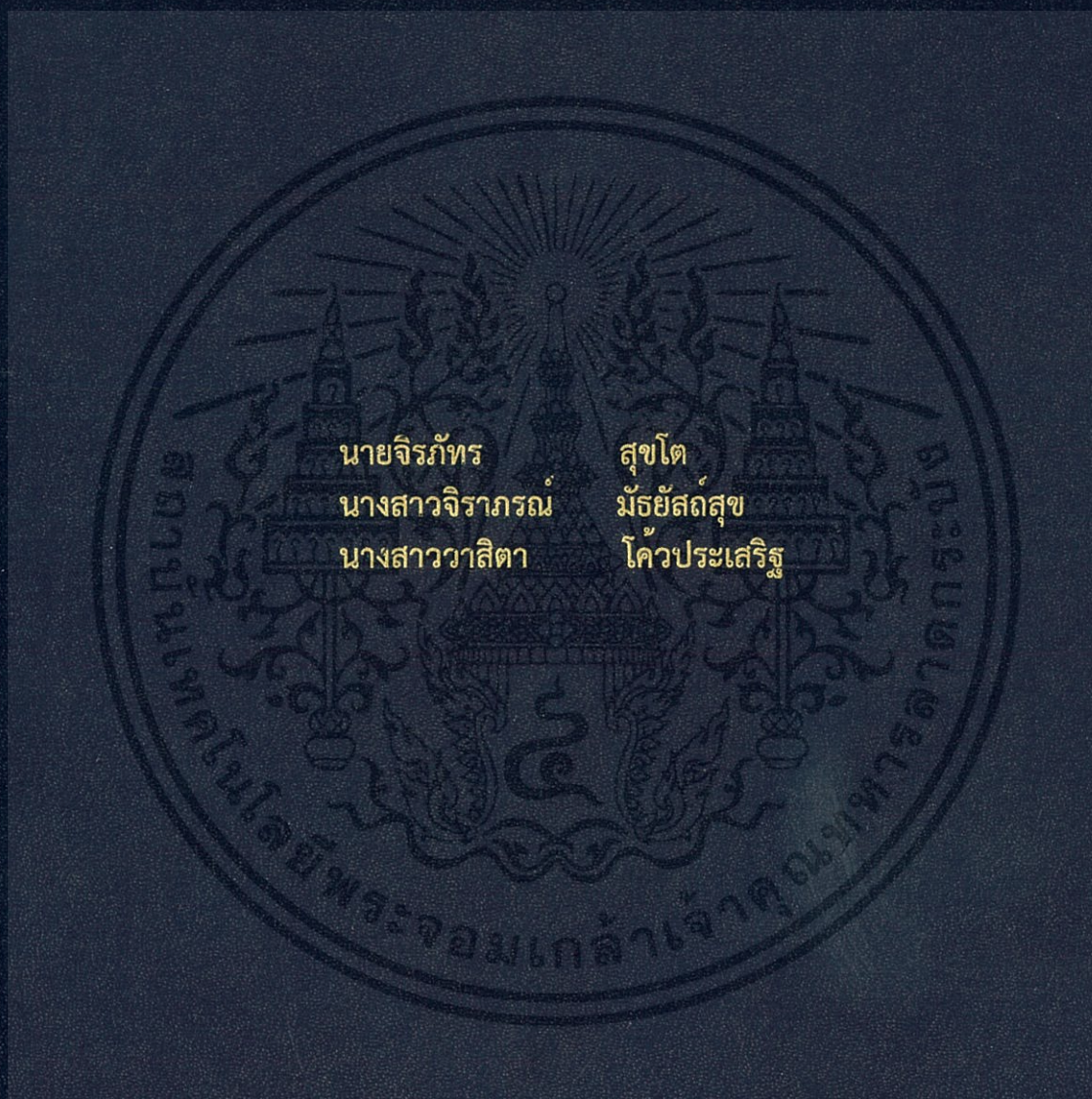


การสร้างระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์  
เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน

IMPLEMENTING ANALOGY FOR SOLAR POWERED  
PRIME MOVER AS TEACHING TOOL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การสร้างระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์  
เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน

IMPLEMENTING ANALOGY FOR SOLAR POWERED  
PRIME MOVER AS TEACHING TOOL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPLEMENTING ANALOGY FOR SOLAR POWERED  
PRIME MOVER AS TEACHING TOOL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN AUTOMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิศวกรรมอัตโนมัติ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การสร้างระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์  
เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน  
Implementing Analogy for Solar Powered  
Prime Mover as Teaching Tool

นักศึกษาผู้จัดทำ นายจิรภัทร สุขโต รหัสนักศึกษา 56010188  
นางสาวจิราภรณ์ มัธยัสต์สุข รหัสนักศึกษา 56010200  
นางสาววาสิตา โคว์ประเสริฐ รหัสนักศึกษา 56011120

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ  
ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.ประภาช อุดคกิมพันธ์	
รศ.ดร.อัมพวัน จุลเสวีวงศ์	

หัวข้อปฏิญญานิพนธ์	การสร้างระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายจิรภัทร สุขโต	รหัสนักศึกษา	56010188
	นางสาวจิราภรณ์ มัธยัสต์สุข	รหัสนักศึกษา	56010200
	นางสาววาสิตา โค้วประเสริฐ	รหัสนักศึกษา	56011120
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ประภาช อुकคกิม่าพันธ์ุ		
	รศ.ดร.อัมพวัน จุลเสรีวงศ์		
ปีการศึกษา	2559		

## บทคัดย่อ

ปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นเรื่องเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเรียนรู้ในหลักการทำงานของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ ปฏิญญานิพนธ์จึงได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างระบบเทียบเคียงด้วยการไหลเวียนของสารทำความเย็นในระบบท่อทองแดงเพื่อใช้เป็นสื่อการสอน โดยเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาประกอบด้วยท่อส่งน้ำมัน ถังเก็บสะสมความร้อน ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ เครื่องกังหันไอน้ำ และคอนเดนเซอร์ ส่วนระบบเทียบเคียงที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย ถังเก็บสารทำความเย็น R134a ท่อขดดูดซับความร้อน และท่อขดระบายความร้อน เมื่อเปรียบเทียบเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาและระบบเทียบเคียงที่นำเสนอ พบว่า ถังเก็บสะสมความร้อนและตัวรับรังสีแสงอาทิตย์เทียบได้กับถังเก็บสารทำความเย็น R134a และท่อขดดูดซับความร้อน ตามลำดับ ส่วนคอนเดนเซอร์เทียบได้กับท่อขดระบายความร้อน และเครื่องกังหันไอน้ำเทียบได้กับความดันแตกต่างระหว่างท่อขดระบายความร้อนและท่อขดดูดซับความร้อน ความถูกต้องของระบบเทียบเคียงที่นำเสนอสามารถยืนยันได้จากผลการทดลอง

คำสำคัญ : เทอร์โมไดนามิกส์, สารทำความเย็น, การถ่ายเทความร้อน, การเทียบเคียง, เครื่องต้นกำลัง, แสงอาทิตย์

Thesis Title	Implementing Analogy for Solar Powered Prime Mover as Teaching Tool
Student	Mr.Jirapat Sookto Ms.Jirapon Mattayatsuk Ms.Wasita Kovpraserd
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Prapart Ukakimaparn Assoc. Prof. Dr. Amphawan Julsereewong
Academic Year	2016

## ABSTRACT

This thesis focuses on the solar powered prime mover, which is used for generating electricity and heat from solar power. In order to help develop an understanding of its principle, its refrigerant-in-copper tube analogy is designed and implemented for use as a teaching tool. The studied prime mover consists of the oil piping, thermal storage tank, heat collector, turbine for power generator, and condenser. The implemented system comprises of the R134A refrigerant storage tank, condenser coil, and evaporator coil. In the proposed analogy, the thermal storage tank and heat collector are represented by the refrigerant storage tank and the evaporator coil, respectively, while the condenser is described by the condenser coil, and the turbine for power generator is posed as the pressure difference between the evaporator coil and condenser coil. The correctness of the proposed analogy can be verified by experimental results.

**Keywords :** Thermodynamic, Refrigerant, Heat Transfer, Analogy, Prime Mover, Solar

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ประภาช อุคคกิมมา พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และรศ.ดร.อัมพวัน จุลเสวีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้ความอนุเคราะห์ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่ คอยให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้งวิธีแก้ไขปัญหาอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการจัดทำ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ให้การสนับสนุน ตลอดจนคอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจคณะผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จลุล่วงสุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้การจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำ ซึ่งไม่สามารถกล่าวชานามได้หมดในที่นี้ รวมถึงเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 สมบัติของสารบริสุทธิ์.....	5
2.2.1 สถานะของสารบริสุทธิ์.....	5
2.2.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์.....	6
2.2.3 อุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัว.....	8
2.2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะ.....	9
2.3 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์.....	14
2.3.1 สมดุลพลังงาน.....	14
2.3.2 พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ.....	15
2.3.3 การถ่ายโอนพลังงาน.....	17
2.3.4 ทิศทางเครื่องหมายและตัวอย่างของการถ่ายโอนความร้อน.....	18
2.4 การอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิด.....	18
2.4.1 ความร้อนจำเพาะ.....	18
2.4.2 เอนทัลปี.....	19

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของแก๊สอุดมคติ.....	20
2.4.4 พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของของแข็งและของเหลว .	20
2.5 สารทำความเย็น.....	23
2.5.1 ประเภทสารทำความเย็น.....	24
2.5.2 สารทำความเย็น R134a.....	26
2.6 SOLIDWORKS .....	27
2.6.1 ประสิทธิภาพการทำงาน.....	28
2.6.2 ลักษณะการทำงาน.....	28
<b>บทที่ 3 การสร้างระบบเทียบเคียงที่นำเสนอ .....</b>	<b>29</b>
3.1 กล่าวนำ .....	29
3.2 การออกแบบ.....	29
3.2.1 การเลือกใช้ของเหลว.....	29
3.2.2 การเลือกใช้ขนาดและความยาวท่อ.....	30
3.2.3 การเลือกเกจวัดความดัน .....	32
3.3 การวางตำแหน่งอุปกรณ์และการทำงานของระบบเทียบเคียง.....	33
3.3.1 การวางตำแหน่งอุปกรณ์.....	33
3.3.2 การทำงานของระบบเทียบเคียง .....	34
3.4 ขั้นตอนของการสร้างระบบเทียบเคียงใน SOLIDWORKS และการติดตั้งอุปกรณ์จริง	34
3.4.1 การสร้างระบบเทียบเคียงใน SOLIDWORKS .....	34
3.4.2 การติดตั้งอุปกรณ์จริง.....	36
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....</b>	<b>37</b>
4.1 กล่าวนำ .....	37
4.2 การตรวจสอบระบบที่สร้างขึ้น.....	37
4.2.1 การเตรียมระบบให้อยู่ในสถานะสุญญากาศ .....	37
4.2.2 การเติมสารทำความเย็น.....	38
4.2.3 การทดสอบของเหลวในระบบ .....	38
4.2.4 ตรวจสอบการไหลของสารในระบบ .....	39

