพื่อคูดไอน้ำออกไปและป้องกันไม่ให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นน้ำปนอยู่ในปั๊มน้ำมันหลังจากนั้นเราจะปิด gas ballast valve

## 2) Sliding – Vane Pumps

ปั๊มแบบนี้จะมีใบอันเดียว ซึ่งเลื่อนอยู่ในช่องที่เจาะยาวอยู่ใน ระหว่างทางเข้าและช่องทางออกของปั๊มชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ

แบบที่ 1 ใบจะเลื่อนอยู่ใน Casing ของมัน และบน Eccentric Cylindrical Rotor โดยปลายข้างหนึ่งของ Vanes จะติดเข้ากับ Stator โดยสปริง ดังรูปที่ 2-19 และอีกข้างหนึ่งจะสัมผัสกับ Rotor

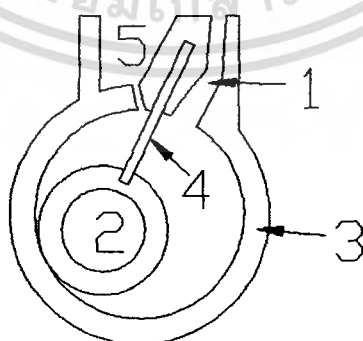


รูปที่ 2.21 Sliding Vane pump, with vanes sliding both in casing and rotor

1. Inlet Tube 2. vane Rotor seal 3. Stator 4. Rotor stator seal  
5. Rotor 6. Discharge Valve 7. Discharge Valve in Exhaust Position & Sliding vane

แบบที่ 2 ของ Sliding Vanes Pump แสดงในรูปที่ 2-20 แบบนี้ ใบจะติดอยู่บนวงแหวนรอบนอกของ Rotor โดยใช้คลัทช์กลึงเป็น คิว Rotor จะหมุนแบบยี่ดหุน ซึ่งจะทำให้ใบนี้เลื่อนไปมาอยู่ในช่องที่เจาะยาวเข้าไปในตัวเรือน

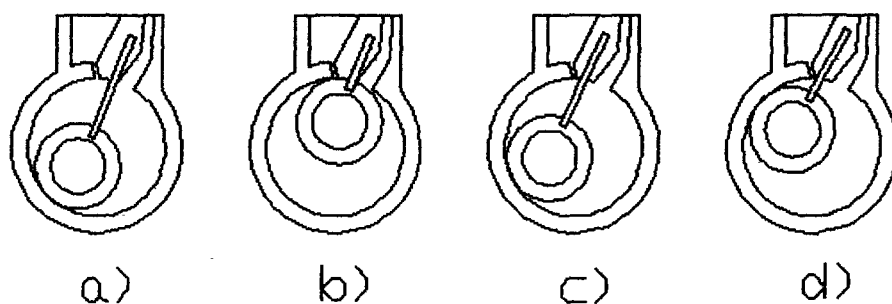
ส่วนประกอบทั้งหมดของแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่กล่าวมานี้จะจุ่มอยู่ในน้ำมัน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเก็บสูญญากาศ และตัวหล่อลื่นวงจรการทำงานของปั๊มจะเป็นดังรูปที่ 2-21 รูปที่ 2-21a ก๊าซจะไหลเข้ามาในปั๊มทางเข้า ซึ่งเรียกว่า Induction ก๊าซที่อยู่ในปั๊มจะถูกตัดขาดจากระบบเรียกว่า Isolation ที่หมุนต่อไปก็จะทำให้ความดันของก๊าซเพิ่มขึ้นจนสามารถค้นวาล์วให้เปิดออก ก๊าซที่จะไหลออกไปจากปั๊มสู่บรรยากาศภายนอกเรียกว่า ช่องทางออกของปริมาตรของก๊าซที่ถูกกวาดผ่านปั๊มในการหมุนหนึ่งรอบของ Rotor ก็คือ ปริมาตรระหว่าง Stator และ Rotor ในขณะที่ Rotor ผ่านช่องเจาะสำหรับใบพอดี



รูปที่ 2.22 Sliding vane pump, with vane sliding in casing

1. Inlet port 2. Rotor 3. Stator 4. Vane 5. Exhaust

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



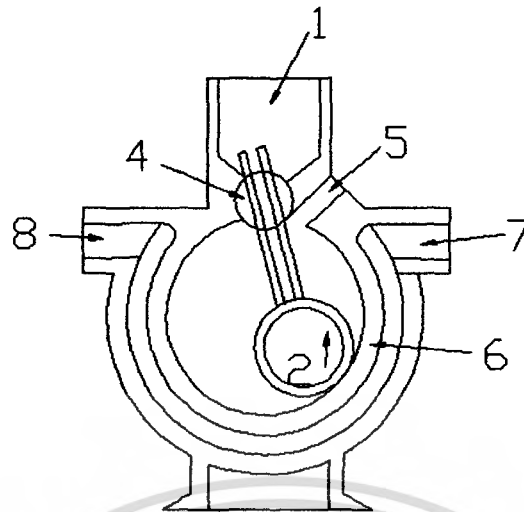
รูปที่ 2.23 Mode of action of a sliding vane pump

(a) Induction (b) Isolation (c) Compression (d) Exhaust

### 3) Rotating – Plunger Pumps ( การเคลื่อนที่ไปมาอย่างรวดเร็วมาก )

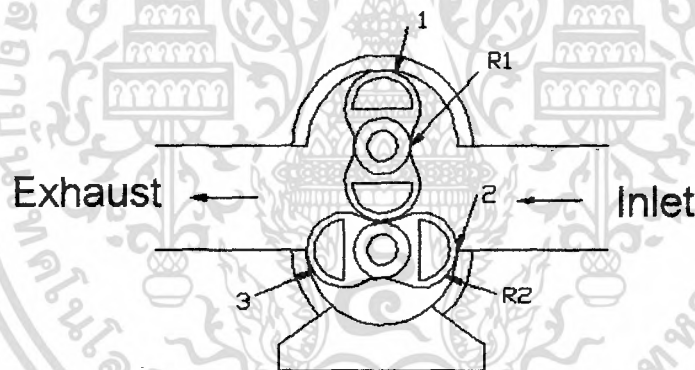
ปั๊มชนิดนี้จะใช้ท่อกลวงแทนใบเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 2-22 ท่อกลวงนี้จะอยู่กับ Stator และจะมีรูเจาะอยู่ที่ด้านข้างของท่อเพื่อเป็นทางเข้าของปั๊ม ก๊าซจะเข้ามาในปั๊มทางช่องเบอร์ 1 ในรูป ผ่านรูที่เจาะด้านข้างของท่อเข้ามาในปั๊มท่อนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงและกลิ้ง ไปด้วยอย่างรวดเร็ว ทำให้ก๊าซเกิดความดันเนื่องจากการอัดก๊าซอย่างรวดเร็ว ปั๊มชนิดนี้จึงต้องมีตัวมาช่วยระบายความร้อน โดยให้เข้าช่องทางระบายความร้อน (เบอร์ 7) และท่อน้ำนี้จะพันรอบ ๆ เพื่อไปรับความร้อนที่เกิดขึ้นในปั๊มแล้วทิ้งน้ำออกไปทางช่องทางออกของช่องระบายความร้อนการออกแบบเพื่อให้ได้ความเร็วในการปั๊มที่สูงมาก สามารถทำได้ถึง  $1000 \text{ m}^3/\text{hr}$  จึงมักนิยมใช้กับระบบใหญ่ ๆ ที่ต้องการความเร็วในการปั๊มสูง

Root's Pumps ประกอบด้วย เครื่องพัคที่มีใบพัค 2 ใบพัคอยู่ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2-23 เครื่องพัคทั้งสองตัวนี้ จะหมุนในทิศตรงกันทาบอยู่ภายในตัวเรือนของปั๊ม ทิศทางการหมุนของเครื่องพัคทั้งสองเป็นดังแนวลูกศรที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-23 เครื่องพัคทั้งสองนี้ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากัน และถูกจัดวางในลักษณะที่ทำให้ผิวของใบพัคของเครื่องพัค  $R_1$  โกล้ชิดและมีความโค้งสอดคล้องพอดีกับผิวของเครื่อง  $R_2$  นี้ก็มีความโค้งพอเหมาะกัผิวผิวด้านในของตัวเรือน แต่ใบพัคของเครื่องทั้งสองนี้จะต้องไม่แตะกันเอง และไม่แตะกับผิวของตัวเรือนด้วย แต่จะมีระยะห่างเล็กน้อย ประมาณ  $0.1 \text{ mm}$  ที่ตำแหน่ง 1 2 และ 3 ที่แสดงอยู่ในรูป



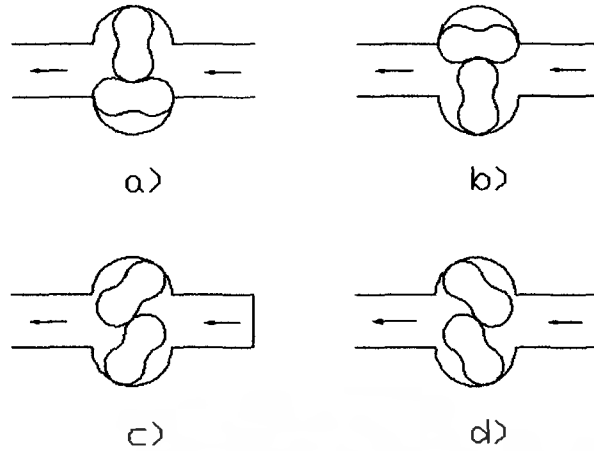
รูปที่ 2.24 Rotating plunger pump

1. Intake    2. Rotating plunger    3. Sliding tube    4. Bearing    5. Exhaust  
6. Stator    7. Cooling water inlet    8. Cooling water outlet



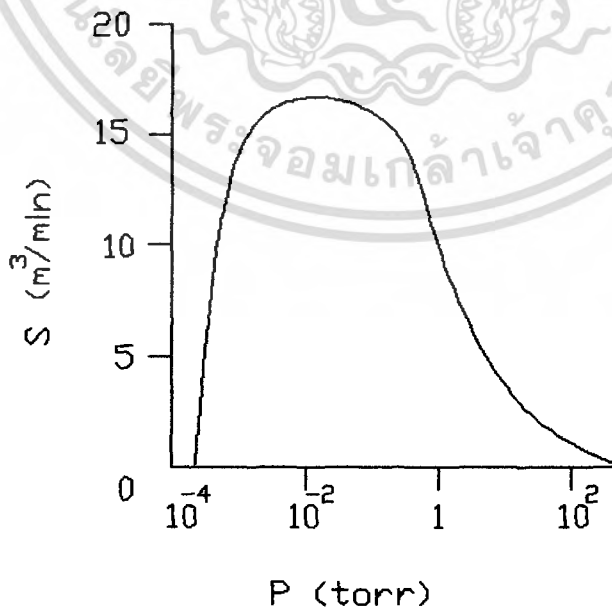
รูปที่ 2.25 Root' pump

การทำงานของปั๊มชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2-24 ก๊าซจากระบบจะเข้ามาทางช่องทางเข้าของปั๊มดังรูปที่ 2-24 a ไบพัดคววนจะหมุนในทิศทางเข็มนาฬิกา ในขณะที่ไบพัดควที่ 2 หมุนตามเข็มนาฬิกา จนถึงตำแหน่งตามรูปที่ 2-24 b ก๊าซที่ไหลเข้ามาในปั๊มจะถูกกวาดไปอยู่ในส่วนบนของตัวเรือน โดยอยู่ในช่องระหว่างเครื่องพัด R<sub>1</sub> กับตัวเรือน เมื่อไบพัดหมุนต่อไปถึงตำแหน่ง 2-24 °c ก๊าซจะถูกกวาดไปทางด้านทางออกและถูกดันออกไปสู่บรรยากาศภายนอกดังรูปที่ 2-24d



รูปที่ 2.26 การทำงานของ Root's pump

เนื่องจากระหว่างช่องทางเข้า กับช่องทางออกจะมีช่องแคบๆ เกิดขึ้นระหว่างที่ใบพัดของเครื่องพัด  $R_1, R_2$  ตลอดเวลา จึงอาจทำให้เกิดการไหลกลับก๊าซจากทางด้านทางออกกลับไปยังทางด้านทางเข้าได้เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของการอัดของ Root's pump จึงต่ำกว่าของพวก Oil Sealed Pumps แต่จากการที่ Root's Pump ไม่มีการแตะสัมผัสกันของใบพัดทั้งหมดและตัวเรือนปั๊มสามารถทำได้ถึง 1,000–4,000 rpm นั่นคือ มีความเร็วในการปั๊มสูงกว่ามาก ๆ ความเร็วในการปั๊มของปั๊มแปรตามความดันได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2-25 จะเห็นว่าผลที่ได้ของปั๊มจะมีค่ามากที่สุดเมื่อปั๊มมีการทำงานที่อัตราส่วนความดันมีค่าประมาณ 10 ที่ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-2}$  ทอร์ ดังนั้นเพื่อให้ Root's pump ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพก็ควรจะมี Backing Pump ที่เหมาะสมทำงานควบคู่ไปด้วย

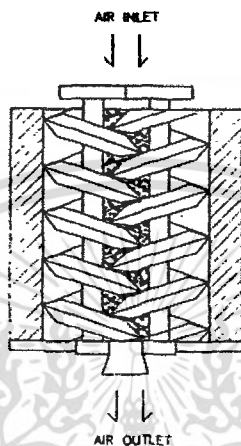


รูปที่ 2.27 Typical pumping speed curve of Root's pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) ปั๊มแบบโรตารี สกรู ( Rotary screw Pumps )

ปั๊มแบบนี้มีข้อดีก็คือการดูดอากาศเป็นไปอย่างราบเรียบโดยใช้เฟืองโรเตอร์ 2 ตัวขบกัน เวลาหมุนจะหมุนสวนทางกันทำให้เกิดการดูดอากาศหรือลดปริมาตรของเสาอากาศทางด้านหน้าโรเตอร์ สามารถทำสุญญากาศได้เท่า ๆ กัน ปั๊มแบบลูกสูบ คือ 27 ถึง 28.5 นิ้วปรอท ลักษณะของปั๊มได้แสดงเอาไว้ตามรูปที่ 2-26



รูปที่ 2.28 หลักการทำงานของปั๊มแบบสกรู

#### 2.15 การเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศ

การเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศมีข้อพิจารณาอยู่หลายอย่างดังนี้

1. ค่าความต้องการสุญญากาศสูงสุดของระบบ สิ่งที่สำคัญสิ่งแรกในการเลือกปั๊มสุญญากาศก็คือเปรียบเทียบการทำงานของปั๊มสุญญากาศกับค่าความต้องการสุญญากาศเป็นสุญญากาศในระดับต่ำจะมีปั๊มให้เลือกใช้มาก แต่หากต้องการค่าความเป็นสุญญากาศในระดับสูง ๆ ก็จะตรงกันข้ามจนอาจกล่าวได้ว่าไม่มีให้เลือกก็ได้

ส่วนการหาค่าความต้องการสุญญากาศของระบบซึ่งเกิดการ ทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ ทั้งหมดในระบบสุญญากาศจะหาได้จากการคำนวณจากสูตรทฤษฎีแคตล็อก เส้นโค้ง แสดงสมรรถนะ หรือการทดลองสร้างระบบต้นแบบขึ้นมา และเมื่อหาค่าสุญญากาศที่ต้องการได้แล้ว ต่อมาก็จะต้องมาดูปั๊มสุญญากาศกัน โดยปกติผู้ผลิตส่วนใหญ่จะบอกค่าอัตราสุญญากาศจำเพาะสูงสุด ( Maximum vacuum rating ) ซึ่งเป็นปริมาณความดันที่ปั๊มจะนำออกไปจากระบบเพื่อให้ระบบมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศมากที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยจะบอกเป็นนิ้วปรอทหรือมิลลิเมตรปรอท ( in-Hg, mm-Hg ) ขึ้นอยู่กับการทำงานด้วยการเป็นไปแบบต่อเนื่องหรือหยุด ๆ เติมน ในตารางที่ 2 ได้แสดงว่าสุญญากาศในขณะที่เดินปั๊มอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสุญญากาศของปั๊มต่าง ๆ

ชนิดปั๊ม	ค่าสุญญากาศจำเพาะสูงสุด เมื่อเดินปั๊มอย่างต่อเนื่อง ( นิ้วปรอท )
โรตารีเวน ( หลายสเตรจ )	29.5
ลูกสูบ	29.0
ไดอะแฟรม ( สเตจเดียวและหลายสเตรจ )	29.0
ลูกสูบ ( หลายสเตรจ )	28.5
โรตารีเวนสกู	28.5
โรตารีเวน ( หล่อลื่นด้วยน้ำมัน )	28.0
โรตารีเวน ( ไม่มีการหล่อลื่น )	26.0
โพลีโรเตอร์	15.0
รีเจนเนอเรทีฟโบเวอร์	7.0

ระดับสุญญากาศต่ำสุดที่สามารถทำได้ที่ระดับน้ำทะเลคือ 29.92 นิ้วปรอท ถือเป็นค่าทางทฤษฎีแต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อใช้งานปั๊มจะทำสุญญากาศได้สูงสุดเพียง 93 % ถึง 98 % ของค่าทางทฤษฎีนี้คือ ประมาณ 28 – 29.5 นิ้วปรอท เนื่องจากเกิดการรั่วไหลภายในและยังเกิดขึ้นอยู่กับชนิดของปั๊มด้วย ปั๊มสุญญากาศบางแบบหากได้มีการนำค้ำให้มีการระบายความร้อนที่ดี ก็อาจจะทำสุญญากาศได้มากกว่าที่กำหนดก็ได้ นอกจากนี้สุญญากาศที่ปั๊มสามารถทำได้ยังขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมที่นำปั๊มไปติดตั้งหากความดันรอบ ๆ ปั๊มที่จุดนั้นต่ำกว่าความดันบรรยากาศก็จะทำให้ค่าสุญญากาศที่ปั๊มทำได้มีค่าต่ำลงด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_a = R_c(P_a)/P_s \quad (2.9)$$

เมื่อ

$R_a$  คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะเมื่อแก้ความดันบรรยากาศแล้ว

$R_c$  คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะที่ปั๊มสามารถทำได้ซึ่งผู้ผลิตกำหนดมา

