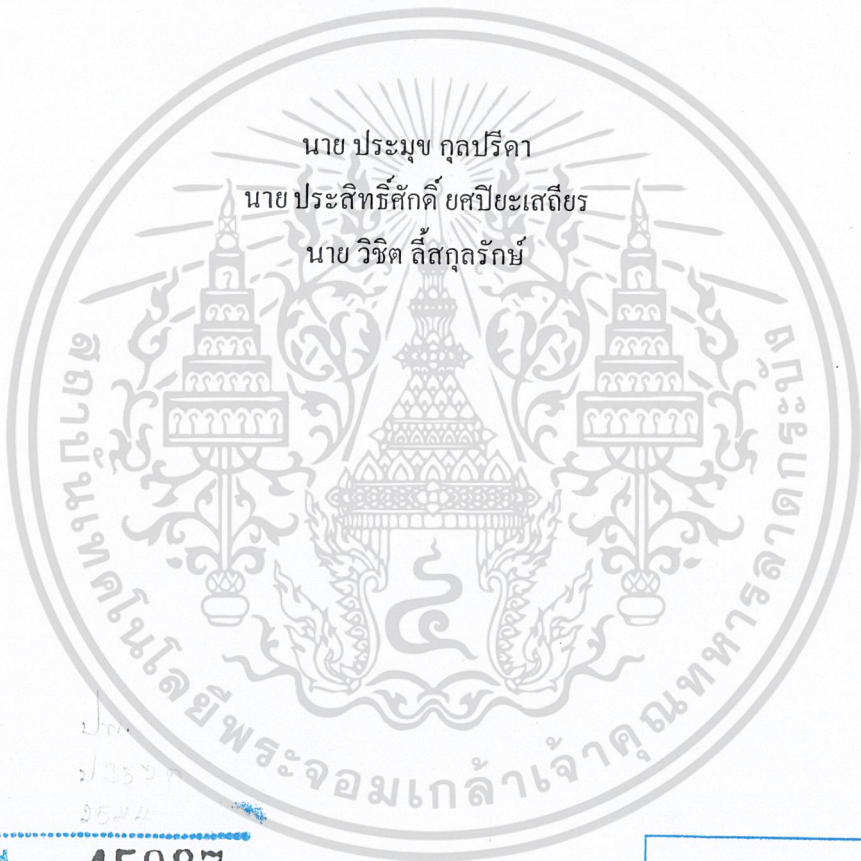


การทำความเย็นแบบสุญญากาศ

VACUUM REFRIGERATION



นาย ประมวช กุลปรีดา

นาย ประสิทธิ์ศักดิ์ ขสปิยะเสถียร

นาย วิชิต ลีสกุลรักษ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.. 45987
วัน, เดือน, ปี 27 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การทำความเย็นแบบสุญญากาศ

VACUUM REFRIGERATION

ผู้จัดทำ

1. นาย ประมุข กุลปรีดา รหัสประจำตัว รหัสประจำตัว 42015356
2. นาย ประสิทธิ์ศักดิ์ ยศปิยะเสถียร รหัสประจำตัว 42515778
3. นาย วิชิต ลีสกุลรักษ์ รหัสประจำตัว รหัสประจำตัว 42515786



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ธวัชชัย นาคพิพัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความเย็นแบบสูญญากาศ

นาย ประมุข กุลปรีดา	42015356
นาย ประสิทธิ์ศักดิ์ ยศปิยะเสถียร	42515778
นาย วิชิต ลีสกุลรักษ์	42515786
ผศ. ธวัชชัย นาคพิพัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ระบบการทำความเย็นแบบสูญญากาศ คือ กระบวนการลดความดันโดยการดึงเอาไอของสารทำความเย็นออกจากห้องระเหย กระบวนการทำความเย็นเริ่มต้นที่ การระเหยของสารทำความเย็นที่ความดันต่ำ ทำให้สารทำความเย็นบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งทำให้สารเหลวส่วนที่เหลือในห้องระเหยมีอุณหภูมิที่ต่ำลงเนื่องจากการถูกดึงความร้อนแฝงออกไป เป็นผลให้ความร้อนทั้งหมดของสารทำความเย็นต่ำลง ไปทำความเย็นที่จุดขดท่อ แล้วไหลเวียนกลับสู่ห้องระเหยอีกครั้ง โครงการนี้เพื่อศึกษาปัจจัยของการทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบสูญญากาศ และสมรรถนะของการทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องระเหยและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นของสารที่เป็น น้ำและแอลกอฮอล์

VACUUM REFRIGERATION

Pramot Kulpeeda

Prasitsak Yospiyasathian

Vichit Lesakulruk

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 vacuum pump. The process of low temperature production begin by the evaporation of refrigerants at low pressure, it make some of the refrigerant vaporized and reduced temperature of working 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 is to study of the factors of vacuum refrigeration and its performance which was changed by pressure in flash tank and compared to the performance between water and alcohol refrigerant.

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ รัชชัย นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา และเอาใจใส่ดูแลเสมอมา ปริญญาโทฉบับนี้จึงสามารถดำเนินการและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นพี่ปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดมิได้คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ผู้ซึ่งอบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสในการศึกษา และเป็นกำลังใจให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรค จนกระทั่งมีวันนี้ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ประมุข กุลปรีดา
ประสิทธิ์ศักดิ์ ยศปิยะเสถียร
วิจิต ลีสกุลรักษ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีในการดำเนินการโครงการ	2
บทที่ 2. ทฤษฎี	3
2.1 หลักการเบื้องต้นของการทำความเย็น	3
2.2 ขบวนการพื้นฐานของการทำความเย็น	3
2.3 ระบบการทำความเย็น	4
2.4 ประเภทของการทำความเย็น	5
2.5 สุญญากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร	5
2.6 หน่วยสุญญากาศ	6
2.7 ระดับของสุญญากาศ (Degree of Vacuum)	6
2.8 บั้มสุญญากาศ	10
2.9 ข้อจำกัดทางวิศวกรรม	11
2.10 ชนิดของบั้มสุญญากาศ	14
2.11 การเลือกบั้มสุญญากาศ	43
2.12 ท่อหรือสายสุญญากาศ	47
2.13 รายละเอียดของโครงสร้าง P-h ไดอะแกรม	47
2.14 หลักการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.15 สมการที่ใช้ในการคำนวณ	50
บทที่ 3. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	53
3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	53
3.2 วิธีการทดลอง	60
บทที่ 4. ผลการทดลอง	62
4.1 ผลการทดลองสารทำความเย็น (น้ำ)	62
4.2 ผลการทดลองสารทำความเย็น(แอลกอฮอล์)	66
4.3 ผลการทดลองสารทำความเย็นในแต่ละความดันสุญญากาศ (น้ำและแอลกอฮอล์)	70
บทที่ 5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	71
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	71
5.2 สรุปผลการทดลอง	72
5.3 ข้อเสนอแนะและการปรับปรุงแก้ไข	73
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก.	77
ภาคผนวก ข.	81

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบหน่วยอื่น ๆ	6
ตารางที่ 2-2 แสดงค่าสุญญากาศของปั๊มต่าง ๆ	43
ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองสารทำความเย็น (น้ำ) ในแต่ละปริมาตร(ไม่ผ่านระบบ)	62
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองสารทำความเย็น (น้ำ) ของระบบ	62
ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณสารทำความเย็น (น้ำ) ของระบบ	63
ตารางที่ 4-4 ผลการทดลองสารทำความเย็น (แอลกอฮอล์) ในแต่ละปริมาตร(ไม่ผ่านระบบ)	66
ตารางที่ 4-5 ผลการทดลองสารทำความเย็น (แอลกอฮอล์) ของระบบ	66
ตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณสารทำความเย็น (แอลกอฮอล์) ของระบบ	67
ตารางที่ 4-7 ผลการทดลองสารทำความเย็นในแต่ละความดันสุญญากาศ (น้ำและแอลกอฮอล์)	70



สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ระบบการทำความเย็น	4
รูปที่ 2-2 แรงดันบรรยากาศดันให้ด้วยสุญญากาศแนวกับผนัง	5
รูปที่ 2-3 ช่วงความสามารถในการทำสุญญากาศของปั๊มแต่ละชนิด	7
รูปที่ 2-4 ช่วงเวลาของความเร็วในการปั๊มแต่ละชนิด	8
รูปที่ 2-5 แสดงการออกแบบระบบสุญญากาศของบริษัท LUCUS (1965)	9
รูปที่ 2-6 บาโรมิเตอร์ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศ	10
รูปที่ 2-7 ในถังสุญญากาศ ความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง	11
รูปที่ 2-8 กราฟแสดงขีดความสามารถ	13
รูปที่ 2-9 รูปประกอบสมการกำลังขับเคลื่อน	14
รูปที่ 2-10 ลักษณะของปั๊มสุญญากาศแบบลูกสูบ	15
รูปที่ 2-11 มอเตอร์ขับเคลื่อนปั๊มทำให้แผ่นไดอะแฟรมขยับตัวขึ้นลงเกิดในปั๊มแบบไดอะแฟรม	16
รูปที่ 2-12 ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเวน	17
รูปที่ 2-13 แสดงภาพตัดของ Rotating Vane Pump	17
รูปที่ 2-14 ภาพแยกชิ้นของ Rotating Vane Pump จาก Ward & Burn (1967)	18
รูปที่ 2-15 แสดงการทำงานของ Rotating Vane Pump	18
รูปที่ 2-16 Typical pumping speed pressure curve of rotating vane pump	20
รูปที่ 2-17 Principle of gas ballast pump and one way gas ballast valve	20
รูปที่ 2-18 Pumping speed curve of one and two stage rotary pump, without and with gas ballast	22
รูปที่ 2-19 Sliding vane pump, with vane sliding both in casing and rotor	23
รูปที่ 2-20 Sliding vane pump, with vane sliding in casing	23
รูปที่ 2-21 Mode of action of a sliding vane pump	24
รูปที่ 2-22 Rotating plunger pump	24
รูปที่ 2-23 Root pump	25
รูปที่ 2-24 การทำงานของ Root pump	25
รูปที่ 2-25 Typical pumping speed curve of Root pump	26
รูปที่ 2-26 หลักการทำงานของปั๊มแบบสกรู	26
รูปที่ 2-27 หลักการทำงานของรีเอนเนอร์ตีฟ โบลเวอร์	27
รูปที่ 2-28 หลักการทำสุญญากาศ โดยไม่ต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 2-29 ภาพตัด Water ring pump	28
รูปที่ 2-30 Molecular pump after backer (1958)	29
รูปที่ 2-31 Details of the rotor and stator plate of the Molecular pump after backer (1998)	30
รูปที่ 2-32 Typical pumping speed curve of Molecular pump for air	30
รูปที่ 2-33 Vapor pump	31
รูปที่ 2-34 Double state oil vapor ejector pump	32
รูปที่ 2-35 Glass oil vapor ejector pump	32
รูปที่ 2-36 Pumping speed curve of oil vapor ejector pumps	33
รูปที่ 2-37 Steam ejector	33
รูปที่ 2-38 Typical diffusion pump characteristic	36
รูปที่ 2-39 Pumping speed and pressure in a multistage diffusion pump	37
รูปที่ 2-40 Fractionating oil diffusion pump	38
รูปที่ 2-41 Example of characteristic of diffusion pump	40
รูปที่ 2-42 Pumping speed an equivalent throughput curve of a diffusion pump	40
รูปที่ 2-43 Sprengle pump	41
รูปที่ 2-44 Water ejector pump	42
รูปที่ 2-45 Toepler pump reprinted from Dushman an Laffery (1962)	42
รูปที่ 2-46 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มสุญญากาศชนิดหนึ่ง	45
รูปที่ 4-47 ปั๊มแบบโรตารีเวนที่มีขนาดกะทัดรัดแบบหนึ่ง	46
รูปที่ 2-48 โครงสร้าง P-h ไดอะแกรม	47
รูปที่ 2-49 โครงสร้าง P-h ไดอะแกรมความดันคงที่ อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรคงที่ เส้นเอนทัลปีคงที่	48
รูปที่ 2-50 ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	49
รูปที่ 2-51 P-h ไดอะแกรมของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	50
รูปที่ 3-1 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของชุดทดลอง	53
รูปที่ 3-2 บอร์ดแสดงวงจรการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ	53
รูปที่ 3-3 ปั๊มสุญญากาศ	54
รูปที่ 3-4 ห้องระเหย	54
รูปที่ 3-5 ปั๊มสารทำความเย็น	55
รูปที่ 3-6 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3-7	ถังเติมสารทำความเย็น	56
รูปที่ 3-8	มาตรการวัดการไหล	56
รูปที่ 3-9	กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง	57
รูปที่ 3-10	เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบปรอท	57
รูปที่ 3-11	เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล	58
รูปที่ 3-12	เกจวัดความดัน	58
รูปที่ 3-13	เกจวัดความดันสุญญากาศ	59
รูปที่ 3-14	แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์	59
รูปที่ 3-15	อีเล็กเตอร์	60
กราฟที่ 4-1	แสดงผลจากปริมาณน้ำต่าง ๆ ที่มีผลต่อเวลาและอุณหภูมิ	64
กราฟที่ 4-2	แสดงผลของ R.E. และ Win ของน้ำที่เวลาต่าง ๆ กัน	64
กราฟที่ 4-3	แสดงค่า C.O.P. ของน้ำที่เวลาต่าง ๆ กัน	65
กราฟที่ 4-4	แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อเวลาและอุณหภูมิ	68
กราฟที่ 4-5	แสดงผลของ R.E. และ Win ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่าง ๆ กัน	68
กราฟที่ 4-6	แสดงค่า C.O.P. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่าง ๆ กัน	69
กราฟที่ 4-7	แสดงความสัมพันธ์ ความดันสุญญากาศ – อุณหภูมิ ของสารทำความเย็น	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้การทำความเย็นได้เข้าไปมีบทบาทต่อการดำรงชีวิตมนุษย์มากยิ่งขึ้นไม่ว่าจะเป็น การนำระบบการทำความเย็นมาอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันตลอดจนนำไปใช้ในการเก็บรักษาอาหาร เครื่องดื่ม ยารักษาโรค และยังได้นำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งจากอดีตถึงปัจจุบันได้มีการศึกษา ค้นคว้าและพัฒนา ระบบการทำความเย็นเพื่อทำให้ใช้ประโยชน์สูงสุด

ระบบการทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ ในโครงการนี้ได้เสนอการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ซึ่งอาจจะเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการทำความเย็น

โครงการนี้ได้นำเทคนิคของการทำความเย็นอีกวิธีหนึ่งมาทำการดำเนินการในโครงการ ซึ่งก็คือ การทำสุญญากาศ ซึ่งจะใช้ความรู้เบื้องต้นทางด้าน การทำความเย็นและวิธีต่าง ๆ ทางวิศวกรรมเป็นแนวทางที่ใช้ในโครงการนี้ เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของการทำความเย็น กำลังที่ใช้ของระบบการทำความเย็น แต่เนื่องจากการทำวิจัยครั้งนี้ ยังขาดแคลนในเรื่องของทุนทรัพย์ที่จะนำมาใช้จ่ายในระหว่างการทำโครงการนี้ จึงอาจจะเป็นผลทำให้การดำเนินงานในโครงการนี้ออกมาไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงหลักการ ทำงานแบบสุญญากาศที่มีผลต่อความดันและอุณหภูมิ ซึ่งความเป็นไปได้ อาจจะต้องมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อสร้างเป็นชุดทดลองระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการ ทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ โดยใช้สารทำความเย็นแต่ละชนิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้เป็นโครงการเกี่ยวกับการศึกษาระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ซึ่งโครงการนี้จะดำเนินการติดตั้งระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศขึ้นแล้วนำมาทำการทดลองหาค่าต่าง ๆ เพื่อที่จะศึกษาประสิทธิภาพของการทำความเย็นนี้

ระบบการทำความเย็นที่ติดตั้งนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ห้องระเหย บีบสารทำความเย็น ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน บีบสุญญากาศ

การดำเนินงานโครงการนี้เป็นเพียงโครงการเริ่มต้น ที่จะทำการศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีที่ว่า สารทำความเย็นสามารถระเหยได้ดีในความดันสุญญากาศ ว่าเป็นไปตามหลักทฤษฎีหรือไม่ ถ้าระบบการทำความเย็นสุญญากาศเป็นผลที่น่าพอใจแล้ว ก็จะมีการพัฒนาต่อไป เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ในงานด้านอุตสาหกรรม

1.4 วิธีในการดำเนินการโครงการ

วิธีและขั้นตอนในการดำเนินงานโครงการนี้สามารถแบ่งออกได้หลัก ๆ เป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนแรกนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการทำงาน ทฤษฎีสุญญากาศ ศึกษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงการนี้ ตลอดจนศึกษาหลักการทำงานของระบบการทำความเย็นสุญญากาศว่าทำงานอย่างไร การคำนวณค่าต่าง ๆ ของระบบ ศึกษาโครงสร้างของ P-h ไดอะแกรมของระบบการทำความเย็นนี้ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะอยู่ในบทที่ 2

หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ แล้วก็เริ่มทำการหาอุปกรณ์ที่ต้องใช้ติดตั้งชุดทดลอง เมื่อติดตั้งชุดทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ต้องมีการทดสอบระบบต่าง ๆ ว่าระบบเกิดรั่ว ก็ทำการติดตั้งส่วนนั้นใหม่ หลังจากแก้ไขให้เรียบร้อยก็ทำการเดินระบบเพื่อทำการทดลอง รายละเอียดทั้งหมดนี้และวิธีการทดลองจะอยู่ในบทที่ 3

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วก็นำผลที่ได้มาคำนวณ โดยส่วนนี้จะอยู่ในบทที่ 4 และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาสร้างเป็นกราฟ เพื่อที่จะศึกษา และเปรียบเทียบแต่ละสารทำความเย็น และแนวโน้มของระบบ

ในส่วนท้ายสุดจะเป็นเกี่ยวกับเรื่องการนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้ ข้อเสนอแนะในการดำเนินการโครงการ รวมทั้งข้อปรับปรุง แก้ไข เพิ่มเติมอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ เพื่อให้ผลการทดลองของโครงการมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

2.1 หลักการเบื้องต้นของการทำความเย็น

ระบบการทำความเย็น คือ การรักษาอุณหภูมิของสิ่งที่ต้องการทำความเย็นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบ ระบบการทำความเย็นที่ใช้ในงานจริงทุกระบบ จะทำการรักษาอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโดยการนำเอาความร้อนออกจากสิ่งที่ต้องการทำความเย็นขณะที่มีอุณหภูมิต่ำและนำความร้อนออกทิ้งขณะที่มีอุณหภูมิสูง โดยอาศัยสารตัวกลาง (สารทำความเย็น) เป็นตัวนำความร้อน

ดังนั้น จุดมุ่งหมายของระบบการทำความเย็น คือ การให้สารทำความเย็นรับความร้อนเข้าสู่ตัวขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ และถ่ายเทความร้อนออกจากตัวขณะที่มีอุณหภูมิสูง เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิของสิ่งที่ต้องการทำให้เย็นต่ำไว้

2.2 ขบวนการพื้นฐานของการทำความเย็น

2.2.1 การเพิ่มอุณหภูมิของสารตัวกลาง

ขบวนการดังกล่าว ทำได้โดยการผ่านน้ำยาที่มีอุณหภูมิต่ำมาสัมผัสกับสิ่งของ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นเช่น การนำอากาศเย็นเข้ามาภายในบ้าน เพื่อรับความร้อนจากผู้อยู่อาศัยและวัตถุต่างๆ ที่อยู่ภายในห้องออกไป

2.2.2 การทำให้สารตัวกลางเปลี่ยนสถานะ

ขณะที่สารตัวกลางเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหรือจากของเหลวเป็นไอ จะดูดความร้อนเข้าสู่ตัวเองปริมาณหนึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ “ความร้อนแฝง” ของสารทำความเย็นชนิดนั้น ๆ ดังนั้นอาศัยหลักการของการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นนี้มาใช้ในระบบทำความเย็นได้

2.2.3 การทำให้ของเหลวขยายตัว

คุณสมบัติของของเหลวข้อหนึ่ง คือ ถ้าของเหลวมีการขยายตัวจะทำให้อุณหภูมิลดลงแต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้ว ปริมาตรของของเหลวจะเพิ่มขึ้นได้โดยยาก ทั้งนี้เพราะของเหลวเป็นของไหลที่ไม่ยุบตัวตามความดันดังนั้นถึงแม้จะทำให้ความดันของของเหลวลดลงแล้วก็ตามปริมาตรของของเหลวจะเพิ่มขึ้นไม่มาก ซึ่งมีผลตามมาก็คือ อุณหภูมิของของเหลวจะลดลงไม่มากด้วย แต่ถ้าให้ของเหลวมีการขยายตัว ขณะเดียวกันยอมให้ของเหลวนั้นกลายเป็นไอไปด้วยจะทำให้อุณหภูมิจากของเหลวนั้นลดลงอย่างมากมาย ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการทำความเย็นด้วยการอัดไอหรือขบวนการซึ่งทำให้ในโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลวขยายตัวและกลายเป็นไอ

2.2.4 การทำให้แก๊สขยายตัว

ขณะที่ไอคิลแก๊สมีการขยายตัว จะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นในขบวนการที่มีการไหลสม่ำเสมอ ถ้าสมมุติว่าขณะที่ไอคิลแก๊สนี้ขยายตัวทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นและไม่มีการเกิดขึ้นหรือไม่ใช้งาน เกิดขึ้นในระดับที่สูงเท่ากัน และการขยายตัวของแก๊สนี้เกิดขึ้นแบบไอเซ็นโทรปิก ซึ่งสรุปได้ว่า ถ้าไอคิลแก๊สมีการขยายตัวตามขบวนการที่มีการไหลสม่ำเสมอจะทำให้อุณหภูมิจากแก๊สลดลง ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้ใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตเห็นประโยชน์แก่สาธารณะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานของการทำความเย็นด้วยอากาศหมุน ระบบการทำความเย็นแบบวัฏจักรอากาศ ซึ่งใช้มากในระบบทำความเย็นของเครื่องบินและระบบทำความเย็นด้วยไอน้ำ

2.2.5 ขบวนการทางแม่เหล็ก

สสารสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดตามคุณลักษณะการเป็นแม่เหล็ก คือสสารที่ไม่ถูกดูดโดยแม่เหล็กเรียกว่า นอนแม็กเนติก และสสารที่ถูกดูดโดยแม่เหล็กเรียกว่า พาราแม็กเนติก เกลือพาราแม็กเนติก เช่น กาโดลิเนียมซัลเฟต มีคุณสมบัติที่ใช้ทำอุณหภูมิต่ำ

กล่าวคือ เมื่อเกลียดังกล่าวถูกหล่อเย็นให้มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ การเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะเกือบไม่เกิดขึ้นเลย เมื่อน้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำนี้เข้าไปในสนามแม่เหล็ก โมเลกุลจะเกิดการเรียงตัว แต่เมื่อนำเอาสนามแม่เหล็กออก โมเลกุลในเกลือจะกลับตัวเพื่อกลับล้างอำนาจแม่เหล็กซึ่งทำให้อุณหภูมิของเกลือลดลงได้อีก การทำความเย็นโดยขบวนการทางแม่เหล็กสามารถทำอุณหภูมิต่ำได้ถึง 0.001 องศาฟาเรนไฮด์ (-273.990 องศาเซลเซียส)

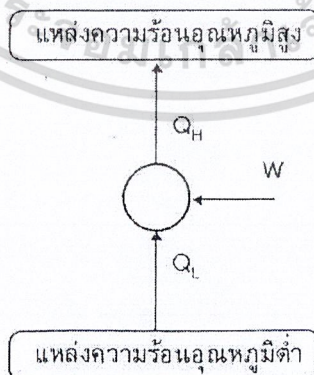
2.2.6 ขบวนการทางไฟฟ้า

หลักการของเทอร์โมคัปเปิลคือ ถ้าเชื่อมต่อขั้วทั้งสองของ โลหะสองชนิดที่ต่างกันเข้าด้วยกัน และทำให้ขั้วต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะทั้งสองนี้ได้ หลักการดังกล่าวนี้เรียกว่า “Peltier effect”

เมื่อนำหลักการดังกล่าวนี้ มาใช้งานในทางที่กลับกันจากทฤษฎีเดิม กล่าวคือ ถ้ามีการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรของโลหะทั้งสองนี้ จะทำให้ขั้วต่อของโลหะข้างหนึ่งมีอุณหภูมิต่ำขึ้น และข้างหนึ่งมีอุณหภูมิสูง วิธีการดังกล่าวนี้นำมาเป็นหลักการของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมสแตติกส์

2.3 ระบบการทำความเย็น

ระบบเครื่องทำความเย็นเป็นขบวนการนำความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำ ถ่ายเทให้กับของไหล (ซึ่งในโครงการานนี้ใช้น้ำและแอลกอฮอล์) ซึ่งจะพาความร้อนไปทิ้งให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยมีงานกระทำแก่ของไหลนั้น



รูปที่ 2-1 ระบบการทำความเย็น

รูปที่ 2-1 เป็นลักษณะการทำงานของระบบทำความเย็น โดยต้องใส่งานให้อุปกรณ์ด้วยปริมาณ W จึงสามารถรับความร้อนในปริมาณ Q_L จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ T_L อุปกรณ์นั้นจะถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_H

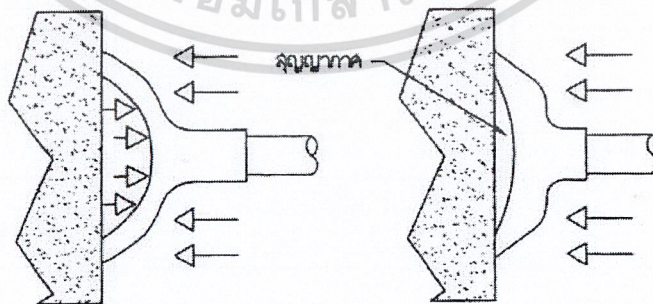
2.4 ประเภทของการทำความเย็น

ในการทำให้อุณหภูมิลดลงจากปกติ (Ambient Air Temperature) ลงมาถึงอุณหภูมิที่ต้องการนั้น สามารถใช้ระบบทำความเย็นได้หลายแบบ ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นแบบทางกลและไม่ใช้ทางกล ดังนี้

- 2.2.1 ระบบการทำความเย็นแบบชนิดอัดไอ
- 2.2.2 ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลาย
- 2.2.3 ระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ (ระบบปิด)
- 2.2.4 ระบบการทำความเย็นแบบให้หัวฉีดไอน้ำ
- 2.2.5 ระบบการทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2.2.6 ระบบแม่เหล็กที่ใช้ในการทำอุณหภูมิต่ำ

2.5 สูญญากาศเกิดขึ้นได้อย่างไร

ในระบบลมอัดอากาศที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นจะเป็นตัวทำให้เกิดแรงในการทำงาน แต่ในระบบ สูญญากาศนั้นจะได้แรงทำงานจากแรงดันบรรยากาศ โดยแรงดันจากลมถูกลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีระดับต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศที่อยู่รอบ ๆ ทำให้ได้แรงดันที่มากกว่า สามารถนำไปใช้งานได้ ในรูปที่ 2-2 แสดงหลักการพื้นฐานของถ้วยสูญญากาศจะทำให้ความดันทั้งด้านในและด้านนอกเท่ากัน แต่เมื่อดันถ้วย สูญญากาศให้แนบกับผนังอากาศที่อยู่ด้านในจะถูกดันออกสู่ภายนอก ทำให้ความดันลดลง เมื่อถึงตอนนั้น ความดันบรรยากาศที่มีค่าสูงกว่าก็จะดันให้ถ้วยแนบกับผนัง ในอุตสาหกรรมจริง ๆ แล้วเครื่องมือที่ใช้ งานเปรียบเสมือนกับภาชนะที่ถูกลบอัด ส่วนปั๊มสูญญากาศก็จะทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบทำให้เกิด ความแตกต่างของความดันขึ้น



รูปที่ 2-2 แรงดันบรรยากาศดันให้ถ้วยสูญญากาศแนบกับผนัง

ตัวอย่างภาชนะปิดในงานต่าง ๆ ในระบบการเติมของเหลวก็คือตัวขวดหรือภาชนะบรรจุ เมื่อเกิดสุญญากาศขึ้นภายในภาชนะบรรจุ เมื่อเกิดสุญญากาศขึ้นภายในแล้ว แรงดันบรรยากาศจะดันให้ของเหลวหรือผงวัสดุที่ต้องการไหลเข้าสู่ภาชนะในระบบนิวแมติกคอนเวเยอร์ ภาชนะปิดก็คือตัวเก็บ (Storage tank) และการใช้งานในงานยกภาชนะปิดก็คือด้วยสุญญากาศนั่นเอง

2.6 หน่วยสุญญากาศ

หน่วยที่นิยมใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศคือนิวปรอท (Mercury, in-Hg) รูปที่ 2-6 แสดงให้เห็นบารอมิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วที่ภายในถูกดูดอากาศออก (สุญญากาศ) ปลายเปิดส่วนอีกด้านหนึ่งเปิดให้จมลงในภาชนะบรรจุปรอทที่เปิดสู่บรรยากาศภายนอก ความดันหรือน้ำหนักที่เกิดจากบรรยากาศจะพยายามออกแรงกระทำกับผิวหน้าของปรอท และดันให้ปรอทเข้าสู่หลอดแก้วสูง 29.92 นิ้ว (760 มม.) ที่ระดับน้ำทะเล ดังนั้นจึงได้ค่ามาตรฐานของค่าความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเลเป็น 29.92 นิ้วปรอท ซึ่งเมื่อเปลี่ยนหน่วยแล้วมาตรฐานนี้จะเท่ากับ 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 2-1 เปรียบเทียบกับหน่วยอื่น ๆ