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดลอง.....	39
4.3.1 ผลการคำนวณจากการออกแบบ.....	39
4.3.2 ผลที่ได้จากการทดลอง.....	41
4.3.3 ผลการคำนวณจากผลการทดลอง.....	43
<b>บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป.....</b>	<b>46</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	46
5.2 ปัญหาและวิธีแก้ปัญหา.....	48
5.2.1 ปัญหาที่พบ.....	48
5.2.2 วิธีการแก้ปัญหา.....	48
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	49
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>50</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>52</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว.....	21
2.2 ข้อมูลค่าความร้อนจำเพาะของของแข็ง.....	22
2.3 สมบัติของสารทำความเย็นแต่ละชนิด .....	25
2.4 ความแตกต่างของแรงดันระหว่างน้ำยา R12 กับ R134a.....	27
3.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ น้ำ น้ำมันเบนซิน และ R134a.....	29
3.2 คุณสมบัติของสารทำความเย็น 134a ที่อุณหภูมิ.....	31
4.1 เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R134a.....	40
4.2 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส.....	41
4.3 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลว.....	42
4.4 ความดันขณะทำการทดลอง.....	42

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	โครงสร้างการผลิตไฟฟ้าจากระบบรางพาราโบลา ..... 1
1.2	ระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ ..... 2
1.3	การเปรียบเทียบอุปกรณ์ระหว่างระบบเทียบเคียงและระบบรางพาราโบลา ..... 3
2.1	ลักษณะระดับโมเลกุลของสารในสถานะต่าง ๆ ..... 5
2.2	แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะสำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัวกับอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ ..... 8
2.4	สารที่มีสถานะเป็นของผสมอิ่มตัว ..... 9
2.5	แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ ..... 10
2.6	แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์ ..... 10
2.7	แผนภาพความดัน-ปริมาตรจำเพาะของสารบริสุทธิ์ ..... 11
2.8	แผนภาพความดัน-อุณหภูมิแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์ ..... 12
2.9	แสดงพื้นผิวความดัน-ปริมาตรจำเพาะ-อุณหภูมิ สำหรับสารหัดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ..... 13
2.10	แสดงพื้นผิวความดัน-ปริมาตรจำเพาะ-อุณหภูมิ สำหรับสารที่ขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ..... 13
2.11	พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดได้ ..... 15
2.12	กระบวนการแอเรียเบติก ..... 16
2.13	การระบุดังในหารถ่ายโอนความร้อนและงาน ..... 18
2.14	กระบวนการคายความร้อน ..... 19
2.15	กระบวนการดูดความร้อน ..... 19
2.16	ปริมาตรจำเพาะของสารที่อัดตัวไม่ได้ค่าคงที่ ..... 23
2.17	หน้าต่างโปรแกรม SOLIDWORKS ..... 28
3.1	เครื่องวัดความดันแบบ Bourdon gauge ..... 33
3.2	Diagram ของระบบเทียบเคียงเครื่องต้นกำลังพลังงาน ..... 34
3.3	ระบบเทียบเคียงแบบ 3 มิติ ของเครื่องต้นกำลังพลังงาน ..... 35
3.4	ด้านหน้าของระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงาน ..... 35
3.5	ระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงาน ..... 36
4.1	การแวกคัมระบบ ..... 38
4.2	ตำแหน่งที่ต้องเปิด-ปิดวาล์วในการทดสอบการไหลของสาร ..... 39
5.1	คุณสมบัติต่าง ๆ ของ Dimensions V1 ..... 46

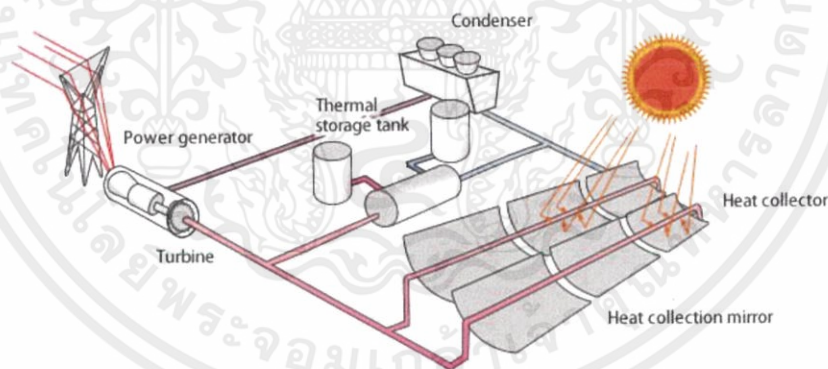
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันพลังงานถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อหลาย ๆ อย่าง ทั้งการดำรงชีวิต การประกอบอาชีพ การผลิตวัตถุดิบ หรือแม้แต่เป็นต้นทุนในการผลิต การขนส่ง และการบริการ การเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการของพลังงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พลังงานนั้นมีจำกัดและขาดแคลน รวมถึงสถานการณ์ด้านพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี เนื่องจากการใช้พลังงานในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันมีสาเหตุมาจากมนุษย์แทบทั้งสิ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของพลังงานทางเลือกต่าง ๆ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทน พลังงานทางเลือก หรือพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง ปราศจากมลพิษ อีกทั้งเกิดใหม่ได้ไม่สิ้นสุด และยังเป็นต้นกำเนิดของพลังงานอื่น ๆ อีกด้วย จากที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ นั้นทำให้สนใจหนึ่งในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์คือ กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ระบบรางพาราโบลา

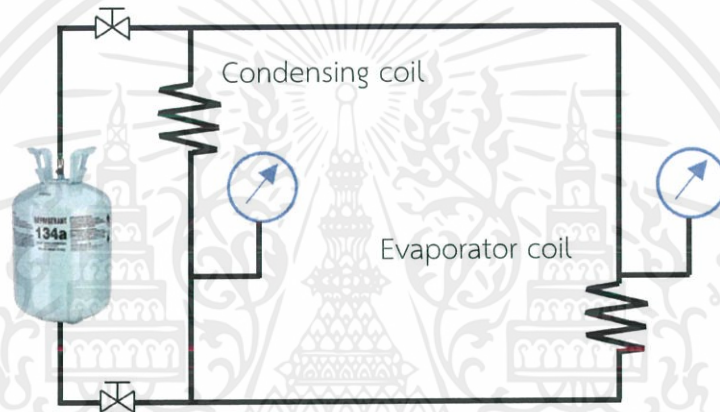


ภาพที่ 1.1 โครงสร้างการผลิตไฟฟ้าจากระบบรางพาราโบลา [1]

จากภาพที่ 1.1 [1] การผลิตไฟฟ้าจากระบบรางพาราโบลามีหลักการทำงานคือ มีส่วนรับรังสีดวงอาทิตย์ (Heat Collector) ซึ่งทำงานโดยใช้หลักการรวมรังสีดวงอาทิตย์ด้วยการสะท้อนจากผิวโค้งรูปพาราโบลาที่เป็นรางยาว โดยส่วนรับรังสีประกอบด้วยส่วนสะท้อนรังสี (Reflector) และท่อรับรังสี (Receiver) ซึ่งท่อรับรังสีเป็นท่อโลหะอยู่ภายในท่อแก้ว โดยช่องว่างระหว่างท่อเป็นสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ภายในมีของเหลวประเภทน้ำมันจุดเดือดสูงไหลในท่อโลหะเพื่อพา

ความร้อนไปถ่ายเทให้กับหม้อไอน้ำ สำหรับผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนเครื่องยนต์กังหัน โดยงานเพลลาที่ได้จากเครื่องยนต์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป

กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากระบบรางพาราโบลา ที่ใช้หลักการในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล ซึ่งของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลาง คือ น้ำมันที่มีจุดเดือดสูง ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นและต้องการศึกษาระบบนี้ โดยการเปลี่ยนของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลาง จากน้ำมันเป็นสารทำความเย็นชนิด R134a ซึ่งสารทำความเย็นชนิดนี้มีคุณสมบัติ ไม่เป็นพิษต่อชั้นบรรยากาศ ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่ติดไฟ และที่สำคัญอย่างยิ่งมีจุดเดือดที่ต่ำ เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำมีข้อจำกัดหลาย ๆ อย่างที่ทำให้ไม่สามารถสร้างระบบจริงได้ จึงจัดทำเพียงแค่ระบบเทียบเคียงใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคตต่อไป ระบบเทียบเคียงแสดงดังภาพที่ 1.2

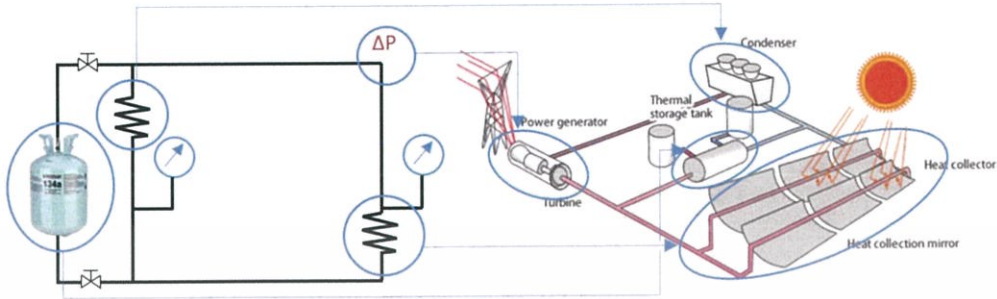


ภาพที่ 1.2 ระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

ระบบเทียบเคียงนี้ใช้หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อนตามกฎเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือ เมื่อให้ความร้อนกับท่อบรรจุสารทำความเย็น R134a ทางฝั่งของ Evaporator coil ความร้อนจะถูกถ่ายเทเข้าสู่สารทำความเย็นชนิด R134a ที่บรรจุอยู่ในท่อทองแดง ซึ่งเมื่อสารทำความเย็น R134a ถูกให้ความร้อนถึงจุดหนึ่งเกิดการขยายตัว และเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอแรงดันสูง ทำให้เกิดแรงดันแตกต่างระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil ซึ่งแรงดันแตกต่างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรในอนาคตต่อไป และเมื่อสารผ่านมาเข้ามาทาง Condensing coil ซึ่งเป็นส่วนดึงพลังงานความร้อนออกจากระบบ ไอนั้นจะถูกเปลี่ยนสถานะกลับไปอยู่ในสถานะของเหลวหมุนเวียนในระบบเช่นนี้ต่อไป