$P_a$  คือ ค่าความดันบรรยากาศรอบ ๆ ปั๊มที่จุดใช้งาน

$P_s$  คือ ค่าความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

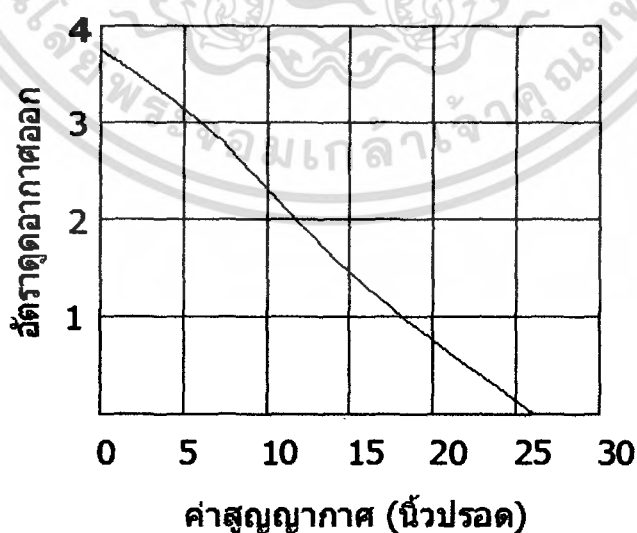
ตัวอย่างที่ 2 ปีมัธยมศึกษาศตวรรษหนึ่งมีค่ามัธยมศึกษาเฉพาะสูงสุด 24 นิ้วปรอท แต่ค่าความดันบรรยากาศรอบ ๆ จุดใช้งานนั้นมีเพียง 22 นิ้วปรอท จากสูตร จะใช้ค่าความดันบรรยากาศมาตรฐานเป็น 30 นิ้วปรอท ดังนั้น ค่ามัธยมศึกษาเฉพาะสูงสุดที่ปีมสามารถทำได้เท่ากัน

$$\begin{aligned} Ra &= (24)(22)/30 \\ &= 17.6 \text{ นิ้วปรอท} \end{aligned}$$

2. ค่าความต้องการอัตราการดูดอากาศออก สิ่งสำคัญอันดับที่สองในการเลือกปีมมัธยมศึกษาศกก็จะเห็นได้แก่ ค่าความต้องการอัตราการดูดอากาศออก (Air flow requirements) ของระบบมัธยมศึกษาศกซึ่งเป็นข้อระบุขีดความสามารถของปีมจะหาได้ดังนี้

- หาอัตราการดูดอากาศออก (free air) จากอุปกรณ์การทำงานที่จะต่อเข้ากับระบบแล้ว จึงเลือกใช้ปีมที่มีอัตราการดูดอากาศออกให้ได้ตามระดับมัธยมศึกษาศกที่ต้องการ ซึ่งค่าอัตราการดูดอากาศออกนี้หาได้จากผลรวมจากปริมาตรของ free air นี้ต้องปล่อยออกจากอุปกรณ์ทำงานแต่ละด้านของระบบในแต่ละรอบการทำงาน ค่านี้จะหาได้จากสูตรแคลคูลัสจากผู้ผลิต กราฟแสดงสมรรถนะ หรือการทดสอบการใช้งานจริง

- คูณค่าผลรวมปริมาตรของ free air นี้ด้วยจำนวนรอบการทำงานในแต่ละนาทีจะทำให้ได้อัตราการดูดมัธยมศึกษาศกที่ต้องการเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ซึ่งค่านี้นับเป็นค่าความต้องการสูงสุดที่ระบบต้องการ



รูปที่ 2.29 กราฟแสดงสมรรถนะของปีมมัธยมศึกษาศกชนิดหนึ่ง

เมื่อได้ค่านี้แล้วก็นำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราการดูดอากาศหรือ Capacity ของปั๊ม ที่มีจำหน่ายโดยปกติจะบอกค่าอัตราการดูดนั้นเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที ( cfm ) ซึ่งจากเส้นกราฟในรูปที่ 2-46 แสดงให้เห็นว่าขณะที่ระดับสูญญากาศสูงขึ้นค่าอัตราการดูดอากาศจะลดลง เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์นี้ผู้ผลิตปั๊มจะเป็นผู้กำหนด

ในขณะที่ปั๊มทำงานที่สภาพแวดล้อมความดันทางเข้าปั๊มเป็น 0 นิ้วปรอทนั้น ค่าอัตราการดูดอากาศจะอยู่ที่จุดสูงสุด ( ไม่เกิดสูญญากาศ ) ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ปั๊มที่มีค่าอัตราการดูดอากาศออกให้ตรงกับความต้องการของระบบ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเป็นสูญญากาศในระดับที่ต้องการ

3. กำลังที่ใช้ขับปั๊ม สำหรับข้อพิจารณาอันดับต่อมาคือการสูญเสียกำลังที่จะใช้ขับปั๊มเมื่อเปรียบเทียบกับระบบลมอัดแล้วจะพบว่า ปั๊มสูญญากาศต้องการพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่น้อยกว่า โดยทั่วไป การเลือกค้นกำลังที่ใช้ขับปั๊มขึ้นอยู่กับว่ามีกำลังเพียงพอที่จะทำให้ปั๊มทำงานได้ กฎโดยทั่วไปแล้วพลังงานในแต่ละ 1 แรงม้า จะให้อัตราการดูดอากาศที่ 20 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที ( cfm )

ค้นกำลังที่ใช้ขับปั๊มสูญญากาศมีทั้งแบบมีมอเตอร์อยู่รวมกับตัวปั๊มและแบบแยกออกจากตัวปั๊มแบบที่มีมอเตอร์ในปั๊มเป็นแบบที่เลือกใช้ได้ง่ายมีขนาดกะทัดรัด และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ด้วยส่วนต้นกำลังแบบแยกนั้นมีทั้งใช้ในเครื่องชนิดแก๊สโซลีนหรือมอเตอร์ไฟฟ้า ในการขับเคลื่อนอย่างไรก็ตามในการเลือกใช้สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือประสิทธิภาพในการขับปั๊มซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของปั๊มสูญญากาศ

4. ผลของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นก็เป็นสิ่งสำคัญเหมือนกันที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ปั๊มสูญญากาศ ความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นทั้งภายในและภายนอกปั๊ม จะมีผลทำให้สมรรถนะของปั๊มและอายุการใช้งานน้อยลง

อุณหภูมิภายในของปั๊มจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสูญญากาศสูงขึ้น ปั๊มจะดูดความร้อนที่เกิดขึ้นเอาไว้ในตัว ในระบบที่ต้องการทำงานอยู่ตลอดเวลาหรือปั๊มที่ทำสูญญากาศในระดับสูงๆ จะต้องมีการระบายความร้อน ส่วนในปั๊มที่ทำงานเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จะมีการระบายความร้อนไปด้วยในตัวระหว่างที่ทำงานอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของตัวปั๊มอาจจะเกิดจากอยู่ใกล้แหล่งความร้อน เกิดการรั่วไหลภายใน เกิดอากาศอัดตัว ความเสียดทานต่าง ๆ และการเพิ่มของอุณหภูมิรอบ ๆ ปั๊ม

5. ข้อพิจารณาอื่น ๆ การเลือกปั๊มใช้ปั๊มสูญญากาศนอกจากจะมีข้อต่าง ๆ ที่ได้แนะนำไปแล้วนั้นยังมีข้ออื่น ๆ ที่จะต้องพิจารณาดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

- คุณภาพของลม เลือกใช้ปั๊มที่ทำงานแบบไม่มีการหล่อลื่น ( Oil free ) ถ้าต้องการให้ลมที่ระบายออกจากตัวปั๊มไม่มีน้ำมัน

- อัตราการไหลของอากาศที่ราบเรียบ ปุ่มแบบโรตารีเวน โรตารีสกรู และรีเซนเนอร์ตีฟ โบลเวอร์ จะให้กระแสที่ราบเรียบ สามารถนำไปใช้ทำสุญญากาศได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องมีถังเก็บสุญญากาศก็ได้



รูปที่ 2.30 ปุ่มแบบโรตารีเวนที่มีขนาดกะทัดรัดแบบหนึ่ง

- ความยากง่ายในการบำรุงรักษา เลือกใช้ปั๊มที่ไม่ต้องการหล่อลื่นทำให้ตัดปัญหาที่ไม่ต้องการหล่อลื่น ไม่ต้องกังวลเรื่องน้ำมันหล่อลื่นในตัวปั๊ม
- เรื่องของเสียงและความสั่นสะเทือน ปั๊มแบบลูกสูบเป็นปั๊มที่มีเสียงดังมากที่สุดเพราะถูกลูกสูบเกิดการเสียดสีตลอดเวลาของช่วงชัก ปั๊มโรตารีเสียงที่เกิดจากการทำงานมีน้อย และมีอัตราการดูดอากาศออกสูง ส่วนปั๊มแบบไดอะแกรมจะเกิดเสียงดังน้อยที่สุดแต่จะใช้กับระบบที่ต้องการอัตราการดูดอากาศที่ต่ำด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันการสั่นสะเทือน และเสียงจะต้องนำมาพิจารณาคิดตั้งหาข้อจำกัดในเรื่องของเสียงและการสั่นสะเทือนเป็นเรื่องสำคัญ
- พื้นที่ที่ใช้ติดตั้งปั๊ม ถ้าพื้นที่มีจำกัดหรือน้อย ปั๊มแบบโรตารีเวนจะมีขนาดกะทัดรัดและใช้กันโดยทั่วไปมากที่สุด

## 2.16 ท่อหรือสายสุญญากาศ

การเลือกใช้สายที่ต่อออกจากปั๊มไปยังอุปกรณ์ใช้งานต่าง ๆ ควรเลือกแบบที่ไม่หักงอได้ง่าย ได้แก่ ท่อโลหะ ท่อทองแดง ท่อยางแข็งหรือท่อพลาสติก และเพื่อให้เกิดแรงกดคั่นตกร่วมน้อยที่สุด ( สุญญากาศที่สูญเสีย ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและข้อต่อต่าง ๆ จะต้องเลือกให้สัมพันธ์กับความต้องการอัตราการดูดอากาศของระบบ แรงที่ได้จากการทำงานของระบบสุญญากาศเกิดจากการทำงานของปั๊มแต่ถ้าหากระยะของท่อที่ใช้ต่อจากปั๊มไปยังจุดที่ใช้งานยาวมากเกินไป หรือเกิดการรั่วไหลแล้วจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง ดังนั้นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของอากาศเข้าสู่ระบบได้ที่ ข้อต่อซีลวาล์วและข้อต่อต่างๆ

## 2.17 ความดันตกในท่อเนื่องจากความเสียดทาน ( pipe friction loss )

เนื่องจากท่อน้ำที่ใช้ในงานทำความเย็นทำหน้าที่เป็นทางเดินของน้ำผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ และจากหลักการเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อจะทำให้เกิดความดันตกเนื่องจากความเสียดทาน โดยค่าความดันตกในท่อจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. ความเร็วของน้ำในท่อ ( water velocity ) ค่าความดันตกในท่อจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วน้ำในท่อ คือยิ่งมีค่าความเร็วสูง ค่าความเสียดทานก็ยิ่งมีค่าสูงขึ้น และจะมีผลถึงการเกิดการกัดกร่อนภายในท่อสูงขึ้นด้วย จึงแนะนำให้ใช้ความเร็วของน้ำในท่อที่เหมาะสม ดังตารางที่ 9.1 และห้ามใช้ความเร็วเกินค่ากำหนดในตารางที่ 9.2 เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนภายในท่อ

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความเร็วของน้ำในท่อ เป็นฟุต/วินาที

Service	Velocity Range ( fps )
Pump discharge	8 – 12
Pump suction	4 – 7
Drain line	4 – 7
Header	4 – 15
Riser	3 – 10
General service	5 – 10
City water	3 – 7

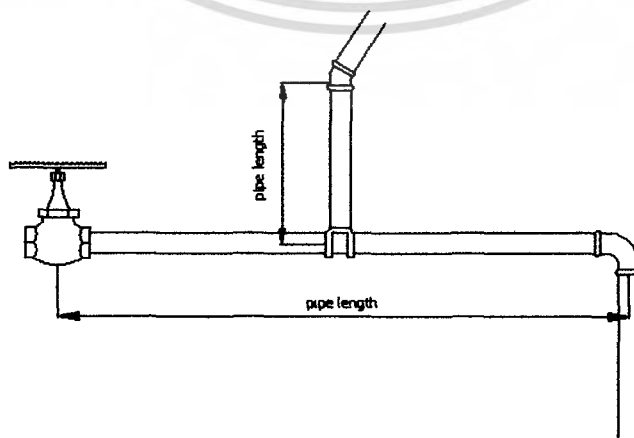
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความเร็วสูงสุดของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในท่อ เป็นฟุต/วินาที  
(Carrier-Handbook)

Normal Operation ( hr/yr )	Water Velocity
1500	12
2000	11.5
3000	11
4000	10
6000	9
8000	8

2. ขนาดของท่อ ( pipe diameter ) เนื่องจากการเลือกขนาดของท่อน้ำจะมีผลต่อค่าความเสียหายและค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งาน เช่น ถ้าเลือกขนาดของท่อเล็กลงจะประหยัดราคาท่อลง แต่จะเกิดความดันตกเนื่องจากความเสียหายเพิ่มขึ้น ต้องใช้ปั๊มและมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ เสียค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องมากขึ้นหรือถ้าเลือกท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะเสียค่าใช้จ่ายเป็นราคาท่อเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเสียหายจะลดลง ทำให้สามารถลดขนาดของปั๊มและมอเตอร์ลงได้ ในการออกแบบท่อน้ำจึงต้องคำนึงถึงขนาดของท่อที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากส่วนประกอบต่าง ๆ ดังกล่าว

3. ความยาวท่อ ( pipe length ) เนื่องจากความเสียหายในท่อส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อน้ำในระบบ ซึ่งจะหาค่าได้จากความยาวของท่อน้ำในแนวตรง และคำนวณหาเป็นค่าความยาวสมมูลหรือความยาวเทียบเท่ากับของวาล์ว ข้อต่อ ข้องอ และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ในระบบท่อ โดยอาศัยตารางที่ 9.3 และ 9.4 สำหรับวิธีการวัดค่าความยาวท่อในแนวตรงนั้น สามารถวัดหาค่าได้โดยวัดระยะระหว่างศูนย์กลางของวาล์วและข้อต่อต่าง ๆ ดังรูปที่ 9.7



รูปที่ 2.31 แสดงวิธีการวัดความยาวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Globe†	60°-Y	45°-Y	Angle†	Gate††	Swing Check‡	LR Check
Nominal Pipe or Tube Size (in.)							
1/2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
3/4	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
1 1/4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
1 1/2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
2	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
2 1/2	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
3 1/2	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
6	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
8	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
10	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
12	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
14	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
16	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
18	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
20	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
24	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความยาวสมมูลของวาล์วแบบต่างๆ เป็นฟุต

Nominal Pipe or Tube Size (in.)	Standard Bend Elbows						Flow-Thru Branch	Smooth Bend Tees		
	90° Std*	90° long Rad.*	90° Street*	90° Std*	45° Street*	180° Std*		Straight-Thru Flow		
								No Reduction	Reduced 1/4	Reduced 1/2
1/2	1.4	0.9	2.3	0.7	1.1	2.3	2.7	0.9	1.2	1.4
3/4	1.6	1.0	2.5	0.8	1.3	2.5	3.0	1.0	1.4	1.6
1	1.7	1.1	2.7	0.9	1.4	2.7	3.2	1.1	1.5	1.7
1 1/4	2.0	1.3	3.0	1.1	1.6	3.0	3.5	1.2	1.6	1.9
1 1/2	2.2	1.4	3.2	1.2	1.7	3.2	3.7	1.3	1.7	2.0
2	2.6	1.7	3.6	1.3	2.0	3.6	4.1	1.4	1.9	2.2
2 1/2	3.0	1.9	4.0	1.5	2.2	4.0	4.5	1.5	2.0	2.4
3	3.3	2.0	4.3	1.6	2.3	4.3	4.8	1.6	2.1	2.5
3 1/2	3.5	2.1	4.5	1.7	2.4	4.5	5.0	1.7	2.2	2.6
4	3.7	2.2	4.7	1.8	2.5	4.7	5.2	1.8	2.3	2.7
5	4.0	2.3	5.0	1.9	2.6	5.0	5.5	1.9	2.4	2.8
6	4.2	2.4	5.2	2.0	2.7	5.2	5.7	2.0	2.5	2.9
8	4.5	2.5	5.5	2.1	2.8	5.5	6.0	2.1	2.6	3.0
10	4.8	2.6	5.8	2.2	2.9	5.8	6.3	2.2	2.7	3.1
12	5.0	2.7	6.0	2.3	3.0	6.0	6.5	2.3	2.8	3.2
14	5.2	2.8	6.2	2.4	3.1	6.2	6.7	2.4	2.9	3.3
16	5.4	2.9	6.4	2.5	3.2	6.4	6.9	2.5	3.0	3.4
18	5.6	3.0	6.6	2.6	3.3	6.6	7.1	2.6	3.1	3.5
20	5.8	3.1	6.8	2.7	3.4	6.8	7.3	2.7	3.2	3.6
24	6.2	3.3	7.2	2.9	3.6	7.2	7.7	2.9	3.4	3.8

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความยาวสมมูลของข้อต่อแบบต่างๆ เป็นฟุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal Pipe or Tube Size (in.)	Elbow Radius			
	90° ER	60° ER	45° ER	30° ER
1/8	2.7	1.1	0.6	0.3
1/4	3.0	1.3	0.7	0.4
3/8	4.0	1.6	0.9	0.5
1	5.0	2.1	1.0	0.7
1 1/4	7.0	3.0	1.5	0.9
1 1/2	8.0	3.4	1.8	1.1
2	10	4.5	2.3	1.3
2 1/2	12	5.2	2.8	1.7
3	15	6.4	3.2	2.0
3 1/2	16	7.3	4.0	2.4
4	21	8.6	4.5	2.7
5	25	11	5.0	3.2
6	30	13	7.0	4.2
8	40	17	9.0	5.1
10	50	21	12	7.2
12	60	26	13	8.0
14	68	29	15	9.0
16	78	31	17	10
18	86	37	19	11
20	100	41	22	13
24	115	49	26	16