	0 ที่ความดันสมบูรณ์																	
ทอร์ (mmHg)	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	ค่าความดันเป็นลบ		ค่าความดันเป็นบวก	
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	2.8	0	0	0	0
ความสูงของปรอท	-500	-400	-300	-200	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	0	0	0	0
ความสูงของน้ำ	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	0	0	0	0
ความดันเกจ	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	0	0	0	0

2.7 ระดับของสุญญากาศ (Degree of Vacuum)

ระดับของสุญญากาศสามารถแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้เป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ระดับสูง และระดับสูงที่สุดในปัจจุบันนี้ การทำให้ถึงเก็บสุญญากาศมีความดันลดลงจนความดันบรรยากาศลดลงไปถึงระดับสุญญากาศระดับสูง (High Vacuum) หรือสุญญากาศระดับที่สูงที่สุด (Ultrahigh Vacuum) นั้นยังไม่มีขีปนาวุธใด ๆ ที่ใช้เพียงตัวเดียวแล้วสามารถกระทำได้ ยังคงต้องใช้ขีปนาวุธหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน ถึงแม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าปั๊มสุญญากาศโดยทั่ว ๆ ไป จะใช้ในการทำให้จำนวนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของก๊าซมีจำนวนลดลง แต่หลักการทำงานในปั๊มแต่ละชนิดเพื่อที่จะให้ความดันต่ำ นั้นจะแตกต่างกัน หลักการของ Vacuum pumping อาจจะใช้หลักการเดียวกันหรือหลาย ๆ หลักการดังต่อไปนี้

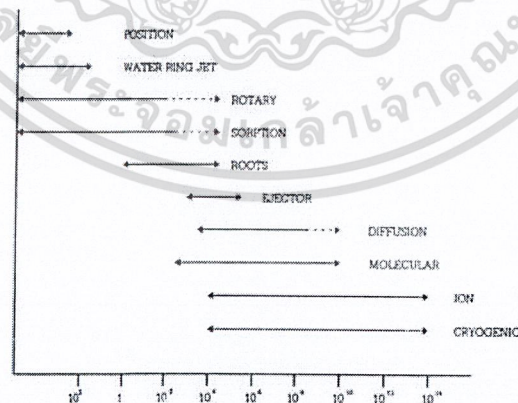
1. Compression -Expansion ของก๊าซ เช่น ใน piston pumps, liquid column or liquid column or liquid ring pumps, root's pumps
2. Drag by viscosity effect เช่น ใน vapor ejector pumps
3. Drag by diffusion effects เช่น ใน vapor diffusion pumps
4. Molecular drag เช่น ใน molecular pumps
5. Ionization effects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

หลักในการเลือกใช้ปั๊มที่สำคัญดังนี้

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

ช่วง Ultra-high Vacuum จะมี Parameters เพิ่มอีก 2 ตัวคือ

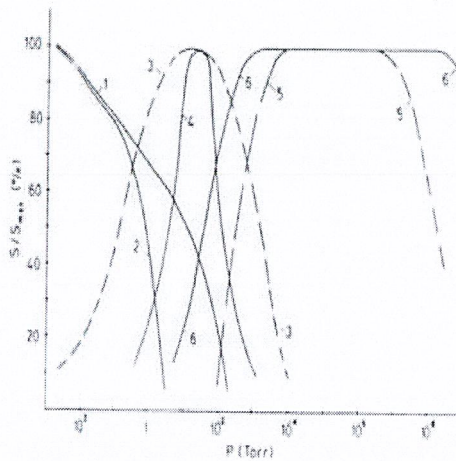
1. ความสามารถในการเลือกใช้ได้
2. ส่วนประกอบของก๊าซที่เหลือ



รูปที่ 2-3 ช่วงความสามารถในการทำสุญญากาศของปั๊มแต่ละชนิด

- ความดันต่ำสุดที่ปั๊มจะทำได้ ณ ตำแหน่งทางเข้าของมัน ค่าความดันต่ำสุดนี้สามารถพิจารณาได้จากกรรไกรในตัวปั๊มเอง หรือจากความดันไอของของไหลที่ใช้ในปั๊มนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 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 ปั๊มแบบเดียวกัน แต่ขนาดต่างกันหรือออกแบบสร้างแตกต่างกัน ก็จะทำให้ Pressure Range ที่ต่างกัน รูปที่ 2-3 แสดงถึง Pressure Rang ของปั๊มชนิดต่าง ๆ กัน และค่า Lowest Pressure ที่ปั๊มแต่ละชนิดสามารถทำได้

- ความเร็วรอบนี้จะไม่คงที่ แต่จะเป็นฟังก์ชันของความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ซึ่งเป็นการ Plot ระหว่างค่าความเร็วรอบกับค่า ความดันของปั๊มต่างชนิดกัน จะเห็นว่ามียู่ 2 แบบ คือ ในตอนเริ่มแรก ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความดันลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุด Maximum แล้วจะเริ่มลดลงไปเรื่อย ๆ เช่น Diffusion Pump, Root Pump เป็นต้น แบบที่ 2 pumping จะสูงสุดในตอนเริ่มต้น แล้วลดลงเมื่อความดันลดลงเรื่อย ๆ เช่น Rotary Pumps เป็นต้น

- ความดันทางออก (Exhaust Pressure) พิจารณาจากกรณีนี้ เราอาจแบ่งปั๊มสุญญากาศได้เป็น 3 จำพวกคือ

1. ปั๊มที่ Exhaust atmosphere โดยทั่ว ๆ ไป จะเรียกว่า roughing หรือ backing pumps

Roughing คือ การดูดอากาศจากระดับ Atmospheric Pressure ใน Chamber ออกไปจนกระทั่ง Chamber มีความดันอยู่ในระดับ Acceptable Operating Pressure

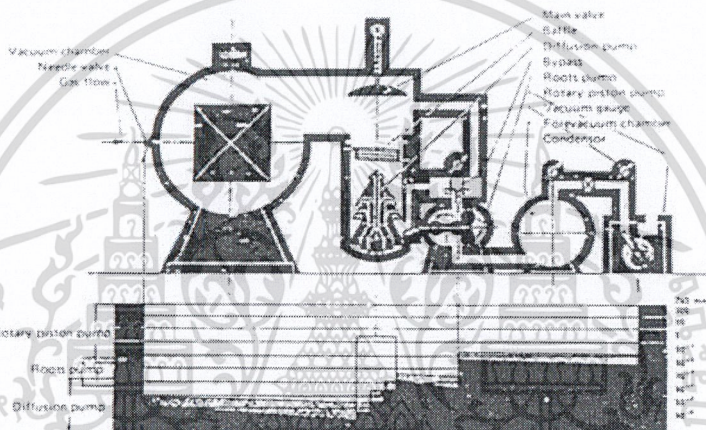
Backing Pumps คือ ปั๊มที่ทำหน้าที่รักษาระดับของความดันที่ทางออกของปั๊มอีกตัวหนึ่งให้มีความดันในระดับที่ปั๊มตัวนั้นสามารถทำงานได้

ปั๊มที่ทำหน้าที่ดังกล่าวข้างต้นก็ได้แก่พวก Mechanical Rotary Pumps 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 พวกนี้ได้แก่ ionization pumps และ Sorption Pumps

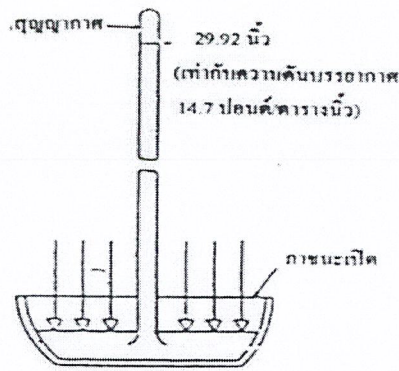
รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะทั่ว ๆ ไปของ Laboratory Vacuum System ซึ่ง Process Chamber ถูกรักษาไว้ที่ความดันต่ำ ๆ โดย Pumping System ที่ประกอบด้วย ปัมป์ 3 ตัวต่อแบบอนุกรมกัน ดังนี้คือ 3-Stage Diffusion Pumps ที่ถูก Back ด้วย Root's Pumps แล้วถูก Back อีกต่อหนึ่งด้วย Rotary piston Pumps



รูปที่ 2-5 แสดงการออกแบบระบบสุญญากาศของบริษัท LUCUS (1965)

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

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

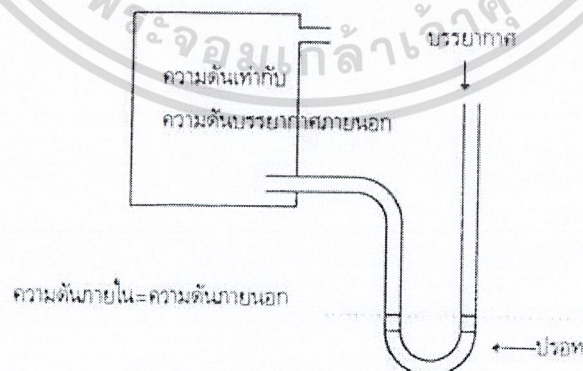


รูปที่ 2-6 บาร์มิเตอร์ใช้วัดค่าความเป็นสุญญากาศ

อากาศจากความดันดันทางที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อัดให้มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อปล่อยออกไป หากเรานำเอาถังใบหนึ่งที่ปิดบังมาต่อท่อเข้ากับปั๊ม นั้น อากาศในถังจะถูกดูดออกไปเรื่อย ๆ ทำให้ความดันภายในลดลง ซึ่งหมายถึงเกิดสภาวะสุญญากาศนั่นเอง การคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับปั๊มทั้งสองชนิดดังกล่าวจึงเหมือนกันทุกอย่าง แต่วิธีการสรรหาชนิดของปั๊มสุญญากาศที่เหมาะสมกับงานนั้นต่างออกไปเป็นคนละเรื่องเลย

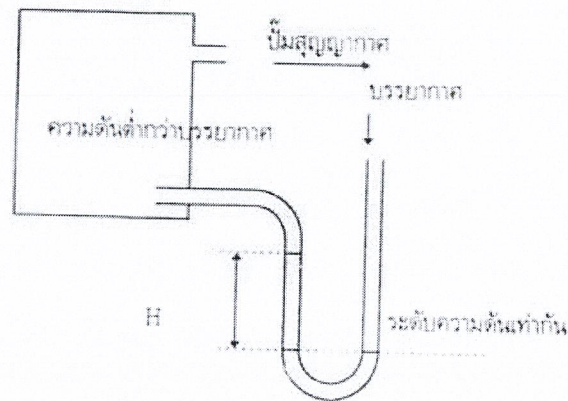
2.8 ปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศ คือ ปั๊มอัดอากาศแบบหนึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศจากความดันดันทางที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อัดให้มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อปล่อยออกไป หากเรานำเอาถังใบหนึ่งที่ปิดบังมาต่อท่อเข้ากับปั๊ม นั้น อากาศในถังจะถูกดูดออกไปเรื่อย ๆ ทำให้ความดันภายในลดลง ซึ่งหมายถึงเกิดสภาวะสุญญากาศนั่นเอง



ก. ก่อนเป็นสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. หลังเป็นสุญญากาศ

รูปที่ 2-7 ในถังสุญญากาศ ความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง

2.9 ข้อจำกัดทางวิศวกรรม

ข้อมูลที่เราจะนำมาใช้ตัดสินว่าปั๊มสุญญากาศตัวใด แบบไหน มีขีดความสามารถเฉพาะตัวที่จะทำสุญญากาศได้ระดับใด (Pump Rating) นั้นมีอยู่สามประการ

ประการแรก คือ ค่าสุญญากาศจำเพาะ (Vacuum Rating) ซึ่งหมายถึงปริมาณความดันที่ปั๊มจะเอาออกไปจากถังเพื่อให้ในถังมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศมากที่สุดที่มันจะทำได้

ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะบอกค่าสุญญากาศสูงสุดที่ปั๊มจะทำได้เป็นความสูงของปรอทเป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร (in-Hg, mm-Hg) ความดันที่เกิดจากความสูงของปรอทดังกล่าวคือ ความดันที่หายไปเนื่องจากถูกปั๊มดูดออกจากเริ่มแรกมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นยิ่งค่าความดันให้ต่ำลงมาก ๆ ได้ (สุญญากาศ) ค่านี้ก็จะยิ่งมาก

จากรูปที่ 2-7 เมื่อภายในถังสุญญากาศความดันในถังจะมีค่าเท่ากับความดันที่เท่ากับปรอทสูง เพื่อให้การระบุค่านี้ชัดเจนและกระชับยิ่งขึ้น เขาจึงกำหนดให้ความสูงของปรอทนี้เป็นค่าที่บอกระดับความเป็นสุญญากาศ (Degree of Vacuum) เพราะความดันบรรยากาศมีมาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลปานกลางมีค่า 29.92 นิ้ว-ปรอท จึงมีค่าจาก 0 ถึง 29.92 ยิ่งค่านี้มีมากก็แสดงว่าเป็นสุญญากาศมาก ตรงกับความรูสึกของคนทั่วไป

ผู้ผลิตบางรายก็บอกค่าสุญญากาศจำเพาะ (Vacuum Rating) เป็นเปอร์เซ็นต์ของสุญญากาศสมบูรณ์ สำหรับเครื่องที่ทำสุญญากาศได้สูงมาก ๆ (High Vacuum) เขาจะใช้หน่วยทอร์ (Torr) เพื่อบอกค่าความดันให้ชัดเจนยิ่งขึ้น 1 ทอร์มีค่า 1 ต่อ 760 ของความดันบรรยากาศมาตรฐานระบุน 1 มม. ปรอทที่มีความดันเท่ากับ 10000000014 ทอร์ ดังนั้นจึงถือได้ว่าความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 760 ทอร์ ในสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันต่ำกว่ามาก ๆ (สูญญากาศสูง) เมื่อต่ำกว่า 1 ทอร์ เราจะบอกตัวเลขยกกำลัง 5,00,000 ทอร์ปัมสูญญากาศแบบลูกสูบหรือแบบไดอะแฟรม อาจทำสูญญากาศได้สูงถึง 28 – 28.5 นิ้ว-ปรอท ซึ่ความสามารถนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและชนิดเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการระบายความร้อนด้วย โดยเฉพาะชนิดที่มีการเสียดสีของชิ้นส่วนภายใน เช่น ปัมแบบเวน จะทำสูญญากาศได้สูงขึ้นกว่าปกติ หากจัดให้เดิน ๆ หยุด ๆ เป็นช่วง ๆ เช่น 10 นาทีหยุด 10 นาที เพื่อให้มีเวลาได้อ่านได้ถ่ายเทความร้อนออกไปจนอุณหภูมิต่ำลง อาจทำสูญญากาศได้สูงกว่าเดิม 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์

ค่าสูญญากาศจำเพาะเหล่านี้คิดคำนวณจากความดันบรรยากาศมาตรฐาน 29.92 นิ้ว-ปรอท (760 มม.ปรอท) ถ้าหากความดันบรรยากาศ ณ ที่ใช้งานต่ำกว่านี้ จะทำให้ค่าสูญญากาศที่เครื่องจะทำให้ลดลงด้วยโดยคำนวณได้จากสูตร

$$V_a = V_o (P_a/29.92) \quad (2.1)$$

เมื่อ V_a คือ ค่าสูญญากาศจำเพาะ เมื่อแก้ความดันบรรยากาศแล้ว นิ้วปรอท V_o คือ ค่าสูญญากาศจำเพาะค่าเดิมที่ผู้ผลิตระบุ นิ้วปรอท และ P_a คือ ค่าความดันบรรยากาศ ณ ที่ใช้งานนิ้ว-ปรอท

ตัวอย่างที่ 1 Root Blower เครื่องหนึ่งมีค่าสูญญากาศจำเพาะ 22 นิ้วปรอท นำไปใช้งานโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งตั้งอยู่ที่ราบสูง สูงจากระดับน้ำทะเล 1,580 ฟุต (ความดันบรรยากาศ 28.42 นิ้วปรอท) จะมีค่าสูญญากาศจำเพาะเปลี่ยนไปจาก 22 (28.42/29.92) เป็น 20.90 นิ้วปรอท

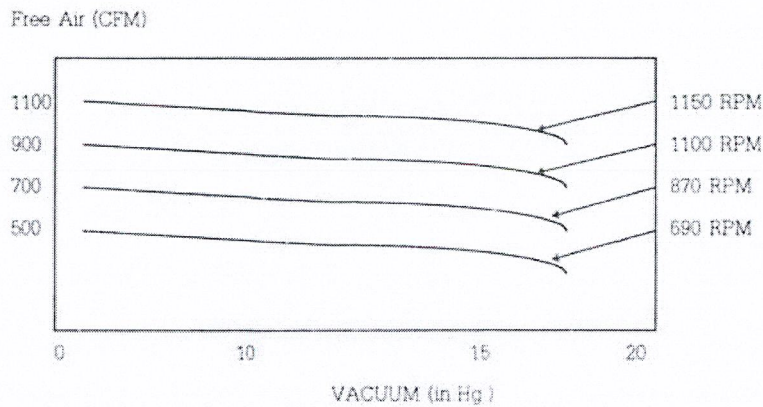
$$\text{เปอร์เซ็นต์ของสูญญากาศสัมบูรณ์} = 29.92 \cdot 100(H)$$

ระดับความดันบรรยากาศ

ระดับความดันในถัง (ความดันเป็นศูนย์)

H นิ้วปรอท มี 29.92 นิ้วปรอท

ข้อมูลสำหรับระบุขีดความสามารถของปั๊มสูญญากาศ ประการที่สองคือ อัตราดูดอากาศออก (Flow Rate หรือ Capacity) มีหน่วยเป็นลบ.ฟุตต่อนาที (cfm) หรือลิตรต่อชั่วโมง (L/h) ปริมาตรอากาศดังกล่าวเป็นปริมาตรอิสระ คือปริมาตรที่ได้จากการคำนวณโดยคิดสมมติว่าหากมันมีความดันและอุณหภูมิมาตรฐานแล้วมันจะมีปริมาตรเท่าไร ไม่ใช่ปริมาตร ณ ความดันก่อนถูกดูดเข้าปั๊ม ค่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) และความดันขาเข้า ผู้ผลิตที่ดีและเชื่อถือได้ควรมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ เช่น รูปที่ 2-8 เพื่อที่ว่าผู้ใช้จะสามารถเลือกได้ถูกต้อง



รูปที่ 2-8 กราฟแสดงขีดความสามารถ

ข้อกำหนดขีดความสามารถข้อสุดท้ายได้แก่ กำลังงานสำหรับการขับเคลื่อน เพื่อให้ได้สภาวะสองประการดังกล่าวมาแล้วตามที่ระบุ หากเปรียบเทียบกับเครื่องอัดอากาศแล้วจะพบว่าปั๊มสุญญากาศต้องการพลังขับเคลื่อนน้อยกว่ามาก เพราะเมื่อกำลังดูดอากาศออกด้วยอัตราสูง ผลต่างความค้ำดันค้ำดันกับด้านปล่อยมีค่าน้อย (ในกรณีที่เพิ่มการเดินเครื่องสุญญากาศ) เมื่อทำสุญญากาศได้สูงแล้ว ผลต่างความค้ำดันปั๊มมากแต่ปริมาตรอากาศที่ถูกดูดผ่านสุญญากาศกลับมีน้อย กำลังงานสำหรับขับเคลื่อนซึ่งเป็นสัดส่วนกับผลคูณระหว่างมวลอากาศ และผลต่างความค้ำดันจึงมีค่าไม่มาก

จากรูปที่ 2-9

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

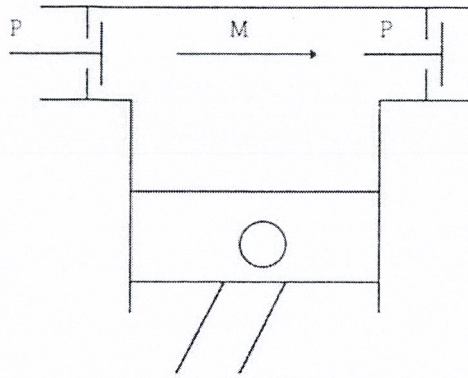
เมื่อ

m = อัตราอากาศที่ถูกดูดผ่านลูกสูบ

P,p = ความค้ำดันขาเข้าและขาออกตามลำดับ

J = ค่าคงที่ใด ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของปั๊ม

หรืออธิบายให้เข้าใจง่าย ๆ ได้ว่าปั๊มสุญญากาศเอาอากาศเพียงให้มีความค้ำดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อจะได้ปล่อยออกไปได้เท่านั้น แทนที่จะต้องอัดให้ได้ความค้ำดันสูง ๆ เช่น 60 ถึง 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้วภายในเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 2-9 รูปประกอบสมการกำลังขับเคลื่อน

ข้อมูลทั้ง 3 ประการดังกล่าวแล้ว จะปรากฏในแผนภูมิแสดงลักษณะการทำงาน (Performance Chart) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสุญญากาศ อัตราการดูดออกปริมาตรเชิงกลและประสิทธิภาพรวมเพื่อหาขนาดของปั๊มและกำหนดสภาวะขณะทำงานที่เหมาะสมที่สุดได้

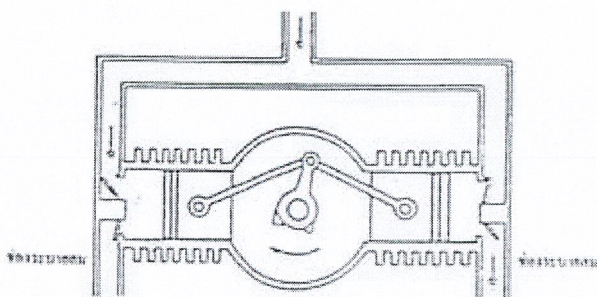
2.10 ชนิดของปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศ คือ ปั๊มอัดอากาศแบบหนึ่ง ดังนั้นปั๊มสุญญากาศจึงมีแบบต่าง ๆ ทุกแบบเท่าที่ปั๊มอัดอากาศจะมี

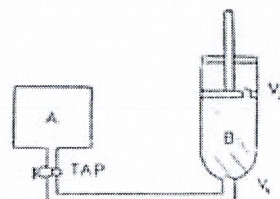
ปั๊มสุญญากาศมีทั้งแบบดูด-อัด (Positive Displacement) และแบบดูดเหวี่ยงหรือไดนามิก(Noon-positive displacement or Dynamic) ปั๊มแบบดูดอัด มีขนาดปริมาตรของห้องอัดที่คงที่ เช่น ปั๊มแบบลูกสูบ ปั๊มแบบโรตารีเวน ปั๊มแบบโหลบ (lope rotor) และสกรูส่วนปั๊มแบบดูดเหวี่ยงจะทำการดูดอากาศ โดยวิธีเปลี่ยนพลังงานศักย์ให้เป็นพลังงานจลน์(Kinetic Energy) ดูดอากาศออกจากระบบ ปั๊มพวกนี้ให้อัตราการไหลที่สูงแต่จะให้ระดับสุญญากาศไม่มากนัก ปั๊มแบบนี้ เช่น ปั๊มแรงเหวี่ยงแบบหลายสเตจ และปั๊มรีเยนเนอเรทีฟโบลเวอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ปั๊มแบบลูกสูบ (Reciprocating piston pumps)

ปั๊มแบบนี้เป็นชนิดที่สามารถทำสุญญากาศได้สูงรูปที่ 2-10ก แสดงให้เห็นลักษณะของปั๊มซึ่งอาจจะมีลูกสูบต่อกับเพลาคือเหวี่ยง 1 หรือ 2 ลูก การเคลื่อนที่ของลูกสูบทำให้อากาศถูกดูดผ่านลิ้นก้นกลับและเกิดสุญญากาศขึ้นที่ช่องพอร์ตทางเข้า ปั๊มแบบนี้สามารถทำสุญญากาศได้สูง 27 หรือ 28.5 นิ้วปรอทขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งาน มีข้อเสียคือ มีเสียงดัง และสิ้นสละที่อุณหภูมิขณะทำงาน ดังนั้นจะต้องติดตั้งเครื่องให้มันคงและแข็งแรง



รูป ก



รูป ข

รูปที่ 2-10 ลักษณะของปั๊มสุญญากาศแบบลูกสูบ

รูปที่ 2-10ข แสดง Piston Pumps ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ คือในขณะที่ลูกสูบถูกยกขึ้นจากตำแหน่งที่ต่ำขึ้น นั้น Valve V_2 จะปิดปริมาตรใน B จะเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความดันใน B ลดลง ดังนั้นจึงเกิดความแตกต่างระหว่างความดันใน A และ B ซึ่งมีผลทำให้ Valve V_1 เปิดขึ้นและก๊าซก็จะไหลผ่านจาก A ไป B เมื่อกดลูกสูบลง ความดันใน B ก็จะเพิ่มขึ้น Valve V_1 จะปิดและ Valve V_2 จะเปิดออก ทำให้ก๊าซใน B ไหลผ่าน Valve V_2 ออกไปข้างนอกได้

ใน 1 stroke ปริมาตรของก๊าซ V_A จะถูกขยายเป็น $V_A + V_B$ ทำให้ความดันลดลงจาก P เป็น P_1 จะได้ว่า $P_1 (V_A + V_B) = P V_A$

$$P_1 / P_2 = V_A / (V_A + V_B) \quad (2.3)$$

ภายหลังจาก n Stroke ความดันลดลงเป็น P_n ได้ว่า

$$\frac{P_n}{P} = [V_A / (V_A + V_B)]^n \quad (2.4)$$

ความดันต่ำสุดที่จะทำได้จาก ปั๊มชนิดนี้ถูกจำกัดโดยเนื้อที่ที่อยู่ระหว่าง V_1 และ V_2 เมื่อลูกสูบอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำสุดเรียกเนื้อที่นี้ว่า Dead space

ให้ V_d เป็น Dead Volume

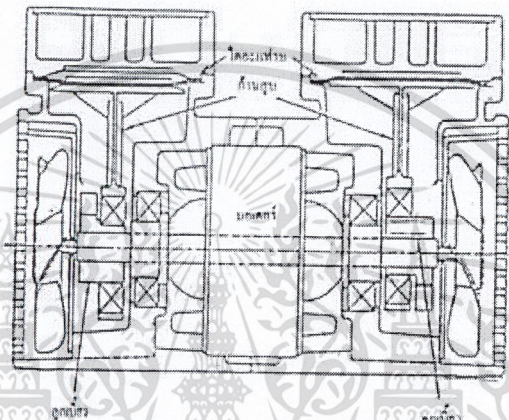
$$\therefore \text{ความดันที่ทำได้ (Minimum attainable pressure) คือ } P_0 = 760 V_d / V_B \quad (2.5)$$

ทั้งนี้เพราะที่ตำแหน่งต่ำสุดของ Stroke เพื่อที่จะทำให้ Valve V_2 เปิดความดันใน B จะต้องเท่ากับความดันบรรยากาศ

Piston ปัม โดยทั่วไปจะมีค่า V_d/V_B ประมาณ 1/8 ถึง 1/10 ดังนั้นความดันต่ำสุดที่จะทำได้ก็มีค่าประมาณ 100 Torr

2. ปัมแบบไดอะแฟรม (Diaphragm ปัม S)

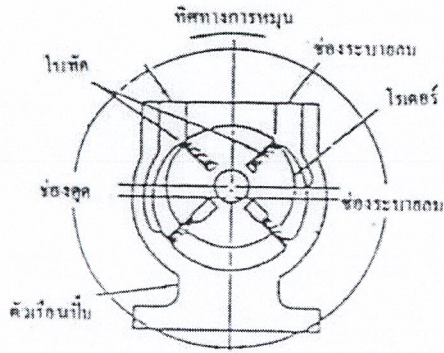
ปัมแบบไดอะแฟรมเป็นปัมแบบชักขึ้นลงชนิดหนึ่ง ที่สร้างสุญญากาศด้วยการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของแผ่นไดอะแฟรม ในห้องอัดที่อยู่ภายในปัมดังแสดงลักษณะเอาไว้ ตามรูปที่ 2-11 แผ่นไดอะแฟรมทำด้วยวัสดุสังเคราะห์อีลาสโตเมอร์ (elastomer) มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่น ดังนั้นการทำงานจึงไม่ต้องการน้ำมันปัมแบบนี้มีทั้งสแตงเดียวที่สามารถทำสุญญากาศได้ 24 นิ้วปรอทและสแตงที่ทุกสุญญากาศได้ 29 นิ้วปรอท



รูปที่ 2-11 มอเตอร์ขับเคลื่อนปั๊มทำให้แผ่นไดอะแฟรมขยับตัวขึ้นลงเกิดสุญญากาศในปัมแบบไดอะแฟรม

3. ปัมแบบโรตารี (Rotary vane pumps)