เมื่อนำระบบเทียบเคียงที่ทำการออกแบบนั้นเปรียบเทียบกับระบบจริงแสดงได้ดังภาพที่ 1.3 กล่าวคือถึงเก็บสารทำความเย็น และท่อขดระบายความร้อน แสดงแทนถึงสะสมอุณหภูมิ และส่วนตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ตามลำดับ ในขณะที่ท่อขดระบายความร้อนแสดงแทนคอนเดนเซอร์ และ

ความดันแตกต่างกันระหว่างท่อระบายความร้อน และท่อดูดดูดซับความร้อน แสดงแทนเครื่องกักกันไอน้ำ ความถูกต้องของการเปรียบเทียบที่นำเสนอสามารถตรวจสอบได้จากผลการทดลอง



ภาพที่ 1.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ระหว่างระบบเทียบเคียงและระบบโรงพาราโบล่า

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

เพื่อนำเสนอการออกแบบและการสร้างระบบเทียบเคียงด้วยการไหลเวียนของสารทำความเย็นในระบบท่อทองแดง เพื่อใช้เป็นสื่อการสอนประกอบการทำความเข้าใจเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า โดยระบบที่นำเสนอและเป็นต้นแบบของการเทียบเคียงนั้นคือ เครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ระบบโรงพาราโบล่า ซึ่งเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาประกอบด้วยท่อส่งน้ำมัน ถังเก็บสะสมความร้อน ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ เครื่องกักกันไอน้ำ และคอนเดนเซอร์ ส่วนระบบเทียบเคียงที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย ถังเก็บสารทำความเย็น R134a ท่อดูดดูดซับความร้อน และท่อระบายความร้อน เพื่อใช้ระบบเทียบเคียงที่สร้างขึ้นเป็นสื่อกลางในการทำความเข้าใจระบบของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. นำเสนอหัวข้อปริญญาโท
2. ศึกษาทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ การเปลี่ยนสถานะของสาร และคุณสมบัติของสารทำความเย็นชนิดต่าง ๆ
3. ออกแบบ ขนาด และความยาวของท่อทองแดง และอุปกรณ์ต่าง ๆ

4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม SOLIDWORK เพื่อใช้ในการออกแบบภาพรวมทั้งหมดของระบบเทียบเคียง

5. สร้างชิ้นงานและอุปกรณ์แต่ละชิ้นในโปรแกรม SOLIDWORK จัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ

6. หาข้อมูลและจัดหาอุปกรณ์

7. สร้างและประกอบระบบเทียบเคียงตามแบบที่ได้วางไว้ในโปรแกรม SOLIDWORK

8. ทดสอบจุดรั่วของระบบ แก๊สจุดที่ผิดปกติ ดำเนินการทดสอบระบบ และบันทึกผลการทดลอง

9. จัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์

10. นำเสนอผลงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถใช้เป็นสื่อการสอน สำหรับทำความเข้าใจกระบวนการของเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์

- สามารถนำระบบเทียบเคียงที่สร้าง ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 กล่าวนำ

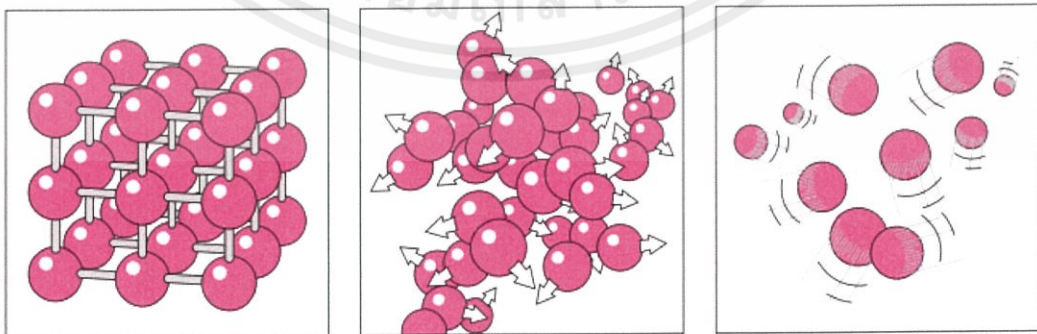
ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษา และออกแบบระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงาน โดยเริ่มจากสมบัติของสารบริสุทธิ์ จากนั้นจะอธิบายกฎข้อต่าง ๆ ของเทอร์โมไดนามิกส์ การอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิด คุณสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R134a รวมไปถึงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสร้างระบบเทียบเคียงโครงสร้างของระบบเทียบเคียง

### 2.2 สมบัติของสารบริสุทธิ์ [2]-[5]

สารบริสุทธิ์ (Pure Substances) คือ สารที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ เช่น น้ำ ( $H_2O$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ออกซิเจน ( $O_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นต้น ในกรณีที่มีสารบริสุทธิ์ชนิดเดียวกันแต่มีสถานะต่างกันรวมอยู่ในระบบเดียวกัน โดยทั่วไปสามารถพิจารณาว่าสารในระบบดังกล่าวยังคงเป็นสารบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น น้ำแข็งรวมอยู่กับน้ำเหลวและไอน้ำ จะถือว่าเป็นส่วนผสมของน้ำทั้ง 3 สถานะเป็นสารบริสุทธิ์ เพราะไม่ว่าน้ำจะอยู่ในสถานะใดก็ตามจะยังคงมีองค์ประกอบเป็น  $H_2O$  เหมือนกัน อย่างไรก็ตามบางกรณีเป็นข้อยกเว้น เช่น อากาศเหลวจะมีสัดส่วนของไนโตรเจนต่อออกซิเจนสูงต่างจากอากาศที่มีสถานะเป็นแก๊ส ดังนั้น เมื่ออากาศในสถานะแก๊สรวมอยู่กับของเหลว จะไม่ถือเป็นสารบริสุทธิ์

#### 2.2.1 สถานะของสารบริสุทธิ์

สถานะของสารบริสุทธิ์สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ ของแข็ง ของเหลว และไอ โดยสารในแต่ละสถานะมีลักษณะดังนี้



(ก) solid

(ข) liquid

(ค) vapor

ภาพที่ 2.1 ลักษณะระดับโมเลกุลของสารในสถานะต่าง ๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1 ของแข็ง (Solid)

ของแข็งเป็นสถานะที่สารมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงสุด จากภาพที่ 2.1 (ก) โมเลกุลของสารที่เป็นของแข็งจะมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบที่แน่นอน โดยโมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่แต่จะมีการสั่นอยู่ในขอบเขตที่แน่นอน ความเร็วในการสั่นของโมเลกุลจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของของแข็งสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นในระดับหนึ่งจะทำให้โมเลกุลของของแข็งเกิดการแยกออกจากกัน ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการหลอมเหลว (Melting process) คือ การเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว

### 2 ของเหลว (Liquid)

ของเหลวเป็นสถานะที่สารมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยรองจากของแข็ง จากภาพที่ 2.1 (ข) โมเลกุลของของเหลวมีตำแหน่งที่ไม่แน่นอนเนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ซึ่งสมบัติดังกล่าวทำให้รูปร่างของของเหลวเปลี่ยนไปตามรูปร่างของภาชนะที่บรรจุ สำหรับระยะห่างระหว่างโมเลกุลในของเหลว ส่วนใหญ่จะมากกว่าระยะห่างระหว่างโมเลกุลในของแข็งของสารชนิดเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าสารพวกนี้จะเกิดการขยายตัวคือ มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการหลอมเหลวเป็นของเหลว แต่สารบางชนิด เช่น น้ำ จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกรณีข้างต้น คือ ระยะห่างระหว่างโมเลกุลในน้ำแข็งจะมากกว่าระยะห่างระหว่างโมเลกุลในน้ำ ทำให้น้ำเกิดการหดตัวคือมีปริมาตรลดลงเมื่อเกิดการหลอมเหลวเป็นของเหลว ซึ่งนี่เป็นสาเหตุทำให้น้ำแข็งลอยน้ำได้

### 3 ไอ (Vapor)

จากภาพที่ 2.1 (ค) ไอเป็นสถานะที่สารมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยที่สุด และมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากที่สุด และแต่ละโมเลกุลมีการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของไอเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรภาชนะที่บรรจุ โมเลกุลของสารในสถานะที่เป็นไอจะมีพลังงานสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารในสถานะที่เป็นของแข็งกับของเหลว ดังนั้น ไอจะปล่อยพลังงานออกมาเป็นปริมาณมากในระหว่างกระบวนการกลั่นตัว (Condensing process) เป็นของเหลว หรือเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง

#### 2.2.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์

ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวกับไอ ในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีของน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งสารบริสุทธิ์ทั้งหมดโดยทั่วไปก็จะมีพฤติกรรมแบบเดียวกันเป็นขั้นตอนดังนี้

1. กระบอกสูบบรรจุน้ำที่ 20°C ความดัน 1 atm ที่สภาวะนี้ น้ำอยู่ในเฟสของเหลว เรียกว่าของเหลวอัดตัว (Compressed liquid) หรือ ของเหลวเย็นเยือก (Subcooled liquid) มีความหมายว่าไม่อยู่ในสภาวะที่จะกลายเป็นไอ เมื่อให้ความร้อนต่อไป น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และปริมาตรจำเพาะ

เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ลูกสูบเคลื่อนตัวขึ้นด้านบนอย่างช้า ๆ ความดันภายในกระบอกสูบมีค่าคงที่ เนื่องจากความดันบรรยากาศภายนอก และน้ำหนักของลูกสูบมีค่าคงที่

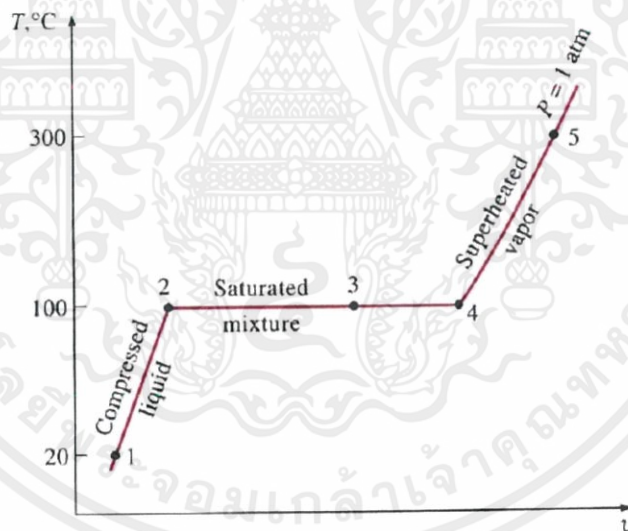
2. เมื่อให้ความร้อนต่อไป อุณหภูมิน้ำจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง  $100^{\circ}\text{C}$  น้ำยังคงเป็นของเหลว แต่ถ้าได้รับความร้อนเพิ่ม น้ำบางส่วนจะกลายเป็นไอ ของเหลวที่พร้อมจะกลายเป็นไอ เรียกว่า ของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid)

3. เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้น บางส่วนของของเหลวจะกลายเป็นไอ เรียกว่าเกิดการเดือด โดยอุณหภูมิจะคงที่กระทั่งของเหลวทั้งหมดกลายเป็นไอ ระหว่างกระบวนการเปลี่ยนเฟส อุณหภูมิจะคงที่ถ้าความดันคงที่

4. ของเหลวทั้งหมดกลายเป็นไอ ถ้าไอเกิดสูญเสียความร้อน ไอบางส่วนจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว ไอที่เกือบจะควบแน่นนี้ เรียกว่า ไออิ่มตัว (Saturated vapor)

5. เมื่อไออิ่มตัวได้รับความร้อนเพิ่ม อุณหภูมิของไอจะเริ่มเพิ่มขึ้น ไอที่จะไม่ควบแน่นนี้เรียกว่า ไอร้อนยิ่งยวด (Superheated vapor)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะที่มีความดันคงที่แสดงได้ด้วยแผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ (T-v diagram) ดังภาพที่ 2.2

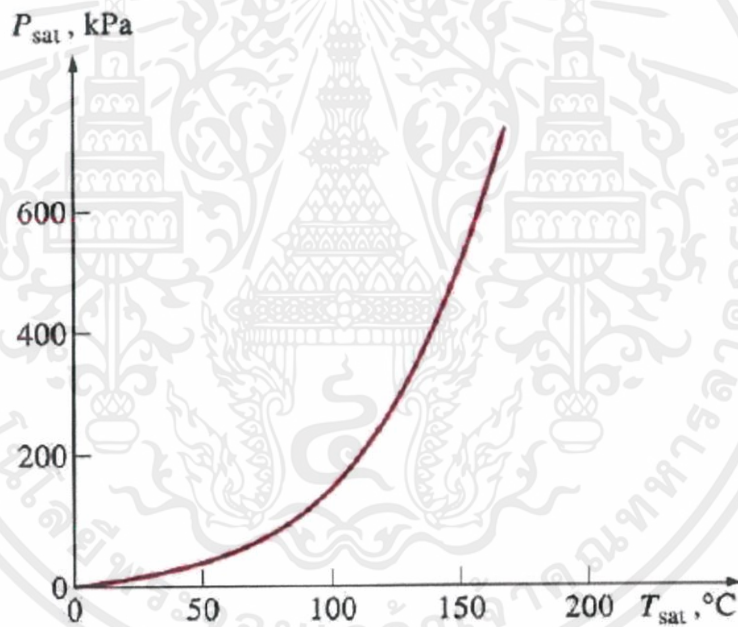


ภาพที่ 2.2 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะสำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ [5]

### 2.2.3 อุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัว

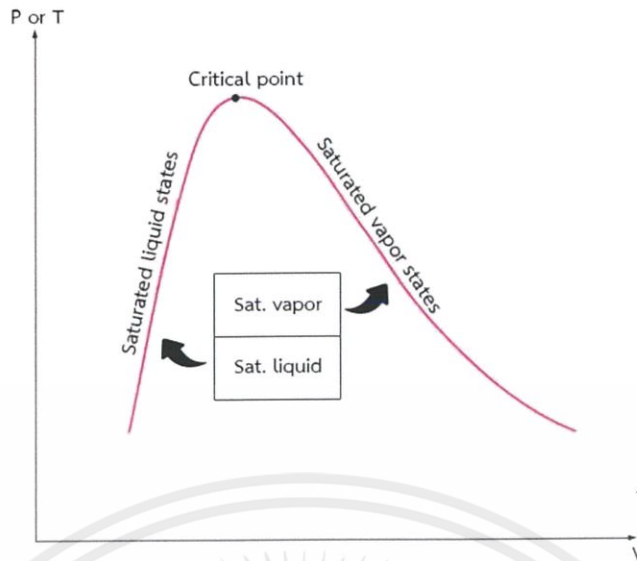
อุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation Temperature,  $T_{sat}$ ) คือ อุณหภูมิที่สารเกิดการระเหยเป็นไอ ภายใต้ความดันที่กำหนด ในทำนองเดียวกันความหมายของความดันอิ่มตัว (Saturation pressure,  $P_{sat}$ ) คือ ความดันที่สารเกิดการระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิที่กำหนด ตัวอย่างเช่น น้ำที่อยู่ภายใต้ความดัน 1 atm มีอุณหภูมิอิ่มตัวที่  $100^{\circ}\text{C}$  มีความดันอิ่มตัวที่ 1 atm

อุณหภูมิอิ่มตัวของสารบริสุทธิ์ขึ้นกับความดัน เนื่องจากการระเหยคือการที่โมเลกุลสามารถลอยหลุดจากผิวของเหลวได้ ดังนั้น ถ้าสารบริสุทธิ์อยู่ภายใต้ความดันที่สูงขึ้น สภาวะที่มีแรงกดดันมากขึ้น สารย่อมต้องการพลังงานที่จะใช้ในการเอาชนะแรงดัน เพื่อให้สามารถลอยหลุดจากผิวของของเหลวมากขึ้น นั่นคือถ้าความดันเหนือสารบริสุทธิ์สูงขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิอิ่มตัว หรืออุณหภูมิที่จะเกิดการระเหยสูงขึ้นด้วยดังตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัว และอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่แสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิ่มตัวกับอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ [5]

สารที่มีสถานะเป็นของผสมของเหลว-ไออิ่มตัว (Saturated Liquid-Vapor Mixture or Saturated Mixture) นั้นในระหว่างกระบวนการระเหย ภายในระบบจะประกอบด้วยสารทำงานใน 2 สถานะ คือ ของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว ซึ่งสารทำงานในลักษณะดังกล่าวเรียกว่าของผสมของเหลว-ไออิ่มตัว หรือของผสมอิ่มตัว จากภาพที่ 2.4 แผนภาพบริเวณที่แสดงสถานะของของผสมอิ่มตัวได้แก่ บริเวณภายในโดม (dome) หรือบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นของเหลวอิ่มตัวและเส้นไออิ่มตัว



ภาพที่ 2.4 สารที่มีสถานะเป็นของผสมอิมิตัว [5]

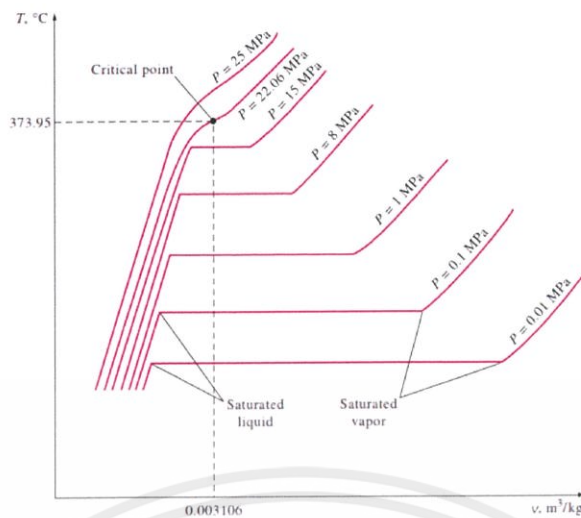
## 2.2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะ

แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ช่วยให้สามารถทำความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์ได้ง่ายขึ้น แผนภาพที่จะกล่าวในหัวข้อนี้มี 3 ภาพแบบคือ แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ (T-v diagram) แผนภาพความดัน-ปริมาตรจำเพาะ (P-v diagram) และแผนภาพอุณหภูมิ-ความดัน (T-P diagram)

### 1 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ (T-v diagram)

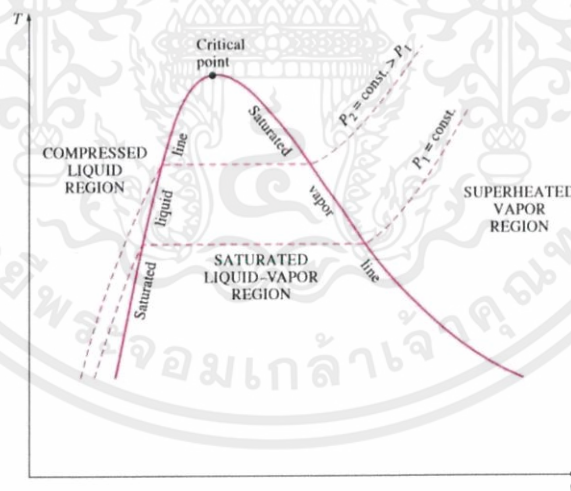
จากแผนภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของเส้นทางกระบวนการ (Process path) ของการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ความดันอื่น ๆ จะมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ความดันที่ 1 atm เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ความดันสูงขึ้น นอกจากจะพบว่าอุณหภูมิอิมิตัวจะมีค่าสูงขึ้นแล้วยังพบว่าค่าปริมาตรจำเพาะของของเหลวอิมิตัวมากขึ้นในขณะที่ปริมาตรจำเพาะของไออิมิตัวน้อยลง

ดังนั้นเมื่อความดันยิ่งสูงขึ้นจะทำให้เส้นทางของกระบวนการที่เชื่อมระหว่างจุดของของเหลวอิมิตัวกับไออิมิตัวยิ่งสั้นลง และมีลักษณะเป็นจุด เมื่อความดันสูงขึ้นเป็น 22.09 kPa ซึ่งจุดดังกล่าวเรียกว่าเป็น จุดวิกฤต (Critical Point, *CP*) โดยที่จุดวิกฤตนี้สารที่มีสถานะเป็นของเหลวอิมิตัวและไออิมิตัวจะมีสมบัติเหมือนกัน สำหรับสารต่างชนิดกันจะมีสภาวะที่จุดวิกฤตแตกต่างกันออกไป โดยข้อมูลสภาวะวิกฤตคือ อุณหภูมิวิกฤต ความดันวิกฤต และปริมาตรจำเพาะวิกฤตของสารต่าง ๆ



ภาพที่ 2.5 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ [5]

สำหรับการให้ความร้อนแก่สารที่ความดันเหนือความดันวิกฤตขึ้นไป จะไม่พบการเปลี่ยนสถานะโดยจะสังเกตเห็นได้แต่เพียงว่าปริมาตรจำเพาะของสารจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตลอดกระบวนการ สารจะมีเพียงสถานะเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าสารนั้นเป็นของเหลวหรือไอ โดยทั่วไปจะเรียกสารที่มีความดันสูงกว่าความดันวิกฤตว่าเป็นของไหล



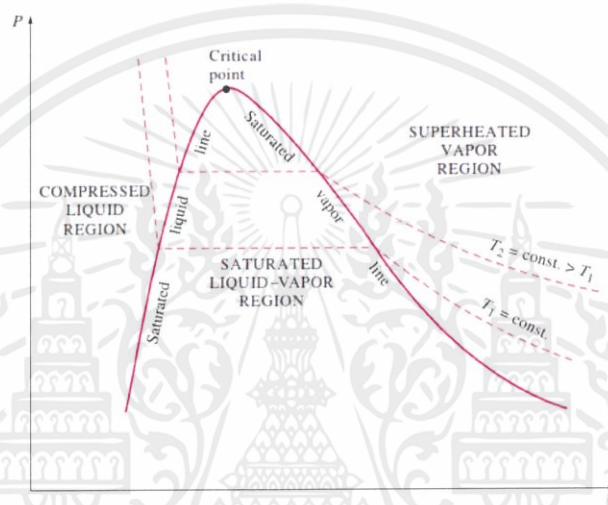
ภาพที่ 2.6 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์ [5]