\* R/D approximately equal to 1 † R/D approximately equal to 1.5

## ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความยาวสมมูลของข้อต่อแบบต่างๆ เป็นฟุต

### 2.18 เสถียรภาพในระบบท่อ

สำหรับการไหลผ่านระบบท่อซึ่งประกอบด้วยท่อตรง ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว การสูญเสียความดันหรือเสถียรภาพของของไหลเนื่องจากความเสียดทานในท่อที่กระทำต่อของไหลขณะไหลเต็มท่อเรียกว่า การสูญเสียหลัก (major loss) ส่วนเสถียรภาพของของไหลเนื่องจากการไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ข้อเพิ่มหรือวาล์วนั้น เรียกว่า การสูญเสียรอง (minor loss) และ เสถียรภาพรวม (total head loss,  $h_{loss,t}$ ) ก็คือผลรวมของเสถียรภาพหลัก (major head loss,  $h_{loss,f}$ ) และเสถียรภาพรอง (minor head loss,  $h_{loss,m}$ )

$$h_{loss,t} = h_{loss,f} + h_{loss,m} \quad (2.10)$$

### 6.5.1 เสถียรภาพหลัก

สำหรับการไหลเต็มท่อภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และยาว  $L$  ด้วยความเร็วเฉลี่ย  $V$  สำหรับของไหลที่มีความหนืดจะทำให้เกิดความเสียดทานต่อการไหลขณะไหลผ่านท่อตรง เสถียรภาพหลักจะใช้สมการคาร์ซี-ไวส์บาคในรูปของสมการ

$$h_{loss,f} = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.5.2 เสดสูญเสียรอง

สำหรับเสดสูญเสียรองเป็นผลมากจากการไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม หรือวาล์ว จะเขียนสมการในรูปของสมการ

$$h_{\text{loss},m} = K \frac{\bar{V}^2}{2g} = f \frac{L_e \bar{V}^2}{D 2g} \quad (2.12)$$

โดยที่  $K$  คือสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) นอกจากนี้อาจพิจารณาการสูญเสียเสดความดันเทียบเท่ากับการสูญเสียเสดความดันภายในท่อตรงแทน โดยจะกำหนด  $L_e$  เป็นความยาวสมมูล (equivalent length) และจะพบว่า

$$L_e = \frac{KD}{f} \quad (2.13)$$

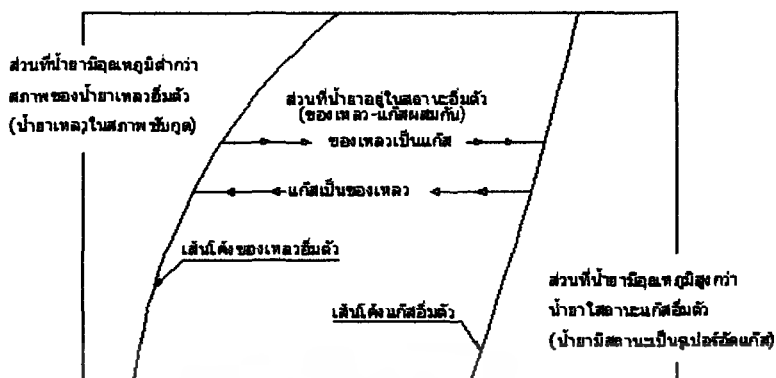
โดยค่าทั่วไปของ  $K$  นี้ ขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ในระบบท่อที่ไหลผ่าน และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการไหล ( $Re$ ) นั่นคือ  $K = f$  (รูปทรงเรขาคณิต,  $Re$ ) อย่างไรก็ตาม ในการไหลที่มีผลของแรงเฉื่อยมากกว่าผลของแรงเนื่องจากความหนืด ( $Re$  มีค่าสูง) จะพบว่าความดันลดหรือเสดสูญเสียนั้น มีความสัมพันธ์กับความดันพลวัต ( $\rho V^2 / 2$ ) โดยตรง ดังนั้นสำหรับตัวประกอบความเสียคานต่อการไหลที่มี  $Re$  สูงมากภายใต้การไหลเต็มท่อนั้นจะขึ้นอยู่กับ  $Re$  เพราะฉะนั้นจึงพิจารณา  $K = f$  (รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ในระบบท่อ)

สมการพลังงานที่ใช้วิเคราะห์สำหรับการไหลผ่านระบบท่อ อยู่ในรูปของ

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + Z_2 + \sum f \frac{L_e \bar{V}^2}{D 2g} + \sum K \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.14)$$

### 2.19 รายละเอียดของโครงสร้างของ P-h ไคอะแกรม

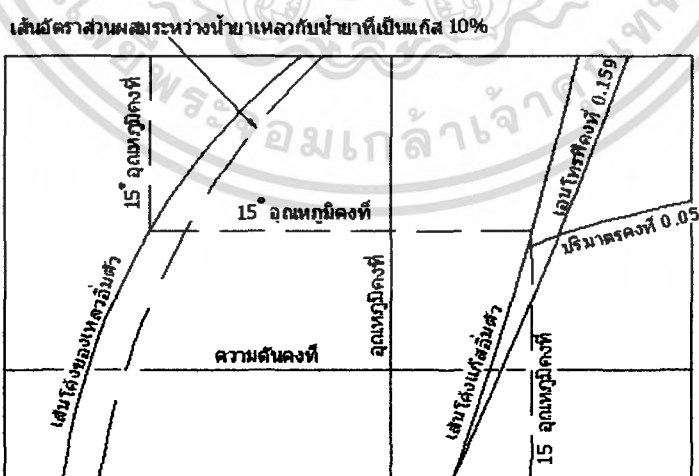
การเปลี่ยนแปลงของสารทำความเย็นที่เป็นก๊าซในระบบการทำความเย็นนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันภายในระบบ ไคอะแกรมความดัน - เอนทัลปีนี้ เป็นการแสดงให้เราเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารทำความเย็นได้ดีที่สุด เรียกว่า Mollier Diagram ภายในไคอะแกรมนีเอนทัลปี (Enthalpy) ใช้อักษรย่อว่า  $h$  แสดงด้วยแกนอนและความดันสมบูรณม์ ใช้อักษรย่อ  $P$  จะแสดงด้วยแนวตั้ง ส่วนเส้นอื่นๆ เช่น เส้นความดัน - เอนทัลปี เส้นของเหลวอิ่มตัว เส้นก๊าซอิ่มตัวและเส้นอื่นๆ จะแสดงไว้หมดในไคอะแกรม



รูปที่ 2.32 โครงสร้าง P-h ไคอะแกรม

โครงสร้าง P-h ไคอะแกรม ได้แสดงดังรูปที่ 2.32 ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนที่สารทำความเย็นมีสภาพอิ่มตัวซึ่งอยู่ตรงกลาง ส่วนที่สามารถทำความเย็นที่มีสภาพเป็นของเหลวพร้อมที่จะระเหยหรือเดือดเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ในทางกลับกันสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอพร้อมที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลว
2. ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพสารทำความเย็นอิ่มตัวซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวอืดตัว (Subcooled)
3. ส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสภาพสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัว ซึ่งอยู่ทางด้านขวาของสารทำความเย็นซึ่งมีสถานะเป็นไอคง ( Superheat ) รายละเอียดของโครงสร้าง P-h ไคอะแกรม



รูปที่ 2.33 โครงสร้าง P-h ไคอะแกรมแสดงความดันคงที่ อุณหภูมิกคงที่ ปริมาตรคงที่ เส้นเออนทาลปีคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เส้นความดันสมบูรณ์คงที่ ( constant pressure ) มีหน่วยเป็น kPa เป็นเส้นที่อยู่ในแนวนอนตลอด

2. เส้นอัตราส่วนระหว่างสารทำความเย็นกับสารทำความเย็นที่เป็นไอ มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ เป็น

เส้นโค้งในแนวตั้ง ซึ่งอยู่ในส่วนกลาง 11 เส้น แต่ละเส้นจะบ่งบอกถึงจำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารทำความเย็นอิ่มตัวที่มีสภาพเป็นของเหลวพร้อมที่จะระเหย หรือเดือดเป็นไอ ในทางกลับกันไอที่จะกลั่นตัว เป็นของเหลวเส้นซ้ายมือสุดเป็นเส้นของเหลวอิ่มตัว ส่วนเส้นที่อยู่ขวามือสุดเป็นเส้นไออิ่มตัว

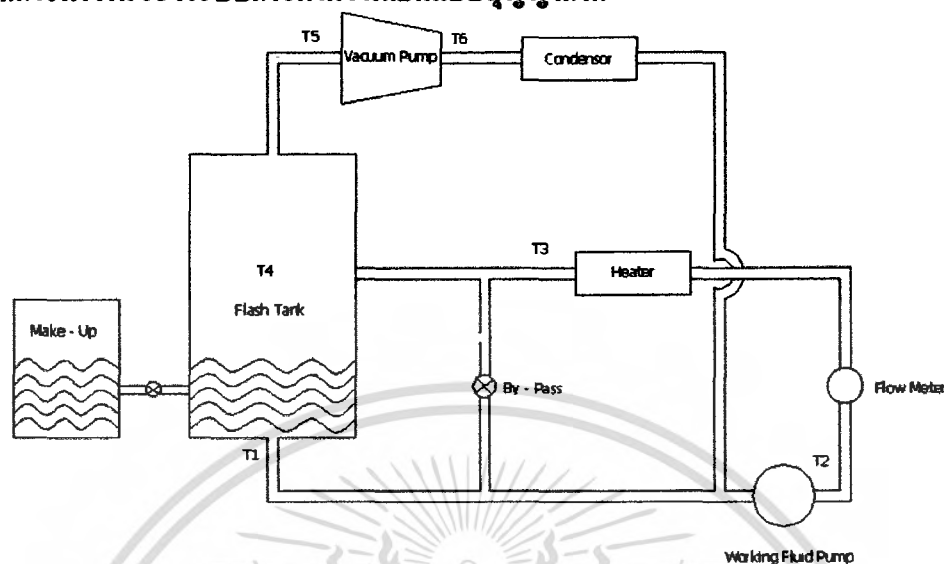
3. เส้นอุณหภูมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส เป็นเส้นประ เส้นอุณหภูมินี้จะอยู่ในแนวนอนเฉพาะที่สารทำความเย็นมีสภาพอิ่มตัวเท่านั้นจะสูงขึ้น เมื่อสารทำความเย็นมีสภาพเป็นของเหลวอิ่มตัว หรือมีอุณหภูมಿನ้อยกว่าอุณหภูมิจึงอิ่มตัว และจะต่ำลงเมื่อสารทำความเย็นมีสภาพเป็นไอคง หรือมีอุณหภูมิตสูงกว่าอุณหภูมิจึงอิ่มตัว

4. เส้นเอนทัลปีคงที่ ( Constant Enthalpy ) มีหน่วยเป็น kJ/kg เป็นเส้นที่อยู่ในแนวตั้ง

5. เส้นปริมาตรจำเพาะ ( Constant Volume ) มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$  เป็นเส้นโค้งในแนวนอน ซึ่งอยู่ในส่วนที่มีอุณหภูมิตสูงกว่าน้ำยาที่มีสภาพเป็นไออิ่มตัว

6. เส้นเอนโทรปีคงที่ ( Constant Entropy ) มีหน่วยเป็น kJ/kg-K เป็นเส้นทแยงมุมในแนวตั้งฉากขึ้นเป็นเส้น ไออิ่มตัว ซึ่งอยู่ในส่วนที่มีอุณหภูมิตสูงกว่าไออิ่มตัว เส้นนี้แสดงการอัดตัวของสารทำความเย็นที่มีสภาพเป็น ไอ ให้มีความดันสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีอุณหภูมิตสูงขึ้น โดย ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน

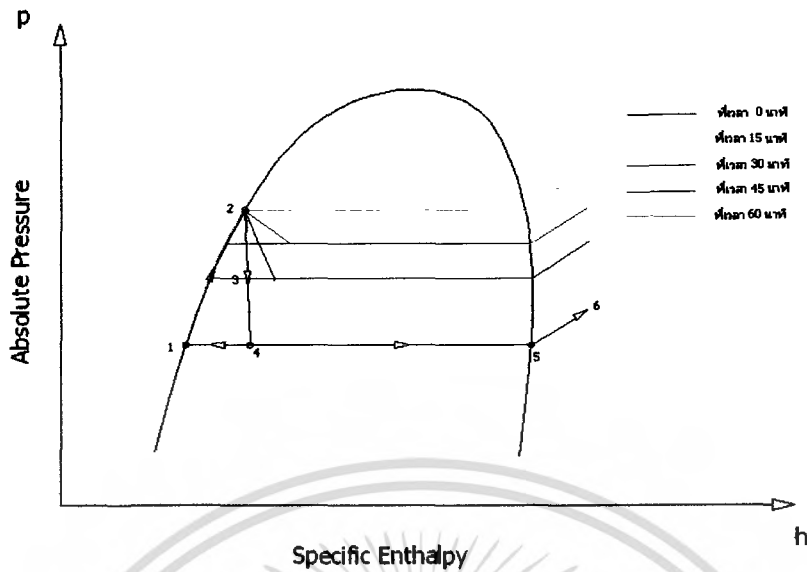
## 2.20 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบสุญญากาศ



รูปที่ 2.34 ระบบทำความเย็นแบบสุญญากาศ

การทำงานของระบบ vacuum refrigeration จะเป็นการทำงานที่มีระบบการทำงานคล้ายคลึงกับระบบทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำ (Steam jet refrigeration system) ในระบบทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำจะมีการทำงาน โดยระบบจะใช้ไอน้ำที่มีความดันสูงฉีดผ่านห้องระเหยเพื่อดึงเอาความดันภายในห้องระเหย จนทำให้ห้องระเหยมีความดันต่ำ แต่ในการทดลองนี้การทำงานภายในระบบจะใช้ปั๊มสุญญากาศในการดูดเอาความดันภายในห้องระเหยแทน

การทำงานของระบบนี้จะเป็นการประยุกต์เอาคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ คือ การนำเอาคุณสมบัติการเดือดของสารทำความเย็นที่เป็นน้ำ การเดือดของน้ำจะมีค่าแปรผันตามความดันบรรยากาศปกติ น้ำจะมีจุดเดือดที่อุณหภูมิที่  $100^{\circ}\text{C}$  และที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศน้ำจะมีจุดเดือดต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ก็สามารถนำทฤษฎีนี้มาประยุกต์ใช้กับการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ซึ่งมีหลักการการทำงานดังนี้ ทำการเติมน้ำเข้าไปในระบบและปริมาณน้ำในถังระเหย (Flash tank) ตามปริมาณของการทดลอง และทำการเดินเครื่อง VACUUM PUMP ทำสุญญากาศเข้าไปในระบบ โดยต้องลดความดันในระบบให้ได้มากที่สุด คือต้องทำให้ในระบบเกิดค่าความดันสัมบูรณ์น้อยที่สุด หลังจากนั้นเดินปั๊มน้ำเพื่อทำให้น้ำภายในระบบเกิดการไหลไปในระบบต่างๆ เมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Ejector ก็จะทำให้น้ำเกิดเป็นฝอยละอองประกอบกับความดันสัมบูรณ์ระบบต่ำก็จะทำให้น้ำเกิดการระเหยตัวดีขึ้น และสามารถดึงเอาความร้อนแฝงในห้องระเหยไปใช้ในการระเหยตัวของน้ำ ก็จะทำให้อุณหภูมิในห้องระเหยลดต่ำลง ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ต่ำลงนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้



รูปที่ 2.35 ไซโครเมติกภาคของกระบวนการทำความเย็น

1 → 2 กระบวนการอัดตัวเกิดขึ้นจากการทำงานของปั๊มสารทำความเย็น โดยของเหลวจากห้องระเหย จะถูกปั๊มสารทำความเย็นอัดให้มีความดันสูงขึ้น ตามกระบวนการ ไอเซนทรอปิก (Constant entropic) หรือแบบเอเดียบาติกแบบไม่มีความเสียด (Frictionless adiabatic process) ผลจากการทำงานของปั๊มสารทำความเย็นนอกจากจะทำให้ความดันของสารทำความเย็นของระบบเพิ่มสูงขึ้นยังเป็นผลให้ค่าเอนทาลปีเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณความร้อนเทียบเท่ากับพลังงานกล เราเรียกผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอัดของปั๊มสารทำความเย็นว่า ความร้อนจากการอัด (Heat of compression)

2 → 3 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการทำงานของถังลดความดัน โดยเริ่มจากสารทำความเย็น ที่มีสถานะเป็นของเหลวจากปั๊มสารทำความเย็นถูกส่งผ่านถังลดความดัน เพื่อลดความดัน ผลของการลดความดันจะทำให้สารทำความเย็นส่วนหนึ่งเปลี่ยนสถานะเป็นไอ จากนั้นมีการเพิ่มความร้อนเข้าไปภายในระบบตรงระหว่างช่วง ผลของการเพิ่มความร้อนเข้าไปนั้นทำให้ความดันและเอนทาลปีเพิ่มตามไปด้วย แล้วทำการให้ความร้อนเข้าไปเรื่อยๆ จนระบบไม่สามารถทำความเย็นได้เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (C.O.P.) ที่เครื่องทำความเย็นนี้จะสามารถทำได้

3 → 4 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในห้องระเหย จะมีสถานะการกลายเป็นไอจากคลื่นลดความดันและอีกสถานะหนึ่งจะเป็นสถานะของของเหลว ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะผสมกันอยู่ในห้องระเหย ซึ่งในกระบวนการที่มีของเหลวภายในระบบจะถูกส่งผ่านไปยังปั๊มสารทำความเย็น (4 → 1) เพื่อที่สารทำความเย็นจะได้ไปหมุนวนภายในระบบ และในส่วนที่เป็นไอก็จะดูดความร้อนภายในห้องระเหยเพื่อใช้ในการระเหยตัวของสารทำความเย็นจนกลายเป็นไออิ่มตัวที่กระบวนการ (4 → 5) หลังจากนั้นจะถูกบีบอัดโดยคอมเพรสเซอร์ไออิ่มตัวไปสู่บรรยากาศที่กระบวนการ (5 → 6) ซึ่งผลจากการดูดความร้อนภายในระบบนี้ก็จะทำให้อุณหภูมิภายในห้องระเหยลดต่ำลงเป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในห้องระเหยต่ำลงไปด้วย น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำลงก็จะนำไปใช้ประโยชน์ที่เหมาะสมต่อไป

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$h = \frac{W_e}{A_s(T_s - T_b)}$$

เมื่อ

$$T_b = \frac{(T_{m,o} + T_{m,i})}{2}$$

$$W_e = VI$$

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $W/m^2.K$

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$T_{m,o}$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออก มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_{m,i}$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้า มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_b$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าและทางออกของของไหลมีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$W_e$  คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $W$

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $A$

$V$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $V$

ความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก มีหน่วยเป็น K/W

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

ค่าความต้านทานการพาความร้อนโดยบังคับ มีหน่วยเป็น K/W

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1}$$

ค่าความต้านทานรวม มีหน่วยเป็น K/W

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{conv}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ มีหน่วยเป็น W

$$Q_r = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}}$$

ประสิทธิภาพการทำความเย็น (C.O.P.)