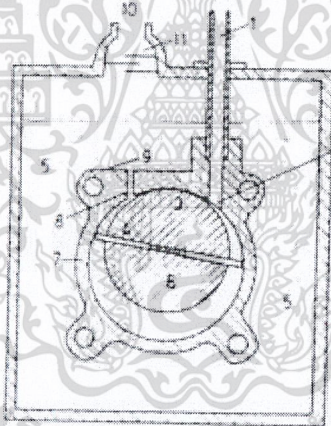
ปัมแบบนี้เหมือนกับเครื่องอัดอากาศดังแสดง ตามรูปที่ 2-12 จะมีเพลลาสามอยู่ในกระบอกปัม และเมื่อใบพัดหมุนจะดูดเอาอากาศออกจากช่องทางเข้าไปออกที่ช่องพอร์ตทางออกทำให้เกิดสุญญากาศขึ้นที่ช่องทางเข้า ปัมชนิดนี้นับว่ามีอัตราการดูดอากาศสูงมาก ปัมมีขนาดกะทัดรัดค่าใช้จ่ายต่ำ ต้องการทอร์ที่ใช้สำหรับเริ่มเดินปัมต่ำ ระดับความสั่นสะเทือนขณะเดินเครื่องและเสียงรบกวนต่ำมาก อัตราการไหลของอากาศเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถทำสุญญากาศที่สูง ๆ ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้นสามารถเดินปัมได้แบบเดิน ๆ หยุด ๆ ส่วนข้อจำกัดของการใช้ปัมแบบนี้ คือ อุณหภูมิและการระบายความร้อน ความสามารถในการทำสุญญากาศของปัมแบบนี้ ชนิดสแตงเดียวคือ 28 นิ้วปรอท แต่ถ้ามีการหล่อลื่นและระบายความร้อนที่ดีจะเพิ่มระดับสุญญากาศได้ 1 นิ้วปรอท



รูปที่ 2-12 ปัมสูญญากาศแบบโรตารีเวิน

1) Rotating - Vane Pumps

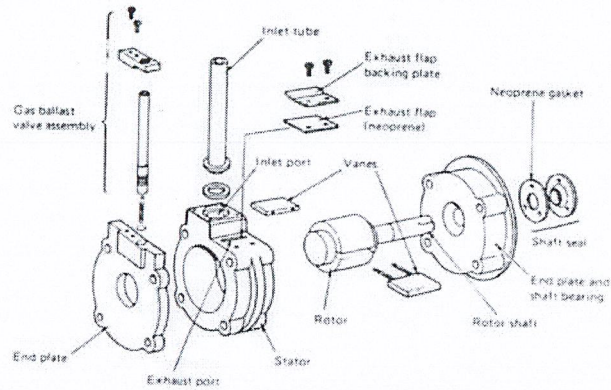
Rotating - Vane Pumps หรือโดยทั่ว ๆ ไปเรียกว่า Rotary Pump ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ Stator และ Rotor ดังแสดงในรูปที่ 2-13 และ 2-14



รูปที่ 2-13 แสดงภาพตัดของ Rotating Vane Pump

1. Inlet Tube 2. Inlet Port 3. Top seat 4. Vanes 5. Oil 6. Rotor 7. Stator 8. Exhaust Port 9. Exhaust flats valve with backing plate 10. Exhaust outlet 11. oil splash baffles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

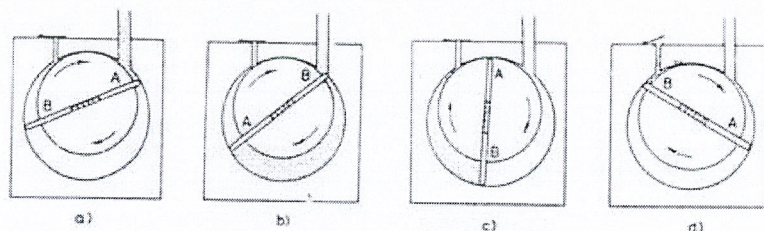


รูปที่ 2-14 ภาพแยกชิ้นของ Rotating Vane Pump จาก Ward & Burn (1967)

Stator เป็นส่วนที่อยู่หนึ่ง ทำด้วย Steel เป็นรูปทรงกระบอกที่ปลายทั้ง 2 ปิดด้วยแผ่นเหล็กซึ่งจะเป็นตัวยึดแกนของ Rotor ด้วยตัว Stator จะถูกเจาะเป็นช่องทางเข้าและทางออก ช่องทางเข้าจะต้องอยู่กับระบบสุญญากาศและโดยปกติมักจะมี ตัวกรองฝุ่นละออง (Dust Filter) อยู่ด้วยส่วนทางออกจะมีวาล์วซึ่งอาจจะเป็นแผ่นโลหะที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งอยู่ระหว่างแผ่นโลหะที่อยู่หนึ่ง 2 แผ่น หรืออาจจะเป็นแผ่นยื่นออกมา (Neoprene) ซึ่งจะอยู่ระหว่าง Stator กับ Metal Backing Plate ดังแสดงในรูปที่ 2-14

Rotor จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กรูปทรงกระบอกติดตั้งบนเพลากลาง (Axis) ของมันจะขนานกับแกนกลางของดังรูปที่ 2-13 และ 2-14 โดยไม่ทับกัน แต่ตัวมันจะไปแตะกับพื้นผิวด้านบนของ stator แนวสัมผัสนี้เรียกว่า Top seal ดังแสดงในรูปที่ 2-13 บนพื้นของ Rotor ที่ตรงกันข้ามในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางจะถูกเจาะเป็นช่องตลอดแนวความยาวของ Rotor เพื่อใช้เป็นที่ยึดใบพัด (Vaness) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีสปริงเป็นตัวยึดระหว่างใบพัดทั้งสองนี้ เพื่อที่ว่าด้านปลายของใบพัดทั้งสองจะแตะกับผนังของ Stator เป็นอย่างดีตลอดเวลาของการเคลื่อนที่ไป

ทั้งนี้ Stator และ Rotor จะจุ่มอยู่ในน้ำมันที่เหมาะสมตลอดเวลา



รูปที่ 2-15 แสดงการทำงานของ Rotating Vane Pump

รูปที่ 2-15 แสดงการทำงานของปั๊มดังนี้ เมื่อใบพัด A เคลื่อนที่ผ่านช่องทางเข้าดังรูปที่ 2-15 a เมื่อใบพัด A เคลื่อนที่ไป ปริมาตรที่อยู่ระหว่าง Stator, Top seal, Rotor และใบพัด A ก็จะเพิ่มขึ้น นั่นคือก๊าซจะเข้ามาในตัวปั๊มมากขึ้น ก็ทำให้ความดันในระบบลดลง ใบพัดจะหมุนไปจนกระทั่งใบพัด B ผ่านช่องทางเข้าดังรูปที่ 2-15 b ปริมาตรของก๊าซส่วนที่จะถูกดูดออกไปจะถูกตัดขาดออกจากระบบ เมื่อใบพัดหมุนต่อไปจนกระทั่งใบพัด A ผ่านตำแหน่ง Top seal ดังรูปที่ 2-15c ในสภาวะนี้ก๊าซ จะกระจายอยู่ในบริเวณระหว่างใบพัด B กับ Top Seal เมื่อหมุนต่อไปก๊าซเหล่านี้จะถูกอัดจนกระทั่งมีความดันมากพอที่จะไปดันให้ วาล์วทางออกเปิด ความดันนี้จะมีค่าประมาณ 850 Torr ดังนั้นก๊าซจะถูกปล่อยออกไปจากปั๊มทางช่องทางออกดังรูปที่ 2-15d

จะเห็นได้ว่าในการหมุน 1 รอบของ Rotor ปริมาตรที่ก๊าซถูกดูดโดยปั๊มจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของปริมาตรที่แสดงในรูป 2-15b เราเรียก อัตราส่วนการดูด (Pump Displacement) S_t

ถ้าให้ V เป็นปริมาตรของบริเวณระหว่างใบพัด A และ B ในรูปที่ 2-15b

และ n เป็น ความเร็วรอบ (โดยปกติมีค่าประมาณ 350 – 700 rpm)

จะได้ว่า

$$S_t = 2Vn \quad (2.6)$$

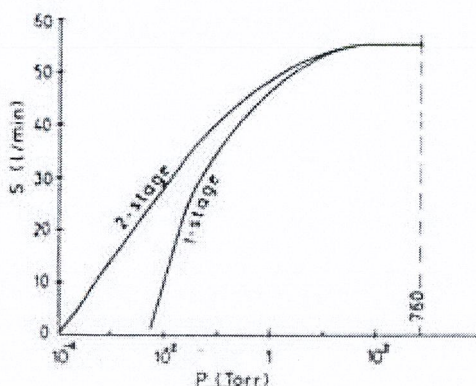
ในทางทฤษฎี ค่าความดันต่ำสุดที่จะได้จากปั๊มนี้อาจจะเป็นการพิจารณาจากก๊าซที่ถูกอัดเข้าไปในปริมาตรเล็ก ๆ ที่จำกัดซึ่งเรียกว่า Dead Volume เท่านั้น เมื่อความดันของระบบที่ต้องถึงระดับอัดตัวสูงสุด ความดันของก๊าซมีค่าน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นก๊าซเหล่านี้จะไม่ถูกปล่อยออกไปจากปั๊มผลก็คือ การกระจายและอัดก๊าซปริมาณเดิมนี้อีกหลาย ๆ ครั้ง ก็ยังไม่มีผลต่อการลดความดันของระบบได้อีกต่อไป เราเรียกอัตรส่วนระหว่างความดันทางออก กับความดันทางเข้าว่า อัตราส่วนการอัดอากาศของปั๊ม ดังนั้น ถ้าต้องการทำให้ระบบมีความดันอยู่ในช่วงของ 10^{-2} Torr ปั๊มที่จะใช้จะต้องมีค่า การอัดอากาศอยู่ในช่วงของ 10^{-5} Torr

ค่าความดันต่ำสุด(Lowest or ultimate pressure) ที่ได้จากปั๊มโรตารีแสดงแรกจะประมาณ 5×10^{-3} Torr ถ้าวัดโดยใช้ Mcleod gauge (permanent gas pressure) แต่จะเป็น 10^{-2} Torr ถ้าวัดด้วย Pirani gauge (total pressure) การวัดค่าความดันได้สูงขึ้นนี้เนื่องจากความดันไอ หรือการฟุ้งกระจายของน้ำมันในปั๊ม การต่อ rotor – stator system 2 ระบบที่เหมือนกันเข้าด้วยกันสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

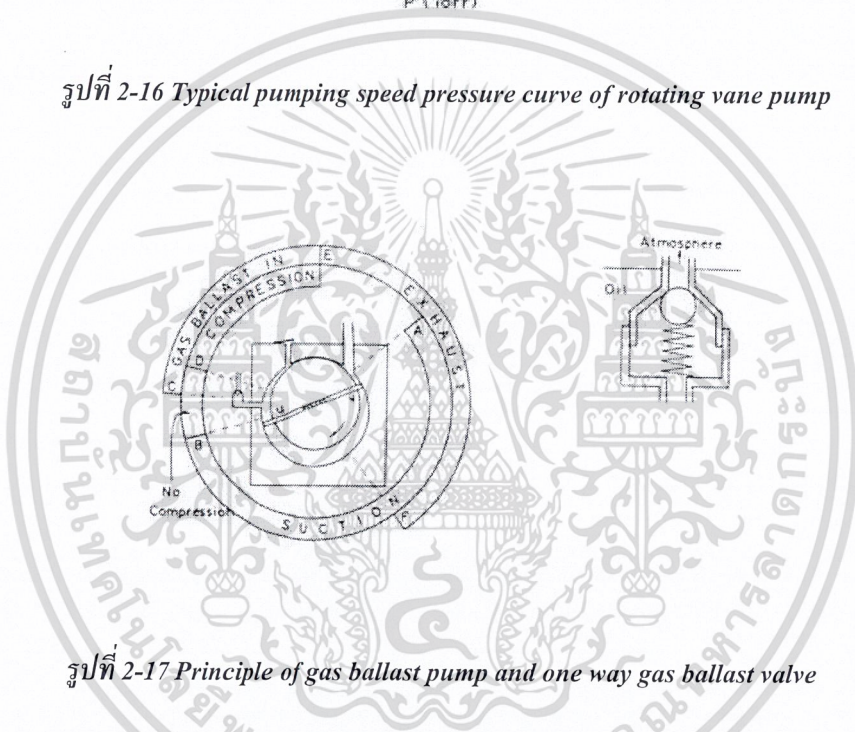
การต่อแบบขนานจะได้ค่าเป็น 2 เท่า แต่ได้สูญญากาศสูงที่สุด (Ultimate Pressure) เหมือนกับระบบเดียว

การต่อแบบอนุกรมจะได้ค่าเท่ากันแต่ให้ความเร็วในการปั๊มที่บริเวณความดันต่ำ ๆ สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2-16 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณความดันสูงประมาณ 760 Torr ค่าความเร็วในการปั๊ม คงที่

ความเร็วสูงสุดและไม่มีความแตกต่างระหว่าง 1 stage และ 2 stage แต่ความเร็วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่บริเวณความดันต่ำและกลายเป็นศูนย์ที่ค่าสุญญากาศสูงที่สุด



รูปที่ 2-16 Typical pumping speed pressure curve of rotating vane pump



รูปที่ 2-17 Principle of gas ballast pump and one way gas ballast valve

ในกรณีที่ใช้ Rotary Pump ไปปั๊มพวกไอที่ควบแน่นได้ เช่น ไอน้ำจะถูกอัดและความดันของมันจะเพิ่มขึ้นดังนั้นจะเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเป็นของเหลวผสมกับปั้มน้ำมันและเมื่อน้ำมันไหลไปรอบ ๆ ในปั้มน้ำมันก็จะพาเอาของเหลวที่ปะปนอยู่เหล่านี้ไปด้วยจนถึงทางด้านความดันต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหยของความดันเหล่านั้น ซึ่งมีผลทำให้ไปจำกัดความดันต่ำสุดที่ควรจะได้เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เหล่านี้ จึงได้มีการนำ gas ballast valve ดังแสดงในรูปที่ 2-17 มาใช้ gas ballast นี้จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของอากาศที่เข้ามาในปั้มในสภาวะที่ปั้มอยู่ในช่วงการอัดอากาศส่วนนี้จะเข้าผสมกับไอน้ำ ซึ่งจะมีความดันเท่ากับระดับของ Ejection Pressure ก่อนที่ไอน้ำจะเกิดการกลั่นตัวหลักการการทำงานของ gas ballast ได้แสดงในรูปที่ 2-17

P_0 คือ ความดันทั้งหมด

P_v คือ ความดันบางส่วนของไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_g คือ ความดันบางส่วนของที่คงตัวของอากาศที่ทางเข้าของปั๊ม

P_s คือ ความดันไออิ่มตัว

P_c คือ ความดันที่ใช้ดันวาล์วทางออก

S คือ ความเร็วในการปั๊มที่ทางเข้า

S_b คือ อัตราความเร็วที่ผ่านเข้ามา

T คือ อุณหภูมิของปั๊ม

T_0 คือ อุณหภูมิภายนอก

C_r คือ อัตราส่วนการอัดอากาศ

จะได้ว่า

$$C_r = P_c / (P_v + P_g) \quad (2.7)$$

ในระหว่างภาวะของการอัดนี้ ค่า P_v ที่มากที่สุดที่จะเป็นไปได้โดยไม่เกิดการกลั่นตัวเป็นน้ำของไอน้ำจะเป็นไปตามสมการ

$$C_r = P_s / P_v \quad (2.8)$$

จากสมการ(2.7) และ (2.8)

$$\begin{aligned} P_v + P_c &= P_s (P_v + P_g) \\ &= P_v P_s + P_s P_g \\ P_v (P_v - P_g) &= P_s P_g \\ P_v &= (P_s + P_g) / (P_c + P_s) \end{aligned} \quad (2.9)$$

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

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

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

นั่นคือ ภายในปั๊มจะกลั่นตัวเป็นน้ำ เมื่อความดันบางส่วนของไอน้ำที่ตำแหน่งทางเข้ามีค่าเกิน 16 % ของความดันอากาศที่ทางเข้าปั๊มนั้น

ถ้าใช้ gas ballast ด้วยจะได้ว่า

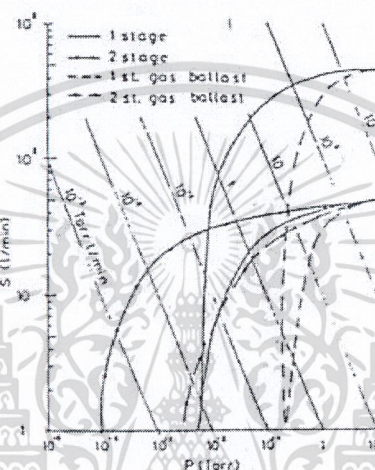
$$P_v = [P_s P_g + P_s P_b (S_b / S)] / (P_c - P_s) \quad (2.10)$$

และ

$$S_b = S/S_b[(P_c P_v / P_s) - P_v - P_g] \quad (2.11)$$

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

$$P_v = (P_s/S) (T/T_0) \{ [P_g S + (P_b - P_s)/S_b] / (P_c - P_s) \} - S_b P_g / P_s \} \quad (2.12)$$



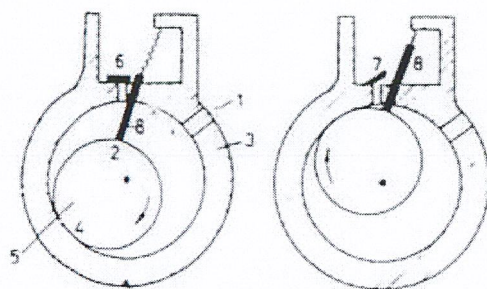
รูปที่ 2-18 Pumping speed curve of one and two stage rotary pump, without and with gas ballast

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

2) Sliding – Vane Pumps

ปั๊มแบบนี้จะมีใบอันเดียว ซึ่งเลื่อนอยู่ในช่องที่เจาะยาวอยู่ใน ระหว่างทางเข้า และช่องทางออกของปั๊มชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ

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

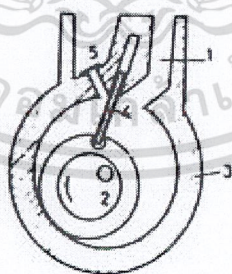


รูปที่ 2-19 Sliding vane pump, with vanes sliding both in casing and rotor.

1. Inlet port 2. Vane Rotor Seal 3. Stator 4. Rotor Stator Seal 5. Rotor 6. Discharge Valve 7. Discharge Valve in Exhaust Position 8. Sliding vane

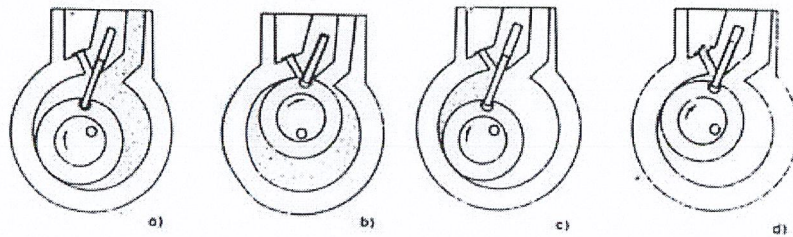
แบบที่ 2 ของ Sliding Vanes Pump แสดงในรูปที่ 2-20 แบบนี้ ใบจะติดอยู่บนวงแหวนรอบนอกของ Rotor โดยใช้ดัดปลุกป็น ตัว Rotor จะหมุนแบบยี่ดหุ่่น ซึ่งจะทําให้ใบนี้เลื่อนไปมาอยู่ในช่องที่เจาะยาวเข้าไปในตัวเรือน

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



รูปที่ 2-20 Sliding vane pump, with vane sliding in casing

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

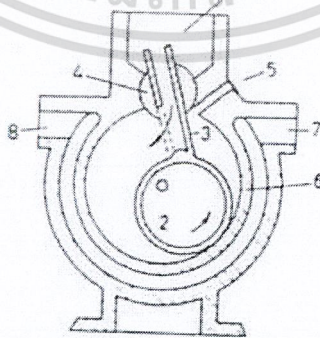


รูปที่ 2-21 Mode of action of a sliding vane pump (a) Induction (b) Isolation (c) Compression (d) Exhaust

3) Rotating – Plunger Pumps (การเคลื่อนที่ไปมาอย่างรวดเร็วมาก)

ปั๊มชนิดนี้จะใช้ท่อกลางแทนใบเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 2-22 ท่อกลางนี้จะอยู่กับ Stator และจะมีรูเจาะอยู่ด้านข้างของท่อเพื่อเป็นทางเข้าของปั๊ม แก๊สจะเข้ามาในปั๊มทางช่องเบอร์ 1 ในรูป ผ่านรูที่เจาะด้านข้างของท่อเข้ามาในปั๊มท่อนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงและกลิ้ง ไปด้วยอย่างรวดเร็ว ทำให้แก๊สเกิดความดัน เนื่องจากการอัดแก๊สอย่างรวดเร็วปั๊มชนิดนี้จึงต้องมีตัวมาช่วยระบายความร้อน โดยให้เข้าช่องทางระบายความร้อน (เบอร์ 7) และท่อน้ำนี้จะพันรอบ ๆ เพื่อปรับความร้อนที่เกิดขึ้นในปั๊มแล้วทิ้งน้ำนี้ออกไปทางช่องทางออกของช่องระบายความร้อนการออกแบบเพื่อให้ได้ความเร็วในการปั๊มที่สูงมาก สามารถทำได้ถึง $1000 \text{ m}^3/\text{hr}$ จึงมักนิยมใช้กับระบบใหญ่ ๆ ที่ต้องการความเร็วในการปั๊มสูง

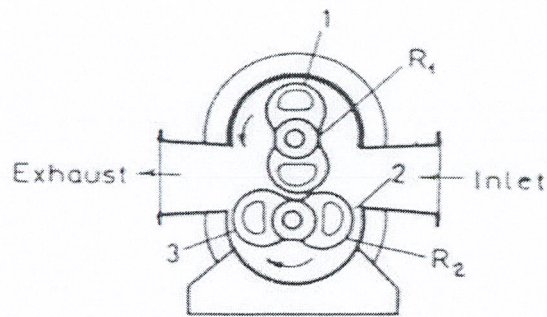
Root's Pumps ประกอบด้วย เครื่องพัดที่มีใบพัด 2 ใบพัดอยู่ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2-23 เครื่องพัดทั้ง 2 ตัวนี้จะหมุนในทิศทางตรงกันที่ขั้วภายในตัวเรือนของปั๊ม ทิศทางของการหมุนของเครื่องพัดทั้ง 2 เป็นดั่งแนวลูกศรที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-23 เครื่องพัดทั้ง 2 นี้ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากัน และถูกจัดวางในลักษณะที่ทำให้ผิวของใบพัดของเครื่องพัด R_1 โกล้ชิดและมีความโค้งสอดคล้องพอดีกับผิวของเครื่อง R_2 นี้ก็มีความโค้งพอดีกับผิวด้านในของตัวเรือน แต่ใบพัดของเครื่องทั้ง 2 นี้จะต้องไม่แตะกันเอง และไม่แตะกับผิวของตัวเรือนด้วย แต่จะมีระยะห่างกันเล็กน้อย ประมาณ 0.1 mm ที่ตำแหน่ง 1,2 และ 3 ที่แสดงอยู่ในรูป 2-23



รูปที่ 2-22 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 2-23 Root's pump

การทำงานของปั๊มชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2-24 ก๊าซจากระบบจะเข้ามาทางช่องทางเข้าของปั๊มดังรูปที่ 2-24a ใบพัดตัวบนจะหมุนในทิศวนเข็มนาฬิกา ในขณะที่ใบพัดตัวที่ 2 หมุนตามเข็มนาฬิกา จนถึงตำแหน่งตามรูปที่ 2-24b ก๊าซที่ไหลเข้ามาในปั๊มจะถูกกวาดไปอยู่ในส่วนบนของตัวเรือน โดยอยู่ในช่องระหว่างเครื่องพัด R_1 กับตัวเรือน เมื่อใบพัดหมุนต่อไปถึงตำแหน่ง 2-24c ก๊าซจะถูกกวาดไปทางด้านทางออกและถูกดันออกไปสู่บรรยากาศภายนอกดังรูปที่ 2-24d

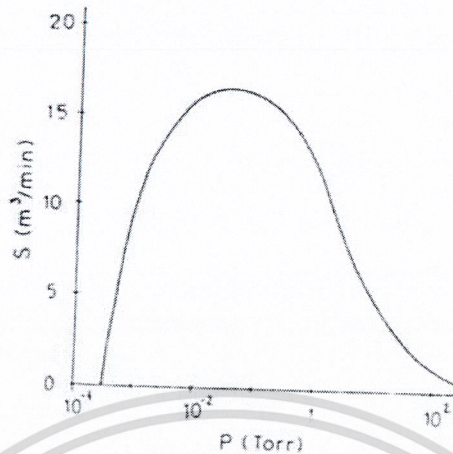


รูปที่ 2-24 การทำงานของ Root's pump

เนื่องจากระหว่างช่องทางเข้า กับ ช่องทางออกจะมีช่องแคบ ๆ เกิดขึ้นระหว่างใบพัดของเครื่องพัด R_1 และ R_2 ตลอดเวลา จึงอาจทำให้เกิดการไหลกลับก๊าซจากทางด้านทางออกกลับไปยังทางด้านทางเข้าได้เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของการอัดของ Root's Pumps จึงต่ำกว่าของพวก Oil Sealed Pumps แต่จากการที่ Root's Pump ไม่มีการแตะสัมผัสกันของใบพัดทั้งหมดและตัวเรือนปั๊มสามารถทำได้ถึง 1,000 – 4,000 rpm นั่นคือ มีความเร็วในการปั๊มสูงกว่ามาก ๆ ความเร็วในการปั๊มของปั๊มแปรตามความดันได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2-25 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ของปั๊มจะมีค่ามากที่สุดเมื่อปั๊มมีการทำงานที่อัตราส่วนความดันมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

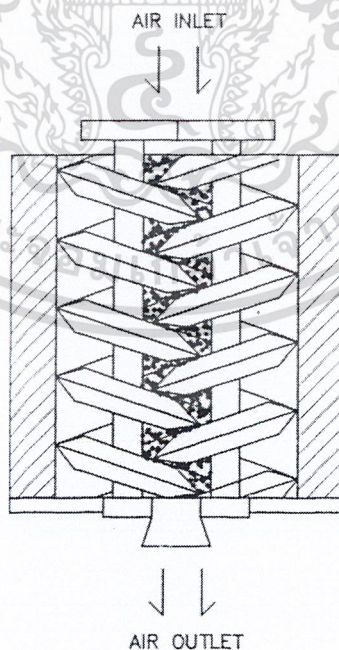
ประมาณ 10 ที่ความดันประมาณ 5×10^{-2} Torr ดังนั้นเพื่อให้ Root's Pump ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพก็ควรจะมี Backing Pump ที่เหมาะสมทำงานควบคู่ไปด้วย



รูปที่ 2-25 Typical pumping speed curve of Root's pump

4) ปั๊มแบบโรตารี สกรู (Rotary screw Pumps)

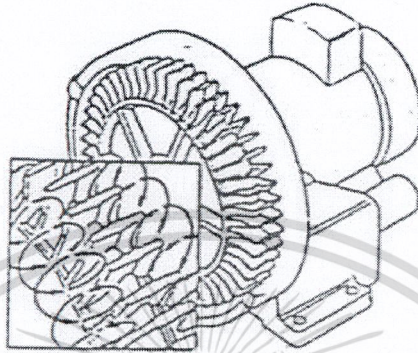
ปั๊มแบบนี้มีข้อดีก็คือการดูดอากาศเป็นไปอย่างราบเรียบโดยใช้เฟืองโรเตอร์ 2 ตัวขบกันเวลาหมุนจะหมุนสวนทางกันทำให้เกิดการดูดอากาศหรือลดปริมาตรของอากาศทางด้านหน้าโรเตอร์ สามารถทำสุญญากาศได้เท่า ๆ กัน ปั๊มแบบลูกสูบคือ 27 ถึง 28.5 นิ้วปรอท ลักษณะของปั๊มได้แสดงเอาไว้ตามรูปที่ 2-26



รูปที่ 2-26 หลักการทำงานของปั๊มแบบสกรู

4. ปั๊มแบบ โหลบ (Lobed rotor pumps)

เป็นปั๊มที่ทำงานทั้งดูด-อัดและดูดเหวี่ยง โครงสร้างจะประกอบด้วยตัวโหลบหรือใบพัดหมุน 2 ตัว หมุนไปทิศทางตรงกันข้าม ดูดอากาศจากระบบที่ต้องการสุญญากาศ ตัวใบพัดหมุนไม่สัมผัสกันแต่จะมีช่องว่างอยู่เล็กน้อย ปั๊มแบบนี้มีข้อจำกัดในการทำสุญญากาศในระดับ 10 ถึง 15 นิ้วปรอท

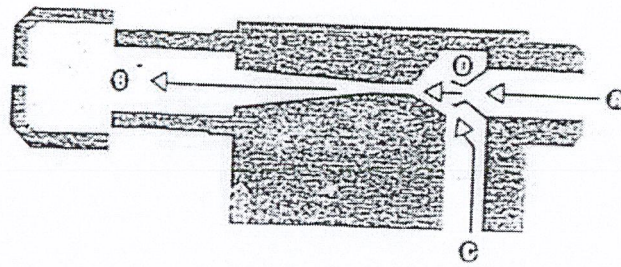


รูปที่ 2-27 หลักการทำงานของรีเจนเนอเรทีฟ โบลเวอร์

5. ปั๊มแบบรีเจนเนอเรทีฟ โบลเวอร์ (Regenerative blower)