เมื่อเชื่อมสภาวะของของเหลวอิ่มตัวที่ระดับความดันต่าง ๆ เข้าด้วยกันจะได้เส้น ซึ่งเรียกว่าเส้นของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid line) เช่นเดียวกันเมื่อเชื่อมสภาวะของไออิ่มตัวที่ระดับความดันต่าง ๆ เข้าด้วยกันจะเกิดเป็นเส้นไออิ่มตัว โดยเส้นของสารอิ่มตัวทั้งสองจะมาบรรจบกันที่จุดวิกฤต ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ด้านซ้ายของเส้นของเหลวอิ่มตัวเป็นบริเวณที่แสดงสภาวะของสารที่มีสถานะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สทวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นของเหลวอัด (Compressed liquid region) ด้านขวาของเส้นไออิมตัวเป็นบริเวณของไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated vapor region) ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในโดม (dome) เป็นบริเวณของของผสมของเหลว-ไออิมตัว (Saturated liquid vapor mixture region)

## 2 แผนภาพความดัน-ปริมาตรจำเพาะ (P-v Diagram)

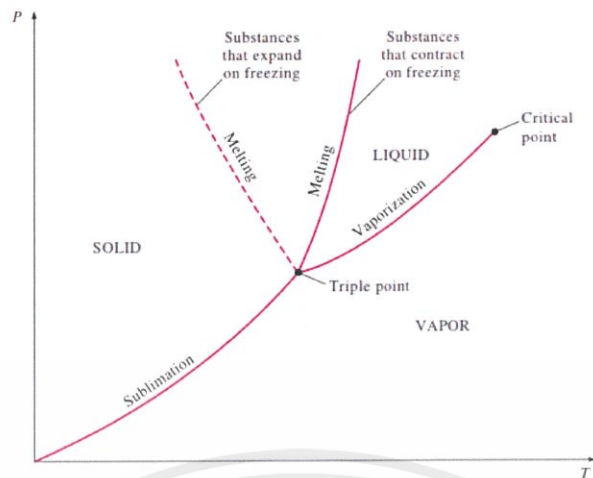
โดยทั่วไปแล้วแผนภาพ P-v ของสารบริสุทธิ์จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแผนภาพ T-v แต่เส้นอุณหภูมิคงที่บนแผนภาพจะมีแนวโน้มลาดลงดังภาพที่ 2.7 เส้นของเหลวอิมตัวและไออิมตัวจะบรรจบกันที่จุดวิกฤติเช่นเดียวกับแผนภาพ T-v



ภาพที่ 2.7 แผนภาพความดัน-ปริมาตรจำเพาะของสารบริสุทธิ์ [5]

## 3 แผนภาพความดัน-อุณหภูมิ (P-T diagram)

เนื่องจากสถานะทั้งสามของสารบริสุทธิ์ได้แยกออกจากกันอย่างเด่นชัดโดยเส้นสามเส้นคือเส้นการระเหิด (Sublimation line) จะแยกสถานะของแข็งกับบริเวณที่มีสถานะเป็นไอเส้นการหลอมเหลว (Melting หรือ Fusion line) จะแยกบริเวณของเหลวกับของแข็ง และเส้นการระเหย (Vaporization line) แยกบริเวณของเหลวกับไอ จุดที่เส้นทั้งสามบรรจบกันเรียกว่าจุดสามสถานะ (Triple point) ที่จุดนี้สถานะทั้งสามของสารบริสุทธิ์จะสมดุลซึ่งกันและกันเส้นการระเหยจะไปสิ้นสุดที่จุดวิกฤติ จากภาพที่ 2.8 แสดงแผนภาพ P-T ของสารบริสุทธิ์ แผนภาพนี้บางครั้งเรียกว่าแผนภาพสถานะ (Phase diagram)

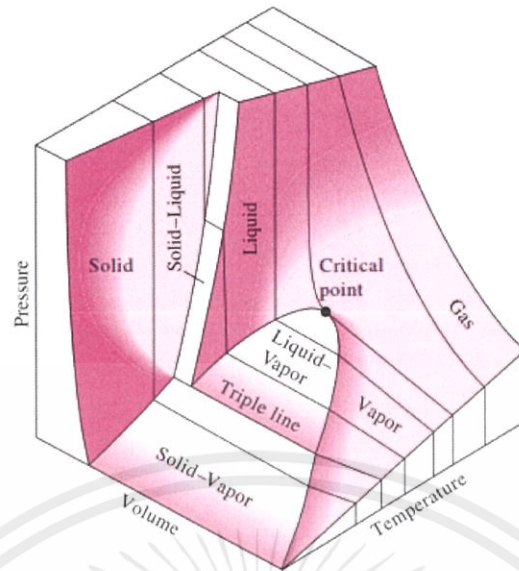


ภาพที่ 2.8 แผนภาพความดัน-อุณหภูมิแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารบริสุทธิ์ [5]

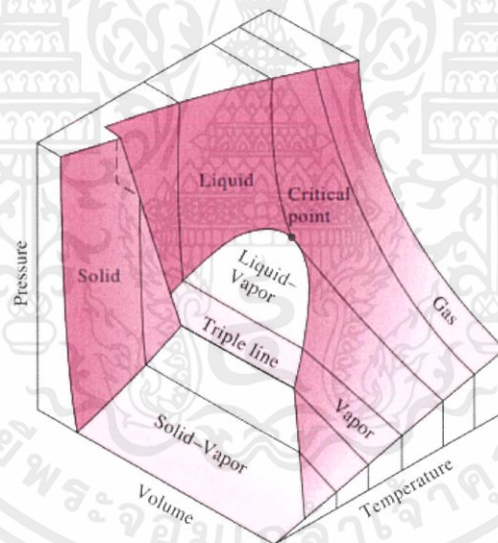
#### 4 แผนภาพพื้นผิวทางอุณหพลศาสตร์ของความดัน-ปริมาตรจำเพาะ-อุณหภูมิ (The P-v-T Surface)

พื้นผิว P-v-T ประกอบขึ้นจากแผนภาพ P-T และ P-v ที่พล็อตบนพิกัดที่ตั้งฉากกันพื้นผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ แบบแรกคือพื้นผิวโค้งเป็นส่วนที่แสดงบริเวณที่มีสถานะเดียวได้แก่ บริเวณที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือไอ อีกแบบหนึ่งคือพื้นผิวที่ประกอบด้วยเส้นตรงที่ขนานกับแกนปริมาตรจำเพาะเป็นส่วนที่แสดงบริเวณที่มี 2 สถานะ ได้แก่ บริเวณของแข็ง-ไอ บริเวณของแข็ง-ของเหลว และบริเวณของเหลว-ไอ

แผนภาพพื้นผิว P-v-T มี 2 แบบ โดยแบ่งได้จากความแตกต่างในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเกิดกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งคือภาพที่ 2.9 เป็นพื้นผิวสำหรับสารที่มีการหดตัวเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และภาพที่ 2.10 เป็นพื้นผิวสำหรับสารที่มีการขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง



ภาพที่ 2.9 แสดงพื้นผิวความดัน-ปริมาตรจำเพาะ-อุณหภูมิ สำหรับสารหดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ [5]



ภาพที่ 2.10 แสดงพื้นผิวความดัน-ปริมาตรจำเพาะ-อุณหภูมิ สำหรับสารที่ขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The first law of Thermodynamics) [6]-[8]

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy principle) คือความสัมพันธ์ของพลังงานในรูปของความร้อน ( $Q$ ), งาน ( $W$ ), และพลังงานรวม ( $E$ ) หลักการว่า “พลังงานไม่สามารถถูกสร้างให้เพิ่มขึ้น หรือทำลายให้ลดลงไปได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้” ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมแล้วจะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้น ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานสิ่งแวดล้อมสูญเสีย เป็นต้น

### 2.3.1 สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

ระบบปิด (Closed system) หมายถึง ระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวล แต่อาจจะมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ระบบเปิด (Open system) หมายถึง ระบบที่มีการถ่ายเทมวล และพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม การสังเกตว่าเป็นระบบปิด หรือระบบเปิด ดูได้จากมีการถ่ายเทมวลเข้าออกจากระบบหรือไม่ ณ เวลาในการคิดสมดุลพลังงาน

การคิดสมดุลพลังงานของระบบปิด ณ เวลาที่ 1 ถึง เวลาที่ 2 เนื่องจากพลังงานไม่สามารถสร้างขึ้น และไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้นจากสมการ Generation term และ Consumption term จึงตัดทิ้ง สมการสมดุลพลังงาน ดังสมการที่ (2.1)

[พลังงานที่เข้าสู่ระบบ] - [พลังงานที่ออกจากระบบ] = [พลังงานรวมในระบบที่เปลี่ยนแปลง]

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (2.1)$$

สมดุลพลังงานในรูปอัตราการถ่ายโอนและอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt \quad (2.2)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ ( $\Delta E_{system}$ ) ในกระบวนการใด ๆ หาได้โดยการหาผลต่างของพลังงานที่สภาวะสุดท้าย (Final state) เทียบกับสภาวะเริ่มต้น (Initial state) นั่นคือ

[พลังงานที่เปลี่ยนแปลง] = [พลังงานที่สภาวะสุดท้าย] - [พลังงานที่สภาวะเริ่มต้น]

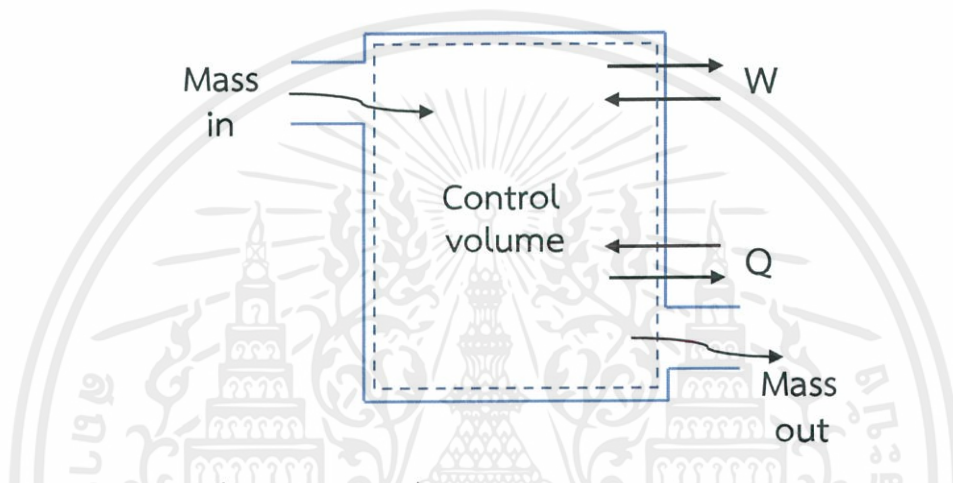
$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{initial} \quad (2.3)$$