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{EER}{1Wh}$$

$$1Wh = 3.412Btu$$

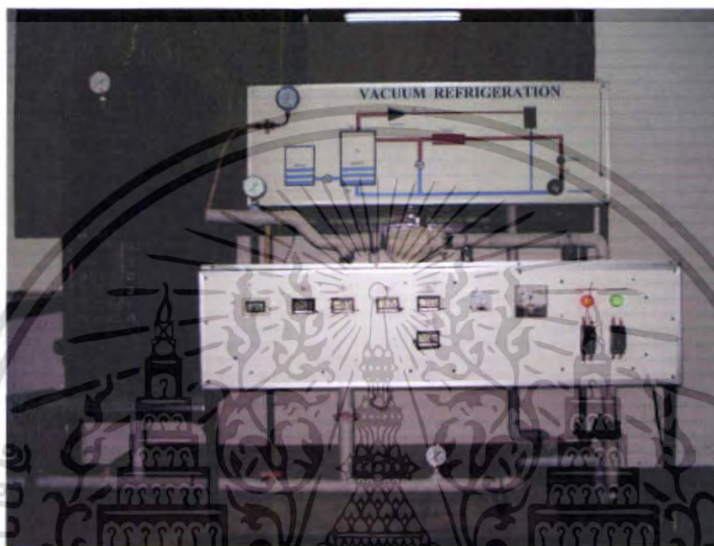
$$EER = 3.1412COP_R$$

เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่จะมีค่า EER อยู่ระหว่าง 8 และ 12 (COP<sub>R</sub> = 2.3 – 3.5)

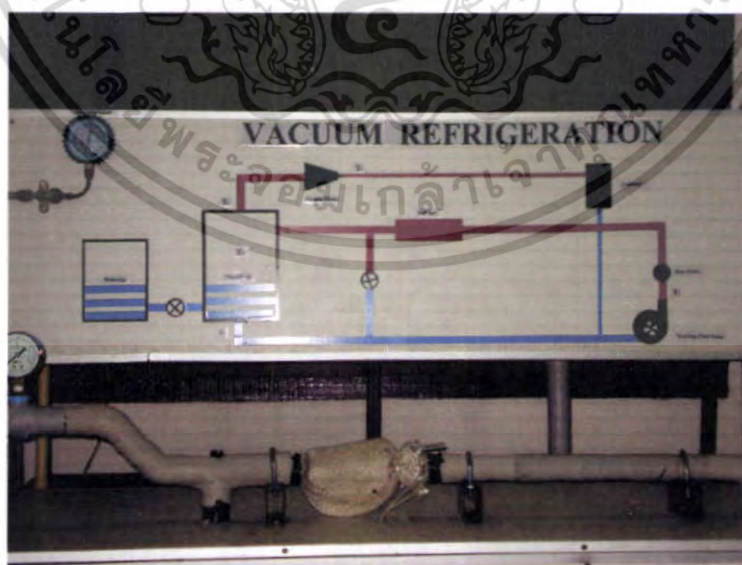
### บทที่ 3

## อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

### 3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของชุดทดสอบ



รูปที่ 3.2 บอร์ดแสดงวงจรการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสูญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ติดตั้งในชุดทดลองวัฏจักรการทำความเย็นแบบสุญญากาศ มีอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่

1. ห้องระเหย (Flash Tank) ใช้วัสดุอลูมิเนียมหนา มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีปริมาตรประมาณ 110 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ภายในจะมีท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด  $\frac{1}{2}$  นิ้ว เจาะรูภายในท่อเป็นรูพรุน เพื่อเป็นทางออกของสารทำความเย็น และยังทำชุดดักไอสารทำความเย็นเข้าไว้ด้วยเพื่อที่จะเป็นการดักไม่ให้สารทำความเย็นไหลออกไปนอกระบบ มีการควบคุมปริมาณของสารทำความเย็นให้คงที่ด้วยวาล์วลูกกลอย



รูปที่ 3.3 ห้องระเหย

2. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นในสถานะไอ โดยคู่อไหลของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิและความดันต่ำ แล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น เป็นปั๊มแบบโรตารี อัตราการไหลโดยปริมาตร 7.2 กิโลกรัม/ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปั๊มสารทำความเย็น ( Working fluid Pump ) ทำหน้าที่ ให้สารทำความเย็น หมุนเวียนภายในระบบการทำความเย็น และทำหน้าที่นำสารทำความเย็นกลับสู่ห้องระเหย ซึ่งมี อัตราการไหลโดยปริมาตร 21.66 ลิตร/นาที



รูปที่ 3.5 ปั๊มสารทำความเย็น

4. ถังเติมสารทำความเย็น ( Make up ) มีหน้าที่เติมสารทำความเย็นให้แก่ระบบให้มีปริมาตรที่คงที่ ทำด้วยวัสดุอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีปริมาตรประมาณ 20 ลิตร



รูปที่ 3.6 ถังเติมสารทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. **มาตรวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น ( Flow rate Meter )** มีหน้าที่วัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น ( ของเหลว ) ภายในมีหน่วยวัดเป็น  $m^3$  สามารถวัดเป็นหน่วยทศนิยมได้ถึง  $0.001 m^3$



รูปที่ 3.7 มาตรวัดอัตราการไหล

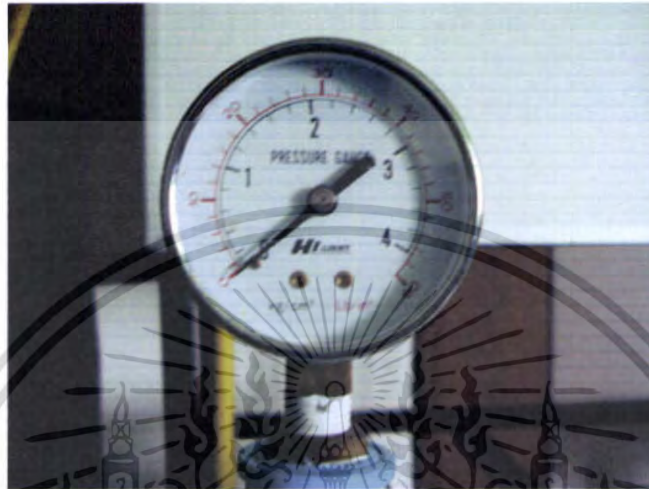
6. **เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล ( Digital Thermometer )** สำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถวัดได้เป็นจุดทศนิยมได้ 1 ตำแหน่ง มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เกจวัดความดัน ( pressure Gauge ) มีหน้าที่วัดความดันภายในระบบการทำ ความเย็นแบบสุญญากาศ หน่วยเป็นทั้ง  $\text{kg/cm}^2$  และ psi



รูปที่ 3.9 เกจวัดความดัน

8. เกจวัดความดันสุญญากาศ ( Vacuum Gauge ) มีหน้าที่วัดการเป็นสุญญากาศ ภายในระบบ วัดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 0-760 mm-Hg



รูปที่ 3.10 เกจวัดความดันสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ตัวกรองความชื้น (dryer) ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้ไอของสารทำความเย็นเข้าไปในปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 3.11 ตัวกรองความชื้น

10. แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์



รูปที่ 3.12 แอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์

11. สารทำความเย็น  $\text{CH}_3\text{OH}$ (Alcohol), R-718( Water ) เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเป็นสารที่มีความระเหยตัวสูง

12. ท่อทางเดิน (Tubing) แบ่งออกเป็นท่อ PVC ท่อชนิดอ่อน และท่อทองแดง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 ทดลองปริมาตรที่เหมาะสมกับการทดลอง

1. ใส่สารทำความเย็น ( น้ำ ) ในห้องระเหย 2 ลิตร
2. เปิดปั๊มสุญญากาศให้ได้อุณหภูมิต่ำสุด
3. จดบันทึกสารทำความเย็นที่อยู่ในห้องระเหยทุกๆ 10 นาที
4. แล้วเปลี่ยนสารทำความเย็นเป็น 5 ลิตร และ 10 ลิตร แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 2-3
5. แล้วเปรียบเทียบค่าการทำความเย็นว่าปริมาณสารทำความเย็นที่ปริมาตรเท่าไรที่ความเย็นดีที่สุด
6. ทำการเปลี่ยนสารทำความเย็นเป็นแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 1-4

#### 3.2.2 ทดลองปริมาตรสารทำความเย็น ( สารทำความเย็นที่เหมาะสม ) ในแต่ละความดันสุญญากาศ

1. เมื่อได้ปริมาณสารทำความเย็นที่ดีแล้ว
2. นำสารทำความเย็น ( น้ำ ) มาทดลอง
3. เปิดปั๊มสุญญากาศทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. ทำการจดบันทึกค่าการทำความเย็นของสารทำความเย็นในห้องระเหย
5. เปลี่ยนสารทำความเย็นเป็นแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 1-4

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลอง 2 สารทำความเย็นมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลองน้ำ R-718( Water )

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองปริมาณน้ำในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)

เวลา ( min )	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย ( T <sub>1</sub> )		
	2 ลิตร	5 ลิตร	10 ลิตร
0	25.7	25.8	25.7
15	17.2	20.4	21.3
30	14.3	16.5	18.6
45	10.1	13.6	16.4
60	9.6	10.4	14.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของระบบโดยใช้น้ำ

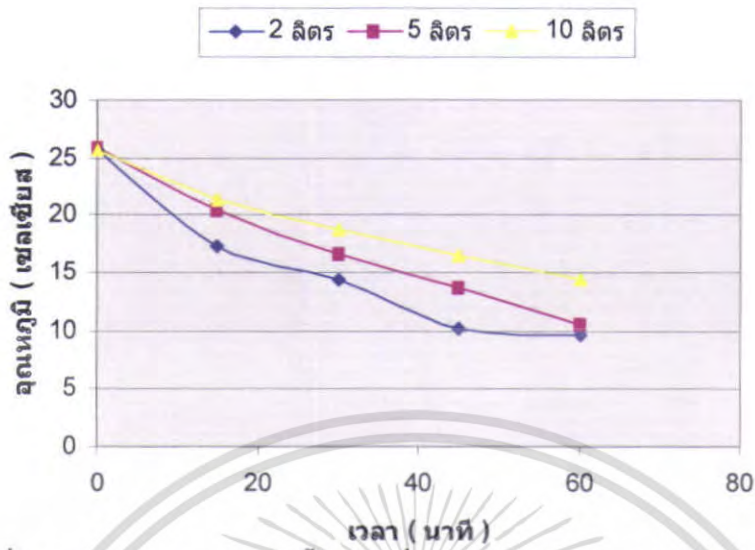
เวลา ( min )	T <sub>1</sub> ( °C )	T <sub>2</sub> ( °C )	T <sub>3</sub> ( °C )	T <sub>4</sub> ( °C )	T <sub>5</sub> ( °C )	T <sub>6</sub> ( °C )
0	9.6	10.5	13.2	17.7	26	32
10	10.4	11.2	13.5	18.0	26	32
20	11.5	12.2	13.7	18.4	26	32
30	13.5	13.5	14.6	19.0	26	32
40	15.5	15.5	16.4	19.7	26	32
50	17.6	17.6	17.6	19.7	26	32
60	18.2	19.3	19.2	19.7	26	32
70	18.7	19.3	19.3	20.4	26	32
80	19.4	19.4	19.4	19.8	26	32
90	19.4	19.4	19.4	19.8	26	32
100	19.4	19.4	19.4	19.9	26	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

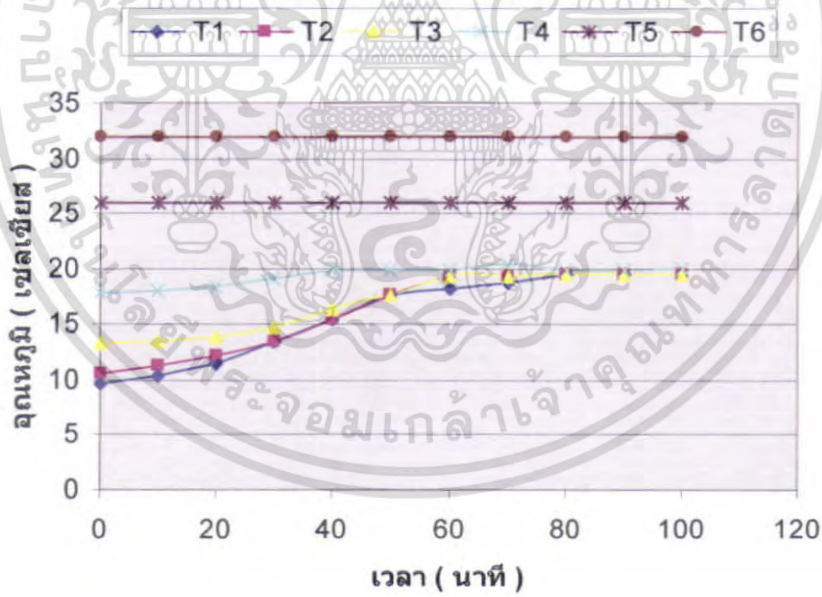
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณระบบโดยใช้น้ำ

เวลา ( min )	$w_{in}$ ( Watt )	R.E. ( Watt )	C.O.P.	EER
0	244	173.81	0.712	2.237
10	244	223.33	0.915	2.874
20	244	272.604	1.12	3.509
30	244	321.705	1.32	4.142
40	244	370.645	1.52	4.770
50	244	419.620	1.72	5.402
60	244	468.578	1.92	6.032
70	244	517.790	2.122	6.666
80	244	566.969	2.323	7.299
90	244	566.969	2.323	7.299
100	244	566.969	2.323	7.299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

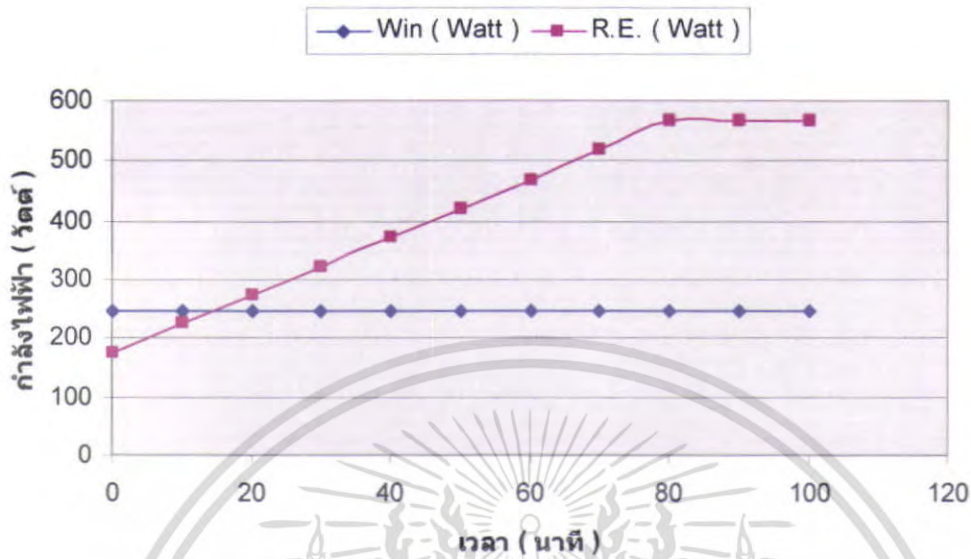


รูปที่ 4.1 แสดงผลจากปริมาณน้ำต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ ( ไม่ผ่านระบบ )

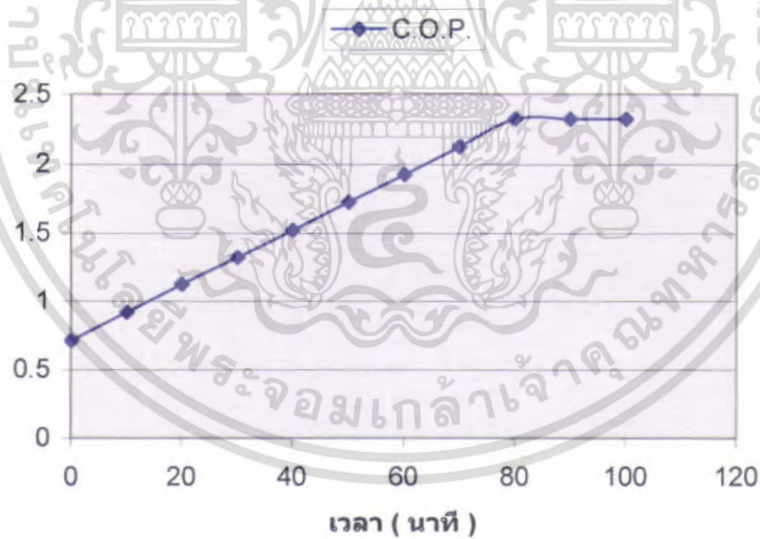


รูปที่ 4.2 แสดงผลจากปริมาณน้ำต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