เป็นปั๊มที่มีราคาถูก ลักษณะของปั๊มจะมีใบพัดที่จะให้อัตราการดูดอากาศออกได้มากกว่า 1,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที และสร้างสุญญากาศได้ในระดับ 7 นิ้วปรอท โดยสุญญากาศจะเกิดหลายๆ สเตจ ในขณะที่ใบพัดหมุนไปเพียงรอบเดียวเนื่องจากอากาศถูกดูดตลอดอย่างต่อเนื่องโดยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวใบพัดแสดงตามรูปที่ 2-27

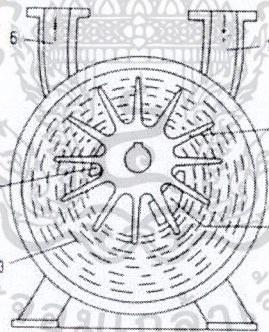
นอกจากปั๊มแบบต่าง ๆ แล้ว ยังมีวิธีที่จะทำให้เกิดสุญญากาศได้หากมีปั๊มอยู่และต้องการใช้งานสุญญากาศเพียงระบบเดียว เพียงแต่ต่อระบบลมอัดเข้ากับหัวฉีดสุญญากาศหรือหัวเป่าลม (Vacuum ejector) ตามรูปที่ 2-28 ซึ่งจะได้อธิบายการทำงานดังนี้ หัวฉีดสุญญากาศทำงานได้โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของคอขวด (Venture) อากาศที่ผ่านกรรกรงก่อนจะถึงจุด A จะต้องไม่มีน้ำมันหล่อลื่นผสมอยู่ เมื่ออากาศไหลผ่านคอขวดไปยังจุด B ความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้นและจะไปดึงอากาศที่อยู่บริเวณ C ทำให้บริเวณ C เกิดเป็นสุญญากาศ อากาศที่ถูกพ่นออกสู่บรรยากาศจะไหลผ่านตัวเก็บเสียงที่จุด D ซึ่งระดับสุญญากาศจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วและปริมาณของลมที่ผ่านคอขวด จะเห็นได้ว่า การสร้างสุญญากาศด้วยระบบที่เป็นระบบฉีดสุญญากาศมีราคาไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามก็คิดถึง ความสูญเสียลมอัดที่ต้องพ่นทิ้งไปแล้วก็นับว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งจะทำให้ระบบนี้ไม่มีประโยชน์เลยก็ได้ ระบบนี้เหมาะกับอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้สุญญากาศเป็นครั้งคราว แต่หากว่าจะต้องใช้สุญญากาศกันเป็นประจำหรือตลอดเวลา แล้วจะขอแนะนำให้ใช้ปั๊มสุญญากาศจะดีกว่า



รูปที่ 2-28 หลักการทำสุญญากาศโดยไม่ต้องใช้ปั๊มสุญญากาศ

6. Water Ring Pump

รูปที่ 2-29 แสดง Water Ring Pump ที่ประกอบด้วยใบพัดหลาย ๆ ใบที่มีแกนหมุนติดตั้งแบบเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และม้วนกลับมาข้างหลัง คือ แกนหมุนนี้จะเคลื่อนที่ไปในลักษณะการเคลื่อนที่กลับไป - มา หรือหมุนในลักษณะที่ไม่ได้มีจุดศูนย์กลางการหมุนอยู่จุดเดียวกันภายในตัวเรือนปั๊ม เมื่อใบพัดนี้หมุนก็จะทำให้ของเหลวหมุนออกไปที่ตำแหน่งด้านบนสุด Pocket ระหว่างใบพัดจะเต็มไปด้วยของเหลว แต่เมื่อ Pocket หมุนไปของเหลวก็จะเคลื่อนที่ออกไปจากแกนและดึงก๊าซเข้ามาผ่านทางช่องดูด (เบอร์ 1 และ 2) และเมื่อหมุนต่อไปของเหลวนั้นก็เคลื่อนที่กลับเข้าหาแกนหมุน และบังคับให้ก๊าซผ่านออกไปภายนอกทางด้านปล่อยออก (เบอร์ 5 และ 6)



รูปที่ 2-29 ภาพตัด Water ring pump

1. Suction 2. Suction port 3. Water ring 4. ใบพัด

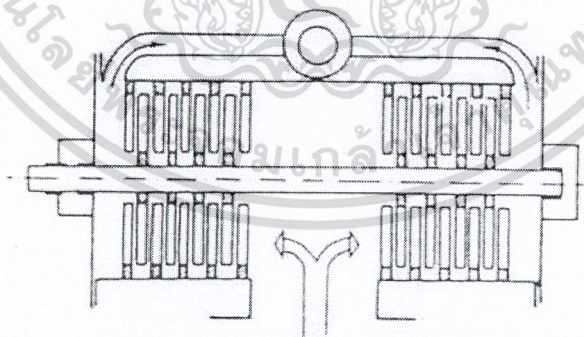
5. Discharge port 6. Discharge

ของเหลวที่ใช้ในปั๊มชนิดนี้โดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นน้ำ ซึ่งจะร้อนขึ้นจากการทำงานของปั๊ม ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้น้ำเย็นลงเป็นปกติโดยอาจจะถ่ายเททิ้งไป แล้วใส่น้ำใหม่เข้ามาทดแทน

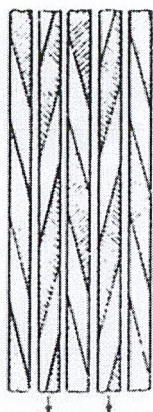
Water Ring Pump สามารถทำให้ความดันลดลงไปได้ถึงประมาณ 30 Torr และความเร็วในการปั๊มสามารถทำได้ถึง $6,000 \text{ m}^3 / \text{hr}$ จึงนิยมใช้ปั๊มชนิดนี้ในระบบใหญ่ ๆ ที่ไม่ต้องการความดันต่ำมาก ๆ แต่ต้องการความเร็วในการปั๊มที่สูง

7. Molecular Pumps

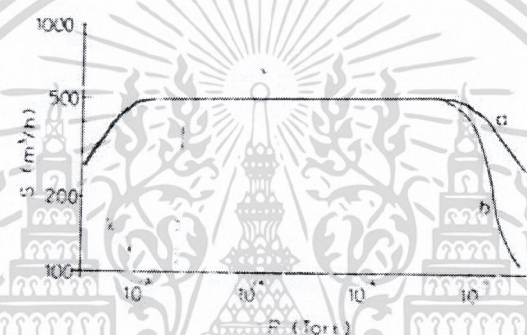
หลักการของ Molecular Pump หรือ Molecular Drag Pumps นี้ต้องอาศัยหลักการคือ ถ้าหน้าสัมผัสเกิดการเคลื่อนที่มัน ก็จะสามารถส่งถ่ายอัตราความเร็วที่ประกอบเข้ากับโมเลกุลดังนั้นใน Molecular Pump จะประกอบด้วย Rotor Plate และ Stator Plate วางเรียงสลับกันดังแสดงในรูปที่ 2-30 Plates เหล่านี้จะถูกเจาะเป็นช่องยาวที่เอียงทำมุมกันในลักษณะที่ว่าโมเลกุลของก๊าซที่ถูกจับอยู่ในช่วงของ Rotor Plate หรือแผ่นเคลื่อนที่ หรือแผ่นหมุนจะถูกส่งไปที่ Stator Plate หรือแผ่นที่อยู่กับระยะห่างระหว่าง Rotor และ Stator จะประมาณ 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 2-31 การเปลี่ยนแปลงค่ามุมของช่องยาว (Slot) ใน Rotor และ Stator จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Zero – Flow (or steady state) อัตราส่วนความดันและความเร็วในการปั๊มพบว่ามุมที่เหมาะสมต่อการนำปั๊มนี้ไปใช้จะมีค่าเท่ากับ 20° เนื่องจากสามารถทำให้ค่าอัตราส่วนความดันต่อสแตต มีค่าประมาณ 5 ดังนั้นปั๊มที่มี 9 สแตต ก็จะ Maintain Zero – flow compression ratio อยู่ในช่วงของ $r \approx 2 \times 10^6$ จะได้ความเร็วในการปั๊มของปั๊มดังแสดงในรูปที่ 2-32 คือ ความเร็วในการปั๊มจะมีค่าคงที่เมื่อความดันมีค่าต่ำกว่า 10^3 Torr ค่าความเร็วในการปั๊มจะขึ้นอยู่กับขนาดของ Backing Pump ช่วงของความเร็วในการปั๊มของ Molecular Pump สามารถทำได้ถึง $3,500 \text{ L} / \text{sec}$ ทั้งนี้เพราะความเร็วในการหมุนสำหรับปั๊มที่ใช้ Rotor ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 17 cm จะมีค่าประมาณ 1,600 rpm. (Beaker, 1958) และได้มีการปรับปรุงทำได้ถึง 42,000 rpm. (Ostorstom and Shapiro, 1972) และ 60,000 rpm. (Henning, 1978)



รูปที่ 2-30 Molecular pump after backer (1958)



รูปที่ 2-31 Details of the rotor and stator plate of the Molecular pump after backer (1998)



รูปที่ 2-32 Typical pumping speed curve of Molecular pump for air
(a) With 45 m³/h backing pump (b) with 10 m³/h backing pump

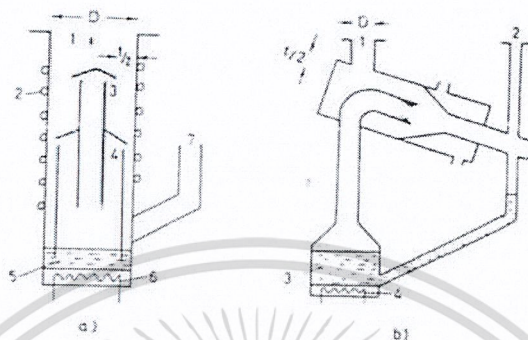
โดยปกติความดันรวมสูงสุดของ Molecular Pump จะมีค่าประมาณ 10^{-10} Torr ทั้งนี้เพราะถูกจำกัดด้วยการ back diffusion ของก๊าซไฮโดรเจน molecular pump มีข้อดีกว่า diffusion pump อย่างมากตรงที่ว่า molecular pump จะไม่มีไอของสารไฮโดรคาร์บอน

8. Vapor Pumps

คำว่า Vapor Pumps โดยปกติจะหมายถึง Ejector Pumps และ Diffusion Pump ข้อแตกต่างระหว่าง Pump 2 ชนิดนี้จะนอกจากความกว้าง (nozzle clearance, $t/2$) โดยพิจารณาจาก วิถีอิสระ (mean tree path) ของโมเลกุลของก๊าซที่ตำแหน่งของช่องทางทางเข้าปั๊มดังแสดงในรูปที่ 2-33 ทั้ง Ejector Pumps และ Diffusion Pump จะมี heater อยู่ที่ฐานเพื่อเป็นตัวให้ความร้อนกับของไหล ซึ่งอาจเป็นน้ำมันหรือปรอทให้กลายเป็นไอ

ใน Diffusion Pump ไอของน้ำหรือปรอทจะลอยขึ้นมาตามปล่องและจะถูกทำให้เบี่ยงเบนทิศทางออกไป โดยหลังการป้อนที่วางอยู่เหนือปล่องโมเลกุล ของไอน้ำจะชนกับโมเลกุลของก๊าซที่เข้ามาในปั๊มทางช่องทางเข้า แต่เนื่องจากค่าวิถีอิสระ (mean tree path) ของโมเลกุลของก๊าซมีค่ามากกว่าความกว้างคอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอด (nozzle clearance, $t/2$) ดังแสดงในรูปที่ 2-33a ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและไอจึงเป็นแบบแพร่กระจาย ซึ่งการแพร่กระจายของก๊าซและไอจะทำให้เกิดการรวบรวมโมเลกุลของก๊าซไปยัง fore – pressure region คือตำแหน่ง 7 ในรูป 2-33a ซึ่งจะต่อไปยัง backing pump ผลของการแพร่กระจายนี้จะทำให้ได้ความแตกต่างของความดันระหว่างด้านสุญญากาศสูง (เบอร์ 1) กับช่วงสุญญากาศต่ำ (เบอร์ 7)



รูปที่ 2-33 Vapor pump

(a) Diffusion pump 1. High vacuum 2. Water Cooling 3. First state 4. Second state 5. Pump oil 6. Heater 7. Force vacuum

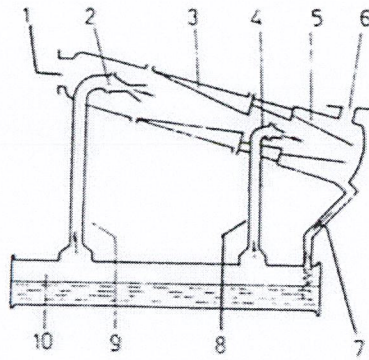
(b) Vapor ejector pump 1. Intake port 2. Force vacuum 3. oil 4. Heater

ใน Ejector Pump รูปที่ 2-33b ค่าวิถีอิสระของโมเลกุลของก๊าซที่ตำแหน่งทางเข้าของปั๊ม ซึ่งจะพาก๊าซออกไปด้วยอัตราเร็วที่สูงมากออกไปตามถังปั๊มที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางลดลงและเปิดออกไปสู่สุญญากาศต่ำ

ปั๊มที่ทำงานโดยการรวมหลักการของการแพร่กระจายและเครื่องเป่าเข้าด้วยกันเรียกว่า Diffusion – Ejector Pump หรือ Vapor looser pumps

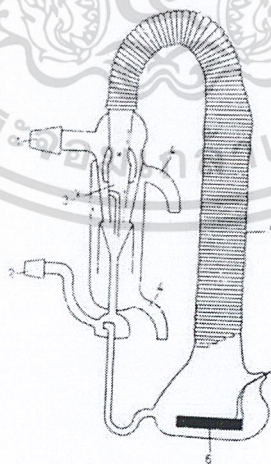
Vapor Ejector Pumps

Ejector Pumps จะทำงานด้วยไอน้ำมันหรือไอน้ำ รูปที่ 2-34 เป็นไดอะแกรมของ Double – Stage oil – Vapor ejector pump น้ำมันจะบรรจุอยู่ในหม้อน้ำ (10) และไอน้ำที่ร้อนจะไหลเข้ามาทางปล่องพ่น (8 และ 9) ออกไปทางหัวฉีด (2-4) ซึ่งจากการออกแบบอย่างพิเศษจึงทำให้หัวฉีดแต่ละอันสามารถผลิตของไอน้ำมัน แล้วผ่านเข้าไปในหัวฉีด 3 และ 5 นี้ อากาศที่ถูกปั๊มออกจากถังจะเข้ามาในปั๊มทางด้านที่เชื่อมต่อเข้ากับค่าสุญญากาศสูงในสแตจแรก (3) และกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอีกในสแตจที่ 2 (5) ในแต่ละสแตจสามารถที่จะทำให้ได้อัตราส่วนการอัดตัวมีค่าประมาณ 10 อากาศที่ถูกอัดไปออกทางด้าน fore – vacuum line (6) จะถูกดูดออกไปสู่บรรยากาศภายนอกโดย backing pump ส่วนน้ำมันที่กลั่นตัวจะไหลกลับมายังหม้อน้ำทางท่อส่งกลับ (7)

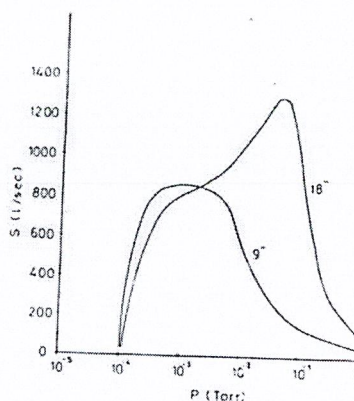


รูปที่ 2-34 Double state oil vapor ejector pump

รูปที่ 2-35 แสดงถึง oil - vapor pump ขนาดเล็กที่ทำด้วยแก้ว ซึ่งหลักการทำงานแบบเดียวกับรูปที่ 2-35 คือน้ำมันจะได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อน (6) น้ำมันจะผ่านขึ้นมาจากหลอดแก้วที่หุ้มด้วยสารที่ป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อน เรียกว่า Lagging น้ำมันจะไหลออกทางระบบหัวฉีด (3) และอากาศจากถังเก็บสุญญากาศจะไหลเข้ามาในปั๊มทางช่องทางเข้า (1) เข้าไปในระบบหัวฉีดแล้วถูกพาเข้าไปในปั๊มโดยน้ำมัน จะถูกดูดออกไปโดย backing pump (2) ส่วนน้ำมันจะกลั่นตัวบนผนังของหัวฉีด ซึ่งทำให้เย็นตลอดเวลาโดยใช้น้ำมันไหลผ่านไประบายความร้อนของหัวฉีดแล้วน้ำมันจะไหลกลับไปภาชนะเดิมที่มีเครื่องทำความร้อน (6) ปั๊มขนาดเล็กที่ทำจากแก้วนี้จะมีความเร็วในการปั๊มประมาณ 2-3 litres/sec ที่ $10^{-1} - 10^{-4}$ Torr โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องทำความร้อนประมาณหลาย ๆ กิโลวัตต์ รูปที่ 2-36 เป็นการแสดงค่าระหว่างค่าความเร็วในการปั๊มของ oil vapor ejector pump เทียบกับความดัน



รูปที่ 2-35 Glass oil vapor ejector pump 1. Intake port 2. Backing pump 3. Nozzle pump
4. Water cooling 5. Lagging 6. Immersion heater



รูปที่ 2-36 Pumping speed curve of oil vapor ejector pumps



รูปที่ 2-37 Steam ejector 1. steam inlet 2. Air intake port 3. Steam nozzle 4. Diffuser 5. Discharge

รูปที่ 2-37 เป็น ejector pump ที่ใช้ไอน้ำ เรียก steam ejector pump ไอน้ำที่มีความเร็วสูงมากจะผ่านเข้ามาในปั๊มทางช่องทางเข้าไอ (1) เข้าไปในหัวฉีด (3) ก๊าซจากถังเก็บสุญญากาศจะเข้ามาในปั๊มทางช่องทางเข้า (2) ทั้งก๊าซและไอน้ำจะไหลเข้าไปในห้องแพร่กระจาย (4) ที่ค่อย ๆ โค้งเข้าและบานออกที่ช่องปล่อยออก (5) โดยหลักการทำงานก็จะเหมือนกัน oil – vapor ejector pump ค่าอัตราส่วนความดันระหว่างทางออกต่อทางเข้าจะมีค่าประมาณ 7.5 per stage

Steam ejector pump นี้สามารถใช้เป็นตัวนำ Rough vacuum ที่มีความเร็วในการปั๊มสูง ๆ ได้ หัวพ่นไอที่มี 4 สเตจสามารถทำให้ระบบที่มีความดันต่ำถึง 0.5 Torr และสามารถปล่อยออกไปสู่บรรยากาศภายนอกได้โดยตรง สำหรับ fire stage steam ejector pump ที่มี interstate water – cooled vapor condensers สามารถใช้ทำให้ระบบมีความดันต่ำลงถึงประมาณ 3×10^{-2} Torr

9. Diffusion Pumps

หลักการทำงานของ Diffusion pumps จะเหมือนกับของ Ejector pump จะต่างกันตรงที่ความกว้างคอคอดไม่เท่ากัน

ในการหาความเร็วในการปั๊มของ Diffusion pumps จะพิจารณาจากขนาดของพิกัดทางเข้า และ Ho factor

ให้ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเข้า

$t/2$ เป็นความกว้างคอคอด

จากรูปที่ 2-33a พ.ท. ของ Intake annulus A จะเขียนได้เป็น

$$A = \pi D^2/4 - \pi (D-t)^2/4 = (\pi t/4) (2D-t) \quad (2.13)$$

ถ้าภาชนะถูกเจาะเป็นรูป พ.ท. A เราจะได้ว่า อัตราโมเลกุลของก๊าซหนีออกไปจากภาชนะ q จะเขียนได้เป็น

$$q = \phi A$$

โดยที่ ϕ คือ molecular incidence rate

$$\text{จาก } \phi = 1/4 n v_{av}$$

$$\text{และ } v_{av} = 1.45 \times 10^4 (T/M)^{1/2} \text{ cm/s}$$

$$\text{เราจะได้ว่า } q = \phi n v_{av} A = 3.64 \times 10^3 (T/M)^{1/2} n A \text{ mole/s} \quad (2.14)$$

และอัตราเร็วของการหนีออกไปจากภาชนะของโมเลกุลของก๊าซจะเขียนได้เป็น

$$\frac{dv}{dt} = q/n = 3.64 \times 10^3 (T/M)^{1/2} A \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.15)$$

และสำหรับอากาศที่ 20°C แทนค่าใน eq (2-13) จะได้ว่า

$$\frac{dv}{dt} = 11.6 A \text{ Lit/sec} \quad (2.16)$$

โดย A มีหน่วยเป็น cm^2

ดังนั้นจากสมการ(2.15) เราจะกล่าวได้ว่าอัตราไหลสูงสุด S_{\max} ของโมเลกุลของก๊าซที่หนัก M มีอุณหภูมิ T จะไหลผ่าน Area A จะเป็น

$$S_{\max} = 3.64 \times 10^3 (T/M)^{1/2} A \quad \text{cm}^3/\text{s}$$

และสำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 20°C จะเป็น

$$S_{\max} = 11.6 A \quad \text{Lit/sec}$$

อัตราส่วนระหว่างความเร็วในการปั๊มที่คอคอด S กับอัตราไหลสูงสุด S_{\max} เรียกว่า H_o factor หรือ speed factor (H) นั่นคือ

$$H = S/S_{\max}$$

โดยปกติ H จะมีค่าประมาณ $0.3 - 0.45$ แต่ปั๊มรุ่นใหม่ ๆ จะมีค่า H สูงขึ้นเป็น 0.5

\therefore ค่าความเร็วในการปั๊มของปั๊มจะหาได้จาก

$$S = H S_{\max} = 3.64 \times 10^3 (T/M)^{1/2} H (\pi/4) t (2D-t) \quad (2.17)$$

ถ้า Diffusion pump มี $H = 0.4$ และเท่ากับ D/S จะได้ว่า ความเร็วในการปั๊มสำหรับอากาศที่อุณหภูมิห้องจะเป็น

$$S = (11.6 \pi/4) \times 0.4 \times 1/3 (2-1/3) D^2 \approx 2D^2 \quad \text{Liters/sec}$$

นั่นคือ ถ้าต้องการให้ Diffusion pump มีความเร็วในการปั๊มเท่ากับ 1,000 litres / sec pump จะต้องมี inlet port ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น

$$D \approx (S/2)^{1/2} = (1000/2)^{1/2} = 22.4 \text{ cm} \approx 9 \text{ inch}$$

จาก eq (2.17) ถ้า H_o factor ไม่ขึ้นกับค่า molecular weight ของก๊าซที่ถูกดูดออกมาเราจะกล่าวถึงความเร็วในการปั๊มของ Diffusion Pump จะเป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของ molecular weight ของก๊าซ

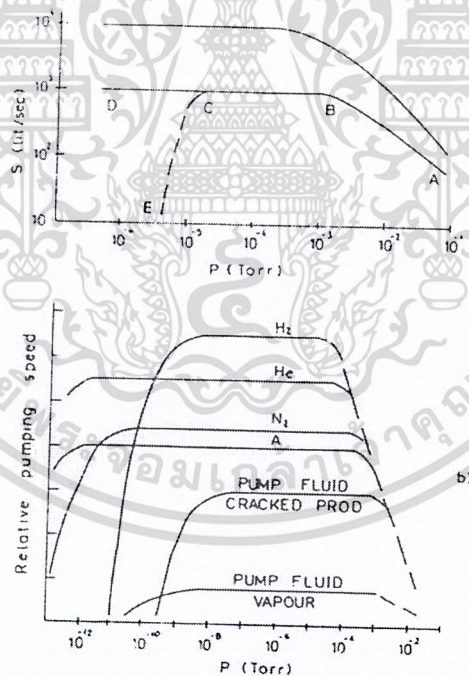
จาก eq (2.17) ยังกล่าวได้อีกว่า ความเร็วในการปั๊มของ Diffusion Pump จะไม่ขึ้นอยู่กับความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2-39

ที่ตำแหน่ง A ในรูปที่ 2-38a เป็นตำแหน่งที่ความดันสูงสุดที่ Diffusion Pump จะเริ่มทำงานได้ในสถานะนี้ ปั๊มจะทำหน้าที่ลดความดันของระบบดังนั้นก็จะเป็นการลดค่าความหนาแน่นของโมเลกุลของ

ก๊าซที่เข้าไปในไออน้ำ เพราะฉะนั้นความเร็วในการปั๊มจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความดันลดลง จนกระทั่งถึงตำแหน่ง B ที่ซึ่งอัตราของ back - diffusion ที่ตำแหน่งยอดสุดของหัวพ่นจะไม่ได้พิจารณาจากความหนาแน่นของก๊าซเข้าอีกต่อไป แต่จะพิจารณาจากอัตราที่ก๊าซถูกดูดออกไปจากหัวพ่น ณ ตำแหน่งนี้ และที่ตำแหน่งที่ความดันต่ำ ๆ ลงไป ความเร็วในการปั๊มจะมีค่าคงที่ที่ S สูงสุด

ค่าสุญญากาศสามารถคำนวณในทางทฤษฎีโดยพิจารณาจากความดันไอของปั๊มของเหลว แต่ในทางทฤษฎีแล้วอาจจะได้ค่าสุญญากาศสูงสุด (Ultimate pressure) ที่ต่ำกว่าได้โดยการเพิ่ม Refrigerated baffler เข้าไป อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัตินั้น ค่าสุญญากาศสูงสุด (Ultimate Pressure) จะขึ้นอยู่กับระบบอย่างเช่น ความเร็วในการปั๊มในระบบจะเป็นศูนย์เมื่อ gas load (เช่น leaks, outgassing) มีค่าเท่ากับอัตราสูงสุดที่ปั๊มสามารถดูดก๊าซออกไป ซึ่งแตกต่างระหว่างทางทฤษฎีและทางปฏิบัติได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-38a โดย curve ABCD เป็นระดับที่ได้จากทางทฤษฎี ส่วน curve ABCE เป็นลักษณะที่ได้จากทางปฏิบัติที่ซึ่งได้จากทางปฏิบัติที่ซึ่งความเร็วในการปั๊มมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความดัน 5×10^{-5} เมื่อค่า throughput = 5×10^{-4} Torr

ช่วง AB ของ curve ในรูปที่ 2-38a นี้ ถ้า plot บนกราฟที่มี scale เป็น log ก็จะได้ curve ออกมาเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งอาจจะเขียนเป็น empirical equation ได้ว่า



รูปที่ 2-38 Typical diffusion pump characteristic

(a) Shape of pumping speed pressure curve for air

(b) Relative pumping speed for various gases. After Hablanian an Maliaka (1972)

$$S = S_m \left(\frac{P}{P_m} \right)^Z \quad (2.18)$$

โดยที่

S_m = Minimum pumping speed (B, C)

P_m = Pressure corresponding to point B

Z = loupe ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 0.8 – 1.0

สำหรับ Section BCE สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็นสมการที่คล้ายกัน ดังนี้คือ S

$$S = S_m \left\| 1 - \left(\frac{pn}{p} \right) \right\| \quad (2.19)$$

โดยที่ S_U = ultimate pressure pumps (จุด E)

1) ขนาดของปั๊ม

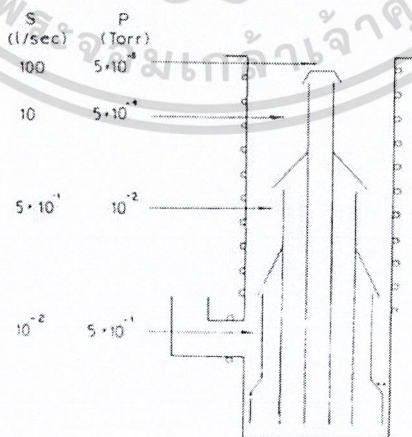
ขนาดของ Diffusion pumps มักบอกด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของ Inlet port ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 นิ้วถึง 48 นิ้ว โดยมีการปั๊มตั้งแต่ 10 litres/sec ถึง 10^5 litres/sec Diffusion pump ขนาดเล็กบางครั้งจะทำได้ด้วยแก้ว

2) Roughing and backing

ในการที่จะให้ Diffusion pump ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ก่อนที่จะเปิดปั๊มจะต้องปฏิบัติตามเงื่อนไข 2 ประการดังนี้คือ

1. ต้องมีค่าความเป็นสุญญากาศไม่ต่ำกว่า 10^{-1} Torr

2. ต้องมีค่าความเป็นสุญญากาศในช่วงที่ backing pump ทำได้



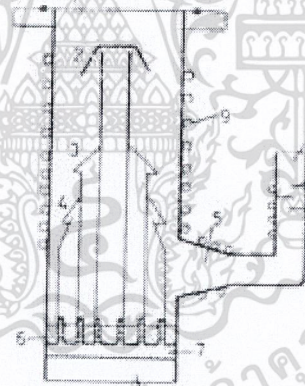
รูปที่ 2-39 Pumping speed and pressure in a multistage diffusion pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นได้ง่ายดายขึ้นด้วยการใช้ External roughing และ Backing pumps แล้วควรรู้ Vapor pumps ที่มีหัวพ่นหลาย ๆ แสดงแบบอนุกรมเข้าด้วยกัน นั่นคือหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น backing pumps ให้กับตัวที่อยู่ถัดขึ้นไป เรียกว่า Multistage diffusion pump ดังแสดงในรูปที่ 2-39 หน้าที่หลักของ jet ตัวบนสุดคือ การทำให้ Diffusion pump มีความเร็วในการปั๊มที่สูง ๆ ดังนั้นหัวพ่นตัวบนสุดนี้จึงมีพื้นที่เข้าที่อยู่ต่ำกว่าพื้นที่เข้าที่เล็กหัวพ่นตัวบนสุด นั่นคือ จะมีพื้นที่ว่างสำหรับไอน้ำเล็ก ลง ผลก็คือ ความเร็วในการปั๊มของหัวพ่นที่ต่ำลงมา ก็จะมีค่าน้อยลงตามไปด้วย นั่นคือจะทำให้ค่าความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของหัวพ่นที่ต่อเข้าด้วยกัน แต่ค่า throughput จะมีค่าคงที่ตลอดทั่วทั้งปั๊ม