ระบบปิดส่วนใหญ่เป็นระบบที่อยู่นิ่ง (Stationary system) ซึ่งกรณีเช่นนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวม ( $\Delta E$ ) ของระบบจึงเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน ( $\Delta U$ )

$$\Delta E = \Delta U \quad (2.4)$$

### 2.3.2 พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ

พลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดได้มี 2 รูปแบบคือ ความร้อน (Heat,  $Q$ ) และงาน (Work,  $W$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



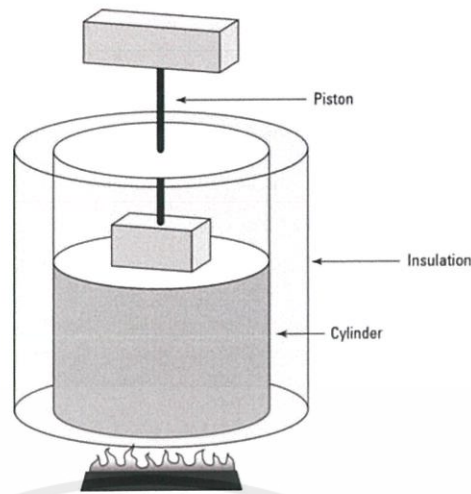
ภาพที่ 2.11 พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดได้ [6]

#### 1 พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบโดยความร้อน

ความร้อน คือ พลังงานที่ถ่ายโอนผ่านระหว่างสองระบบ หรือระบบกับสิ่งแวดล้อมเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ “ความร้อน” เป็นเทอมที่ใช้เฉพาะในขณะทีพลังงานเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตของระบบเท่านั้น เมื่อพลังงานนี้เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของอีกระบบหนึ่ง หรือสิ่งแวดล้อมแล้วพลังงานนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานภายใน ( $U$ )

กระบวนการที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนผ่านขอบเขตของระบบเรียกว่า กระบวนการแอดิแบติก (Adiabatic process) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 การเกิดกระบวนการเช่นนี้เป็นได้ 2 ลักษณะคือ มีการหุ้มฉนวน (Insulator) อย่างดี หรืออุณหภูมิของระบบเท่ากับสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.12 กระบวนการเอเรียเบติก [7]

หน่วยของความร้อนที่นิยมใช้ในระบบเอสไอคือ kJ สัญลักษณ์ความร้อนและความร้อนต่อหน่วยมวลคือ  $Q$  และ  $q$  ตามลำดับ

$$q = \frac{Q}{m} \quad (2.5)$$

การหาปริมาณการถ่ายโอนความร้อน ยังสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ( $\dot{Q}$ ) เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะได้

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (2.6)$$

เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนคงที่จะได้

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (2.7)$$

โดย  $\Delta t = t_2 - t_1$  คือ เวลาในการเกิดกระบวนการ

## 2 การถ่ายโอนพลังงานโดยงาน

งานเป็นพลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบได้เช่นเดียวกับความร้อน หน่วยของงานจะเหมือนกับหน่วยของพลังงานในรูปอื่น ๆ สัญลักษณ์ของงาน และงานต่อหน่วยมวลเป็น  $W$  และ  $w$  ตามลำดับ

### 2.3.3 การถ่ายโอนพลังงาน

การถ่ายโอนพลังงานความร้อนจะมี 3 แบบด้วยกัน คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยการนำความร้อน และพาความร้อนต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานความร้อน ส่วนในการแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องใช้ตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานความร้อน

#### 1 การนำความร้อน (Heat conduction)

ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

การนำความร้อนเป็นกระบวนการ ที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียงในแก๊ส การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุล หรือกล่าวคือ การนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรง จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ )

#### 2 การพาความร้อน (Heat convection)

การถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว หรือแก๊สโดยที่ของเหลว หรือแก๊สส่วนที่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนที่พาความร้อนไปด้วย โดยหลักการแล้วกล่าวได้ว่า การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากที่สารใดสารหนึ่ง ได้รับความร้อนแล้ว ความหนาแน่นของอนุภาคน้อยลงขยายตัวลอยตัวสูงขึ้น พร้อมทั้งพาความร้อนไปด้วย ขณะเดียวกันส่วนอื่นที่ยังไม่ได้รับความร้อนยังมีความหนาแน่นของอนุภาคมากกว่าจะเคลื่อนมาแทนที่เป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนสารนั้นได้รับความร้อนทั่วกัน เรียกว่า การพาความร้อน

#### 3 การแผ่รังสี (Radiation)

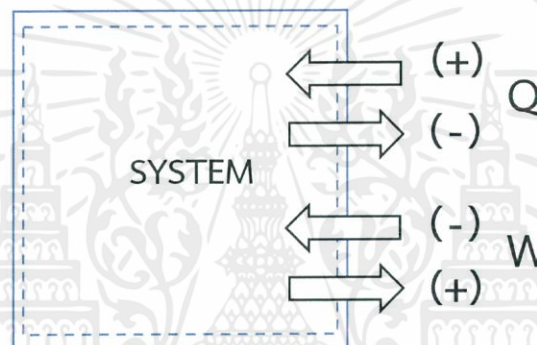
การถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน เช่น การนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า  $-270^{\circ}\text{C}$  หรือ  $0^{\circ}\text{K}$  ย่อมมีการแผ่รังสี วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว เช่น การตากปลาแห้ง ตากเสื้อผ้ากลางแจ้ง ทั้งนี้การแผ่รังสีคือ การถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางใด ๆ เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ถือเป็น

ความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัวแปร คือ

1. สีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้มดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีอ่อน
2. ผิววัตถุ วัตถุผิวขรุขระดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและขัดมัน

### 2.3.4 ทิศทางเครื่องหมายและตัวอย่างของการถ่ายโอนความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตของระบบได้ การพิจารณาพลังงานจะต้องระบุทั้งปริมาณ และทิศทางในการถ่ายโอนพลังงานสามารถทำได้โดยการกำหนดตัวห้อย “in” สำหรับการถ่ายโอนพลังงานเข้าสู่ระบบ และ “out” สำหรับการถ่ายโอนพลังงานออกจากระบบดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การระบุทิศทางในการถ่ายโอนความร้อนและงาน [6]

## 2.4 การอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิด [8]-[9]

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ หลักการอนุรักษ์พลังงาน หรือสมดุลพลังงานสำหรับระบบใด ๆ ในระหว่างกระบวนการใด ๆ

### 2.4.1 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะในทางเทอร์โมไดนามิกส์มี 2 แบบ คือ ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (Specific heat at constant volume,  $C_v$ ) คือ พลังงานที่ทำให้สารมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1^\circ\text{C}$  ตามกระบวนการปริมาตรคงที่ และความร้อน คือ ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (Specific heat at constant pressure,  $C_p$ ) คือ พลังงานที่ทำให้สารมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $1^\circ\text{C}$  ตามกระบวนการความดันคงที่ ความร้อนจำเพาะ  $C_p$  จะมีค่ามากกว่าความร้อนจำเพาะ  $C_v$  เสมอ เนื่องจากในกระบวนการความดันคงที่ จะต้องการพลังงานส่วนหนึ่งเพื่อทำให้ระบบเกิดการขยายตัว ในขณะที่กระบวนการปริมาตรคงที่ ไม่มีความต้องการพลังงานส่วนนี้

## 2.4.2 เอนทัลปี

เอนทัลปี (Enthalpy) คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการที่ความดันคงที่ ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $H$

$$H = E + PV \quad (2.8)$$

เมื่อทำการทดลองสิ่งที่วัดได้ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี และให้นิยามว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยา (Enthalpy of reaction,  $\Delta H$ ) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเอนทัลปีของสารผลิตภัณฑ์กับเอนทัลปีของสารตั้งต้น ดังสมการที่ (2.9)

$$\Delta H = H_{\text{สารผลิตภัณฑ์}} - H_{\text{สารตั้งต้น}} \quad (2.9)$$

ซึ่งถ้าค่า  $\Delta H$  น้อยกว่าศูนย์แสดงว่าเป็นกระบวนการคายความร้อน ในทางกลับกันถ้า  $\Delta H$  มากกว่าศูนย์แสดงว่าเป็นกระบวนการดูดความร้อน ดังภาพที่ 2.14 และภาพที่ 2.15 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.14 กระบวนการคายความร้อน [9]



ภาพที่ 2.15 กระบวนการดูดความร้อน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของแก๊สอุดมคติ

พลังงานภายในของอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ( $u = u(T)$ ) โดยไม่ขึ้นกับความดัน และปริมาตรจำเพาะจากนิยามของเอนทัลปี โดยที่สภาวะความดันต่ำแก๊สจริงจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ ดังนั้นความร้อนจำเพาะของแก๊สจริงเหล่านั้นสามารถถือได้ว่าเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว โดยความร้อนจำเพาะของแก๊สที่ความดันต่ำเรียกว่าความร้อนจำเพาะของแก๊สอุดมคติ

การหาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน และเอนทัลปีของแก๊สอุดมคติเป็นไปได้ 3 วิธีดังนี้

1. การใช้ข้อมูลซึ่งแสดงเป็นค่า  $u$  และ  $h$  ในตารางแสดงสมบัติของแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งจะเป็นวิธีที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด
2. ข้อมูล  $C_v$  หรือ  $C_p$  ในรูปที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เป็นวิธีที่สะดวกสำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และให้ผลที่แม่นยำพอสมควร
3. การคำนวณโดยใช้ข้อมูลความร้อนจำเพาะเฉลี่ย เป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก โดยจะให้ผลแม่นยำพอสมควรหากช่วงของอุณหภูมิไม่กว้างมากนักแต่หากช่วงอุณหภูมิไม่กว้างมากนักแต่หากช่วงอุณหภูมิกว้างมากค่าที่คำนวณได้อาจผิดพลาดมากเช่นกัน

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_v$  และ  $C_p$  ของแก๊สอุดมคติได้จากอนุพันธ์ของความสัมพันธ์  $C_v$  คือ  $dh = du + Rdt$  เมื่อแทนเทอม  $dh$  ด้วย  $c_p dT$  และแทน  $du$  ด้วย  $c_v dT$  แล้วหารสมการด้วย  $dT$  จะได้  $C_p = C_v + R$  (kJ/kg · K)

อัตราส่วนของ  $C_p$  ต่อ  $C_v$  เรียกว่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Specific heat ratio,  $k$ )