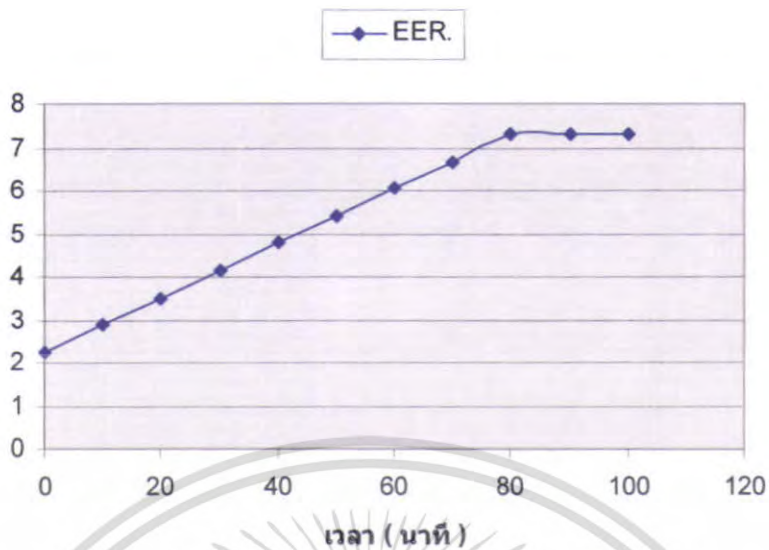


รูปที่ 4.3 แสดงผลของ R.E. และ Win ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.4 แสดงค่า C.O.P. ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงค่า EER ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองของแอลกอฮอล์

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองปริมาณแอลกอฮอล์ในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)

เวลา (min)	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย ( $T_1$ )		
	2 ลิตร	5 ลิตร	10 ลิตร
0	25	25	25
15	14.4	18.6	20.1
30	9.4	16.4	18.6
45	8.6	14.5	15.3
60	7.3	13.2	13.8

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของระบบโดยใช้แอลกอฮอล์

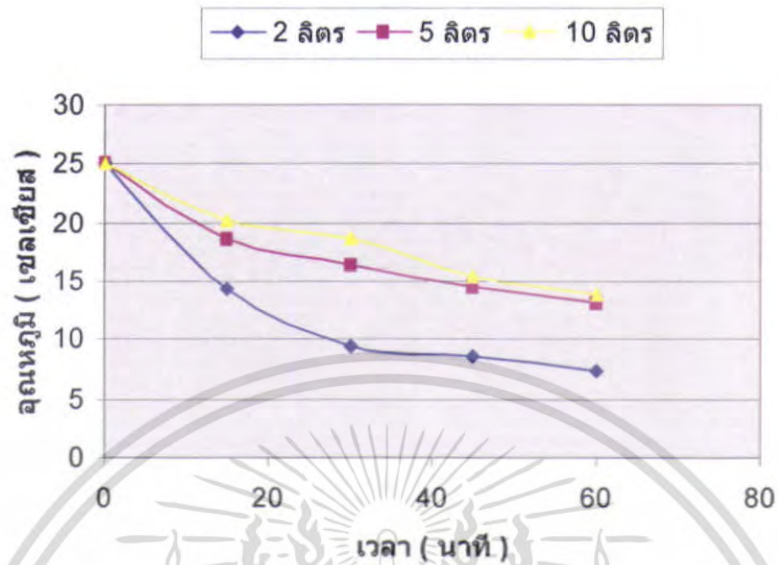
เวลา (min)	$T_1$ ( $^{\circ}C$ )	$T_2$ ( $^{\circ}C$ )	$T_3$ ( $^{\circ}C$ )	$T_4$ ( $^{\circ}C$ )	$T_5$ ( $^{\circ}C$ )	$T_6$ ( $^{\circ}C$ )
0	7.3	8.8	10.4	17.7	24	31
10	9.6	11.2	12.1	18.1	24	31
20	11.9	12.2	12.6	18.0	24	31
30	12.8	13.1	13.2	19.3	24	31
40	13.6	13.8	14.1	19.5	24	31
50	14.1	14.4	14.8	19.7	24	31
60	15.1	15.1	15.1	19.6	24	31
70	15.3	15.3	15.3	19.7	24	31
80	15.7	15.8	15.8	19.7	24	31
90	15.8	15.8	15.8	19.8	24	31
100	16.1	16.2	16.2	19.8	24	31
110	16.1	16.2	16.2	19.8	24	31
120	16.1	16.2	16.2	19.8	24	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

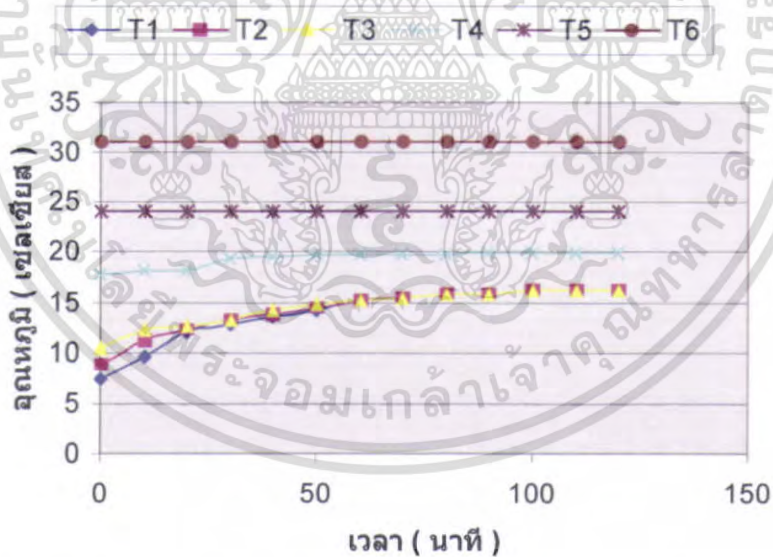
**ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณระบบโดยใช้แอลกอฮอล์**

เวลา ( min )	$w_{in}$ ( Watt )	R.E. ( Watt )	C.O.P.	EER
0	244	174.47	0.715	2.25
10	244	223.49	0.915	2.877
20	244	272.709	1.12	3.511
30	244	321.86	1.319	4.144
40	244	370.95	1.520	4.775
50	244	420.084	1.722	5.408
60	244	469.205	1.923	6.040
70	244	518.355	2.124	6.673
80	244	567.457	2.325	7.305
90	244	616.616	2.527	7.938
100	244	665.720	2.730	8.570
110	244	665.720	2.730	8.570
120	244	665.720	2.730	8.570

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

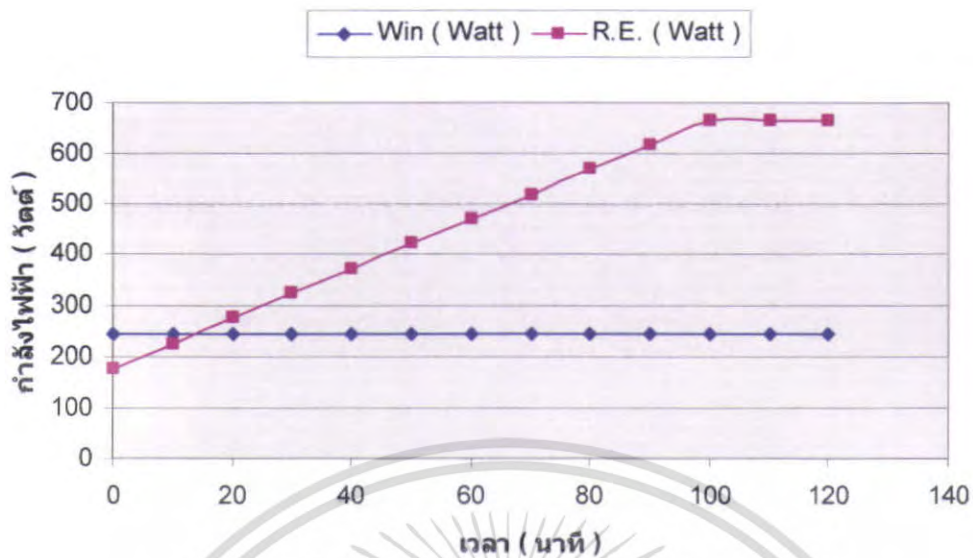


รูปที่ 4.6 แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ ( ไม่ผ่านระบบ )

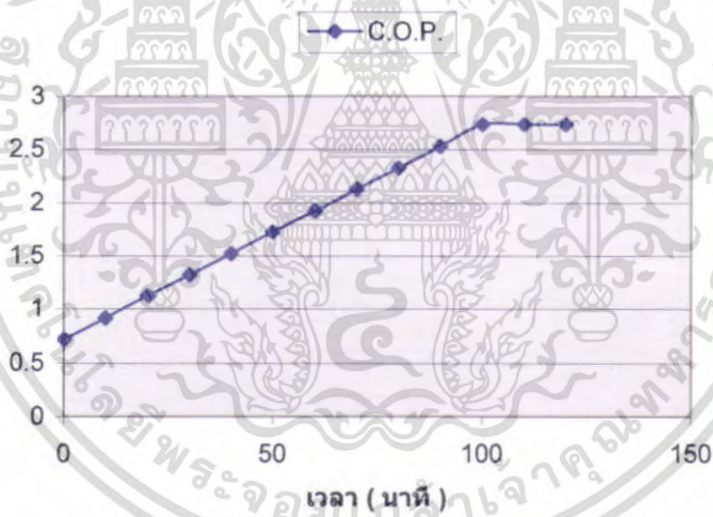


รูปที่ 4.7 แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่างๆ ที่มีผลเวลาและอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

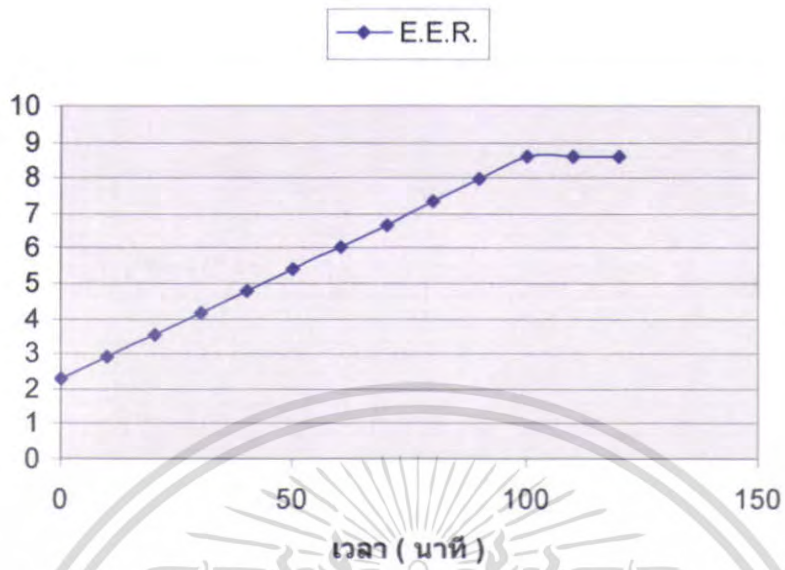


รูปที่ 4.8 แสดงผลของ R.E. และ Win ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.9 แสดงค่า C.O.P. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน

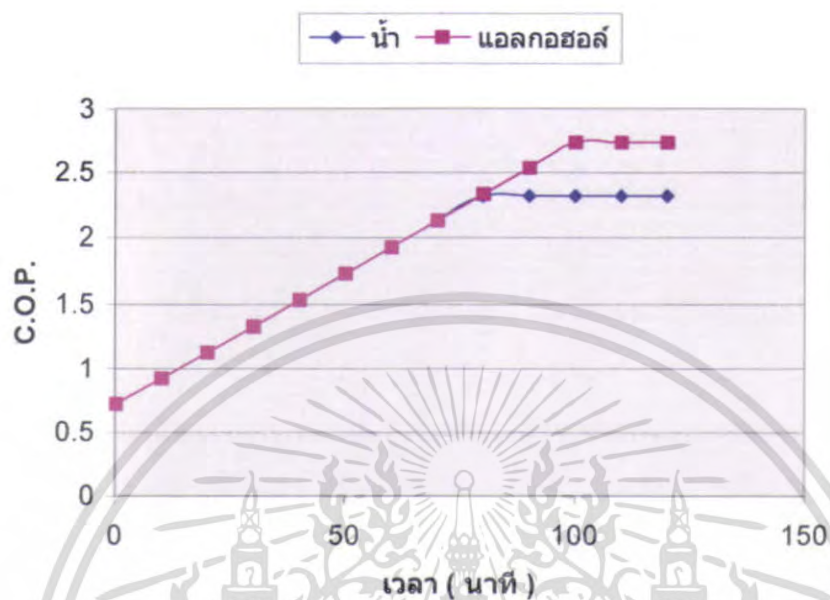
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



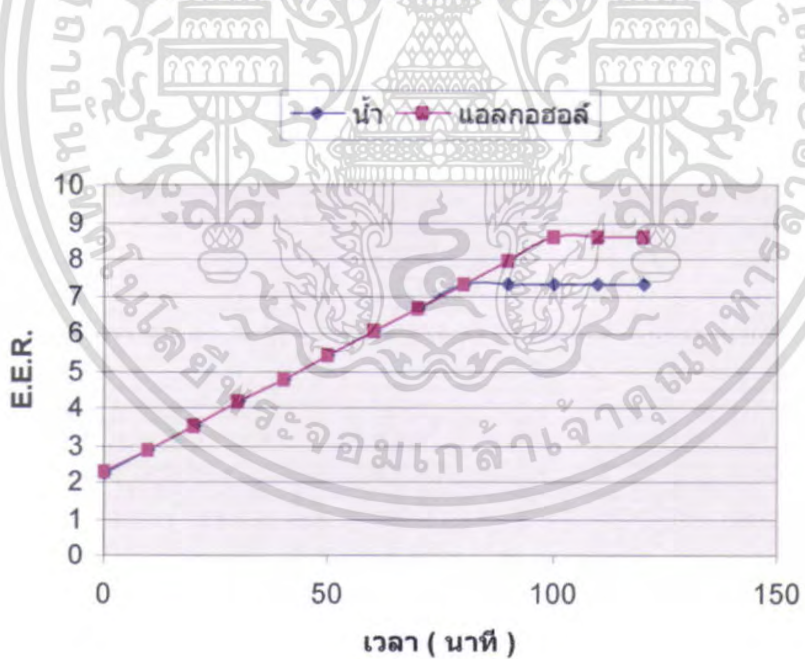
รูปที่ 4.10 แสดงค่า EER, ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำและแอลกอฮอล์



### สัมประสิทธิ์การทำความเย็นของน้ำและแอลกอฮอล์



### ประสิทธิภาพการทำความเย็นของน้ำและแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เครื่องทำความเย็นแบบสุญญากาศ เป็นอุปกรณ์การทำความเย็นที่ใช้ปั๊มสุญญากาศ เป็นการทำให้ความดันในห้องระเหยมีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งส่งผลทำให้สารทำความเย็นและฝอยละอองของสารทำความเย็นภายในห้องระเหยเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเดือดของสารทำความเย็นที่ความดันบรรยากาศ ปริมาณของสารทำความเย็นที่กลายเป็นไอจะพาความร้อนออกไปกับการที่ทำให้สารทำความเย็นบางส่วนกลายเป็นไอ

เครื่องทำความเย็นแบบสุญญากาศเป็นระบบการทำความเย็นที่ยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะในการทำความเย็นที่ได้นั้นจะต้องใช้ไอของสารทำความเย็นและประสิทธิภาพในการทำความเย็นของอุปกรณ์นี้ก็อยู่ในขั้นต่ำ โดยทั่วไปการใช้งานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศนี้ก็ไม่สะดวกแต่มีความเหมาะสมกับบางสภาวะของการใช้งาน

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ความสมบูรณ์แบบและการได้สัดส่วนของส่วนประกอบของอุปกรณ์ภายในระบบการทำความเย็นซึ่งในการทำการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเอาปั๊มสุญญากาศที่มีอยู่แล้ว มาทำการประกอบเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นที่พอใจ การที่จะให้ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

1. ห้องระเหย ( Flash Tank ) ทำหน้าที่ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลง ปริมาณภายในห้องระเหยจะต้องมีปริมาณที่พอเหมาะกับปริมาณการทำความเย็นที่สามารถทำได้ ภายในห้องระเหยจะมีการทำสปริงเกอร์ไว้เพื่อทำหน้าที่สำหรับทำให้สารทำความเย็นที่ไหลกลับเข้าห้องระเหยกลายเป็นละอองน้ำเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นให้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สารทำความเย็นกลายเป็นไอได้ดี ก็จะสามารถพาความร้อนออกไปได้มากขึ้น เป็นผลให้สารทำความเย็นที่เหลืออยู่ภายในห้องระเหยมีอุณหภูมิต่ำลงได้ดีขึ้น อีกประการหนึ่ง ภายในห้องระเหยนั้นจะต้องมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ยิ่งเข้าสู่สุญญากาศมากยิ่งขึ้นเท่าใด ก็จะสามารถทำความเย็นได้มากขึ้นเท่านั้น ดังนั้น การเชื่อมต่อระหว่างห้องระเหยกับอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในระบบจะต้องกันรั่วซึมเป็นอย่างดี และวัสดุที่ใช้ทำห้องระเหยและอุปกรณ์อื่น ๆ ไม่ควรเป็นสนิมได้ง่าย เพราะเมื่อสารทำความเย็นไหลกลับเข้ามาในห้องระเหย จะเกิดการอุดตันได้ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบทำความเย็นต่ำลงและสนิมที่เกิดขึ้นจะทำความเสียหายต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของ

ระบบ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ทำให้กำลังที่ต้องใช้ในการหมุนเวียนของสารทำความเย็นสูงขึ้น

2. บีบสารทำความเย็น ทำหน้าที่บีบสารทำความเย็นให้ไหลหมุนเวียนภายในระบบ บีบต้องสามารถบีบสารทำความเย็นเข้าสู่ห้องระเหยเป็นฝอยละอองได้พอเหมาะ กล่าวคือ ขนาดของบีบต้องเพียงพอที่ทำให้สารทำความเย็น ไหลกลับเข้าสู่ห้องระเหยให้เป็นฝอยละออง เพราะไม่อย่างนั้นพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นจะน้อยลง ทำให้การทำความเย็นที่ได้จะมีค่าต่ำลง การสูญเสียความร้อนแฝง (Latent Heat) ก็จะต่ำลงด้วย ดังนั้นบีบสารทำความเย็นจะต้องมีอัตราการไหลที่พอเหมาะกับขนาดของระบบและต้องมีขนาดเพียงพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันก่อนไหลกลับห้องระเหย และภายในห้องระเหยเพื่อให้สารทำความเย็นที่เข้าสู่ห้องระเหยเป็นฝอยละออง