3) Fractionating Pumps

ถ้าปั๊มน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบทางเคมี เรียกปั๊มชนิดนี้ว่า Fractionating oil diffusion pump ดังแสดงในรูปที่ 2-40 ของไหลที่ไหลกลับจากหัวพ่นจะไปยังหม้อน้ำมันนั้นจะเป็นแบบ radially inward ไปยังจุดศูนย์กลางของหม้อน้ำมัน ถ้าการไหลของน้ำมันนี้ถูกกีดขวางด้วย barrieri ที่มีรูเปิดเล็ก ๆ (พื้นที่แรงงานบนแผ่นพื้นที่ในรูปที่ 2-40) ของไหลจะถูกทำให้ร้อนในขณะที่มันยังอยู่ที่รอบนอกของหม้อน้ำมัน ดังนั้นส่วนประกอบของของไหลที่มีความดันสูงก็จะระเหยขึ้นไปในส่วนรอบนอกของเครื่องทำความร้อน ในขณะที่ของไหลไหลไปยังจุดศูนย์กลาง มันก็จะได้รับความร้อนตลอดเวลา ซึ่งทำให้ของไหลร้อนขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะที่ไหลไปยังจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 2-40 Fractionating oil diffusion pump 1. Pump inlet, High vacuum 2. First state 3. Second state 4. Third state 5. Ejector 6. Pump Fluid 7. Fractionating boiler 8. Heater 9. Water cooling coil 10. Forline baffle 11. Backing line, Force vacuum

พวกความดันไอต่ำก็จะกลายเป็นไอน้ำขึ้นไป ระบบหัวพ่นนี้ได้ถูกออกแบบในลักษณะที่เป็นท่อวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กัน วางเรียงกัน ตั้งแต่เล็กจนถึงใหญ่ โดยแต่ละท่อนั้นจะได้รับไอที่ระเหยจากแต่ละวงพื้นที่ของหม้อน้ำ จากวงจุดศูนย์กลางซึ่งความดันไอจะมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่หัวพ่นตัวบนสุดซึ่งจะอยู่ที่ศูนย์กลางก็จะได้รับไอจากส่วนตรงกลางของหม้อน้ำมัน ซึ่งความดันของของไหลจะต่ำที่สุด หัวพ่นตัวต่ำ ๆ ลงมาจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับให้กับตัวที่อยู่สูงกว่า

4) การระบายความร้อน

การ Cooling diffusion pump ก็เป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานของปั๊มเช่นเดียวกับการทำความร้อน โดยปกติ diffusion pump จะเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ แต่ก็จะมีแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ สำหรับพวกปั๊มขนาดเล็ก การระบายความร้อนนี้จะต้องออกแบบในลักษณะที่ว่าบริเวณของผนังของปั๊มส่วนที่จะถูกชนด้วยไอน้ำจะต้องมีความเย็นที่สุด และอัตราการระบายความร้อนนี้ก็ค่อนข้างตายตัว เพราะว่ามันมีค่าต่ำเกินไปไอน้ำจะไม่กลั่นตัวที่ผนังของปั๊มทั้งหมดก็จะเกิด back – streaming effect เพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราส่วนการหล่อเย็นสูงเกินไปไอน้ำไม่เพียงแต่กลั่นตัวเท่านั้น แต่มันยังเย็นมากเกินไปอีกด้วย ผลก็คือทำให้การไหลไปยังหม้อน้ำมัน ช้าลง และต้องให้กำลังงานกับเครื่องทำความร้อนมากขึ้นเพื่อที่จะให้ของไหลนี้ระเหยขึ้นไปอีก

5) Back - streaming and Back - migration

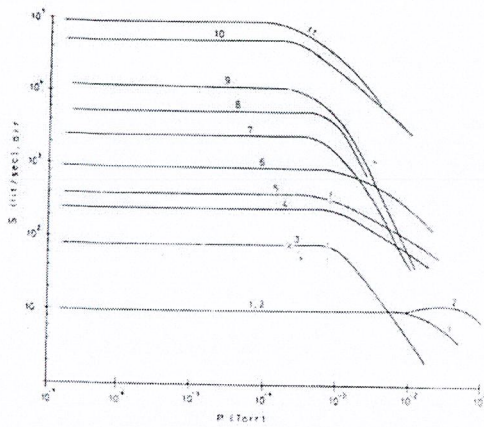
ข้อเสียของ Diffusion pump เพื่อการที่ปั๊มของไหลเข้าไปในถึงเก็บสุญญากาศ ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ back - streaming กับ back - migration

Back – streaming คือ การที่โมเลกุลของของไหลทำงาน ในส่วนน้อยเกิดการไหลออกจากหัวพันด้านบนไปในทางที่ไม่ถูกต้อง คือ ไปยังถึงเก็บสุญญากาศ ก๊าซที่โมเลกุลของของไหลนี้อาจเนื่องจากการที่โมเลกุลไหลออกหรือหลังจากการที่ชนกับโมเลกุลของก๊าซหรือโมเลกุลของไอชนิดต่าง ๆ แล้วทำให้มันไหลไปไม่ถูกต้อง ดังนั้น การออกแบบหัวฉีดที่จะต้องแห่งในระหว่างการปั๊ม

Back – migration เกิดขึ้นเนื่องจากการ re - evaporation ของของไหลทำงานจากผนังของปั๊มและผนังของท่อที่ต่อกลับเข้าไปยังสุญญากาศ

Back – streaming และ back - migration นี้สามารถลดลงได้โดยการใช้ baffles และ cold traps แต่ก็จะมีผลกระทบต่อความเร็วในการปั๊มคือทำให้มันมีค่าลดลง

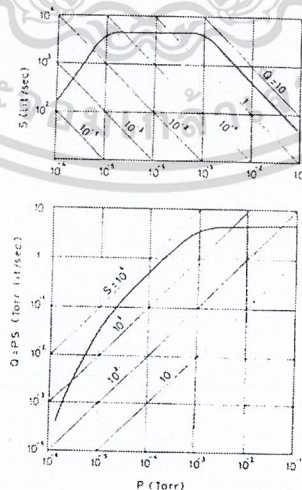
Characteristic curves รูปที่ 2-41 แสดงถึง Characteristic curves ของ diffusion pump ที่เป็นการเขียนระหว่างความเร็วในการปั๊ม (litre/sec) กับความดัน (Torr) ของปั๊มที่ผลิตโดยบริษัทหลายบริษัท และมีขนาดต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2-41 Example of characteristic of diffusion pump. Ultimate pressure depends usually on the pump oil use 1. One oil diffusion pump 2. One inch Mercury diffusion pump 3. Two inch oil diffusion pump 4. 80 mm. Oil diffusion pump 5. 100 Oil diffusion pump 6. 138 mm. Oil diffusion pump 7. 9 inch Oil diffusion pump 8. 12 inch Oil diffusion pump 9. 24 inch Oil mercury diffusion pump 10. 100 mm. Oil diffusion pump 11. 48 inch Oil diffusion pump

ข้อสำคัญในการใช้ Diffusion pump คือ จะต้องมีการ Backing ด้วย fore pump ตลอดเวลาและ throughput ของ fore pump จะต้องมีความเท่ากับหรือมากกว่า throughput ของ diffusion pump

เพื่อเหตุผลในการเลือกใช้ Backing pump ที่เหมาะสมจึงเป็นประโยชน์ที่จะพิจารณา Characteristic curves ของ Diffusion pump ที่เป็นการเขียนระหว่าง throughput กับความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2-42



รูปที่ 2-42 Pumping speed an equivalent throughput curve of a diffusion pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Ion -Pumps

Ion - pump คือปั๊มสุญญากาศที่ดูโมเลกุลของก๊าซออกจากระบบโดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าก๊าซถูก Ionize แล้วไอออนบวกที่ได้ออกมาถูกเร่งให้ไปยังแผ่นที่มีประจุลบ อะตอมของก๊าซก็จะถูกเคลื่อนย้ายออกไปจากระบบนั่นก็คือ เกิดการทำงานของปั๊ม โดยทั่ว ๆ ไปโมเลกุลของก๊าซที่ถูก Ionize นี้จะถูกส่งถ่ายออกไปในทิศทางที่ต้องการ โดยการให้สนามไฟฟ้า การ Ionization อาจทำได้โดยการให้โมเลกุลของก๊าซชนกับอิเล็กตรอนที่แพร่ออกมาจาก hot filament หรือจาก cold cathode discharge ดังนั้นเราอาจแบ่งปั๊มชนิดนี้ตามชนิดของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้เป็น 2 แบบ คือ hot cathode ion - pumps และ cold cathode ion - pumps

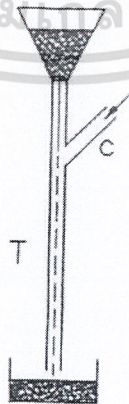
ทั้ง hot cathode ion - pump และ cold cathode ion - pumps ก็สามารถใช้เป็นปั๊มสำหรับระบบปิดขนาดเล็ก ๆ ที่ได้มีการถ่ายถอดก๊าซออกไปจนถึงความดันเหลือประมาณ 10^{-3} Torr ความเร็วในการปั๊มของ hot cathode ion - pump จะมีค่าโดยปกติประมาณอยู่ในช่วงของ 10^{-3} litres/sec ส่วนความเร็วในการปั๊มของ cold cathode ion - pumps จะมีค่าประมาณ 1 litres/sec

11. Mechanical Pump

ในปัจจุบันนี้ Vacuum pump ที่ใช้ของเหลวในการอัดและปล่อยออกนั้นไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก Liquid Pumps ที่น่าสนใจมี

1. Sprengel Pumps
2. Water - Jet Pumps
3. Toepler Pumps

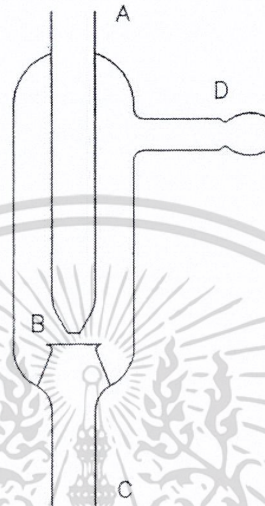
รูปที่ 2-43 แสดงลักษณะของ Sprengel Pumps ซึ่งมีการใช้เป็นครั้งแรกในโรงงานทำหลอดไฟ หลักการทำงานของปั๊มเป็นดังนี้คือ หยดของปรอทที่หยดลงใน Capillary T ในแนวตั้งนั้นจะจับฟองอากาศออกไปนั่นคือ มันจะดูดอากาศออกไปจากหลอด C และปล่อยออกไปทางอ่างปรอทด้านล่างแล้วออกไปสู่บรรยากาศรอบนอก



รูปที่ 2-43 Sprengel pump

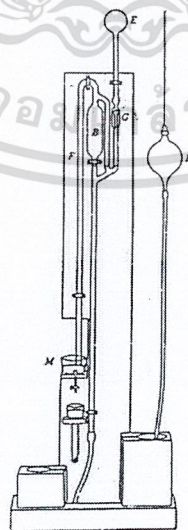
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-44 เป็น Water – Jet Pumps ซึ่งเป็นปั๊มที่ใช้งานในการทดลองโดยเฉพาะงานทางด้านตัวกรอง น้ำจากท่อที่ไหลแรงจะถูกผ่านเข้าไปในหลอดแก้วทาง A ทางออกอีกปลายหนึ่งของหลอดแก้วคือที่ B นี้ จะมีกรวยแก้วที่ใหญ่รองรับเพื่อป้องกันการกระจ่ายของน้ำและเป็นตัวผ่านของน้ำออกไปที่ C และท่อ D จะต่ออยู่กับภาชนะที่ต้องการสูบล้างอากาศออก โมเลกุลของก๊าซจากระบบถูกจับโดยลำน้ำที่มีความเร็วสูงมากนี้ แล้วถูกภาชนะหรือระบบต่ำลงไปได้ถึง 10 - 17 ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันไอของน้ำ



รูปที่ 2-44 Water ejector pump

รูปที่ 2-45 เป็น Toepler Pumps อากาศใน E จะถูกดูดออกไปโดยการทำให้ปรอทใน Reservoir R สูงขึ้นและต่ำลงสลับกัน Reservoir R นี้ต่อกับหลอดที่ยาวกว่าเครื่องวัดความยาวซึ่งวางอยู่ได้หลอด ใน



รูปที่ 2-45 Toepler pump reprinted from Dushman an Laffery (1962)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จังหวะของช่วงชักขึ้น ก๊าซที่อยู่ในจังหวะช่วงชักลงความดันใน E จะถูกทำให้ต่ำลงโดยการขยายตัวของ ก๊าซจาก E เข้าไปใน B GlassValve G จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้ปรอทเข้าไปในภาชนะ E ใน จังหวะของ Upward Stroke Toepler Pumps นี้สามารถทำให้ความดันต่ำลงไปถึง 10^{-5} Torr ข้อเสียของปั๊ม ชนิดนี้ก็คือมีความเร็วในการปั๊มที่ช้ามาก ๆ

2.11 การเลือกปั๊มสุญญากาศ

การเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศมีข้อพิจารณาอยู่หลายอย่างดังนี้

1. ค่าความต้องการสุญญากาศสูงสุดของระบบ สิ่งที่สำคัญสิ่งแรกในการเลือกปั๊มสุญญากาศก็คือ เปรียบเทียบการทำงานของปั๊มสุญญากาศกับค่าความต้องการสุญญากาศเป็นสุญญากาศในระดับต่ำจะมีปั๊ม ให้เลือกใช้มาก แต่หากต้องการค่าความเป็นสุญญากาศในระดับสูง ๆ ก็จะตรงกันข้าม จนอาจกล่าวได้ว่า ไม่มีให้เลือกก็ได้

ส่วนการหาค่าความต้องการสุญญากาศของระบบซึ่งเกิดการ ทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งเกิดจากการ ทำงานของอุปกรณ์ ทั้งหมดในระบบสุญญากาศจะหาได้จาก การคำนวณจากสูตรทฤษฎีแคตล็อก เส้นโค้ง แสดงสมรรถนะ หรือการทดลองสร้างระบบต้นแบบขึ้นมา และเมื่อหาค่าสุญญากาศที่ต้องการได้แล้ว ต่อมา ก็คงจะต้องมาดูปั๊มสุญญากาศกัน โดยปกติผู้ผลิตส่วนใหญ่จะบอกค่าอัตราสุญญากาศจำเพาะสูงสุด (Maximum vacuum rating) ซึ่งเป็นปริมาณความดันที่ปั๊มจะนำออกไปจากระบบเพื่อให้ระบบมีความดัน ต่ำกว่าบรรยากาศมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยจะบอกเป็นนิ้วปรอทหรือมิลลิเมตรปรอท (in-Hg,mm-Hg) ขึ้นอยู่กับการทำงานด้วยการเป็น ไปแบบต่อเนื่องหรือหยุด ๆ เดิน ในตารางที่ 2 ได้แสดงว่าสุญญากาศใน ขณะที่เดินปั๊มอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 2 แสดงค่าสุญญากาศของปั๊มต่าง ๆ

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

ระดับสูญอากาศต่ำสุดที่สามารถทำได้ที่ระดับน้ำทะเลคือ 29.92 นิ้วปรอท ถือเป็นค่าทางทฤษฎี แต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อใช้งานปั๊มจะทำสูญอากาศได้สูงสุดเพียง 93 % ถึง 98 % ของค่าทางทฤษฎีนี้คือ ประมาณ 28 ถึง 29.5 นิ้วปรอท เนื่องจากเกิดการรั่วไหลภายในและยังขึ้นอยู่กับชนิดของปั๊มด้วย ปั๊มสูญอากาศบางแบบหากได้มีการจัดให้มีการระบายความร้อนที่ดี ก็อาจจะทำสูญอากาศได้มากกว่าที่กำหนดก็ได้ นอกจากนี้สูญอากาศที่ปั๊มสามารถทำได้ยังขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมที่นำไปติดตั้ง หากความดันรอบ ๆ ปั๊มที่จุดนั้นต่ำกว่าความดันบรรยากาศก็จะทำให้ค่าสูญอากาศที่ปั๊มทำได้มีค่าต่ำลงด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ra = Rc (Pa) / Ps \quad (2.20)$$

เมื่อ

Ra คือ ค่าสูญอากาศจำเพาะเมื่อแก้ความดันบรรยากาศแล้ว

Rc คือ ค่าสูญอากาศจำเพาะที่ปั๊มสามารถทำได้ซึ่งผู้ผลิตกำหนดมา

Pa คือ ค่าความดันบรรยากาศรอบ ๆ ปั๊มที่จุดใช้งาน

Ps คือ ค่าความดันบรรยากาศ

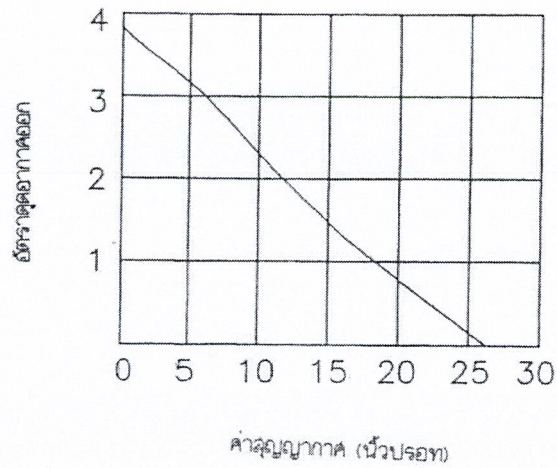
ตัวอย่าง 2 ปั๊มสูญอากาศตัวหนึ่งมีค่าสูญอากาศจำเพาะสูงสุด 24 นิ้วปรอท แต่ค่าความดันบรรยากาศรอบ ๆ จุดใช้งานนั้นมีเพียง 22 นิ้วปรอท จากสูตรจะใช้ค่าความดันบรรยากาศมาตรฐานเป็น 30 นิ้วปรอทดังนั้นค่าสูญอากาศจำเพาะสูงสุดที่ปั๊มสามารถทำได้เท่ากัน

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

2. ค่าความต้องการอัตราการดูดอากาศออก สิ่งที่สำคัญอันดับที่สองในการเลือกปั๊มสูญอากาศก็จะเห็นได้แก่ ค่าความต้องการอัตราการดูดอากาศออก (Air flow requirements) ของระบบสูญอากาศซึ่งเป็นข้อระบุขีดความสามารถของปั๊มจะหาได้ดังนี้

- หาอัตราการดูดอากาศออก (free air) จากอุปกรณ์การทำงานที่ต่อเข้ากับระบบแล้วจึงเลือกใช้ปั๊มที่มีอัตราการดูดอากาศออกให้ได้ตามระดับสูญอากาศที่ต้องการ ซึ่งค่าอัตราการดูดอากาศออกนี้หาได้จากผลรวมจากปริมาตรของ (free air) นี้ต้องปล่อยออกจากอุปกรณ์ทำงานแต่ละด้านของระบบในแต่ละรอบการทำงาน ค่านี้อาจหาได้จากสูตรแคลคูลัสจากผู้ผลิต กราฟแสดงสมรรถนะ หรือการทดสอบการใช้งานจริง

- คูณค่าผลรวมปริมาตรของ free air นี้ด้วยจำนวนรอบการทำงานในแต่ละนาทีจะทำให้ได้อัตราการดูดอากาศออกที่ต้องการเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ซึ่งค่านี้นับเป็นค่าความต้องการสูงสุดที่ระบบต้องการ



รูปที่ 2-46 กราฟแสดงสมรรถนะของปั๊มสุญญากาศชนิดหนึ่ง

เมื่อได้ค่านี้แล้วก็นำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราการดูดอากาศหรือ (Capacity) ของปั๊ม ที่มีจำหน่ายโดยปกติ จะบอกค่าอัตราการดูดนั้นเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที (cfm) ซึ่งจากเส้นกราฟในรูปที่ 2-46 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่ระดับสุญญากาศสูงขึ้นค่าอัตราการดูดอากาศจะลดลง เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์นี้ผู้ผลิตปั๊มจะเป็นผู้กำหนด

ในขณะที่ปั๊มทำงานที่สภาพความดันทางเข้าปั๊มเป็น 0 นิ้วปรอทนั้น ค่าอัตราการดูดอากาศจะอยู่ที่จุดสูงสุด (ไม่เกิดสุญญากาศ) ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ปั๊มที่มีค่าอัตราการดูดอากาศออกให้ตรงกับค่าความต้องการของระบบ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเป็นสุญญากาศในระดับที่ต้องการ

3. กำลังที่ใช้ขับปั๊ม สำหรับข้อพิจารณาอันดับต่อมาคือการสูญเสียกำลังที่ใช้ขับปั๊ม เมื่อเปรียบเทียบกับระบบลมอัดแล้วจะพบว่า ปั๊มสุญญากาศต้องการพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่น้อยกว่าโดยทั่วไป การเลือกต้นกำลังที่ใช้ขับปั๊มขึ้นอยู่กับว่ามีกำลังเพียงพอที่จะทำให้ปั๊มทำงานได้ กฎโดยทั่ว ๆ ไปแล้วพลังงานในแต่ละ 1 แรงม้าจะให้อัตราการดูดอากาศที่ 20 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที (cfm)

ต้นกำลังที่ใช้ขับปั๊มสุญญากาศมีทั้งแบบที่มีมอเตอร์อยู่รวมกับตัวปั๊มและแบบแยกออกจากตัวปั๊ม แบบที่มีมอเตอร์ในปั๊มเป็นแบบที่เลือกใช้ได้ง่ายมีขนาดกระทัดรัด และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ด้วย ส่วนต้นกำลังแบบแยกนั้นมีทั้งใช้ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนหรือมอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนอย่างไรก็ตามในการเลือกใช้สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือประสิทธิภาพในการขับปั๊มซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของปั๊มสุญญากาศ

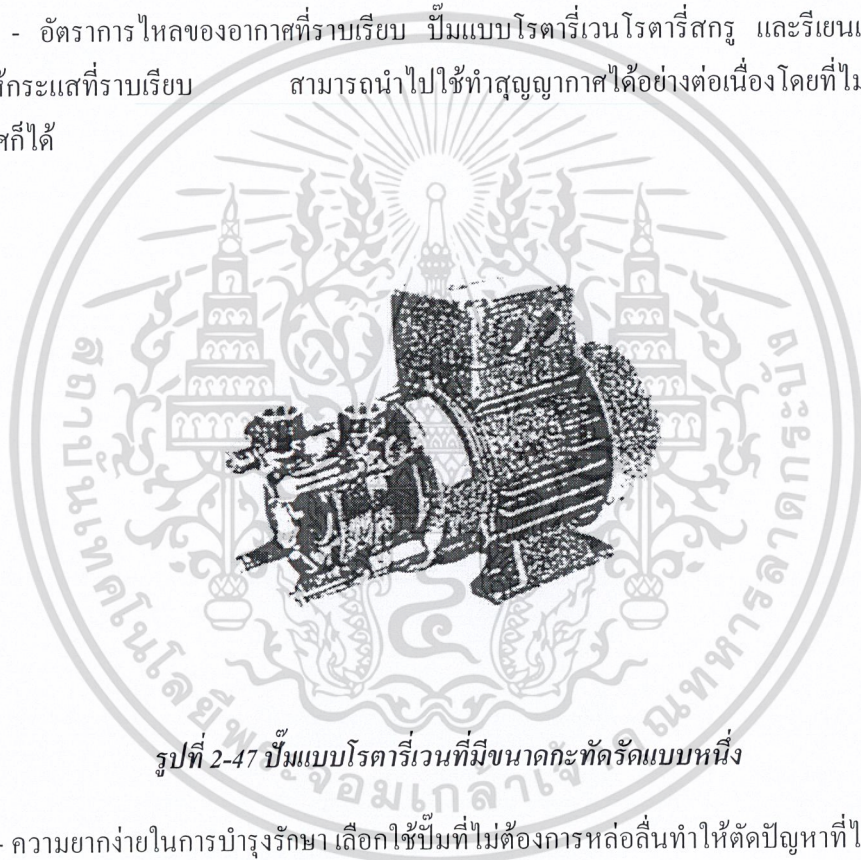
4. ผลของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นก็เป็นสิ่งสำคัญเหมือนกันที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศ ความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นทั้งภายในและภายนอกปั๊ม จะมีผลทำให้สมรรถนะของปั๊มและอายุการใช้งานน้อยลง

อุณหภูมิภายในของปั๊มจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสุญญากาศสูงขึ้น ปั๊มจะดูดความร้อนที่เกิดขึ้นเอาไว้ในตัว ในระบบที่ต้องการทำงานอยู่ตลอดเวลาหรือปั๊มที่ทำสุญญากาศในระดับสูง ๆ จะต้องมีการระบายความร้อน ส่วนในปั๊มที่ทำงานเป็นช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จะมีการระบายความร้อนไปด้วยในตัวระหว่างที่ทำงาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวปั๊มอาจจะเกิดจากอยู่ใกล้แหล่งความร้อน เกิดการรั่วไหลภายใน เกิดอากาศอัดตัว ความเสียดทานต่าง ๆ และการเพิ่มของอุณหภูมิรอบ ๆ ปั๊ม

5. ข้อพิจารณาอื่น ๆ การเลือกปั๊มใช้ปั๊มสุญญากาศนอกจากจะมีข้อต่าง ๆ ที่ได้แนะนำไปแล้วนั้น ยังมีข้ออื่น ๆ ที่จะต้องพิจารณาดังจะ ได้กล่าวต่อไปนี้

- คุณภาพของลม เลือกใช้ปั๊มที่ทำงานแบบไม่มีการหล่อลื่น (Oil free) ถ้าต้องการให้ลมที่ระบายออกจากตัวปั๊มไม่มีน้ำมัน

- อัตราการไหลของอากาศที่ราบเรียบ ปั๊มแบบโรตารีเวนโรตารีสกรู และรีเวนเนอเรตีฟโบลเวอร์จะให้กระแสที่ราบเรียบ สามารถนำไปใช้ทำสุญญากาศได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องมีถังเก็บสุญญากาศก็ได้



รูปที่ 2-47 ปั๊มแบบโรตารีเวนที่มีขนาดกะทัดรัดแบบหนึ่ง

- ความยากง่ายในการบำรุงรักษา เลือกใช้ปั๊มที่ไม่ต้องการหล่อลื่นทำให้ตัดปัญหาที่ไม่ต้องการหล่อลื่น ไม่ต้องกังวลเรื่องน้ำมันหล่อลื่นในตัวปั๊ม

- เรื่องของเสียงและความสั่นสะเทือน ปั๊มแบบลูกสูบเป็นปั๊มที่มีเสียงดังมากที่สุดเพราะลูกสูบเกิดการเสียดสีตลอดเวลาของช่วงชัก ปั๊มโรตารีเสียงที่เกิดจากการทำงานมีน้อย และมีอัตราการดูดอากาศออกสูง ส่วนปั๊มแบบไดอะแฟรมจะเกิดเสียงดังน้อยที่สุดแต่จะใช้กับระบบที่ต้องการอัตราการดูดอากาศที่ต่ำด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันการสั่นสะเทือน และเสียงจะต้องนำมาพิจารณาดัดตั้งหากข้อจำกัดในเรื่องของเสียงและการสั่นสะเทือนเป็นเรื่องสำคัญ

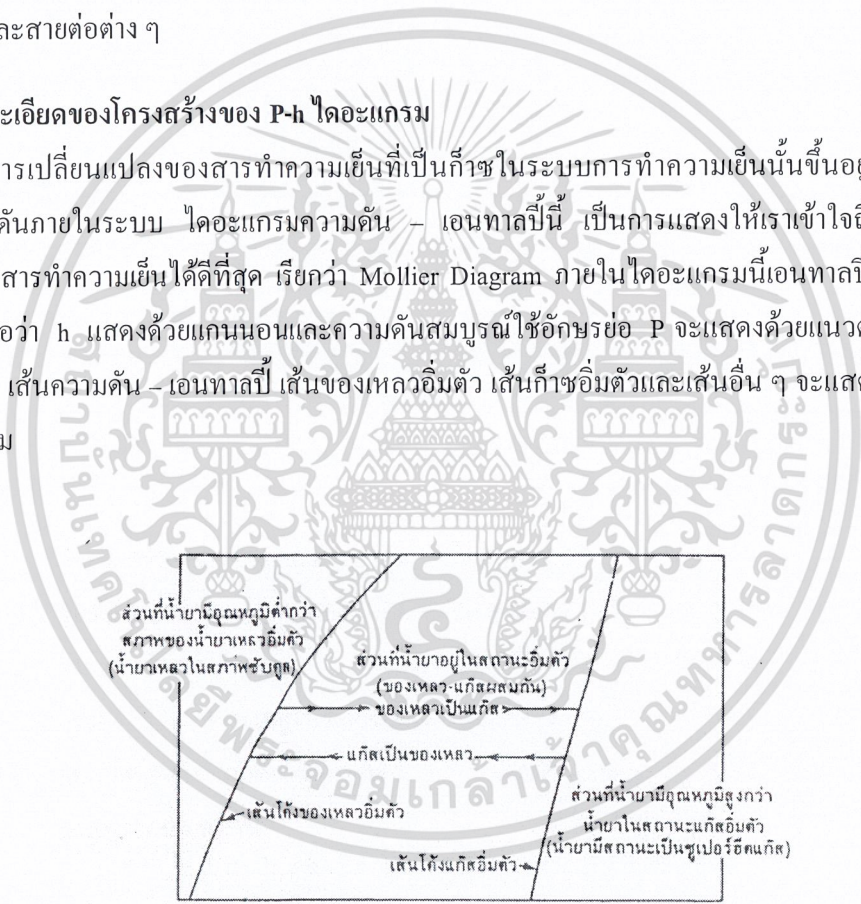
- พื้นที่ที่ใช้ติดตั้งปั๊ม ถ้าพื้นที่มีจำกัดหรือน้อย ปั๊มแบบโรตารีเวนจะมีขนาดกะทัดรัดและใช้กันโดยทั่วไปมากที่สุด