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.10)$$

### 2.4.4 พลังงานภายใน เอนทัลปี และความร้อนจำเพาะของของแข็งและของเหลว

ของแข็งและของเหลวจัดเป็นสารที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible substance) ซึ่งหมายถึงสารที่มีความหนาแน่น หรือปริมาตรจำเพาะคงที่ สารในลักษณะนี้มี  $C_v = C_p$  ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์เป็น  $c$  และข้อมูลค่าความร้อนจำเพาะของแข็งและของเหลวมีแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว [8]

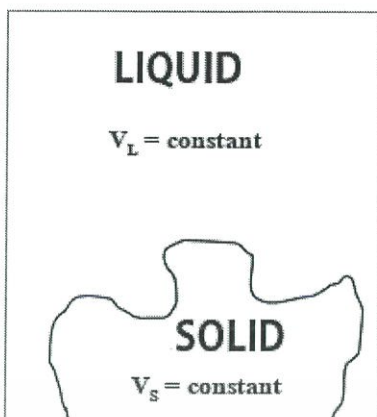
Substance	Liquid properties		
	Temperature, °Cr, kg/m <sup>3</sup>		Temperature, °Cr, kg/m <sup>3</sup>
Ammonia	33.3	682	4.43
	20	665	4.52
Argon	185.6	1394	1.14
Carbon dioxide	0	298	0.59
Ethanol	25	783	2.46
Ethyl alcohol	20	789	2.84
Helium	-268.9	146.2	22.8
Hydrogen	-252.8	70.7	10.0
Isobutane	-11.7	593.8	2.28
Methane	-161.5	423	3.49
Methanol	25	787	2.55
Nitrogen	-195.8	809	2.06
	-160	596	2.97
Octane Oil (light)	20	703	2.10
Oxygen	-183	1141	1.71
Petroleum	20	640	2.0
Propane	-42.1	581	2.25
	0	529	2.53
	50	449	3.13
Refrigerant-134a	-50	1443	1.23
	-26.1	1374	1.27
	0	1295	1.34
	25	1207	1.43
	0	1000	4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลค่าความร้อนจำเพาะของของแข็ง [8]

Substance	Density, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Specific heat, $c_p$ kJ/kg·K
Metals		
Aluminium		
200 K		0.797
250 K		0.859
300 K	2,700	0.902
350 K		0.929
400 K		0.949
Bronze (76% Cu, 2% Zn, 2% Al)	8,280	0.400
Brass, yellow (65% Cu, 35% Zn)	8,310	0.400
Copper		
-100°C		0.342
-50°C		0.367
0°C		0.381
27°C	8,900	0.386
100°C		0.393
Iron	7,840	0.45
Lead	11,310	0.128
Magnesium	1,730	1.000
Nickel	8,890	0.440
Silver	10,470	0.235
Steel, mild	7,830	0.500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 ปริมาตรจำเพาะของสารที่อัดตัวไม่ได้ค่าคงที่ [8]

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน ค่าความร้อนจำเพาะของสารที่อัดตัวไม่ได้ดังที่แสดงในภาพที่ 2.16 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ความสัมพันธ์ของความร้อนจำเพาะในรูปอนุพันธ์ย่อย จึงสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในอนุพันธ์ธรรมดาได้ดังนี้

$$du = C_v dT = c(T) dT \quad (2.11)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระหว่างสภาวะที่ 1 และ 2 สามารถหาได้โดยการอินทิเกรต

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT \quad (2.12)$$

สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างมากนัก สามารถใช้ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิเฉลี่ยในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในได้ดังนี้

$$\Delta u = C_{avg} (T_2 - T_1) \quad (2.13)$$

## 2.5 สารทำความเย็น [10]-[11]

ความหมายของสารทำความเย็นโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย หมายถึง สารที่ทำให้เกิดความเย็นโดยการดูดความร้อน เมื่อขยายตัว หรือเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นไอ สารนี้ในสภาพไอถ้าได้ระบายความร้อนออกจะคืนสภาพเป็นของเหลว

ความหมายจากหนังสือ 1997 ASHRAE Handbook Fundamentals (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) ได้ให้ความหมายของ ‘สารทำความเย็น’ ว่าหมายถึง สารทำงาน (Working fluid) ในเครื่องทำความเย็น และปรับอากาศระบบไอ (Vapour compression cycle) หรือระบบเชิงกล (Mechanical compressor) และระบบดูดกลืน (Absorption) เมื่อได้รับความร้อนสารทำความเย็นเหลวจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และนำความร้อนไปถ่ายเทสู่ภายนอกทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้ง

ความหมายจากพจนานุกรมศัพท์ปรับอากาศอังกฤษ-ไทย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน 2541 หน้า 90 ให้ความหมายของ ‘สารทำความเย็น’ ว่าหมายถึง สารซึ่งหมุนเวียนอยู่ในวงจรทำความเย็น และใช้เป็นตัวกลางดูดซับความร้อนที่มาจากภายนอกวงจรทำความเย็น และนำความร้อนไปถ่ายเททิ้งภายนอกระบบ

หน้าที่ของสารทำความเย็น เป็นการถ่ายโอนพลังงานจากระดับหนึ่ง และจ่ายไปยังอีกระดับหนึ่งที่สูงกว่า ประเภทของสารทำความเย็นหลัก ๆ จะมีมากมายแตกต่างกัน โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวทางเทคนิค เช่น ความดัน (Pressure), อุณหภูมิ (Temperature), ความจุของความร้อน (Heat Content), ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume), และเอนโทรปี (Entropy) ตามแต่ความต้องการ

### 2.5.1 ประเภทสารทำความเย็น

ประเภทของสารทำความเย็นสามารถแบ่งประเภทได้ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

#### 1. แบ่งตามกระบวนการผลิต

- Natural refrigerants เช่น HC-600a (Isobutane), HC-290 (Propane)
- Synthesis refrigerants เช่น HCFCs, HFCs

#### 2. แบ่งตามสมบัติ

- Pure refrigerants เช่น HCFC-22, HFC-134a
- Mixture refrigerants เช่น HFC-407C, HFC-410A

#### 3. แบ่งตามสูตรเคมี

- CFC (Chlorofluorocarbon) ประกอบด้วย คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R11 R12 หรือเรียกว่า CFC-11, CFC-12
- HFC (Hydrofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R407C หรือเรียกว่า HFC-407C และ R134a หรือเรียกว่า HFC-134a ที่นำมาใช้แทน R12

-HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คลอรีน ฟลูออรีน และ คาร์บอน เช่น R22 หรือเรียกว่า HCFC-22 แต่สารตัวนี้มีคลอรีน ผสมอยู่จึงกำลังจะยกเลิก ใช้ภายในปี 2015

-HC (Hydrocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจนและคาร์บอน เช่น R290 หรือเรียกว่า HC-290

สารทำความเย็นหลายชนิดเป็นตัวการเพิ่มแก๊สเรือนกระจกหรือทำลายชั้นบรรยากาศ โดยประเมินได้จาก

1. ค่าของ ODP (Ozone Depleting Potential)
2. ค่าของ GWP (Global Warming Potential) โดยกำหนดค่า GWP ของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบ คือ เท่ากับ 1

สารทำความเย็นที่ดีจะต้องมีค่า ODP เป็นศูนย์ และ ค่า GWP ที่ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารทำความเย็นแต่ละชนิด [10]

Refrigerant	Group	Atmospheric life	ODP	GWP	Safety classification
R11	CFC	130	1	4000	A1
R12	CFC	130	1	8500	A1
R22	HCFC	15	0.05	1500	A1
R134a	HFC	16	0	1300	A1
R404a	HFC	16	0	3260	A1
R410a	HFC	16	0	1720	A1
R507	HFC	130	1	3300	A1
R717	NH <sub>3</sub>	-	0	0	B2
R744	CO <sub>2</sub>	-	0	1	A1
R290	HC	< 1	0	8	A3
R600a	HC	< 1	0	8	A3

จากตารางจะเห็นว่าสารประเภท CFC และ HCFC มีค่า ODP และ GWP ที่สูงกว่าสารประเภทอื่น สาร CFC จึงถูกยกเลิกใช้ไปแล้วและ HCFC กำลังมีการยกเลิกตามมา สำหรับสารประเภท HFC แม้ว่าจะมีค่า ODP เป็นศูนย์แต่ยังมีค่า GWP ที่น่าเป็นห่วง ส่วนสารทำความเย็น

ธรรมชาติ จำพวกไฮโดรคาร์บอน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์แม้ว่าจะมีค่า ODP และ GWP ที่ต่ำก็ตาม แต่สารเหล่านี้ยังมีข้อด้อยในด้านสมรรถนะ และความปลอดภัยบางอย่างด้วย

## 2.5.2 สารทำความเย็น R134a

R134a (Tetrafluoroethane –  $CF_3CH_2F$ ) เป็นสารทำความเย็นกลุ่มอีเทน ซึ่งโมเลกุลของอีเทนประกอบด้วยคาร์บอน 2 อะตอม และไฮโดรเจน 6 อะตอม เมื่อเปลี่ยนไฮโดรเจนด้วยฟลูออรีนจำนวน 4 อะตอมจะได้เป็น R134a ราคาจะสูงกว่าซึ่งเป็นสาร HFC เป็นสารทำความเย็นที่ถูกพัฒนามาใช้แทนสาร CFC ซึ่งมีส่วนอย่างมากในการทำลายชั้นบรรยากาศของโลก นานาชาติได้ตกลงที่จะเลิกผลิต และยุติการใช้สารที่ทำลายชั้นบรรยากาศรวมถึง R12 ด้วยเหตุนี้สาร R134a ได้ถูกพัฒนานำมาใช้เป็นอีกทางเลือก สำหรับใช้แทน R12 การเปรียบเทียบ R134a กับ R12 มีข้อแตกต่างกัน 3 อย่างคือ

1. R134a สามารถดูดความชื้นได้มากกว่า R12 จึงมีแนวโน้มจะเกิดสนิมภายในระบบได้ง่าย ปัจจุบันสารดูดความชื้นที่ใช้จะเป็นซิลิกาเจล ถ้าต้องการดูดความชื้นออกจากวงจร R134a จะต้องใช้ซิลิกาเจลจำนวนมาก แต่ถ้าให้ได้ผลดีสำหรับระบบที่ใช้ R134a จะใช้สารดูดความชื้น ซีโอล์ด แทนซิลิกาเจล รูปสารดูดความชื้น
2. R134a จะทำให้ซีลเสียหาย รวมถึงท่ออ่อนด้วย ในระบบปรับอากาศที่ใช้ R12 จะใช้ซีลที่ทำจาก NBR (Nitrile butadiene rubber) แต่ NBR จะละลายได้ใน R134a ดังนั้นจึงใช้ RBR (Rubber in behalf of R134a) ซึ่งจะพัฒนาใช้สำหรับ R134a ทำวัสดุใช้เป็นซีล วัสดุที่ใช้ทำท่อความดันสูงและต่ำ จะใช้ NBR แต่ถ้าเป็นระบบปรับอากาศที่ใช้ R134a สารทำความเย็นจะรั่วไหลออกมา ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนวัสดุทำท่อใหม่เพื่อใช้กับ R134a การซึมของสารทำความเย็น และน้ำจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้ R12
3. มีความแตกต่างกันของแรงดันระหว่างน้ำยา R12 กับ R134a ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