3. ท่อดูด และท่อจ่าย ในระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ มีน้ำและแอสกอสอลด์เป็นสารทำความเย็น ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำท่อดูดและท่อจ่าย รวมทั้งท่อทางเดินของน้ำ ต้องไม่เกิดเป็นสนิมง่าย และทนการกัดกร่อนได้ดี ท่อดูดเป็นช่วงของท่อเข้าสู่บีบสารทำความเย็น ส่วนท่อจ่ายคือ ท่อในช่วงหลังบีบ ท่อทั้งสองจะต้องมีความสามารถที่จะทนต่อความแตกต่างของแรงกดดันของบรรยากาศได้ พิจารณาท่อดูดจะต้องมีความแข็งแรงกว่าท่อจ่ายเพราะเนื่องจากอยู่ด้านหน้าของบีบ ก็จะเป็นสุญญากาศ ซึ่งมีแรงดูดภายในมากกว่าขนาดของท่อจะต้องมีค่าความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานน้อย เพื่อลดขนาดของบีบ

ในการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ผลที่เกิดขึ้นต่อระบบการทำความเย็น โดยใช้สารทำความเย็นแบบต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์เป็นส่วนใหญ่ ต่อไปถ้าเราทำการวิเคราะห์ว่าอุปกรณ์ใดมีผลต่อการทำความเย็นอย่างไร เริ่มแรกจะพิจารณาถึงอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบ ซึ่งมีผลเนื่องจากบีบสารทำความเย็น อัตราการไหลนั้นควรมีมากพอกับพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนหรือไม่ ถ้ามีมากก็จะทำให้การทำความเย็นทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่ควรทำให้อุณหภูมิที่ออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนมากเกินไปหรือขนาดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนใหญ่ไป จะทำให้อุณหภูมิที่ไหลกลับเข้าไปในห้องระเหย มีอุณหภูมิสูงมากไป ซึ่งทำให้เพิ่มอุณหภูมิของสารทำความเย็นภายในห้องระเหย อีกอย่างหนึ่งคือ ใช้น้ำสามารถระเหยออกไปได้มากเท่าใดซึ่งมีผลมาจากความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยและพื้นที่ผิวของน้ำ และท้ายสุดบีบสุญญากาศมีอัตราการดึงเอาไอสารทำความเย็นมากน้อยเท่าใดถ้ามาก การทำความเย็นก็จะได้มากด้วย ความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยนั้นสามารถทำได้อย่างมีขีดจำกัด จะเห็นจากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นว่า ความดันใกล้สุญญากาศเท่าใด อุณหภูมิการเดือดหรือจุดเดือดของสารทำความเย็นก็จะยิ่งใกล้ศูนย์องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นเป็นไปได้ที่ระบบการทำความเย็นจะสามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำกว่าศูนย์องศา

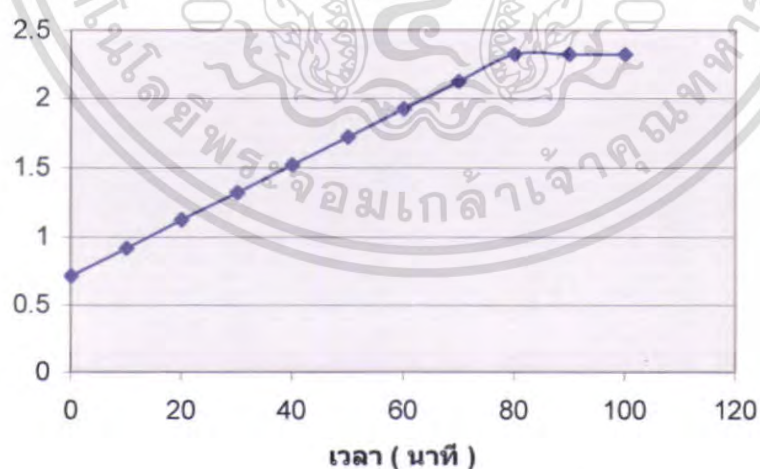
เซตเซียง โดยปริมาณการทำความเย็นที่จะทำได้มากหรือน้อยนั้นจะขึ้นกับปริมาณของสารทำความเย็นที่กลายเป็นไอและปริมาณสารทำความเย็นที่อยู่ในห้องระเหย

## 5.2 สรุปผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยแบ่งตามสารทำความเย็นที่ใช้ในการทดลอง

- สารทำความเย็นที่เป็นน้ำ

เวลา ( min )	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย ( T <sub>1</sub> )		
	2 ลิตร	5 ลิตร	10 ลิตร
0	25.7	25.8	25.7
15	17.2	20.4	21.3
30	14.3	16.5	18.6
45	10.1	13.6	16.4
60	9.6	10.4	14.3

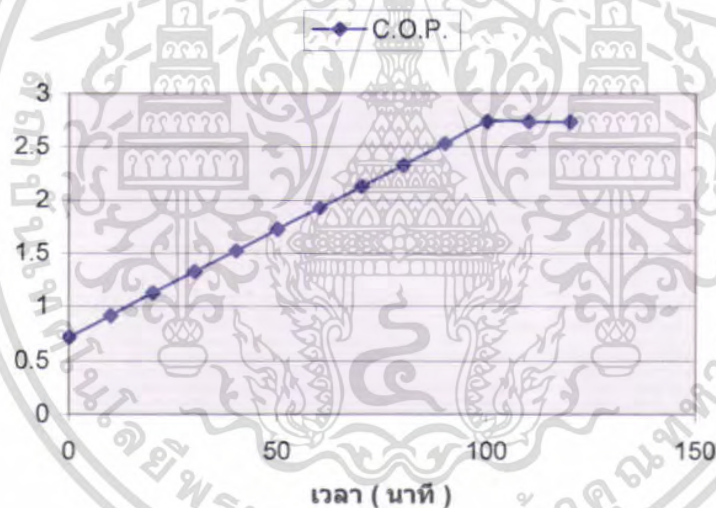


แสดงค่า C.O.P. ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารทำความเย็นที่เป็นแอลกอฮอล์

เวลา ( min )	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย ( T <sub>v</sub> )		
	2 ลิตร	5 ลิตร	10 ลิตร
0	25	25	25
15	14.4	18.6	20.1
30	9.4	16.4	18.6
45	8.6	14.5	15.3
60	7.3	13.2	13.8



แสดงค่า C.O.P. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทำความเย็นที่ทำได้จะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารทำความเย็นและคุณสมบัติของกระเหยตัวของสารทำความเย็นนั้นๆ ถ้าหากสารทำความเย็นที่ใช้มีปริมาตรที่เหมาะสมและการระเหยตัวกลายเป็นไอของสารทำความเย็นทำได้ดี ก็จะทำให้สามารถทำความเย็นได้ดีตามไปด้วย ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าแอลกอฮอล์มีการระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าน้ำจนทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นดีกว่าน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เนื่องจากภายในระบบมีระบบท่อที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานมากจึงทำให้การทำงานของปั๊มสุญญากาศและปั๊มสารทำความเย็นนั้นทำงานมากขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการทำความเย็นนั้นลดลง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นมีความสำคัญกับปริมาณการทำความเย็นที่ทำได้ต่องานที่ให้แก่ปั๊มสุญญากาศและปั๊มสารทำความเย็นเมื่อให้งานเข้าไปมากก็จะทำให้สัมประสิทธิ์ในการทำความเย็นลดลง

3. ปริมาตรของห้องระเหยต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับปั๊มสุญญากาศเนื่องจากการทำงานและประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศมีความจำกัดฉะนั้นถ้าหากมีขนาดของห้องระเหยใหญ่เกินไปก็จะทำให้ปั๊มสุญญากาศนั้นทำงานหนักเกินไปและทำงานไม่ได้เต็มประสิทธิภาพจึงมีผลทำให้การทำความเย็นนั้นลดลง

4. ขนาดของปั๊มสารทำความเย็นจะต้องทำให้มีขนาดเล็กและควรมีอัตราการไหลที่ต่ำไม่สูงมากเกินไป เนื่องจากจะมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของสารทำความเย็นซึ่งจะได้รับความร้อนจากปั๊มสารทำความเย็นขณะที่ปั๊มสารทำความเย็นทำงาน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการแก้ไขและปรับปรุงชุดการทดลองการทำความเย็นแบบสุญญากาศ จากการวิเคราะห์จากผลการทดลอง ทำให้ทราบถึงว่าเป็นผลมาจากอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่มีผลต่อการทำความเย็นในการแก้ไขเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ได้ทำการปรับปรุงและคิดแปลงแก้ไขให้ดีขึ้น มีดังต่อไปนี้

1. ในการออกแบบห้องระเหยนั้นต้องมีปริมาตรของห้องระเหยสมดุลกับขนาดของปั๊มสุญญากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารทำความเย็นที่ต้องการ เพื่อให้ปั๊มสุญญากาศสามารถทำความดันในห้องระเหยต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้มากขึ้น โดยที่จะใช้งานของปั๊มสุญญากาศน้อยที่จำเป็น โดยห้องระเหยที่ออกแบบไว้จะต้องสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นนั้นเราสามารถทำได้โดยการทำให้สารทำความเย็นเข้าสู่ห้องระเหยเป็นละออง โดยทำให้สปริงเกอร์มากพอกับความสมดุลขนาดปั๊มสารทำความเย็น

2. ท่อดูดและท่อจ่าย จะต้องออกแบบให้มีความเสียดทานของการดำเนินการไหลต่ำที่สุดและต้องมีขนาดที่เหมาะสมและถูกต้อง เพื่อลดค่าใช้จ่ายและขนาดของปั๊มของสารทำความเย็น

3. ขนาดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีปริมาณที่เหมาะสมกับสภาวะการแลกเปลี่ยนความร้อน

4. ขดท่อจะต้องมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และวัสดุที่ใช้ทำท่อต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง

5. ปั๊มสุญญากาศ ต้องมีอัตราการไหลที่สูงและเพียงพอกับขนาดของห้องระเหย

6. ลดขนาดของห้องระเหยให้มีปริมาตรที่ปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

1. ชูชัย ค. ศิริวัฒนา “ การทำความเย็น และ การปรับอากาศ ” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น )
2. ผศ.ดร. สมชัย อัครทิวา อาจารย์ ขวัญจิต วงษ์ชาติ “ เทอร์โม ไดนามิกส์ (Thermodynamics )”
3. รองศาสตราจารย์ มนตรี พิรุณเกษตร “การถ่ายเทความร้อน”
4. ผศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. สมศักดิ์ สุโมคยกุล “ เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ ”
6. วิวัฒน์ กัททิยธนี “เทคโนโลยีไอน้ำ”
7. YUNUS A.CENGEL MICHAEL A. BOLES ‘ THERMODYNAMICS ‘



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

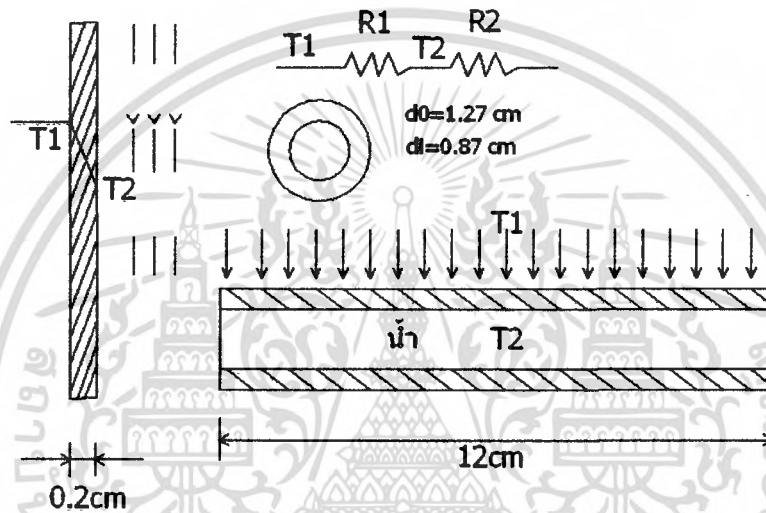
**ภาคผนวก ก.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่างการคำนวณ

อุณหภูมิก่อนเข้า Heat Load 19.4 องศา และทางออกมีค่าเท่ากับทางเข้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.4 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 โวลต์ ให้กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.87 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 12 เซนติเมตร อุณหภูมิที่ผิวท่อ 110 องศา (สารทำความเย็นที่เป็นน้ำ)



$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} &= 240 \text{ V} \times 2.4 \text{ A} \\ &= 580 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk}$$

ค่า K ของเหล็กกล้าไร้สนิม 54 (W/m.K)

$$= \frac{\ln(0.00735 / 0.00635)}{2\pi(0.12)(54)}$$

$$= 0.00359 \quad \text{K/W}$$

$$T_b = \frac{(T_{m,0} + T_{m,i})}{2}$$

$$= \frac{19.4 + 19.4}{2} = 19.4$$

$$h = \frac{W_e}{A_s(T_s - T_b)}$$

$$= \frac{580}{\pi(0.0127)(0.12)(110 - 19.4)}$$

$$= 1337.17 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi(0.00635)(0.12)(1337.17)}$$

$$= 0.156$$

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{conv}$$

$$= 0.00359 + 0.156 = 0.1598 \text{ K/W}$$

$$Q_r = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}}$$

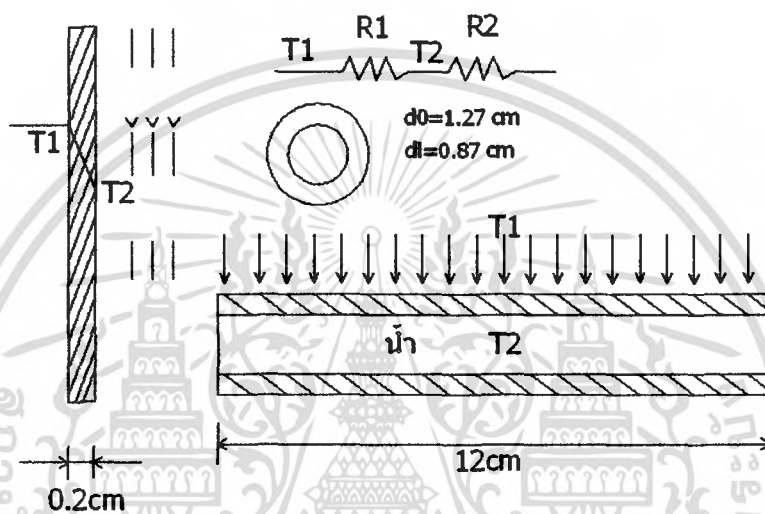
$$= \frac{110 - 19.4}{0.1598} = 566.969 \text{ W}$$

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$= \frac{566.969}{244} = 2.323$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิก่อนเข้า Heat Load 16.2 องศา และทางออกมีค่าเท่ากับทางเข้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.4 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 โวลต์ ให้กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.87 เซนติเมตร ความยาวเท่า 12 เซนติเมตร อุณหภูมิที่ผิวท่อ 130 องศา (สารทำความเย็นที่เป็นแอลกอฮอล์)



จากสมการ = 240 V × 2.8 A  
= 680 Watt

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk}$$

ค่า K ของเหล็กกล้าไร้สนิม 54 (W/m.K)

$$= \frac{\ln(0.00735 / 0.00635)}{2\pi(0.12)(54)}$$

$$= 0.00359 \quad \text{K/w}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_b = \frac{(T_{m,0} + T_{m,i})}{2}$$

$$= \frac{16.2 + 16.2}{2} = 16.2$$

$$h = \frac{W_e}{A_s(T_s - T_b)}$$

$$= \frac{680}{\pi(0.0127)(0.12)(130 - 16.2)}$$

$$= 1248.05 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_1 L h}$$

$$= \frac{1}{2\pi(0.00635)(0.12)(1248.05)}$$

$$= 0.167$$

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{conv}$$

$$= 0.00359 + 0.167 = 0.1709 \text{ K/W}$$

$$Q_r = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}}$$

$$= \frac{130 - 16.2}{0.1709} = 665.719 \text{ W}$$

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$= \frac{665.719}{244} = 2.728$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข - 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ

Saturated water—Temperature table

Temp., t °C	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
	Sat. press., P <sub>sat</sub> kPa	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Sat. vapor, s <sub>g</sub>
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1558	9.1558
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2350.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.990	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2525.4	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2531.7	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1693	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2538.4	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2545.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.5291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2552.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.0051	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2559.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2566.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2573.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2580.1	0.7680	7.2218	7.9896
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2586.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2593.5	0.8937	6.9360	7.8295
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2599.9	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	313.93	2320.6	2606.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	334.92	2308.0	2613.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	355.92	2295.3	2619.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	376.94	2282.5	2625.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2631.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6730	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2637.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.23	2243.1	2643.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2034	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2649.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0390	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2654.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2660.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2665.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66308	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2670.1	1.6346	5.3919	7.0255
135	313.22	0.001075	0.56879	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2675.0	1.6872	5.2901	6.9753
140	361.53	0.001080	0.50950	588.77	1960.9	2549.6	589.15	2144.3	2680.0	1.7392	5.1901	6.9254
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2685.0	1.7906	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2690.0	1.8416	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34646	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2695.0	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2700.0	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2705.0	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2049.0	2710.0	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2715.0	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2719.0	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2585.0	785.19	1996.2	2723.0	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2587.0	807.43	1977.9	2727.0	2.2355	4.2706	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.5	2589.7	829.78	1959.0	2731.0	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2592.2	852.26	1939.8	2735.0	2.3305	4.0997	6.4302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข – 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water—Temperature table (Continued)