2.12 ท่อหรือสายสุญญากาศ

การเลือกใช้สายที่ต่อออกจากปั๊มไปยังอุปกรณ์ใช้งานต่าง ๆ ควรเลือกแบบที่ไม่หักงอได้ง่าย ได้แก่ ท่อโลหะ ท่อทองแดง ท่อยางแข็งหรือท่อพลาสติก และเพื่อให้เกิดแรงดันตกคร่อมน้อยที่สุด (สุญญากาศที่สูญเสีย) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและข้อต่อต่าง ๆ จะต้องเลือกให้สัมพันธ์กับค่าความต้องการอัตราการดูดอากาศของระบบ แรงที่ได้จากการทำงานของระบบสุญญากาศเกิดจากการทำงานของปั๊มแต่ถ้าหากระยะของท่อที่ใช้ต่อจากปั๊มไปยังจุดที่ใช้งานยาวมากเกินไป หรือเกิดการรั่วไหลแล้วจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง ดังนั้นจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของอากาศเข้าสู่ระบบได้ที่ ข้อต่อ ซีลวาล์วและสายต่อต่าง ๆ

2.13 รายละเอียดของโครงสร้างของ P-h ไลอะแกรม

การเปลี่ยนแปลงของสารทำความเย็นที่เป็นก๊าซในระบบการทำความเย็นนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันภายในระบบ ไลอะแกรมความดัน - เอนทัลปีนี้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสภาพของสารทำความเย็นได้ดีที่สุด เรียกว่า Mollier Diagram ภายในไลอะแกรมนี้เอนทัลปี (Enthalpy) ใช้อักษรย่อว่า h แสดงด้วยแกนอนและความดันสัมบูรณ์ใช้อักษรย่อ P จะแสดงด้วยแนวตั้ง ส่วนเส้นอื่น ๆ เช่น เส้นความดัน - เอนทัลปี เส้นของเหลวอิ่มตัว เส้นก๊าซอิ่มตัวและเส้นอื่น ๆ จะแสดงไว้หมดในไลอะแกรม



รูปที่ 2-48 โครงสร้าง P-h ไลอะแกรม

โครงสร้างของ P-h ไลอะแกรม ได้แสดงดังรูปที่ 2-48 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนที่สารทำความเย็นมีสภาพอิ่มตัวซึ่งอยู่ตรงกลาง ส่วนที่สารทำความเย็นที่มีสภาพเป็นของเหลวพร้อมที่จะระเหยหรือเดือดเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ในทางกลับกันสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอพร้อมที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลว

2. ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพสารทำความเย็นอิ่มตัวซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Subcooled)
3. ส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสภาพสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัว ซึ่งอยู่ทางด้านขวาของสารทำความเย็น ซึ่งมีสถานะเป็นไอคง (Superheat)

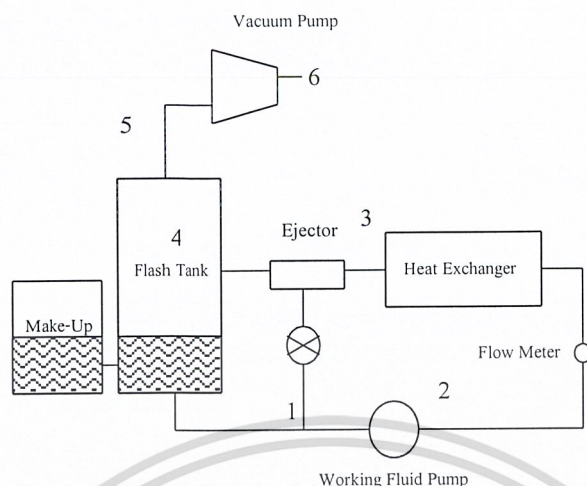
รายละเอียดของโครงสร้าง P-h ไคอะแกรม



รูปที่ 2-49 โครงสร้าง P-h ไคอะแกรมแสดงความดันคงที่ อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรคงที่ เส้นเอนทาลปีคงที่

- 1.เส้นความดันสมบูรณ์คงที่ (Constant Pressure) มีหน่วยเป็น kPa เป็นเส้นที่อยู่ในแนวนอนตลอด
- 2.เส้นอัตราส่วนระหว่างสารทำความเย็นเหลวกับสารทำความเย็นที่เป็นไอ มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ เป็นเส้นโค้งในแนวดิ่ง ซึ่งอยู่ในส่วนกลาง 11 เส้น แต่ละเส้นจะบ่งบอกถึงจำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารทำความเย็นอิ่มตัวที่มีสภาพเป็นของเหลวพร้อมที่จะระเหย หรือเดือดเป็นไอ ในทางกลับกันไอที่จะกลั่นตัว เป็นของเหลวเส้นซ้ายมือสุดเป็นเส้นของเหลวอิ่มตัว ส่วนเส้นที่อยู่ขวามือสุดเป็นเส้นไออิ่มตัว
- 3.เส้นอุณหภูมิมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส เป็นเส้นประ เส้นอุณหภูมินี้จะอยู่ในแนวนอนเฉพาะที่ สารทำความเย็นมีสภาพอิ่มตัวเท่านั้นจะสูงขึ้น เมื่อสารทำความเย็นมีสภาพเป็นของเหลวอิ่มตัว หรือมีอุณหภูมिन้อยกว่าอุณหภูมิมิอิ่มตัว และจะต่ำลงเมื่อสารทำความเย็นมีสภาพเป็นไอคง หรือมีอุณหภูมิมิสูงกว่าอุณหภูมิมิอิ่มตัว
- 4.เส้นเอนทาลปีคงที่(Constant Enthalpy) มีหน่วยเป็น kJ/kg เป็นเส้นที่อยู่ในแนวดิ่ง
- 5.เส้นปริมาตรจำเพาะ (Constant Volume)มีหน่วยเป็น kg/m³ เป็นเส้นโค้งในแนวนอน ซึ่งอยู่ในส่วนที่มีอุณหภูมิมิสูงกว่าน้ำยาที่มีสภาพเป็นไออิ่มตัว
- 6.เส้นเอนโทรปีคงที่ (Constant Entropy) มีหน่วยเป็น kJ/kg-K เป็นเส้นทะแยงมุมในแนวดิ่งแยกขึ้นเป็นเส้นไออิ่มตัว ซึ่งอยู่ในส่วนที่มีอุณหภูมิมิสูงกว่าไออิ่มตัว เส้นนี้แสดงการอัดตัวของสารทำความเย็นที่มีสภาพเป็นไอให้มีความดันสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีอุณหภูมิมิสูงขึ้นโดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน

2.13 หลักการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

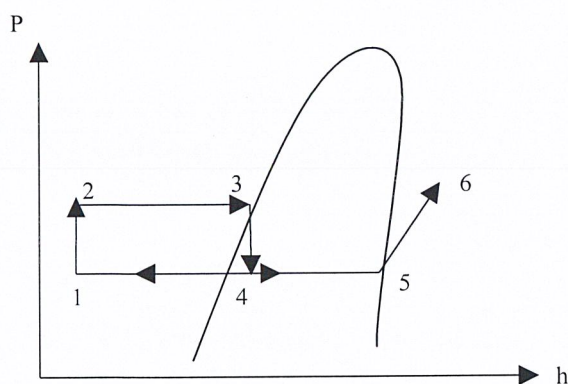


รูปที่ 2-50 ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 2-50 แสดงถึงหลักการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ คือ ปั๊มสุญญากาศจะทำการเอาอากาศในห้องระเหยออกไปเรื่อย ๆ จนห้องระเหยนั้นเป็นสุญญากาศ จะเกิดการระเหยตัวของสารทำความเย็นและดึงความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Q_r) ในสารทำความเย็นออกไปจากห้องระเหยซึ่งจะทำให้ค่าความร้อนของการทำความเย็นทั้งหมด (Q_T) ลดลง มีผลทำให้อุณหภูมิภายในห้องระเหยลดลง

ในขณะเดียวกันปั๊มสารทำความเย็น (Working Fluid Pump) จะปั๊มสารทำความเย็นเหลวไหลเวียนภายในระบบซึ่งจะไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) สารทำความเย็นที่ผ่านชุดจุดต่อจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลวนกลับห้องระเหยซึ่งจะทำเป็นกะทะคว่ำไว้ในห้องระเหยเพื่อให้สารทำความเย็นกระจายเป็นละออง เพื่อสะดวกในการกลายเป็นไอ สารทำความเย็นในห้องระเหยบางส่วนจะดูดความร้อนจากสารทำความเย็นที่อยู่รอบ ๆ จนกลายเป็นไอแล้วออกไปสู่บรรยากาศ เหตุผลที่สารทำความเย็นกลายเป็นไอภายในห้องระเหย เพราะเมื่อสารทำความเย็นกลับเข้าสู่ห้องระเหยมีอุณหภูมิของสารทำความเย็นมีอุณหภูมิสูงกว่าห้องระเหย (จุดเดือด) จึงสามารถเดือดกลายเป็นไอได้ง่ายที่ความดันต่ำ ตลอดเวลาที่ไอของสารทำความเย็นที่ถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไป การทำความเย็นก็จะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

จากรูปหลักการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ สามารถแสดงด้วย P-h ไดอะแกรม ดังนี้



รูปที่ 2-51 P-h ไคอะแกรมของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

ที่สถานะ $1 \gg 2$ สารทำความเย็นในห้องระเหยเกิดการระเหยตัวทำให้สารทำความเย็นกลายเป็นสารทำความเย็นสถานะของเหลวอัดตัว ที่ความดัน P_1 และอุณหภูมิ T_1 ถูกอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก โดยปั๊มสารทำความเย็น จนความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น P_2 และ T_2 ตามลำดับ

ที่สถานะ $2 \gg 3$ สารทำความเย็นสถานะของเหลวอัดตัวไหลเข้าสู่ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยกระบวนการความดันคงที่ ไหลออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนในสถานะของเหลวอัดตัว ที่ความดัน P_3 และอุณหภูมิ T_3 ตามลำดับ

ที่สถานะ $3 \gg 4$ สารทำความเย็นไหลสถานะของเหลวอัดตัวไหลเข้าอีเจกเตอร์ (Ejector) เป็นกระบวนการเอนทัลปีคงที่ ไม่มีงาน จนทำให้ความดันและอุณหภูมิลดลงเป็น P_4 และ T_4 ตามลำดับ

ที่สถานะ $5 \gg 6$ สารทำความเย็นสถานะไออัดตัวที่ความดัน P_5 และอุณหภูมิ T_5 ไหลเข้าปั๊มสุญญากาศ เปลี่ยนสถานะจากไออัดตัวเป็นไอคงที่ความดัน P_6 และอุณหภูมิ T_6

2.15 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.13.1 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) กำลังงานที่ใช้ของปั๊มสุญญากาศ สามารถหาได้จาก

$$W_v = m_s (h_6 - h_5) \quad (2.21)$$

เมื่อ

W_v คือ กำลังที่ใช้ของปั๊มสุญญากาศ มีหน่วยเป็น Watt

m_s คือ ปริมาณไอของสารทำความเย็นที่ไหลผ่านปั๊มสุญญากาศ มีหน่วยเป็น kg/sec

h_6 คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากปั๊มสุญญากาศ มีหน่วยเป็น kJ/kg

h_5 คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่เข้าปั๊มสุญญากาศ มีหน่วยเป็น kJ/kg

2.13.2 ปั๊มสารทำความเย็น(Working Fluid Pump) กำลังงานที่ใช้ของปั๊มสารทำความเย็นสามารถหาได้

$$W_p = m_1 (h_2 - h_1) \quad (2.22)$$

เมื่อ

- W_p คือ กำลังของปั๊มสารทำความเย็นที่ใช้ปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น Watt
 m_1 คือ ปริมาณสารทำความเย็นที่ไหลผ่านปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น kg/sec
 h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น kJ/kg
 h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าจากปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น kJ/kg

2.13.3 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายเทออกที่ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถหาได้จาก

$$R.E. = m_1 (h_3 - h_2) \quad (2.23)$$

เมื่อ

- R.E. คือ ปริมาณความร้อนที่คายออกที่ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน มีหน่วยเป็น Watt
 m_1 คือ ปริมาณสารทำความเย็นที่ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน มีหน่วยเป็น kg/sec
 h_3 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ไหลออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อน มีหน่วยเป็น kJ/kg
 h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น kJ/kg

2.13.4 งานที่ให้แก่ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

$$W_{in} = W_p + W_v \quad (2.24)$$

เมื่อ

- W_{in} คือ ผลรวมงานปั๊มสุญญากาศและปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น Watt
 W_v คือ กำลังที่ใช้ของปั๊มสุญญากาศ มีหน่วยเป็น Watt
 W_p คือ กำลังที่ใช้ของปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น Watt

2.13.5 ประสิทธิภาพการทำความเย็น(C.O.P.) ค่าบ่งบอกสมรรถนะการทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

$$C.O.P. = R.E. / W_{in} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

R.E. คือ ปริมาณความร้อนที่คายออกที่จุดแลกเปลี่ยนความร้อน มีหน่วยเป็น Watt

W_{in} คือ ผลรวมงานปั๊มสูญญากาศและปั๊มสารทำความเย็น มีหน่วยเป็น Watt

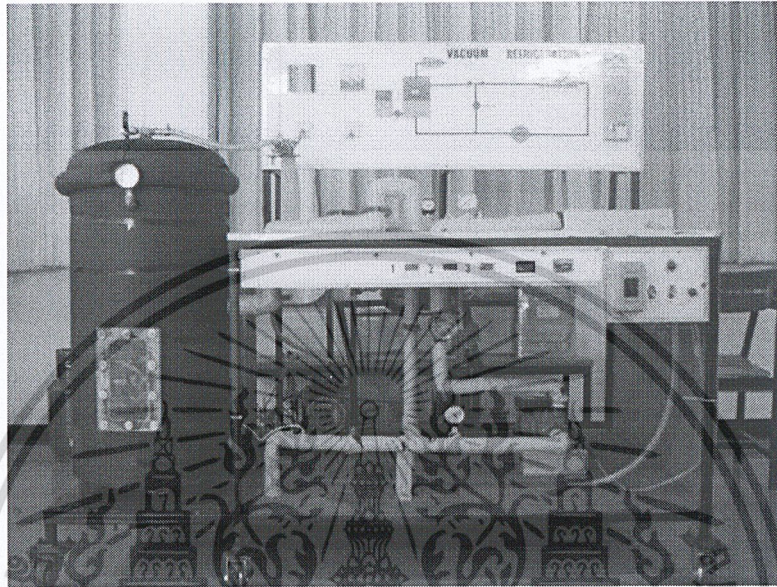


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

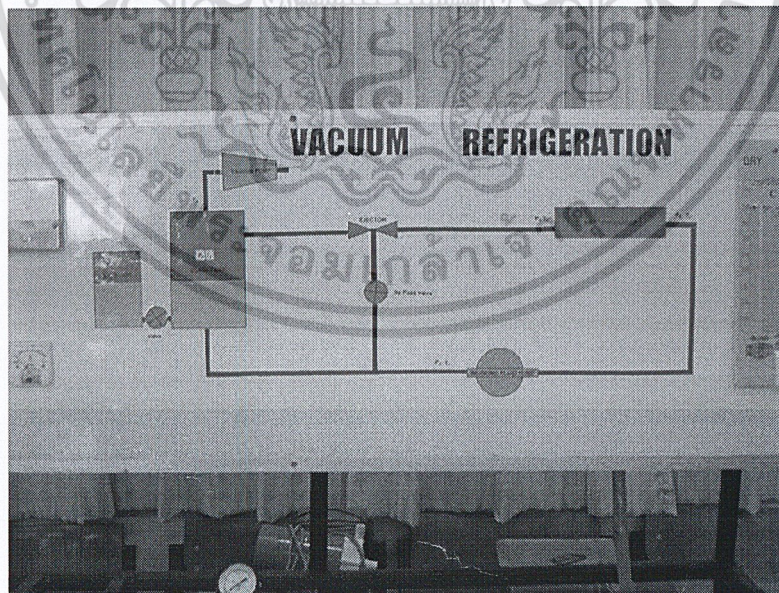
บทที่ 3

อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3-1 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของชุดทดลอง

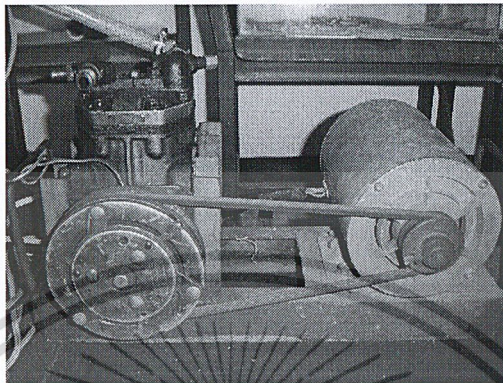


รูปที่ 3-2 บอร์ดแสดงวงจรการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

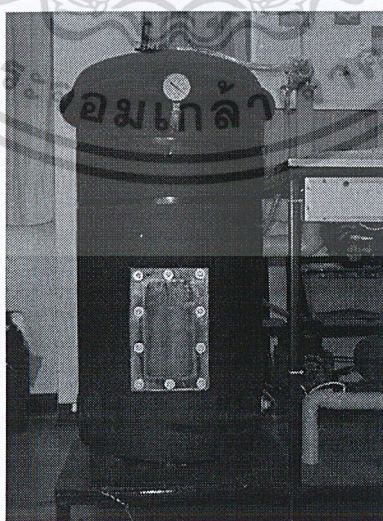
อุปกรณ์ที่ติดตั้งในชุดทดลองวัฏจักรการทำความเย็นแบบสุญญากาศ มีอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่

1. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นในสถานะไอ โดยดูดไอของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิและความดันต่ำ แล้วทำการปล่อยสู่บรรยากาศ เป็นปั๊มแบบลูกสูบ อัตราการไหลโดยปริมาตร 50 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3-3 ปั๊มสุญญากาศ

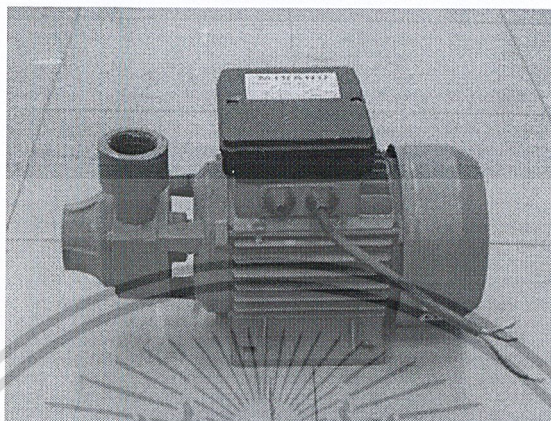
2. ห้องระเหย (Flash Tank) ใ้วัสดุอะลูมิเนียมหนา มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีปริมาตรประมาณ 110 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ภายในมีท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ปลายเปิด เพื่อเป็นทางออกของสารทำความเย็นที่ผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไหลกลับมาห้องระเหย จะทำกะทะคว่ำไว้ในห้องระเหยเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสารทำความเย็นเพื่อสะดวกในกระจายเป็นละออง เพื่อการรับแลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องระเหยและมีการควบคุมปริมาตรสารทำความเย็นให้คงที่ด้วยวาล์วลอย



รูปที่ 3-4 ห้องระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปั๊มสารทำความเย็น (Working fluid Pump) ทำหน้าที่ ให้สารทำความเย็นหมุนเวียนภายในระบบการทำความเย็นและทำหน้าที่นำสารทำความเย็นกลับสู่ห้องระเหย ซึ่งมีอัตราการไหลโดยปริมาตร 35 ลิตรต่อ นาที ความเร็วรอบ 2,850 รอบ/นาที กำลังสูงสุด 1/2 HP H.MAX = 35 เมตร ยี่ห้อ MIRANO รุ่น IDB-35



รูปที่ 3-5 ปั๊มสารทำความเย็น

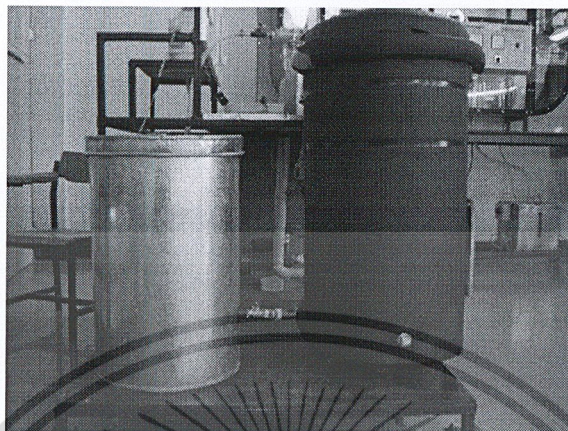
4. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ทำหน้าที่ ทำความเย็นในชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะใช้น้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็น จะรับปริมาณความร้อนผ่านผิวท่อทำให้อุณหภูมิโดยรอบชุดท่อมีอุณหภูมิลดลง เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลไปทางเดียวกันใช้ท่อทองแดงขนาด 1/2 นิ้ว 2 กลีบ



รูปที่ 3-6 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

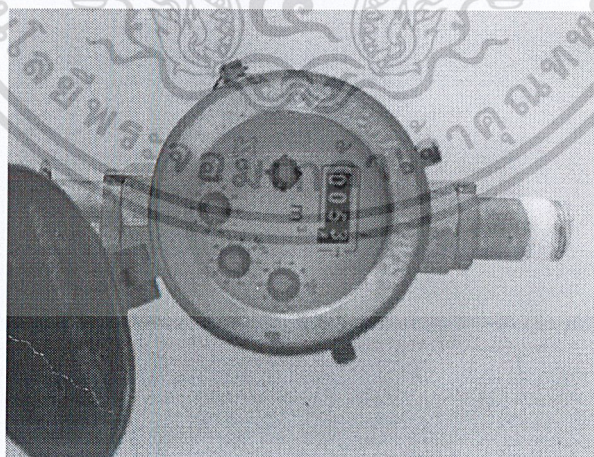
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ถังเติมสารทำความเย็น (Make up Working Fluid Tank) มีหน้าที่เติมสารทำความเย็นให้แก่ระบบให้คงที่ตลอด ทำด้วยวัสดุอะลูมิเนียม



รูปที่ 3-7 ของถังเติมสารทำความเย็น

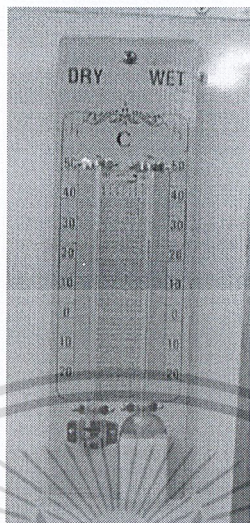
6. มาตรวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็น (Flow rate Meter) มีหน้าที่วัดปริมาณสารทำความเย็น(ของเหลว) ภายในระบบมีหน่วยเป็น m^3 สามารถวัดเป็นหน่วยทศนิยมได้ถึง 0.001 m^3



รูปที่ 3-8 มาตรการวัดการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กระจเปาะเปียกและกระจเปาะแห้ง ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิห้องทดลองเป็นอุณหภูมิ Dry Bulb และอุณหภูมิ Wet Bulb



รูปที่ 3-9 กระจเปาะเปียกกระจเปาะแห้ง

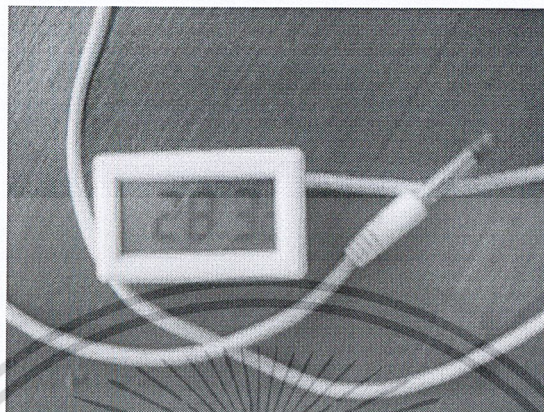
8. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบปรอท วัดอุณหภูมิได้ 0-100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3-10 เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Thermometer) สำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถวัดเป็นจุดทศนิยมได้ 1 ตำแหน่ง มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 3-11 เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล

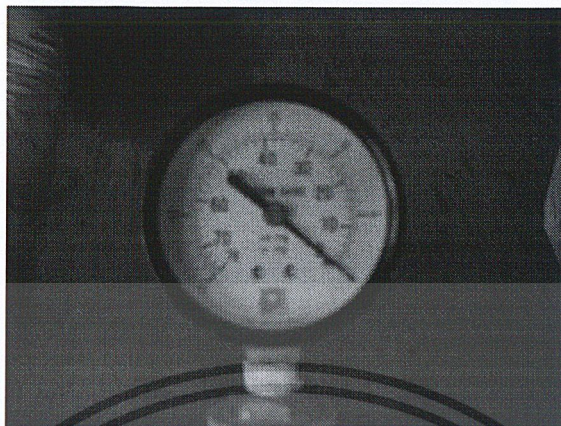
10. เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) มีหน้าที่วัดความดันภายในระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศมีหน่วยเป็นทั้ง kgf/cm^2 และ psi



รูปที่ 3-12 เกจวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เกจวัดความดันสุญญากาศ (Vacuum Gauge) มีหน้าที่วัดความดันภายในห้องระเหย วัดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 0 - 760 mm-Hg



รูปที่ 3-13 เกจวัดความดันสุญญากาศ

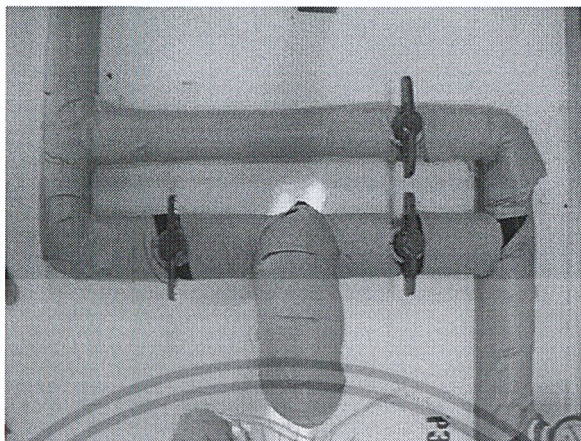
12. แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์



รูปที่ 3-14 แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. อีเจ็คเตอร์



รูปที่ 3-15 อีเจ็คเตอร์

15. สารทำความเย็น R-718 (Water), CH_3OH (Alcohol) เป็นสารทำความเย็นที่ใช้ในวงจรทดลอง เนื่องจากเป็นสารที่มีการระเหยตัวสูง

16. ท่อทางเดิน (Tubing) แบ่งออกเป็นท่อ PVC, ท่อชนิดอ่อนและ ท่อทองแดง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ทดลองปริมาณที่เหมาะสมกับการทดลอง

1. ใส่สารทำความเย็น (น้ำ) ในห้องระเหย 2 ลิตร
2. เปิดปั๊มสุญญากาศให้ได้ค่าความดันสุญญากาศ 25 in-Hg (635 mmHg)
3. เปิดปั๊มสุญญากาศไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จดบันทึกอุณหภูมิสารทำความเย็นที่อยู่ในห้องระเหย ทุก ๆ 15 นาที
4. แล้วเปลี่ยนสารทำความเย็นเป็น 5 ลิตรและ 10 ลิตร แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 2-3
5. แล้วเปรียบเทียบค่าการทำความเย็นว่าปริมาณสารทำความเย็นดีที่สุดที่สุด
6. ทำการเปลี่ยนสารทำความเย็นเป็นแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 1-4

3.2.2 ทดลองเกี่ยวกับปริมาตรสารทำความเย็น (สารทำความเย็นที่เหมาะสม) ในแต่ละความดันสุญญากาศ

1. เมื่อได้ปริมาณสารทำความเย็นดีที่สุดแล้ว
2. นำสารทำความเย็น (น้ำ) มาทดลองที่ความดันสุญญากาศ 5 in-Hg (127 mmHg)
3. เปิดปั๊มสุญญากาศทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. ทำการจดบันทึกค่าการทำความเย็นของสารทำความเย็นในห้องระเหย
5. เปลี่ยนค่าความดันสุญญากาศเป็น 10-25 in-Hg แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 3-4
6. เปลี่ยนสารทำความเย็นแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 1-5

3.2.3 ทดลองเกี่ยวกับการค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของการทำความเย็นแบบสุญญากาศ

ก่อนเริ่มทำการทดลองจะต้องปฏิบัติดังต่อไปนี้ เติมสารทำความเย็นในห้องระเหยแล้วทำการ ตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ว่าพร้อมทำการทดลองหรือไม่ แล้วเริ่มทำการทดลอง

1. เติมสารทำความเย็น (น้ำ) ปริมาณ 2 ลิตร
2. เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อทำการสุญญากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความดัน 25 in-Hg (635 mmHg)
3. เปิดปั๊มสารทำความเย็นเพื่อทำให้สารทำความเย็นหมุนเวียนภายในระบบ
4. เปิดน้ำไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน
5. ทำการเก็บค่าต่าง ๆ ทุก ๆ 5 นาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังต่อไปนี้
 - อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความดันภายในระบบที่ตำแหน่งต่าง
 - วัดปริมาณสารทำความเย็นเข้าสู่ระบบ จับเวลาต่อปริมาณสารทำความเย็นที่ใช้
 - วัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน จับเวลาต่อปริมาณน้ำที่ใช้
6. เปลี่ยนสารทำความเย็นแอลกอฮอล์ แล้วทำการทดลองตามขั้นตอน 1 – 6 เช่นเดิม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการทดลอง 2 สารทำความเย็น มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง (น้ำ)

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองปริมาณน้ำในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)

เวลา [min]	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย (T_1)		
	2ลิตร	5ลิตร	10ลิตร
0	24.3	24.3	24.3
15	15.3	17.9	22
30	15.1	17.7	21.7
45	14.6	17.6	21.5
60	14.7	17.5	21.4

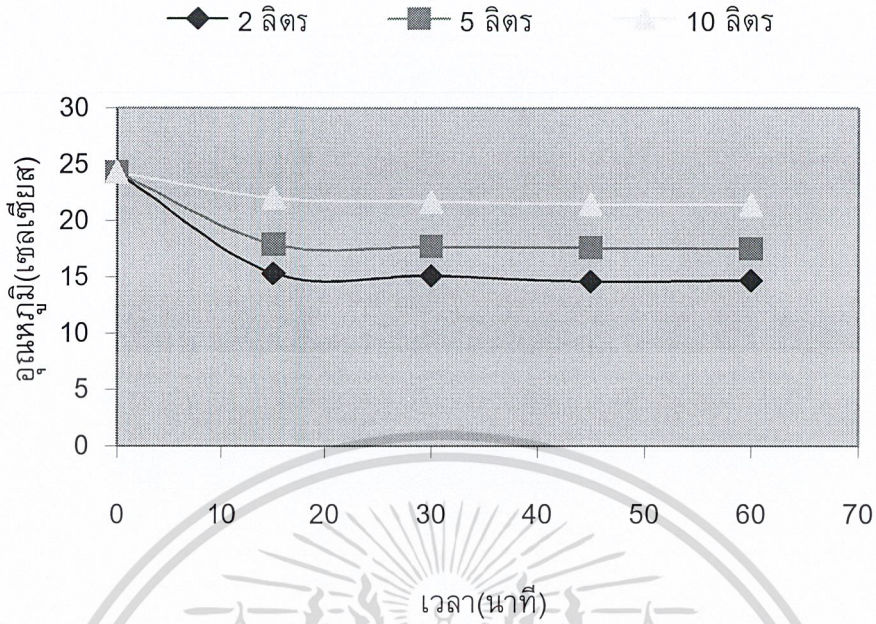
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองของระบบโดยใช้น้ำ

เวลา [min]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]	m_1 [kg/sec]	m_5 [kg/sec]
5	15.2	15.5	16.1	22.5	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
10	15.8	16.1	16.6	23	20.5	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
15	16.3	16.6	17	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
20	17.8	18.1	18.5	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
25	18	18.3	18.7	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
30	18.2	18.5	18.9	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
35	18.3	18.6	19	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
40	18.3	18.6	19	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
45	18.6	18.9	19.3	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
50	19.2	19.5	19.9	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
55	19.3	19.6	20	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}
60	19.3	19.6	20	23	20	24.3	0.0764	7.21×10^{-10}

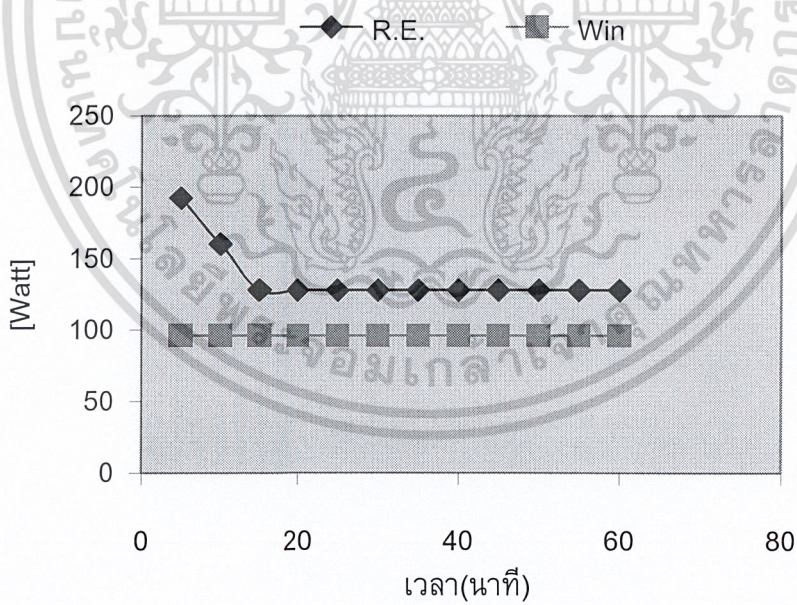
ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณของระบบโดยใช้น้ำ

เวลา [min]	W_{in} [Watt]	R.E. [Watt]	C.O.P.
5	96.2004	192.3704	1.9996
10	96.1852	160.3086	1.6666
15	96.1852	128.2469	1.3333
20	96.0017	128.0022	1.3333
25	96.0017	128.0022	1.3333
30	96.0017	128.0022	1.3333
35	96.0017	128.0022	1.3333
40	96.0017	128.0022	1.3333
45	96.0017	128.0022	1.3333
50	96.0017	128.0022	1.3333
55	96.0017	128.0022	1.3333
60	96.0017	128.0022	1.3333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

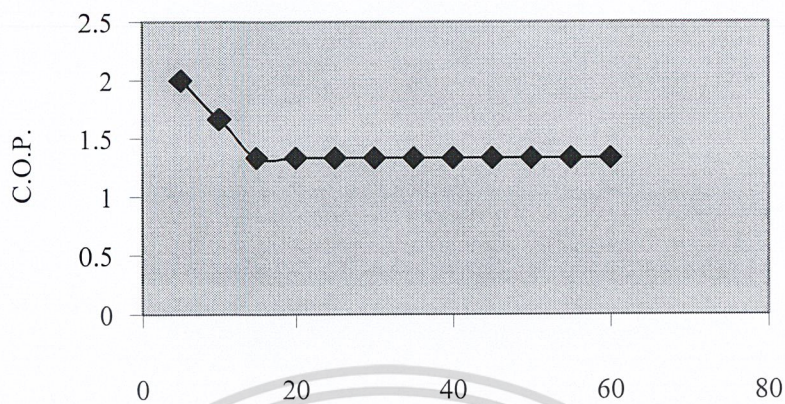


กราฟที่ 4-1 แสดงผลจากปริมาณน้ำต่าง ๆ ที่มีผลต่อเวลาและอุณหภูมิ



กราฟที่ 4-2 แสดงผลของ R.E. และ Win ของน้ำที่เวลาต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เวลา(นาฬิกา)

กราฟที่ 4-3 แสดงค่า C.O.P. ของน้ำที่เวลาต่างๆ กัน

4.2 ผลการทดลอง (แอลกอฮอล์)

ตารางที่ 4-4 ผลการทดลองปริมาณสารแอลกอฮอล์ในแต่ละปริมาตร (ไม่ผ่านระบบ)

เวลา [min]	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย (T_1)		
	2ลิตร	5ลิตร	10ลิตร
0	24.3	24.3	24.3
15	11.4	13.7	20.9
30	11.1	13.5	20.7
45	10.9	13.3	20.6
60	10.7	13.2	20.5

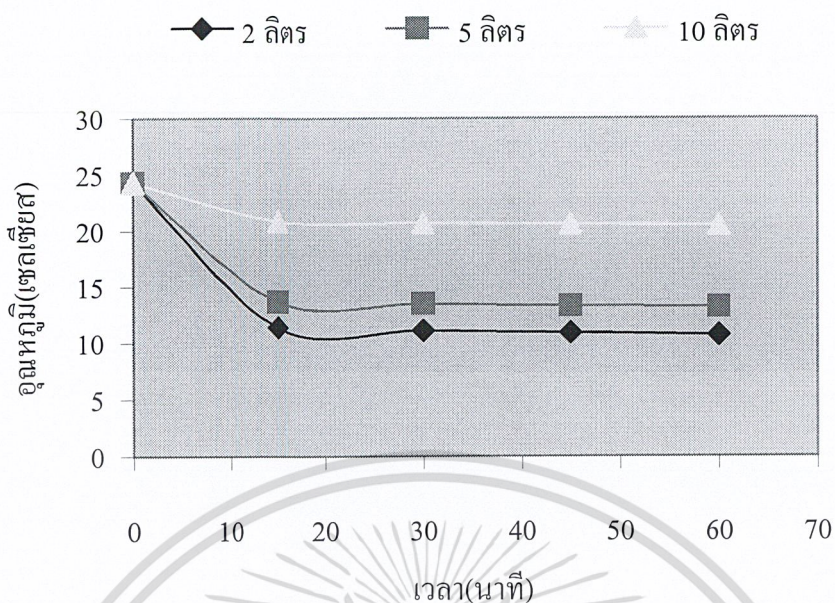
ตารางที่ 4-5 ผลการทดลองของระบบโดยใช้แอลกอฮอล์

เวลา [min]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]	m_1 [kg/sec]	m_5 [kg/sec]
5	11.2	11.5	12.1	23	20.5	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
10	11.5	11.8	12.3	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
15	11.9	12.2	12.6	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
20	12.3	12.5	12.9	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
25	12.4	12.7	13.1	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
30	12.8	13.1	13.5	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
35	13.2	13.5	13.9	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
40	13.6	13.9	14.3	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
45	14.1	14.4	14.8	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
50	14.5	14.8	15.2	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
55	14.6	14.9	15.3	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}
60	14.6	14.9	15.3	23	21	24.3	0.0338	1.4714×10^{-8}

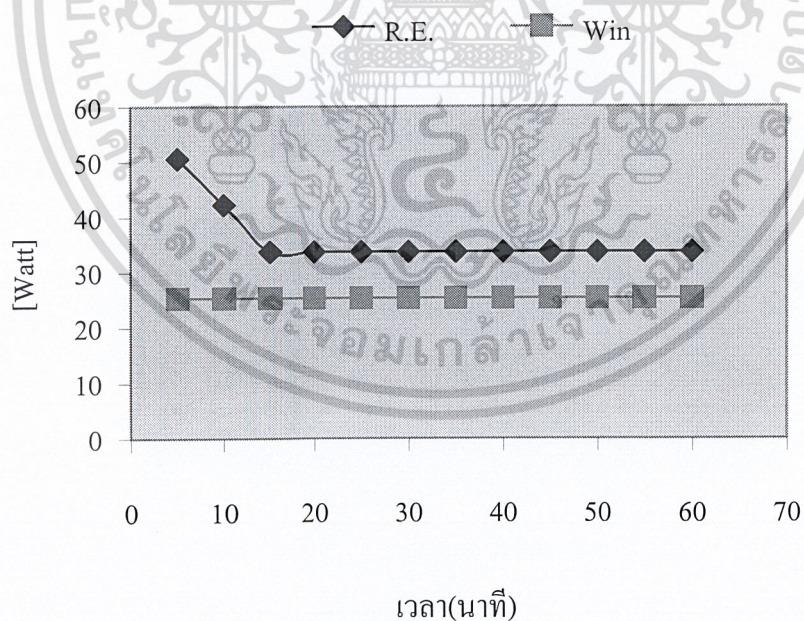
ตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณของระบบโดยใช้แอลกอฮอล์

เวลา [min]	W_{in} [Watt]	R.E. [Watt]	C.O.P.
5	25.2885	50.5768	1.9999
10	25.2885	42.2489	1.6322
15	25.2885	33.7179	1.3333
20	25.2885	33.7179	1.3333
25	25.2885	33.7179	1.3333
30	25.2885	33.7179	1.3333
35	25.2885	33.7179	1.3333
40	25.2885	33.7179	1.3333
45	25.2885	33.7179	1.3333
50	25.2885	33.7179	1.3333
55	25.2885	33.7179	1.3333
60	25.2885	33.7179	1.3333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

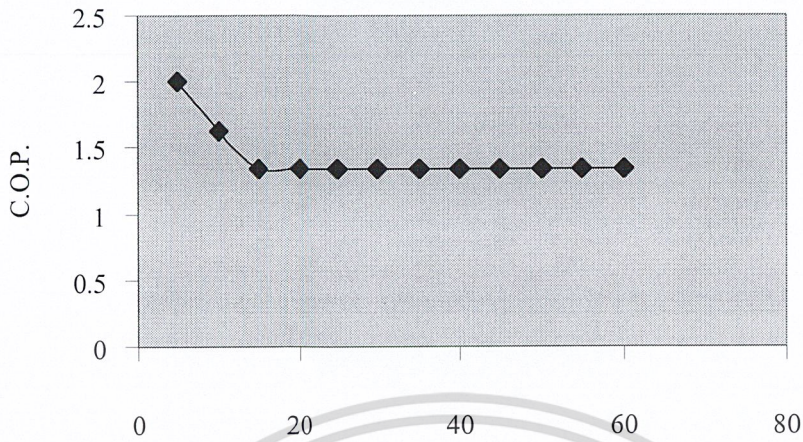


กราฟที่ 4-4 แสดงผลจากปริมาณแอลกอฮอล์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อเวลาและอุณหภูมิ



กราฟที่ 4-5 แสดงผลของ R.E. และ Win ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

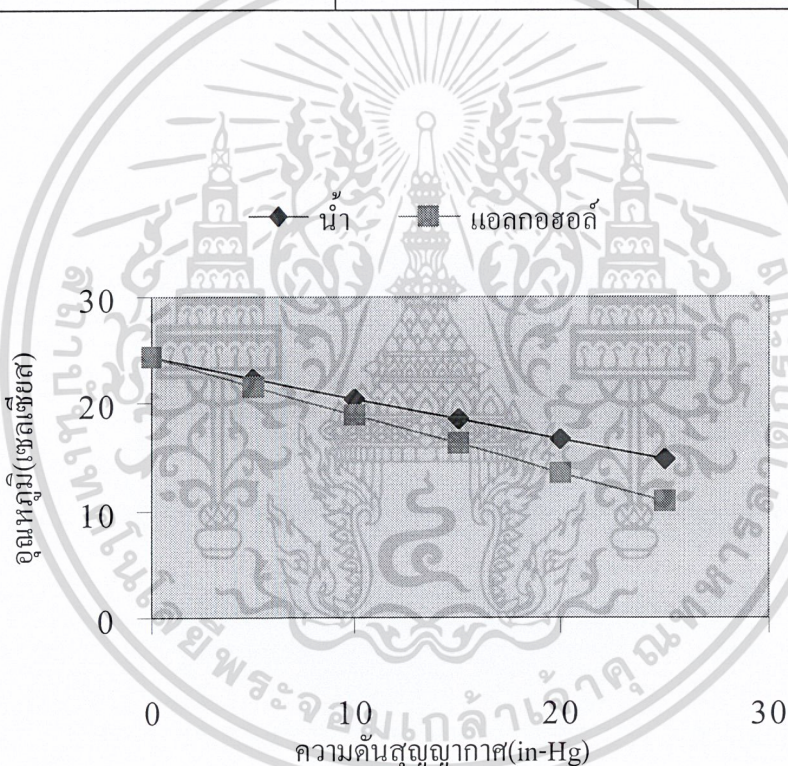


กราฟที่ 4-6 แสดงค่า C.O.P. ของแอลกอฮอล์ที่เวลาต่างๆ กัน

4.3 ผลการทดลองสารทำความเย็นในแต่ละความดันสุญญากาศ

ตารางที่ 4-7 ผลการทดลองสารทำความเย็นในแต่ละความดันสุญญากาศ (น้ำและแอลกอฮอล์)

ความดันสุญญากาศ (in-Hg)	อุณหภูมิสารทำความเย็นในห้องระเหย	
	น้ำ	แอลกอฮอล์
0	24.3	24.3
5	22.4	21.5
10	20.5	18.9
15	18.6	16.4
20	16.7	13.5
25	14.8	10.9



กราฟที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ ความดันสุญญากาศ – อุณหภูมิ ของสารทำความเย็น

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เครื่องทำความเย็นแบบสุญญากาศ เป็นอุปกรณ์การทำความเย็นที่ใช้ปั๊มสุญญากาศ เป็นการทำให้ความดันในห้องระเหยมีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งส่งผลทำให้สารทำความเย็นและฝอยละอองของสารทำความเย็นภายในห้องระเหยเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเดือดของสารทำความเย็นที่ความดันบรรยากาศ ปริมาณของสารทำความเย็นที่กลายเป็นไอจะพาความร้อนออกไปกับการที่ทำให้สารทำความเย็นบางส่วนกลายเป็นไอ

เครื่องทำความเย็นแบบสุญญากาศเป็นระบบการทำความเย็นที่ยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเพราะว่าในการทำความเย็นที่ได้นั้นจะต้องใช้ไอของสารทำความเย็นและประสิทธิภาพในการทำความเย็นของอุปกรณ์นี้ก็อยู่ในขั้นต่ำ โดยทั่วไปการใช้งานของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศนี้ก็ไม่สะดวกแต่มีความเหมาะสมกับบางสถานะของการใช้งาน

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ความสมบูรณ์แบบและการได้สัดส่วนของส่วนประกอบของอุปกรณ์ภายในระบบการทำความเย็นซึ่งในการทำการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเอาปั๊มสุญญากาศที่มีอยู่แล้ว มาทำการประกอบเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก เนื่องจากสาเหตุของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 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 ของระบบ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน ทำให้กำลังที่ต้องใช้ในการหมุนเวียนของสารทำความเย็นสูงขึ้น

- 2.ปั๊มสารทำความเย็น ทำหน้าที่ปั๊มสารทำความเย็นให้ไหลหมุนเวียนภายในระบบ ปั๊มต้องสามารถปั๊มสารทำความเย็นเข้าสู่ห้องระเหยเป็นฝอยละอองได้พอเหมาะ กล่าวคือ ขนาดของปั๊มต้องเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอที่ทำให้สารทำความเย็นไหลกลับเข้าสู่ห้องระเหยให้เป็นฝอยละออง เพราะไม่อย่างนั้นพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นจะน้อยลง ทำให้การทำความเย็นที่ได้จะมีค่าต่ำลง การสูญเสียความร้อนแฝง (Latent Heat) ก็ จะต่ำลงด้วย ดังนั้นปั๊มสารทำความเย็นจะต้องมีอัตราการไหลที่พอเหมาะกับขนาดของระบบและต้องมี ขนาดเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกต่างระหว่างความดันก่อนไหลกลับห้องระเหยและภายในห้องระเหย เพื่อให้สารทำความเย็นที่เข้าสู่ห้องระเหยเป็นฝอยละออง

3. ท่อดูด และท่อจ่าย ในระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ มีน้ำ และแอลกอฮอล์เป็นสารทำความเย็น ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำท่อดูดและท่อจ่าย รวมทั้งท่อทางเดินของน้ำ ต้องไม่เกิดเป็นสนิมง่าย และทน การกัดกร่อนได้ดี ท่อดูดเป็นช่วงของท่อเข้าสู่ปั๊มสารทำความเย็น ส่วนท่อจ่ายคือ ท่อในช่วงหลังปั๊ม ท่อทั้งสองจะต้องมีความสามารถที่จะทนต่อความแตกต่างของแรงกดดันของบรรยากาศได้ พิจารณาท่อดูดจะต้องมีความแข็งแรงกว่าท่อจ่ายเพราะเนื่องจากอยู่ด้านหน้าของปั๊ม ก็จะเป็นสุญญากาศ ซึ่งมีแรงดูดภายในมากกว่าขนาดของท่อจะต้องมีค่าความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานน้อย เพื่อลดขนาดของปั๊ม

ในการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ผลที่เกิดขึ้นต่อระบบการทำความเย็นโดยใช้สารทำความเย็นแบบต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์เป็นส่วนใหญ่ ต่อไปถ้าเราทำการวิเคราะห์หว่าอุปกรณ์ใดมีผลต่อการทำความเย็นอย่างไร เริ่มแรกจะพิจารณาถึงอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบ ซึ่งมีผลเนื่องจากปั๊มสารทำความเย็น อัตราการไหลนั้นควรมีมากพอกับพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนหรือไม่ ถ้ามีมากก็จะทำให้การทำความเย็นทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่ควรทำให้อุณหภูมิที่ออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนมากเกินไปหรือขนาดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนใหญ่ไป จะทำให้อุณหภูมิที่ไหลกลับเข้าไปในห้องระเหย มีอุณหภูมิสูงมากไป ซึ่งทำให้เพิ่มอุณหภูมิของสารทำความเย็นภายในห้องระเหย อีกอย่างหนึ่งคือ ใช้น้ำสามารถระเหยออกไปได้มากเท่าใดซึ่งมีผลมาจากความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยและพื้นที่ผิวของน้ำ และท้ายสุดปั๊มสุญญากาศมีอัตราการดึงเอาไอสารทำความเย็นมากน้อยเท่าใด ถ้ามาก การทำความเย็นก็จะได้มากด้วย ความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยนั้นสามารถทำได้ยังมีขีดจำกัด จะเห็นจากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นว่าความดันใกล้เข้าสู่สุญญากาศเท่าใด อุณหภูมิการเดือดหรือจุดเดือดของสารทำความเย็นก็จะยิ่งใกล้ศูนย์องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นเป็นไปไม่ได้ที่ระบบการทำความเย็นจะสามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส โดยปริมาณการทำความเย็นที่จะทำได้มากหรือน้อยนั้นจะขึ้นกับปริมาณของสารทำความเย็นที่กลายเป็นไอและปริมาณสารทำความเย็นที่อยู่ในห้องระเหย

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลที่ได้จากตารางข้อมูลการทดลอง เมื่ออุณหภูมิห้องเท่ากับ 24.3 องศาเซลเซียส โดยความดันสุญญากาศภายในห้องระเหยมีค่า 25 in-Hg (635 mmHg) จากสูตรในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการทำความเย็นซึ่งผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับทางทฤษฎี

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการทำความเย็นมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเย็นที่ทำได้ของงานของปั๊มสุญญากาศและปั๊มสารทำความเย็น ซึ่งปริมาณการทำความเย็นที่ทำได้มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารทำความเย็นที่พอเหมาะแต่ละสารทำความเย็นในห้องระเหยที่สามารถกลายเป็นไอได้ ถ้าหากสาร

ทำความเย็นสามารถระเหยได้มากเท่าใด การทำความเย็นก็จะมากขึ้นด้วย ในทางกลับกัน ถ้าปริมาณสารทำความเย็นมีมากเกินไป ก็จะยิ่งทำให้การระเหยตัวกลายเป็นไอทำได้น้อย ทำให้การทำความเย็นมีค่าต่ำลง และเมื่อนำสารทำความเย็นมาทดลองในแต่ละความดันสุญญากาศ ค่าการทำความเย็นมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มความดันสุญญากาศ จากผลการคำนวณข้อมูลที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นนั้นจะมีค่าช่วงอยู่ระหว่าง 1.33–1.99 จากทำการทดลองในโครงการนี้สามารถทำความเย็นได้น้อยกว่าที่คิดไว้ เนื่องจากสาเหตุความบกพร่องของอุปกรณ์ คือ ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของระเหยสารทำความเย็นเนื่องจากปั๊มสารทำความเย็นไม่เหมาะสมและถูกต้องเท่าไรนัก นอกจากนี้ระบบท่อที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานมาก จากการทดลองผลการทดลองที่สอดคล้องพบว่าเมื่อค่าปริมาณสารทำความเย็นเสริมเข้าไปซึ่งเท่ากับปริมาณที่สารทำความเย็นกลายเป็นไอน้ำยิ่งมากการทำความเย็นก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นเพิ่มขึ้น

จากข้อมูลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนกลับเข้าห้องระเหยและไอสารทำความเย็นที่ออกจากห้องระเหยนั้น บางช่วงของอุณหภูมิของไอสารทำความเย็นออกจากห้องระเหย จะมีค่าประมาณ 20 องศาเซลเซียส (น้ำ), 21 องศาเซลเซียส (แอลกอฮอล์) จะมีค่ามากกว่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ การที่มีค่าน้อยนั้น เนื่องจากปริมาณการระเหยตัวออกจากห้องระเหยนั้นน้อย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำเสริมซึ่งมีค่าน้อย และประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำลงด้วย

จะพบว่าระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ มีค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นค่อนข้างต่ำ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารทำความเย็นที่เสริมเข้าไปสู่ระบบยิ่งมาก ย่อมหมายความว่า ปริมาณสารทำความเย็นที่ระเหยตัวออกจากห้องระเหยมากตามไปด้วย ทำให้สามารถทำปริมาณความเย็นได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นสูงขึ้นด้วย แต่เนื่องจากงานของปั๊มสุญญากาศที่ให้แก่ระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศที่นำมาเปรียบเทียบกับงานจากการทำให้เป็นไอสารทำความเย็นซึ่งมีค่ามาก ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นต่ำลงได้ ถ้าคิดในแง่ที่ว่างานที่ให้นั้นเป็นเพียงงานของปั๊มสุญญากาศเท่านั้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการแก้ไขและปรับปรุงชุดการทดลองการทำความเย็นแบบสุญญากาศ จากการวิเคราะห์ จากผลการทดลอง ทำให้ทราบถึงว่าเป็นผลมาจากอุปกรณ์ในแต่ละส่วนที่มีผลต่อการทำความเย็น ในการแก้ไขเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งจะทำได้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นสูงขึ้น ในการแก้ไขอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วนั้น ซึ่งจากปั๊มสุญญากาศซึ่งเป็นแบบไดอะแฟรมเปลี่ยนมาเป็นปั๊มแบบลูกสูบ ซึ่งจะทำได้ดึงเอาความร้อนและปริมาณไอของสารทำความเย็นออกจากห้องระเหยได้มากกว่า ส่วนในกรณีที่ได้ทำการปรับปรุงและตัดแปลงแก้ไขให้ดีขึ้น มีดังต่อไปนี้

1. ในการออกแบบห้องระเหยนั้นจะต้องมีปริมาตรของห้องระเหยสอดคล้องกับขนาดของปั๊มสุญญากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารทำความเย็นที่ต้องการ เพื่อทำให้ปั๊มสุญญากาศสามารถทำความดันในห้องระเหยต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้มากขึ้น โดยที่จะใช้งานของปั๊มสุญญากาศน้อยเท่าที่จำเป็น โดยห้องระเหยที่ออกแบบไว้จะต้องสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสารทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของ

สารทำความเย็นนั้นเราสามารถทำได้โดยการทำให้สารทำความเย็นเข้าสู่ห้องระเหยเป็นละออง โดยทำให้สปริงเกอร์มากพอกับความสมดุลขนาดปั๊มสารทำความเย็น

2. ปั๊มสารทำความเย็นต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานภายในท่อดูดและท่อจ่าย รวมทั้งค่าความดันสถิตยและค่าความดันภายในระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศและต้องมีอัตราการไหลที่เพียงพอ ปั๊มที่ใช้ควรมีอัตราการไหลที่ต่ำไม่สูงมากเกินไป

3. ท่อดูดและท่อจ่าย จะต้องออกแบบให้มีความเสียดทานของการดำเนินการไหลต่ำที่สุด และต้องมีขนาดที่เหมาะสมและถูกต้อง เพื่อลดค่าใช้จ่ายและขนาดของปั๊มสารทำความเย็น

4. ขนาดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องมีความเหมาะสมกับสภาวะการแลกเปลี่ยนความร้อน

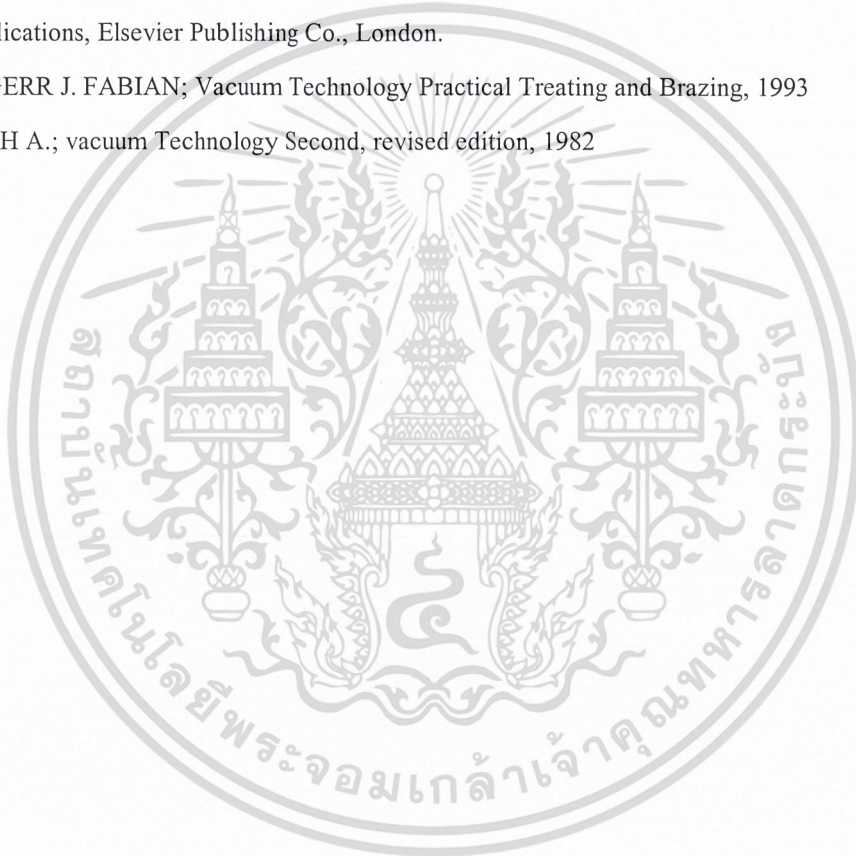
5. ขดท่อ จะต้องมีความถี่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และวัสดุที่ใช้ทำท่อต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง

6. ปั๊มสุญญากาศ ต้องมีอัตราการไหลที่สูงและเพียงพอกับขนาดของห้องระเหย



บรรณานุกรม

- [1] อัครเดช สิ้นธุภัก, “การทำควมเย็น,” ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, “การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer),” โรงพิมพ์ หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพมหานคร, 2536.
- [3] สุนันท์ ตรีชัยนิตย์, “การถ่ายเทความร้อน,” โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] Yunus A. Cengel, and Michael A. Boies, ” Thermodynamics : An Engineering Approach” McGraw-Hill, New York, 1989
- [5] Smisek, M., and Cerny, Slavoy (1970), “ Active Carbon Manufacture Properties and Applications, Elsevier Publishing Co., London.
- [6] ROGER J. FABIAN; Vacuum Technology Practical Treating and Brazing, 1993
- [7] ROTH A.; vacuum Technology Second, revised edition, 1982





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างผลการคำนวณของระบบการทำความเย็นแบบสุญญากาศ โดยใช้ น้ำ เป็นสารทำความเย็น ซึ่งนำค่าที่ได้จากผลการทดลองดังตารางที่ 4-2 มาเปิดตารางน้ำที่ ข.-1 ภาคผนวก ข. เพื่อหาค่าเอนทาลปี (Enthalpy)

จากตารางน้ำที่ ข.-1 ภาคผนวก ข. จะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$T_1 = 15.2$	$^{\circ}\text{C}$	$h_1 = 63.8288$	kJ/kg
$T_2 = 15.5$	$^{\circ}\text{C}$	$h_2 = 65.087$	kJ/kg
$T_3 = 16.1$	$^{\circ}\text{C}$	$h_3 = 67.6034$	kJ/kg
$T_5 = 20$	$^{\circ}\text{C}$	$h_5 = 2538.1$	kJ/kg
$T_6 = 24.3$	$^{\circ}\text{C}$	$h_6 = 2545.926$	kJ/kg

Load temperature 24.3 $^{\circ}\text{C}$

$\rho_{\text{สารทำความเย็น}} = \rho_1 =$ ความหนาแน่นที่อุณหภูมิเริ่มทำการทดลองที่ 24.3 $^{\circ}\text{C} = 997.148$ Kg/m^3

มวลสารทำความเย็นที่ผ่านระบบ $m_1 = \rho_1 \times$ อัตราการไหลผ่านระบบ
 $= (997.148 \text{ kg/m}^3) \times (0.21 \text{ m}^3)/(5)(60)$
 $= 0.0764 \text{ kg/sec}$

ค่าการทำความเย็น R.E. $= m_1 (h_3 - h_2)$
 $= (0.0764 \text{ kg/sec}) (2.5164 \text{ kJ/kg})$
 $= 192.3704 \text{ Watt}$

งานที่ปั๊มสารทำความเย็น $W_p = m_1 (h_2 - h_1)$
 $= (0.0764 \text{ kg/sec})(1.25825 \text{ kJ/kg})$
 $= 96.2004 \text{ Watt}$

$\rho_5 =$ ความหนาแน่นที่อุณหภูมิที่ ตำแหน่ง 5 $= 0.017304031 \text{ kg/m}^3$
 มวลสารทำความเย็นที่ผ่านปั๊มสุญญากาศ $m_5 = \rho_5 \times$ อัตราการไหลผ่านปั๊มสุญญากาศ
 $= (0.017304031 \text{ kg/m}^3) (0.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3)/(120)(60)$
 $= 7.21 \times 10^{-10} \text{ kg/sec}$

งานที่ปั๊มสุญญากาศ $W_v = m_5 (h_6 - h_5)$
 $= (7.21 \times 10^{-10} \text{ kg/sec}) (7.826 \text{ kJ/kg})$
 $= 5.6425 \times 10^{-6} \text{ Watt}$

งานที่ให้แก่ระบบการทำความเย็น $W_{in} = W_p + W_v$
 $= 96.2004 \text{ Watt}$

ประสิทธิภาพการทำความเย็น C.O.P. $= \text{R.E.} / W_{in}$
 $= 192.3704 / 96.2004$
 $= 1.996$

ตัวอย่างผลการคำนวณของระบบการทำความเย็นแบบสูญญากาศ โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นสารทำความเย็น ซึ่งนำค่าที่ได้จากผลการทดลองดังตารางที่ 4-5 มาเปิดตารางแอลกอฮอล์ที่ ข.-2 ภาคผนวก เพื่อหาค่าเอนทาลปี (Enthalpy)

จากตารางน้ำที่ ข.-2 ภาคผนวก ข. จะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$T_1 = 11.2$	$^{\circ}\text{C}$	$h_1 = 566.9315$	kJ/kg
$T_2 = 11.5$	$^{\circ}\text{C}$	$h_2 = 567.6785$	kJ/kg
$T_3 = 12.1$	$^{\circ}\text{C}$	$h_3 = 569.1725$	kJ/kg
$T_5 = 20.5$	$^{\circ}\text{C}$	$h_5 = 1766.996$	kJ/kg
$T_6 = 24.3$	$^{\circ}\text{C}$	$h_6 = 1770.948$	kJ/kg

Load temperature 24.3 $^{\circ}\text{C}$

$\rho_{\text{สารทำความเย็น}} = \rho_1 =$ ความหนาแน่นที่อุณหภูมิเริ่มทำการทดลองที่ 24.3 $^{\circ}\text{C} = 787.29$ kg/m^3

$$\begin{aligned} \text{มวลสารทำความเย็นที่ผ่านระบบ} \quad m_1 &= \rho_1 \times \text{อัตราการไหลผ่านระบบ} \\ &= (787.29 \text{ kg/m}^3) \times (0.129 \text{ m}^3)/(5)(60) \\ &= 0.0338 \text{ kg/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าการทำความเย็น} \quad \text{R.E.} &= m_1(h_3 - h_2) \\ &= (0.0338 \text{ kg/sec})(1.494 \text{ kJ/kg}) \\ &= 50.5768 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งานที่ปั๊มสารทำความเย็น} \quad W_p &= m_1(h_2 - h_1) \\ &= (0.0338 \text{ kg/sec})(0.747 \text{ kJ/kg}) \\ &= 25.2884 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_5 &= \text{ความหนาแน่นที่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 5} = 0.176572844 \text{ kg/m}^3 \\ \text{มวลสารทำความเย็นที่ผ่านปั๊มสูญญากาศ} \quad m_5 &= \rho_5 \times \text{อัตราการไหลผ่านปั๊มสูญญากาศ} \\ &= (0.176572844 \text{ kg/m}^3) (0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3)/(120)(60) \\ &= 1.4714 \times 10^{-8} \text{ kg/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งานที่ปั๊มสูญญากาศ} \quad W_v &= m_5(h_6 - h_5) \\ &= (1.4714 \times 10^{-8} \text{ kg/sec})(3.952 \text{ kJ/kg}) \\ &= 5.8149 \times 10^{-8} \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งานที่ให้แก่ระบบการทำความเย็น} \quad W_{in} &= W_p + W_v \\ &= 25.2885 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการทำความเย็น} \quad \text{C.O.P.} &= \text{R.E.} / W_{in} \\ &= 50.5768 / 25.2885 \\ &= 1.999 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ

Saturated water—Temperature table

Temp., <i>T</i> , °C	Sat. press., <i>P</i> _{sat} , kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
Sat. press., MPa												
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6885	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} , MPa	Specific volume, m ³ /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 _{ig}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{ig}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{ig}	Sat. vapor, s _g
200	1.5538	0.001157	0.13736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1596.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001447	0.018350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Source: Tables A-4 through A-8 are adapted from Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1986), pp. 635–651. Originally published in Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill, and Joan G. Moore, *Steam Tables*, SI Units (New York: John Wiley & Sons, 1978).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Sat. temp., T _{sat} °C	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
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.59	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	763.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2871.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Saturated water—Pressure table (Concluded)

Press., P MPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Specific volume, m ³ /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
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1957.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
Superheated water												
P = 0.01 MPa (45.81°C)*												
Sat. ¹	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2667.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.05 MPa (81.33°C)												
P = 0.10 MPa (99.63°C)												
P = 0.20 MPa (120.23°C)												
P = 0.30 MPa (133.55°C)												
P = 0.40 MPa (143.63°C)												
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.8058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2850.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50 MPa (151.86°C)												
P = 0.60 MPa (158.85°C)												
P = 0.80 MPa (170.43°C)												
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2969.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

¹Properties of saturated vapor at the specified pressure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Continued)

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
P = 1.00 MPa (179.91°C)				P = 1.20 MPa (187.99°C)				P = 1.40 MPa (195.07°C)				
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4478	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2984
P = 1.60 MPa (201.41°C)				P = 1.80 MPa (207.15°C)				P = 2.00 MPa (212.42°C)				
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4808	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7664
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8837	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
P = 2.50 MPa (223.99°C)				P = 3.00 MPa (233.90°C)				P = 3.50 MPa (242.60°C)				
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06688	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09196	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2338	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5085	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.8	7.6837
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6762	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Continued)												
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
P = 4.0 MPa (250.40°C)				P = 4.5 MPa (257.49°C)				P = 5.0 MPa (263.99°C)				
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.04406	2600.1	2798.3	6.0198	0.03944	2597.1	2794.3	5.9734
275	0.05457	2667.9	2886.2	6.2285	0.04730	2650.3	2863.2	6.1401	0.04141	2631.3	2838.3	6.0544
300	0.05884	2725.3	2960.7	6.3615	0.05135	2712.0	2943.1	6.2828	0.04532	2698.0	2924.5	6.2084
350	0.06645	2826.7	3092.5	6.5821	0.05840	2817.8	3080.6	6.5131	0.05194	2808.7	3068.4	6.4493
400	0.07341	2919.9	3213.6	7.7690	0.06475	2913.3	3204.7	6.7047	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459
450	0.08002	3010.2	3330.3	6.9363	0.07074	3005.0	3323.3	6.8746	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.07651	3095.3	3439.6	7.0301	0.06857	3091.0	3433.8	6.9759
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.08765	3276.0	3670.5	7.3110	0.07869	3273.0	3666.5	7.2589
700	0.11095	3462.1	3905.9	7.6198	0.09847	3459.9	3903.0	7.5631	0.08849	3457.6	3900.1	7.5122
800	0.12287	3650.0	4141.5	7.8502	0.10911	3648.3	4139.3	7.7942	0.09811	3646.6	4137.1	7.7440
900	0.13469	3843.6	4382.3	8.0647	0.11965	3842.2	4380.6	8.0091	0.10762	3840.7	4378.8	7.9593
1000	0.14645	4042.9	4628.7	8.2662	0.13013	4041.6	4627.2	8.2108	0.11707	4040.4	4625.7	8.1612
1100	0.15817	4248.0	4880.6	8.4567	0.14056	4246.8	4879.3	8.4015	0.12648	4245.6	4878.0	8.3520
1200	0.16987	4458.6	5138.1	8.6376	0.15098	4447.5	5136.9	8.5825	0.13587	4456.3	5135.7	8.5331
1300	0.18156	4674.3	5400.5	8.8100	0.16193	4673.1	5399.4	8.7549	0.14526	4672.0	5398.2	8.7055
P = 6.0 MPa (275.64°C)				P = 7.0 MPa (285.88°C)				P = 8.0 MPa (295.06°C)				
Sat.	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892	0.02737	2580.5	2772.1	5.9133	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432
300	0.03616	2667.2	2884.2	6.0674	0.02947	2632.2	2838.4	5.9305	0.02426	2590.9	2785.0	5.7906
350	0.04223	2789.6	3043.0	6.3335	0.03524	2769.4	3016.0	6.2283	0.02995	2747.7	2987.3	6.1301
400	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408	0.03993	2878.6	3158.1	6.4478	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634
450	0.05214	2988.9	3301.8	6.7193	0.04416	2978.0	3267.1	6.6327	0.03817	2966.7	3272.0	6.5551
500	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803	0.04814	3073.4	3410.3	6.7975	0.04175	3064.3	3398.3	6.7240
550	0.06101	3174.6	3540.6	7.0288	0.05195	3167.2	3530.9	6.9486	0.04516	3159.8	3521.0	6.8778
600	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677	0.05565	3260.7	3650.3	7.0894	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206
700	0.07352	3453.1	3894.2	7.4234	0.06283	3448.5	3889.3	7.3476	0.05481	3443.9	3882.4	7.2612
800	0.08160	3643.1	4132.7	7.6566	0.06981	3639.5	4128.2	7.5822	0.06097	3636.0	4128.8	7.5173
900	0.08958	3837.8	4375.3	7.8727	0.07669	3835.0	4371.8	7.7991	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351
1000	0.09749	4037.8	4622.7	8.0751	0.08350	4035.3	4619.8	8.0020	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384
1100	0.10536	4243.3	4875.4	8.2661	0.09027	4240.9	4872.8	8.1933	0.07896	4238.6	4870.3	8.1300
1200	0.11321	4454.0	5133.3	8.4474	0.09703	4451.7	5130.9	8.3747	0.08489	4449.5	5128.5	8.3115
1300	0.12106	4669.6	5396.0	8.6199	0.10377	4667.3	5393.7	8.5475	0.09080	4665.0	5391.5	8.4842
P = 9.0 MPa (303.40°C)				P = 10.0 MPa (311.06°C)				P = 12.5 MPa (327.89°C)				
Sat.	0.02048	2557.8	2742.1	5.6772	0.018026	2544.4	2724.7	5.6141	0.013495	2505.1	2673.8	5.4624
325	0.02327	2646.6	2856.0	5.8712	0.019861	2610.4	2809.1	5.7568				
350	0.02580	2724.4	2956.6	6.0361	0.02242	2699.2	2923.4	5.9443	0.016126	2624.6	2826.2	5.7118
400	0.02993	2848.4	3117.8	6.2854	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120	0.02000	2789.3	3039.3	6.0417
450	0.03350	2955.2	3256.6	6.4844	0.02975	2943.4	3240.9	6.4190	0.02299	2912.5	3199.8	6.2719
500	0.03677	3055.2	3386.1	6.6576	0.03279	3045.8	3373.7	6.5966	0.02560	3021.7	3341.8	6.4618
550	0.03987	3152.2	3511.0	6.8142	0.03564	3144.6	3500.9	6.7561	0.02801	3125.0	3475.2	6.6290
600	0.04285	3248.1	3633.7	6.9599	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	0.03029	3225.4	3604.0	6.7810
650	0.04574	3343.6	3755.3	7.0943	0.04101	3338.2	3748.2	7.0398	0.03248	3324.4	3730.4	6.9218
700	0.04857	3439.3	3876.5	7.2221	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	0.03460	3422.9	3855.3	7.0536
800	0.05409	3632.5	4119.3	7.4596	0.04859	3628.9	4114.8	7.4077	0.03869	3620.0	4103.6	7.2965
900	0.05950	3829.2	4364.8	7.6783	0.05349	3826.3	4361.2	7.6272	0.04267	3819.1	4352.5	7.5182
1000	0.06485	4030.3	4614.0	7.8821	0.05832	4027.8	4611.0	7.8315	0.04658	4021.6	4603.8	7.7237
1100	0.07016	4236.3	4867.7	8.0740	0.06312	4234.0	4865.1	8.0237	0.05045	4228.2	4858.8	7.9165
1200	0.07544	4447.2	5126.2	8.2556	0.06789	4444.9	5123.8	8.2055	0.05430	4439.3	5118.0	8.0937
1300	0.08072	4662.7	5389.2	8.4284	0.07265	4660.5	5387.0	8.3783	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Superheated water (Concluded)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
P = 15.0 MPa (342.24°C)				P = 17.5 MPa (354.75°C)				P = 20.0 MPa (365.81°C)				
Sat.	0.010337	2455.5	2610.5	5.3098	0.007920	2390.2	2528.8	5.1419	0.005834	2293.0	2409.7	4.9269
350	0.011470	2520.4	2692.4	5.4421								
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2685.0	2902.9	5.7213	0.009942	2619.3	2818.1	5.5540
450	0.018445	2879.5	3156.2	6.1404	0.015174	2844.2	3109.7	6.0184	0.012695	2806.2	3060.1	5.9017
500	0.02080	2996.6	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.014768	2942.9	3238.2	6.1401
550	0.02293	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.4230	0.016555	3062.4	3393.5	6.3348
600	0.02491	3208.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.018178	3174.0	3537.6	6.5048
650	0.02680	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296.0	3693.9	6.7357	0.019693	3281.4	3675.3	6.6582
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993
800	0.03210	3610.9	4092.4	7.2040	0.02738	3601.8	4081.1	7.1244	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3507	0.02645	3797.5	4326.4	7.2830
1000	0.03875	4015.4	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589	0.02897	4003.1	4582.5	7.4925
1100	0.04200	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531	0.03145	4211.3	4840.2	7.6874
1200	0.04523	4433.8	5112.3	8.0108	0.03876	4428.3	5106.6	7.9360	0.03391	4422.8	5101.0	7.8707
1300	0.04845	4649.1	5376.0	8.1840	0.04154	4643.5	5370.5	8.1093	0.03636	4638.0	5365.1	8.0442
P = 25.0 MPa				P = 30.0 MPa				P = 35.0 MPa				
375	0.0019731	1798.7	1848.0	4.0320	0.0017892	1737.8	1791.5	3.9305	0.0017003	1702.9	1762.4	3.8722
400	0.006004	2430.1	2580.2	5.1418	0.002790	2067.4	2151.1	4.4728	0.002100	1914.1	1987.6	4.2126
425	0.007881	2609.2	2806.3	5.4723	0.005303	2455.1	2614.2	5.1504	0.003428	2253.4	2373.4	4.7747
450	0.009162	2720.7	2949.7	5.6744	0.006735	2619.3	2821.4	5.4424	0.004961	2498.7	2672.4	5.1962
500	0.011123	2884.3	3162.4	5.9592	0.008678	2820.7	3061.1	5.7905	0.006927	2751.9	2994.4	5.6282
550	0.012724	3017.5	3335.6	6.1765	0.010168	2970.3	3275.4	6.0342	0.008345	2921.0	3213.0	5.9026
600	0.014137	3137.9	3491.4	6.3602	0.011446	3100.5	3443.9	6.2331	0.009527	3082.0	3395.5	6.1179
650	0.015433	3251.6	3637.4	6.5229	0.012596	3221.0	3598.9	6.4058	0.010575	3189.8	3559.9	6.3010
700	0.016646	3361.3	3777.5	6.6707	0.013661	3335.8	3745.6	6.5606	0.011533	3309.8	3713.5	6.4631
800	0.018912	3574.3	4047.1	6.9345	0.015623	3555.5	4024.2	6.8332	0.013278	3536.7	4001.5	6.7450
900	0.021045	3783.0	4309.1	7.1680	0.017448	3768.5	4291.9	7.0718	0.014883	3754.0	4274.9	6.9386
1000	0.02310	3990.9	4568.5	7.3802	0.019196	3978.8	4554.7	7.2867	0.016410	3966.7	4541.1	7.2064
1100	0.02512	4200.2	4828.2	7.5765	0.020903	4189.2	4816.3	7.4845	0.017895	4178.3	4804.6	7.4037
1200	0.02711	4412.0	5089.9	7.7605	0.022589	4401.3	5079.0	7.6692	0.019360	4390.7	5068.3	7.5910
1300	0.02910	4626.9	5354.4	7.9342	0.024266	4616.0	5344.0	7.8432	0.020815	4605.1	5333.6	7.7653
P = 40.0 MPa				P = 50.0 MPa				P = 60.0 MPa				
375	0.0016407	1677.1	1742.8	3.8290	0.0015594	1638.6	1716.6	3.7639	0.0015028	1609.4	1699.5	3.7141
400	0.0019077	1854.6	1930.9	4.1135	0.0017309	1788.1	1874.6	4.0031	0.0016335	1745.4	1843.4	3.9318
425	0.002532	2096.9	2198.1	4.5029	0.002007	1959.7	2060.0	4.2734	0.0018165	1892.7	2001.7	4.1626
450	0.003693	2365.1	2512.8	4.9459	0.002486	2159.6	2284.0	4.5884	0.002085	2053.9	2179.0	4.4121
500	0.005622	2678.4	2903.3	5.4700	0.003892	2525.5	2720.1	5.1726	0.002956	2390.6	2567.9	4.9321
550	0.006984	2869.7	3149.1	5.7785	0.005118	2763.6	3019.5	5.5485	0.003956	2658.8	2896.2	5.3441
600	0.008094	3022.6	3346.4	6.0144	0.006112	2942.0	3247.6	5.8178	0.004834	2861.1	3151.2	5.6452
650	0.009063	3158.0	3520.6	6.2054	0.006966	3093.5	3441.8	6.0342	0.005595	3028.8	3364.5	5.8829
700	0.009941	3283.6	3681.2	6.3750	0.007727	3230.5	3616.8	6.2189	0.006272	3177.2	3553.5	6.0824
800	0.011523	3517.8	3978.7	6.6662	0.009076	3479.8	3933.6	6.5290	0.007459	3441.5	3889.1	6.4109
900	0.012962	3739.4	4257.9	6.9150	0.010283	3710.3	4224.4	6.7882	0.008508	3681.0	4191.5	6.6805
1000	0.014324	3954.6	4527.6	7.1356	0.011411	3930.5	4501.1	7.0146	0.009480	3906.4	4475.2	6.9127
1100	0.015642	4167.4	4793.1	7.3364	0.012496	4145.7	4770.5	7.2184	0.010409	4124.1	4748.6	7.1195
1200	0.016940	4380.1	5057.7	7.5224	0.013561	4359.1	5037.2	7.4058	0.011317	4338.2	5017.2	7.3083
1300	0.018229	4594.3	5323.5	7.6969	0.014616	4572.8	5303.6	7.5808	0.012215	4551.4	5284.3	7.4837

ตารางที่ ข.-1 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำ (ต่อ)

Compressed liquid water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
P = 5 MPa (263.99°C)				P = 10 MPa (311.06°C)				P = 15 MPa (342.24°C)				
Sat.	0.0012859	1147.8	1154.2	2.9202	0.0014524	1393.0	1407.6	3.3596	0.0016581	1585.6	1610.5	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.04	0.0001	0.0009952	0.09	10.04	0.0002	0.0009928	0.15	15.05	0.0004
20	0.0009995	83.65	88.65	0.2956	0.0009972	83.36	93.33	0.2945	0.0009950	83.06	97.99	0.2934
40	0.0010056	166.95	171.97	0.5705	0.0010034	166.35	176.38	0.5686	0.0010013	165.76	180.78	0.5666
60	0.0010149	250.23	255.30	0.8285	0.0010127	249.36	259.49	0.8258	0.0010105	248.51	263.67	0.8232
80	0.0010268	333.72	338.85	1.0720	0.0010245	332.59	342.83	1.0688	0.0010222	331.48	346.81	1.0656
100	0.0010410	417.52	422.72	1.3030	0.0010385	416.12	426.50	1.2992	0.0010361	414.74	430.28	1.2955
120	0.0010576	501.80	507.09	1.5233	0.0010549	500.08	510.64	1.5189	0.0010522	498.40	514.19	1.5145
140	0.0010768	586.76	592.15	1.7343	0.0010737	584.68	595.42	1.7292	0.0010707	582.66	598.72	1.7242
160	0.0010988	672.62	678.12	1.9375	0.0010953	670.13	681.08	1.9317	0.0010918	667.71	684.09	1.9260
180	0.0011240	759.63	765.25	2.1341	0.0011199	756.65	767.84	2.1275	0.0011159	753.76	770.50	2.1210
200	0.0011530	848.1	853.9	2.3255	0.0011480	844.5	856.0	2.3178	0.0011433	841.0	858.2	2.3104
220	0.0011866	938.4	944.4	2.5128	0.0011805	934.1	945.9	2.5039	0.0011748	929.9	947.5	2.4953
240	0.0012264	1031.4	1037.5	2.6979	0.0012187	1026.0	1038.1	2.6872	0.0012114	1020.8	1039.0	2.6771
260	0.0012749	1127.9	1134.3	2.8830	0.0012645	1121.1	1133.7	2.8699	0.0012550	1114.6	1133.4	2.8576
280					0.0013216	1220.9	1234.1	3.0548	0.0013084	1212.5	1232.1	3.0393
300					0.0013972	1328.4	1342.3	3.2469	0.0013770	1316.6	1337.3	3.2260
320									0.0014724	1431.1	1453.2	3.4247
340									0.0016311	1567.5	1591.9	3.6546
P = 20 MPa (365.81°C)				P = 30 MPa				P = 50 MPa				
Sat.	0.002036	1785.6	1826.3	4.0139	0.0009856	0.25	29.82	0.0001	0.0009766	0.20	49.03	0.0014
0	0.0009904	0.19	20.01	0.0004	0.0009886	82.17	111.84	0.2898	0.0009804	81.00	130.02	0.2848
20	0.0009928	82.77	102.62	0.2923	0.0009886	82.17	111.84	0.2898	0.0009872	161.86	211.21	0.5527
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0009951	164.04	193.89	0.5607	0.0009962	242.98	292.79	0.8052
60	0.0010084	247.68	267.85	0.8206	0.0010042	246.06	276.19	0.8154	0.0010073	324.34	374.70	1.0440
80	0.0010199	330.40	350.80	1.0624	0.0010156	328.30	358.77	1.0561	0.0010201	405.88	456.89	1.2703
100	0.0010337	413.39	434.06	1.2917	0.0010290	410.78	441.66	1.2844	0.0010348	487.65	539.39	1.4857
120	0.0010496	496.76	517.76	1.5102	0.0010445	493.59	524.93	1.5018	0.0010515	569.77	622.35	1.6915
140	0.0010678	580.69	602.04	1.7193	0.0010621	576.88	608.75	1.7098	0.0010703	652.41	705.92	1.8891
160	0.0010885	665.35	687.12	1.9204	0.0010821	660.82	693.28	1.9096	0.0010912	735.69	790.25	2.0794
180	0.0011120	750.95	773.20	2.1147	0.0011047	746.59	778.73	2.1024	0.0011146	819.7	875.5	2.2634
200	0.0011388	837.7	860.5	2.3031	0.0011302	831.4	865.3	2.2893	0.0011408	904.7	961.7	2.4419
220	0.0011695	925.9	949.3	2.4870	0.0011590	918.3	953.1	2.4711	0.0011702	990.7	1049.2	2.6158
240	0.0012046	1016.0	1040.0	2.6674	0.0011920	1006.9	1042.6	2.6490	0.0012034	1078.1	1138.2	2.7860
260	0.0012462	1108.6	1133.5	2.8459	0.0012303	1097.4	1134.3	2.8243	0.0012415	1167.2	1229.3	2.9537
280	0.0012965	1204.7	1230.6	3.0248	0.0012755	1190.7	1229.0	2.9986	0.0013304	1287.9	1327.8	3.1741
300	0.0013596	1306.1	1333.3	3.2071	0.0013997	1390.7	1432.7	3.3539	0.0014032	1452.0	1522.1	3.4557
320	0.0014437	1415.7	1444.6	3.3979	0.0016265	1626.6	1675.4	3.7494	0.0018691	1781.4	1837.5	4.0012
340	0.0015884	1539.7	1571.0	3.6075								
360	0.0018226	1702.8	1739.3	3.8772								
380												

ตารางที่ ข.-2 ตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอลกอฮอล์

Temp (K)	Pressure (bar)	Sp. vol		Spec. enthalpy		Spec. heat const pr. sat liq kJ/kg.K
		sat. liq cu. m/kg	sat. vap	sat. liq kJ/kg	sat. vap	
270	.03327	.00123	20.93	531.5	1740.7	2.375
280	.06208	.00124	11.62	556.1	1752.1	2.420
290	.1094	.001259	6.776	581.0	1763.2	2.471
300	.1860	.001274	4.095	606.2	1773.6	2.520
310	.3043	.00129	2.566	631.7	1783.1	2.58
320	.4817	.001306	1.661	657.5	1791.9	2.67
330	.7395	.001323	1.103	683.6	1799.6	2.75
337.5	1.0012	.001337	.8110	703.4	1804.8	2.81
340	1.1044	.001342	.7533	710.1	1806.5	2.83
350	1.6082	.001361	.5256	736.9	1812.4	2.91
360	2.208	.001381	.3752	764.3	1817.4	3.01
370	3.188	.001403	.2723	792.5	1821.6	3.11
380	4.357	.001426	.2015	820.2	1825.1	3.22