Temp., T °C	Specific volume m <sup>3</sup> /kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg·K			
	Sat. press., P <sub>sat</sub> kPa	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Sat. vapor, s <sub>g</sub>
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.85	1723.5	2596.4	674.87	1920.0	2794.8	2.5776	4.0154	6.3730
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	697.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	720.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086604	940.79	1660.5	2601.3	743.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	766.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	790.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	813.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	837.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	861.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	885.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	910.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.0	2598.7	934.8	1661.8	2795.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1441.2	2596.5	959.8	1633.7	2791.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1411.7	2593.7	985.1	1604.5	2786.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1381.4	2590.3	1010.7	1574.5	2781.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.5	0.001333	0.030153	1228.2	1350.2	2586.4	1036.7	1543.2	2775.0	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.5	0.001349	0.027755	1253.7	1318.1	2581.8	1063.1	1510.7	2771.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1285.9	2576.5	1089.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1254.5	2570.5	1117.1	1441.6	2759.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.0	0.001404	0.021659	1332.7	1223.0	2563.6	1144.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1191.9	2555.8	1173.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9866.0	0.001447	0.018333	1387.7	1160.3	2547.1	1202.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10556	0.001472	0.016849	1416.5	1128.1	2537.2	1231.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11284	0.001499	0.015470	1445.1	1095.9	2526.0	1262.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12051	0.001528	0.014183	1475.0	1063.5	2513.4	1293.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12858	0.001560	0.012979	1506.7	1030.5	2499.2	1325.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13707	0.001597	0.011848	1537.5	995.5	2483.0	1359.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14601	0.001638	0.010783	1570.7	958.8	2464.5	1394.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15541	0.001685	0.009772	1505.5	921.7	2443.2	1431.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16529	0.001741	0.008806	1542.4	875.9	2418.3	1471.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4376	5.2114
355	17570	0.001808	0.007972	1582.2	826.4	2388.5	1513.0	812.9	2526.9	3.8447	1.2947	5.1384
360	18666	0.001885	0.006950	1720.2	625.7	2351.9	1561.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19822	0.002015	0.006075	1777.2	526.4	2303.5	1617.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21044	0.002217	0.004493	1844.5	385.5	2230.1	1691.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22064	0.0023106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข – 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water - Pressure table

Press., MPa	Sat. Temp., $T_{sat}$ , °C	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/kg · K				
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$			
1.0	6.47	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.684	2338.1	2392.8	54.688	2476.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2326.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2806	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.2	2407.3	100.98	2443.9	2544.8	0.3443	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4754
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4782	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	226.93	2222.1	2448.0	226.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2346.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8322
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2179.0	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9953	317.53	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6591
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3389
161.325	99.97	0.001043	1.6754	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.5	1.3069	6.0476	7.3345
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	113.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	115.64	0.001057	1.0337	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6855	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	536.08	2001.8	2536.8	536.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.54	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.99	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.45242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.55	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0386	6.8861
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.5	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.09	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.46	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water—Pressure table (Continued)

Press., P <math>P_0</math>	Sat. temp., $T_{sat}$ °C	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Sat. vapor, $s_g$
800	170.41	0.001115	0.24035	719.57	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.3457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.3705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21485	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.3941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.4166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.4381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.4785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.56	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.5259	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.69	1971.9	2786.5	2.5808	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.25	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.6435	4.1940	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.62	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.7143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.8844	4.0333	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099567	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1899.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3330
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1884.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.57	1643.2	2602.1	961.87	1870.1	2801.9	2.5542	3.7116	6.2558
3000	233.83	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.5454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001285	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001310	0.032440	1205.6	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2705.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1522.6	809.4	2432.0	1649.9	951.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2486
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1560.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8062	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1599.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9356	1.0960	5.0266
20,000	365.73	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2339.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	240.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2064.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
P = 0.01 MPa (45.81 °C)				P = 0.05 MPa (111.3 °C)				P = 0.10 MPa (119.63 °C)				
Sat.	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.7476	2888.1	3176.5	8.7021	2.8655	2888.1	3176.5	8.4000
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	6.6712	3050.0	3383.1	9.0156	3.3555	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	7.1330	3133.1	3506.0	9.2011	3.6279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	7.5948	3220.6	3642.7	9.3626	3.9100	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	8.0566	3313.6	3793.3	9.5083	4.2027	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	8.5184	3413.1	3958.2	9.6400	4.5000	3856.5	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	8.9802	3520.6	4138.2	9.7500	4.8000	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	9.4420	3636.1	4333.7	9.8400	5.1000	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	9.9038	3760.6	4545.7	9.9100	5.4000	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	10.3656	3893.1	4774.3	10.0000	5.7000	4687.2	5413.3	10.5229
P = 0.50 MPa (151.86 °C)				P = 1.00 MPa (179.88 °C)				P = 2.00 MPa (212.07 °C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2610	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00568	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0271	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
P = 5.00 MPa (263.97 °C)				P = 10.00 MPa (311.07 °C)				P = 20.00 MPa (373.95 °C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9516	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข - 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Continued)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.5	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.5	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข - 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Continued)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
P = 4.0 MPa (250.34 °C)				P = 4.5 MPa (257.44 °C)				P = 5.0 MPa (263.94 °C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	5.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
P = 6.0 MPa (275.59 °C)				P = 7.0 MPa (285.53 °C)				P = 8.0 MPa (295.01 °C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
P = 9.0 MPa (303.94 °C)				P = 10.0 MPa (317.97 °C)				P = 12.5 MPa (327.81 °C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.036724	3518.8	4102.8	7.2967
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1100	0.070224	4242.0	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Concluded)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
P = 15.0 MPa (342.15°C)				P = 17.5 MPa (354.01°C)				P = 20.0 MPa (365.75°C)				
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.036503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574
P = 25.0 MPa				P = 30.0 MPa				P = 35.0 MPa				
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.9	4270.6	6.9853
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841
P = 40.0 MPa				P = 50.0 MPa				P = 60.0 MPa				
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1746.2	1843.2	3.9317
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2160.3	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.0	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ข – 1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

### Compressed liquid water

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K		
$P = 5 \text{ MPa (263.34 °C)}$					$P = 10 \text{ MPa (311.06 °C)}$					$P = 15 \text{ MPa (342.16 °C)}$				
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848		
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004		
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932		
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666		
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234		
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659		
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958		
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148		
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243		
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259		
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206		
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100		
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951		
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774		
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586		
280					0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565	0.0013096	1213.4	1233.0	3.0410		
300					0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488	0.0013783	1317.6	1338.3	3.2279		
320									0.0014733	1431.9	1454.0	3.4263		
340									0.0016311	1567.9	1592.4	3.6555		
$P = 20 \text{ MPa (355.15 °C)}$					$P = 30 \text{ MPa (407.81 °C)}$					$P = 40 \text{ MPa (458.81 °C)}$				
Sat.	0.0020378	1785.8	1826.6	4.0146										
0	0.0009904	0.23	20.03	0.0005	0.0009857	0.29	29.86	0.0003	0.0009767	0.29	49.13	0.0010		
20	0.0009929	82.71	102.57	0.2921	0.0009886	82.11	111.77	0.2897	0.0009805	80.93	129.95	0.2845		
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0009951	164.05	193.90	0.5607	0.0009872	161.90	211.25	0.5528		
60	0.0010084	247.75	267.92	0.8208	0.0010042	246.14	276.26	0.8156	0.0009962	243.08	292.88	0.8055		
80	0.0010199	330.50	350.90	1.0627	0.0010155	328.40	358.86	1.0564	0.0010072	324.42	374.78	1.0442		
100	0.0010337	413.50	434.17	1.2920	0.0010290	410.87	441.74	1.2847	0.0010201	405.94	456.94	1.2705		
120	0.0010496	496.85	517.84	1.5105	0.0010445	493.66	525.00	1.5020	0.0010349	487.69	539.43	1.4859		
140	0.0010679	580.71	602.07	1.7194	0.0010623	576.90	608.76	1.7098	0.0010517	569.77	622.36	1.6916		
160	0.0010886	665.28	687.05	1.9203	0.0010823	660.74	693.21	1.9094	0.0010704	652.33	705.85	1.8889		
180	0.0011122	750.78	773.02	2.1143	0.0011049	745.40	778.55	2.1020	0.0010914	735.49	790.06	2.0790		
200	0.0011390	837.49	860.27	2.3027	0.0011304	831.11	865.02	2.2888	0.0011149	819.45	875.19	2.2628		
220	0.0011697	925.77	949.15	2.4867	0.0011595	918.15	952.93	2.4707	0.0011412	904.39	961.45	2.4414		
240	0.0012053	1016.1	1040.2	2.6676	0.0011927	1006.9	1042.7	2.6491	0.0011708	990.55	1049.1	2.6156		
260	0.0012472	1109.0	1134.0	2.8469	0.0012314	1097.8	1134.7	2.8250	0.0012044	1078.2	1138.4	2.7864		
280	0.0012978	1205.6	1231.5	3.0265	0.0012770	1191.5	1229.8	3.0001	0.0012430	1167.7	1229.9	2.9547		
300	0.0013611	1307.2	1334.4	3.2091	0.0013322	1288.9	1328.9	3.1761	0.0012879	1259.6	1324.0	3.1218		
320	0.0014450	1416.6	1445.5	3.3996	0.0014014	1391.7	1433.7	3.3558	0.0013409	1354.3	1421.4	3.2888		
340	0.0015693	1540.2	1571.6	3.6086	0.0014932	1502.4	1547.1	3.5438	0.0014049	1452.9	1523.1	3.4575		
360	0.0018248	1703.6	1740.1	3.8787	0.0016276	1626.8	1675.6	3.7499	0.0014848	1556.5	1630.7	3.6301		
380					0.0018729	1782.0	1838.2	4.0026	0.0015884	1667.1	1746.5	3.8102		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข – 2 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอลกอฮอล์

Temp ( K )	Pressure ( bar )	Sp.vol Sat.liq cu.m/kg	Sp.vol Sat.vap cu.m/kg	Spec.enchalpy Sat.liq kj/kg	Spec.enchalpy Sat.vap kj/kg	Spec.Heat Const.Sat.liq kj/kg.K
270	0.03327	0.00123	20.93	531.5	1740.7	2.375
280	0.06208	0.00124	11.62	556.1	1752.1	2.420
290	0.1094	0.001259	6.776	581.0	1763.2	2.471
300	0.1860	0.001274	4.095	606.2	1773.6	2.520
310	0.3043	0.00129	2.566	631.7	1783.1	2.580
320	0.4817	0.001306	1.661	657.5	1791.9	2.670
330	0.7395	0.001323	1.103	683.6	1799.6	2.750
337.5	1.0012	0.001337	0.8110	703.4	1804.8	2.810
340	1.1044	0.001342	0.7533	710.1	1806.5	2.830
350	1.6082	0.001361	0.5256	736.7	1812.4	2.910
360	2.208	0.001381	0.3752	764.3	1817.4	3.010
370	3.188	0.001403	0.2723	792.5	1821.6	3.110
380	4.357	0.001426	0.2015	820.2	1825.1	3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การทำความเย็นแบบสุญญากาศ<sup>1</sup>

อำนาจ พักอินทร์<sup>2</sup>, อติศร บ่อผล<sup>2</sup>, อนุวัฒน์ มวงค์<sup>2</sup>

ธวัชชัย นาคพิพัฒน์<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นแบบสุญญากาศ คือ เป็นกระบวนการลดความดันภายในระบบโดยการดึงเอาไอสารทำความเย็นภายในระบบการทำความเย็นในท้องระเหย ( Flash Take ) ในกระบวนการทำความเย็นจะเริ่มต้นด้วยการทำให้สารตัวกลางในการทำความเย็นคือ น้ำ ฉีดพ่นโดยผ่าน Ejector ในสภาวะสุญญากาศซึ่งทำให้สารทำความเย็นระเหยกลายเป็นไอ และเนื่องจากสารตัวกลางในการทำความเย็นเมื่อฉีดพ่นเข้าไปในระบบแล้ว ก็จะทำให้สารตัวกลางเกิดฝอยละอองขนาดเล็กลง ก็จะทำให้อุณหภูมิภายในระบบต่ำลงเนื่องเนื่องจากการดึงดูดความร้อนแฝงออกไป ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีอุณหภูมิภายในลดลง ซึ่งโครงการนี้จะเป็นการศึกษาปัจจัยการทำงานของสารทำความเย็นแบบสุญญากาศ และสมรรถนะของการทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในระบบและประสิทธิภาพของการทำความเย็นที่ใช้น้ำและแอลกอฮอล์เป็นสารตัวกลางในการทำความเย็น ขบวนการทำความเย็นและสมรรถนะที่น่าสนใจ

### Abstract

The vacuum refrigeration system is the process of pressure reduction by pulling out vapor of working fluid from the flash tank by pump. The process of low temperature refrigeration begin by the evaporation of refrigeration at low pressure, it make some of the refrigeration vaporized and reduced temperature of the fluid in the flash tank due to pulling out of the latent heat. At the lower part of flash tank, liquid substance which has low temperature working fluid is use to produce cool air at evaporator. Due to the total heat of refrigerants was reduced and become to low temperature, it was circulated to heat exchanger and return back to flash tank again. This project was to study of the facture of vacuum refrigeration and its performance which was changed by pressure in flash tank and it's were compared between water and alcohol mixture. The satisfy of cooling capacity and performance are of trained.

© 2007 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

**Keywords:** Vacuum Refrigeration: Vacuum Refrigeration Test Set: Vacuum Gauge: Pressure Gauge: Voltmeter: Ammeter: Orifice

### 1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้การทำความเย็นได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตมนุษย์มากยิ่งขึ้นไม่ว่าจะเป็นการนำระบบการทำความเย็นมาอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันตลอดจนนำไปใช้ในการเก็บรักษาอาหาร เครื่องดื่ม ยารักษาโรค และยังนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษา ค้นคว้าและพัฒนากระบวนการทำความเย็นเพื่อที่จะทำให้ระบบการทำความเย็นมีประสิทธิภาพและไม่ไปทำลายสิ่งแวดล้อม

<sup>1</sup>ชื่ออังกฤษ " Vacuum Refrigeration "

<sup>2</sup> นักศึกษานิติศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., ห้อง 3Q/1, 3Q/2, 3Q/2 รหัส 48015410, 48015449 และ 48015450 ตามลำดับ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สจล., โทร. 0 2326 4197

**สัญลักษณ์**

$C.O.P.$ ประสิทธิภาพสารทำความเย็น	$W_p$ กำลังของปั๊มสารทำความเย็นที่ใช้ปั๊มสารทำความเย็น Watt
$W_v$ กำลังที่ใช้ของปั๊มสุญญากาศ Watt	$W_{in}$ ผลรวมของปั๊มสุญญากาศและสารทำความเย็น Watt
$R.E.$ ปริมาณความร้อนที่ออกที่จุดแลกเปลี่ยนความร้อน Watt	$m_a$ ปริมาณไอของสารทำความเย็นที่ไหลผ่านปั๊มสุญญากาศ kg/sec
$h_A$ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่สิ้นสุดความดัน kg/sec	$h_B$ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ห้องระเหย kg/sec
$h_C$ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ปั๊มความดัน kg/sec	$h_D$ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่จุดแลกเปลี่ยนความร้อน kg/sec
$P_{abs}$ ความดันสัมบูรณ์	$P_{atm}$ ความดันบรรยากาศ
$P_{gauge}$ ความดันเกจ	$Q_{comp}$ ความร้อนจากการอัด

ระบบการทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่นิยมใช้กันมากก็คือ ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ ในโครงการนี้ได้เสนอการทำความเย็นแบบสุญญากาศซึ่งอาจจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการทำความเย็น

โดยในโครงการนี้ได้นำวิธีการทำความเย็นอีกวิธีหนึ่งขึ้นมาซึ่งก็คือ การทำความเย็นแบบสุญญากาศ ซึ่งจะให้ความรู้เบื้องต้นทางด้านการทำงานและวิธีการต่างๆทางด้านวิศวกรรม ซึ่งโครงการนี้เป็นการศึกษาการทำงานแบบสุญญากาศซึ่งจะมีผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน ซึ่งการทำงานของโครงการนี้อาจจะยังไม่มีความสมบูรณ์มากนักเป็นเพราะต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงและยังไม่ค่อยได้รับความนิยมนัก และในอนาคตก็ต้องมีการศึกษาและค้นคว้าเพื่อพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์อีกต่อไป

**2. วัตถุประสงค์**

เพื่อสร้างเป็นชุดทดลองการทำงานแบบสุญญากาศ ศึกษาการทำงานของระบบ และการหาค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น โดยการเปลี่ยนการใช้สารทำความเย็นมาเป็นน้ำแทน ว่าการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นจะมีประสิทธิภาพในการทำความเย็นมากน้อยเพียงใด

**3. ทฤษฎีการทำงานโดยทั่วไป**

เครื่องปรับอากาศทุกชนิด มีหลักการทํางานเหมือนกัน คือใช้คุณสมบัติในการระเหยของของเหลว และความร้อนแฝงจากการระเหยนี้ เช่น น้ำ เมื่อระเหยกลายเป็นไอตัวเองก็จะเย็นลง เนื่องจากได้ใช้ความร้อนแฝงไปในการระเหย ความเย็นลักษณะนี้ ก็คือความเย็นที่สามารถนำมาใช้ในการปรับอากาศได้

น้ำก็เป็นสารทำความเย็น โดยเรียกว่า R-718 แต่เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติในการระเหยช้าเกินไป ไม่สามารถนำมาใช้เป็นสารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพได้โดยตรง

**4. การเกิดความร้อน**

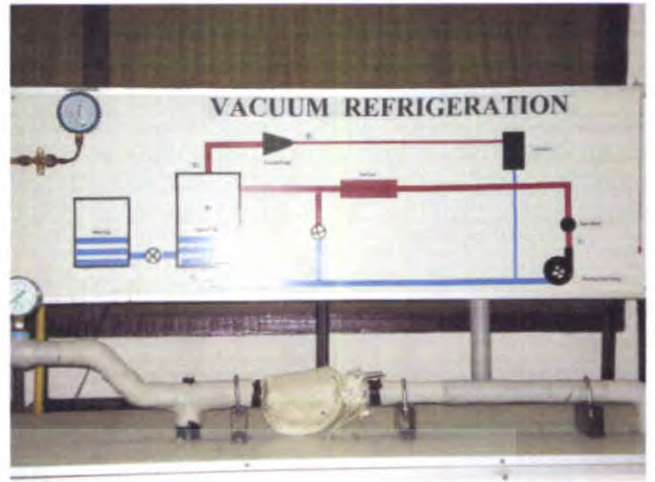
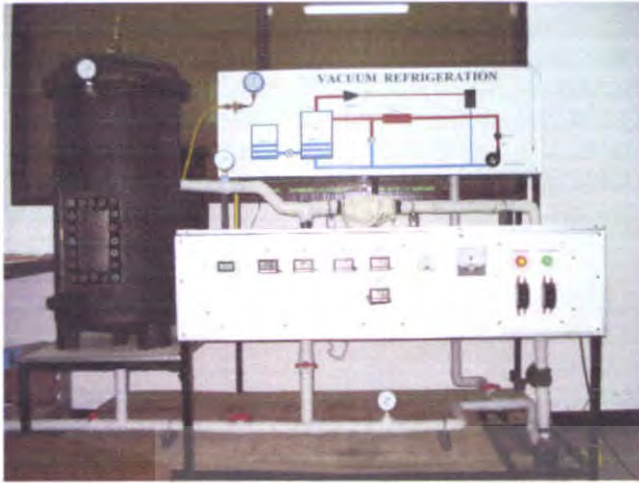
การเกิดความร้อนในเครื่องทำความเย็น รวมทั้งปรับอากาศที่ใช้อยู่ทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นตู้แช่ เครื่องปรับอากาศรถยนต์ เครื่องปรับอากาศในบ้าน หรือในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป มีหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดความร้อนเหมือนกันหมดคือ การทำให้สารซึ่งเป็นสารตัวกลางในการทำความเย็น ( refrigerant ) เปลี่ยนสถานะเพราะขณะเปลี่ยนสถานะสารทุกชนิดต้องการความร้อนแฝงเข้ามาช่วยเสมอ ดังนั้นถ้าเราทำให้สารนี้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จะเกิดการดูดความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมินั้นลดลงจึงเกิดความร้อนขึ้น

**5. การประยุกต์ใช้งานในการทำความเย็น**

ในปัจจุบันเราต้องอาศัยระบบทำความเย็นมากมายใช้งานในด้านต่างๆ มากมายได้แก่

1. การผลิตอาหาร ( food processing )
2. การเก็บรักษาอาหาร ( food storing )
3. การผลิตในงานอุตสาหกรรม ( industrial process )
4. การทำความเย็นเพื่อการขนส่ง ( transportation refrigeration )
5. การปรับอากาศ ( air conditioning )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



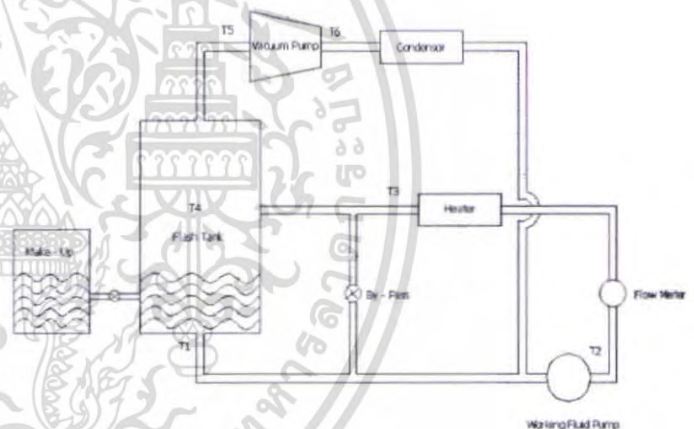
ชุดทดสอบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

## 6. อุปกรณ์ต่างๆของชุดทดสอบ

รายชื่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในชุดทดสอบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

1. บั๊มสารทำความเย็น ( Working fluid pump )
2. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger )
3. บั๊มสุญญากาศ ( Vacuum Pump )
4. อีเจ็คเตอร์ ( Ejector )
5. ห้องระเหย ( Flash Tank )
6. ถังเติมสารทำความเย็น ( Make up )
7. เครื่องควบแน่น ( Condenser )
8. เครื่องทำความร้อน ( Heater )

ซึ่งมีหลักการการทำงานดังนี้ ทำการเติมน้ำเข้าไปในระบบและปริมาณน้ำในถังระเหย ( Flash tank ) ตามปริมาณของการทดลอง และทำ



## 7. หลักการทำงานของระบบ

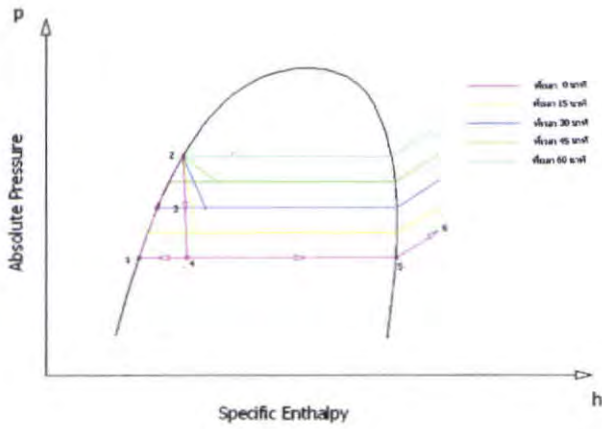
การทำงานของระบบ vacuum refrigeration จะเป็นการทำงานที่มีระบบการทำงานคล้ายคลึงกับระบบทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำ (Steam jet refrigeration system) ในระบบการทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำจะมีการทำงานโดยระบบจะใช้ไอน้ำที่มีความดันสูงฉีดผ่านห้องระเหยเพื่อดึงเอาความดันภายในห้องระเหย จนทำให้ห้องระเหยมีความดันต่ำ แต่ในการทดลองนี้การทำงานภายในระบบจะใช้บั๊มสุญญากาศในการดูดเอาความดันภายในห้องระเหยแทน

การทำงานของระบบนี้จะเป็นการประยุกต์เอาคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้ คือ การนำเอาคุณสมบัติการเดือดของสารทำความเย็นที่เป็นน้ำ การเดือดของน้ำจะมีค่าแปรผันตามความดันบรรยากาศปกติ น้ำจะมีจุดเดือดที่อุณหภูมิที่ 100 °C และที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศน้ำจะมีจุดเดือดต่ำกว่า 100 °C ก็สามารถนำทฤษฎีนี้มาประยุกต์ใช้กับการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

การเดินเครื่อง VACUUM PUMP ทำสุญญากาศเข้าไปในระบบโดยต้องลดความดันในระบบให้ได้มากที่สุด คือต้องทำให้ในระบบเกิดความดันสัมบูรณ์น้อยที่สุด หลังจากนั้นเดินบั๊มน้ำเพื่อทำให้น้ำภายในระบบเกิดการไหลไปในระบบต่างๆ เมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Ejector ก็จะทำให้มันเกิดเป็นฝอยละอองประกบกับความดันสัมบูรณ์ระบบต่ำก็จะทำให้น้ำเกิดการระเหยตัวดีขึ้น และสามารถดึงเอาความร้อนแฝงในห้องระเหยไปใช้ในการระเหยตัวของน้ำ ก็จะทำให้อุณหภูมิในห้องระเหยลดต่ำลง ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ต่ำลงนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้

จากรูปหลักการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ สามารถแสดงด้วย P-h โดยแกรม ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1 → 2 กระบวนการอัดตัวเกิดขึ้นจากการทำงานของปั๊มสารทำความเย็นโดยของเหลวจากห้องระเหย จะถูกปั๊มสารทำความเย็นอัดให้มีความดันสูงขึ้น ตามกระบวนการไอเซนทรอปิก (Constant entropic) หรือแบบเอเดียติกแบบไม่มีความเสียด (Frictionless adiabatic process) ผลจากการทำงานของปั๊มสารทำความเย็นนอกจากจะทำให้ความดันของสารทำความเย็นของระบบเพิ่มสูงขึ้นยังเป็นผลให้ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณความร้อนเทียบเท่ากับพลังงานกล เราเรียกผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอัดของปั๊มสารทำความเย็นว่า ความร้อนจากการอัด (Heat of compression) ซึ่งจะมีค่าเป็น

$$Q_{comp} = h_2 - h_1$$

2 → 3 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการทำงานของลิ้นลดความดัน โดยเริ่มจากสารทำความเย็น ที่มีสถานะเป็นของเหลวจากปั๊มสารทำความเย็นถูกส่งผ่านลิ้นลดความดัน เพื่อลดความดัน ผลของการลดความดันจะทำให้สารทำความเย็นส่วนหนึ่งเปลี่ยนสถานะเป็นไอ จากนั้นมีการเพิ่มความร้อนเข้าไปภายในระบบตรงระหว่างช่วง ผลของการเพิ่มความร้อนเข้าไปนั้นทำให้ความดันและเอนทัลปีเพิ่มตามไปด้วย แล้วทำการให้ความร้อนเข้าไปเรื่อยๆ จนระบบไม่สามารถทำความเย็นได้ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (C.O.P.) ที่เครื่องทำความเย็นนี้ จะสามารถทำได้

3 → 4 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในห้องระเหย จะมีสถานะการกลายเป็นไอจากลิ้นลดความดันและอีกสภาวะหนึ่งจะเป็นสภาวะของของเหลว ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะผสมกันอยู่ในห้องระเหย ซึ่งในกระบวนการที่มีของเหลวภายในระบบจะถูกส่งผ่านไปยังปั๊มสารทำความเย็น (4 → 1) เพื่อที่สารทำความเย็นจะไปหมุนวนภายในระบบ และในส่วนที่เป็นไอก็จะดูดความร้อนภายในห้องระเหยเพื่อใช้ในการระเหยตัวของสารทำความเย็นจนกลายเป็นไออัดตัวที่

กระบวนการ (4 → 5) หลังจากนั้นจะถูกปั๊มสุญญากาศดูดเอาไออัดตัวไปสู่อุปกรณ์ทำความเย็นที่กระบวนการ (5 → 6) ซึ่งผลจากการดูดความร้อนภายในระบบนี้ก็จะทำให้อุณหภูมิภายในห้องระเหยลดต่ำลงเป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำภายในห้องระเหยต่ำลงไปด้วย น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำลงก็จะนำไปใช้ประโยชน์ที่เหมาะสมต่อไป

### สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$h = \frac{W_e}{A_s(T_s - T_b)}$$

เมื่อ

$$T_b = \frac{(T_{m,o} + T_{m,i})}{2}$$

$$W_e = VI$$

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$T_{m,o}$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออก มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_{m,i}$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้า มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$T_b$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าและทางออกของของไหลมีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

$W_e$  คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น W

I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น A

V คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V

ความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก มีหน่วยเป็น  $K/W$

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

ค่าความต้านทานการพาความร้อนโดยบังคับ มีหน่วยเป็น  $K/W$

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1}$$

ค่าความต้านทานรวม มีหน่วยเป็น  $K/W$

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{conv}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ มีหน่วยเป็น W

$$Q_r = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}}$$

**ประสิทธิภาพการทำความเย็น (C.O.P.)**

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{EER}{1Wh}$$

$$1Wh = 3.412 Btu$$

$$EER = 3.1412 COP_R$$

เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่มักจะมีค่า EER อยู่ระหว่าง 8 และ 12 (COP<sub>R</sub> = 2.3 - 3.5)

$$= \frac{19.4 + 19.4}{2} = 19.4$$

$$h = \frac{W_e}{A_s(T_s - T_b)}$$

$$= \frac{580}{\pi(0.0127)(0.12)(110 - 19.4)}$$

$$= 1337.17 \frac{W}{m^2 K}$$

**การคำนวณ**

อุณหภูมิก่อนเข้า Heat Load 17.6 องศา และทางออกมีค่าเท่ากับทางเข้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.4 แอมป์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 240 โวลต์ ให้กับท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.87 เซนติเมตร ความยาวเท่า 12 เซนติเมตร อุณหภูมิที่ผิวท่อ 98 องศา

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi(0.00635)(0.12)(1337.17)}$$

$$= 0.156$$

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{conv}$$

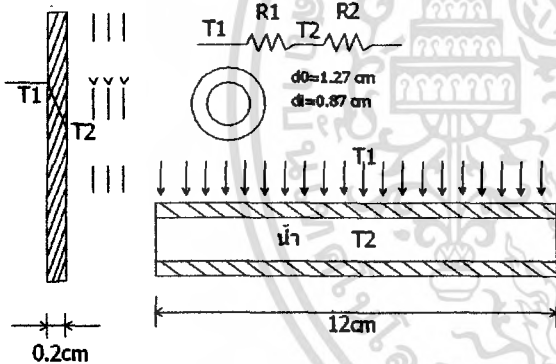
$$= 0.00359 + 0.156 = 0.1598 K/W$$

$$Q_r = \frac{T_2 - T_1}{R_{tot}}$$

$$= \frac{110 - 19.4}{0.1598} = 566.969 W$$

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$= \frac{566.969}{244} = 2.323$$



จากสมการ = 240 V × 2.4 A

= 580 Watt

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk}$$

ค่า K ของเหล็กกล้าไร้สนิม 54 (W/m.K)

$$= \frac{\ln(0.00735 / 0.00635)}{2\pi(0.12)(54)}$$

$$= 0.00359 K/W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

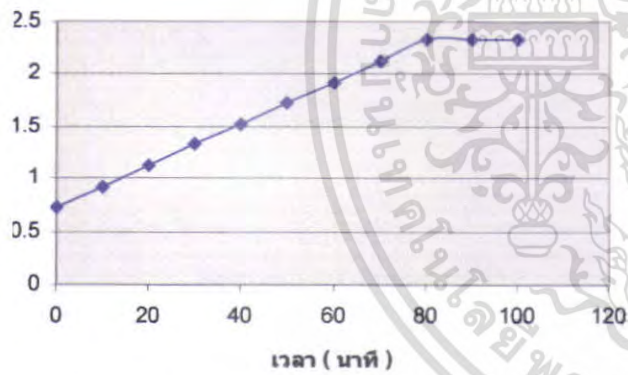
ตารางแสดงผลการทดลองของการทำความเย็น (น้ำ)

เวลา (min)	$w_{in}$ (Watt)	R.E. (Watt)	C.O.P.	EER
0	244	173.81	0.712	2.237
10	244	223.33	0.915	2.874
20	244	272.604	1.12	3.509
30	244	321.705	1.32	4.142
40	244	370.645	1.52	4.770
50	244	419.620	1.72	5.402
60	244	468.578	1.92	6.032
70	244	517.790	2.122	6.666
80	244	566.969	2.323	7.299
90	244	566.969	2.323	7.299
100	244	566.969	2.323	7.299

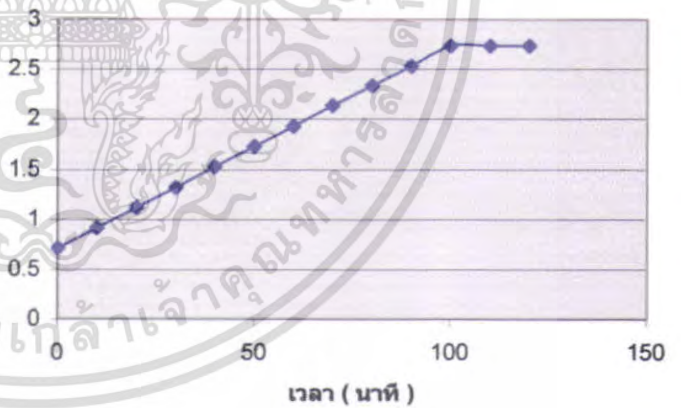
ตารางแสดงผลการทดลองของการทำความเย็น (แอลกอฮอล์)

เวลา (min)	$w_{in}$ (Watt)	R.E. (Watt)	C.O.P.	EER
0	244	174.47	0.715	2.25
10	244	223.49	0.915	2.877
20	244	272.709	1.12	3.511
30	244	321.86	1.319	4.144
40	244	370.95	1.520	4.775
50	244	420.084	1.722	5.408
60	244	469.205	1.923	6.040
70	244	518.355	2.124	6.673
80	244	567.457	2.325	7.305
90	244	616.616	2.527	7.938
100	244	665.720	2.730	8.570
110	244	665.720	2.730	8.570
120	244	665.720	2.730	8.570

C.O.P.

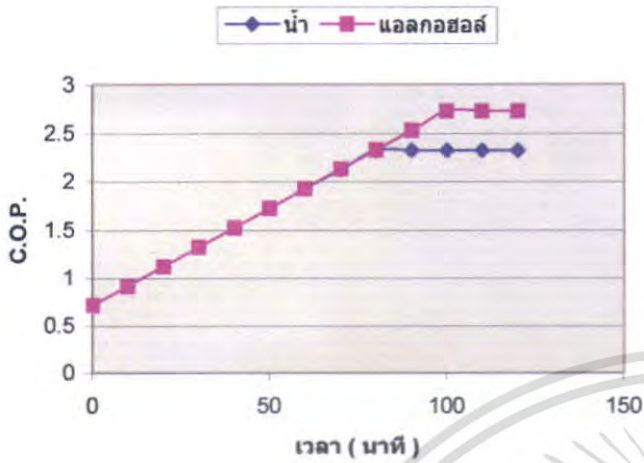


C.O.P.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำและแอลกอฮอล์



### สรุปผลการทดลอง

จากผลที่ได้จากตารางข้อมูลการทดลอง เมื่ออุณหภูมิห้องเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองโครงการนี้ได้ใช้ความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยมีค่า 29.6 in-Hg จากสมการในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการทำความเย็น ซึ่งผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับทางทฤษฎี

พบว่าสัมประสิทธิ์ในการทำความเย็นมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเย็นที่ทำได้ของปั๊มสุญญากาศและปั๊มสารทำความเย็น ซึ่งปริมาณการทำความเย็นที่ทำได้มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารทำความเย็นและความสามารถในการกลายเป็นไอของสารทำความเย็นนั้นๆ ถ้าหากสารทำความเย็นที่ใช้สามารถระเหยได้มากเท่าไรการทำความเย็นก็จะมากขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าปริมาณของสารทำความเย็นมีมากเกินไปก็จะยิ่งทำให้การระเหยตัวกลายเป็นไอทำได้น้อย ทำให้การทำความเย็นมีค่าต่ำลง ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟ C.O.P. ของน้ำและแอลกอฮอล์ ซึ่งจะเห็นว่าแอลกอฮอล์สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าน้ำจึงทำให้การทำความเย็นของแอลกอฮอล์มีค่ามากกว่าน้ำ

### เอกสารอ้างอิง

1. ชูชัย ต. ศิริวัฒนา “ การทำความเย็น และ การปรับอากาศ ” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ( ไทย - ญี่ปุ่น )
2. ผศ.ดร. สมชัย อัครทิวา อาจารย์ ชวัญจิต วงษ์ชาติ “ เทอร์โมไดนามิกส์ ( Thermodynamics ) ”
3. รองศาสตราจารย์ มนตรี พิรุณเกษร “ การถ่ายเทความร้อน ”
4. ผศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ “ การถ่ายเทความร้อน ” งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้