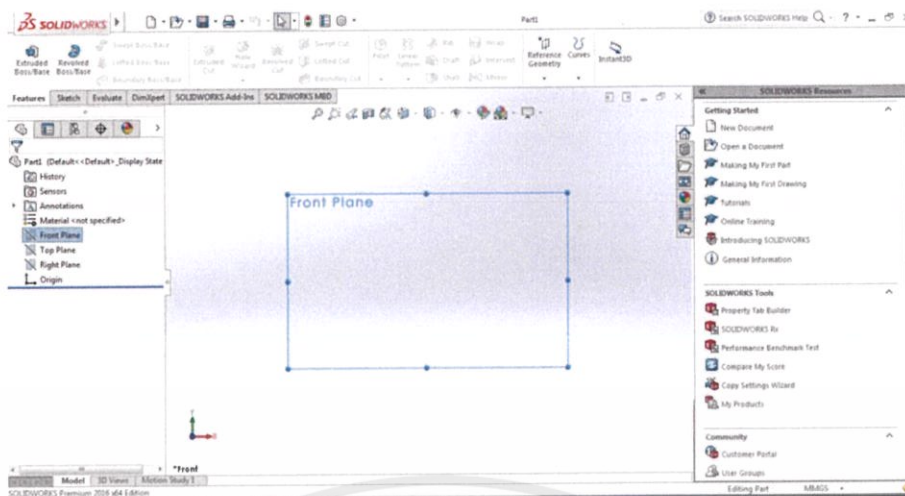
ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างของแรงดันระหว่างน้ำยา R12 กับ R134a [11]

Temperature		R12	R134a
F	C		
-25	-31.7	2.3	6.9
-20	-28.9	0.6	37
-15	-26.1	2.4	0.6
-10	-23.3	4.5	1.9
-5	-20.6	6.7	4.0
0	-17.8	9.2	6.5
5	-15.0	11.8	9.1
10	-12.2	14.6	11.9
15	-9.4	17.7	15.0
20	-6.7	21.0	18.4
25	-3.9	24.6	22.1
30	-1.1	28.5	26.1

## 2.6 SOLIDWORKS [12]-[13]

SOLIDWORKS เป็นซอฟต์แวร์เพื่อให้พนักงานออกแบบใช้ เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อสร้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำลองใน Computer ก่อนที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง โดยซอฟต์แวร์จะจัดอยู่ในตระกูล CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานจำลองในรูปแบบ 3D Solid Models เป็นแบบงานแยกชิ้น (Part) และแบบงานประกอบ (Assembly) เพื่อนำไปสร้างเป็น 2D Standard Engineering (CADD = Computer Aided Design and Drafting) หน้าต่างโปรแกรม SOLIDWORKS และพื้นที่ทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.17

โปรแกรม SOLIDWORKS เป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงมาก คือ สามารถที่จะทำงานมากมายหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานที่ต้องขึ้นเป็น Solid หรือ Surface ก็มีเครื่องที่รองรับเป็นอย่างดี เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถที่จะประกอบชิ้นงานได้ใน Mode ของชุดคำสั่ง Assembly รวมทั้งผู้ต้องการ Drawing ของชิ้นงาน ก็เพียงลากชิ้นงานมาวางในใบงานแล้วขนาด จะมองเห็นได้ว่าผู้ใช้งาน สามารถที่จะประหยัดเวลาในการทำงาน และสนุกกับการทำงานอีกด้วย



ภาพที่ 2.17 หน้าต่างโปรแกรม SOLIDWORKS

### 2.6.1 ประสิทธิภาพการทำงาน

ประสิทธิภาพของ SOLIDWORKS เอื้อให้แก่ออกแบบสามารถสร้างชิ้นงานจำลองทางด้าน Mechanical Engineering Design ได้อย่างสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรม และการตรวจสอบความผิดพลาดของ 3D Solid Models เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และลดระยะเวลาการทำงานในการออกแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในองค์กร

### 2.6.2 ลักษณะการทำงาน

SOLIDWORKS แบ่งหมวดการทำงานหลักออกเป็น 3 หมวด คือ Part, Assembly และ Drawing โดยรูปแบบการทำงานมีลักษณะการใช้งานดังนี้

Part Mode เป็นหมวดการทำงานเริ่มต้นก่อนที่จะก้าวสู่การทำงานในหมวด Assembly และ Drawing ในขั้นนี้จะมีการแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การใช้ 2D Sketch เพื่อนำไปสู่การสร้างเป็น 3D Feature และมีเงื่อนไขเป็น Feature-Based Modeling และ Parametric โดยมีการอ้างอิงจาก Solid Mode

## บทที่ 3

# การสร้างระบบเทียบเคียงที่นำเสนอ

### 3.1 กล่าวนำ

ในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีรูปแบบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน คือ การใช้แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานกล จำพวกโซลาเซลล์ และการใช้แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานกล อาทิเช่น การผลิตไฟฟ้าโดยใช้ไอน้ำ เนื่องจากน้ำมีจุดเดือดที่สูง ( $100^{\circ}\text{C}$ ) ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะใช้ของเหลวประเภทอื่นที่มีจุดเดือดที่ต่ำกว่าน้ำมาใช้ในการออกแบบ สารที่ทางผู้จัดทำได้เลือกมาใช้ในการออกแบบนั้นคือ สารทำความเย็นชนิด R134a ซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำ ไม่กัดกร่อน ไม่เป็นอันตรายต่อชั้นบรรยากาศ ไม่ติดไฟ และไม่เป็นพิษ มาใช้เป็นตัวกลาง และใช้กฎของเทอร์โมไดนามิกส์มาเป็นพื้นฐานในการออกแบบ

### 3.2 การออกแบบ

#### 3.2.1 การเลือกใช้ของเหลว

เนื่องจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำหลักการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รูปแบบระบบรางพาราโบลา และกฎของเทอร์โมไดนามิกส์มาเป็นพื้นฐานในการออกแบบ ทางคณะผู้จัดทำเล็งเห็นว่าน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการนั้นมีจุดเดือดที่สูง จึงมีแนวคิดที่จะเปลี่ยนของเหลวเป็น สารทำความเย็นชนิด R134a

ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ น้ำ น้ำมันเบนซิน และ R134a

คุณสมบัติ	น้ำ	น้ำมันเบนซิน	สารทำความเย็น R134a
ชื่อทางเคมี	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_6$	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$
จุดเดือด	$100^{\circ}\text{C}$	$80.1^{\circ}\text{C}$	$-26.3^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมเหลว	$0^{\circ}\text{C}$	$5.5^{\circ}\text{C}$	$-103.3^{\circ}\text{C}$
ความหนาแน่น	$1 \text{ g/cm}^3$	$0.8786 \text{ g/cm}^3$	$4.25 \text{ kg./m}^3$
ปริมาตรเชิงโมล	$18.015 \text{ g/mol}$	$78.11 \text{ g/mol}$	$102.03 \text{ g/mol}$

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า R134a มีจุดเดือดที่ต่ำมาก ดังนั้นใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าน้ำมันในการทำให้สารเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส แต่สารทำความเย็น R134a นั้นมีข้อจำกัดอยู่บางส่วนคือ ต้องการระบบกักเก็บโดยเฉพาะทุกอย่างต้องเป็นระบบปิด เนื่องจากเมื่อสารทำความเย็น

R134a เมื่อรั่วไหลออกสู่ชั้นบรรยากาศแล้วสารจะระเหยกลายเป็นแก๊สทั้งหมด ดังนั้นข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ และสร้างระบบเทียบเคียงนั้นคือ ระบบบรรจุสารโดยต้องเป็นระบบปิดทั้งหมด ไม่ทำให้สารรั่วไหลออกมาสู่บรรยากาศได้

### 3.2.2 การเลือกใช้ขนาดและความยาวท่อ

ในปฏิญานิพนธ์นี้การเลือกความยาวท่อที่ใช้ขึ้น ต้องสัมพันธ์กันกับขนาดของท่อ และปริมาตรของสาร ซึ่งในแต่ละสถานะของสารนั้นมีปริมาตรไม่เท่ากัน ดังนั้นสามารถหาปริมาตรของสาร R134a ได้จากการดูตารางที่ 3.2 เป็นคุณสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R134a เพื่อนำค่า Specific Volume ของสารที่อุณหภูมิ และสถานะนั้นมาคำนวณ ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เลือกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจาก 34°C เป็นอุณหภูมิ 44°C ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 3.2 มีค่า Specific Volume ดังต่อไปนี้

1. ที่อุณหภูมิ 34°C สถานะของเหลว Specific Volume = 0.0008536 m<sup>3</sup>/kg
2. ที่อุณหภูมิ 44°C สถานะของเหลว Specific Volume = 0.0008854 m<sup>3</sup>/kg
3. ที่อุณหภูมิ 44°C สถานะของแก๊ส Specific Volume = 0.017837 m<sup>3</sup>/kg

โดยคิดที่มวลของ R134a ที่ 0.02 kg

จากสูตรหาปริมาตร ดังสมการที่ (3.1)

$$v = \frac{V}{m}$$

(3.1)

โดยที่  $v$  = Specific Volume (m<sup>3</sup>/kg)

$V$  = ปริมาตร (m<sup>3</sup>)

$m$  = มวลของสาร (kg)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของสารทำความเย็น 134a ที่อุณหภูมิ [1]

Temp	Pressure	Specific volume (m <sup>3</sup> /kg)	
		v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>
°C	kPa		
28	726.9	0.0008367	0.028242
30	770.2	0.0008421	0.026622
32	815.4	0.0008478	0.025108
34	862.6	0.0008536	0.023691
36	911.9	0.0008595	0.022364
38	963.2	0.0008657	0.021119
40	1016.6	0.0008720	0.019952
42	1072.2	0.0008768	0.018868
44	1130.1	0.0008854	0.017837
46	1252.9	0.0008997	0.016866

หาปริมาตรของของเหลวที่อุณหภูมิ 34°C สามารถหาได้โดย แทนค่าหาปริมาตรในสมการที่ (3.1) จะได้

$$V = 0.02 \times 0.0008536$$

$$V = 1.707 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

หาปริมาตรของของเหลวที่อุณหภูมิ 44°C สามารถหาได้โดย แทนค่าหาปริมาตรในสมการที่ (3.1) จะได้

$$V = 0.02 \times 0.0008854$$

$$V = 1.771 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

หาปริมาณของแก๊สที่อุณหภูมิ 44°C สามารถหาได้โดย แทนค่าหาปริมาตรในสมการที่ (3.1) จะได้

$$V = 0.02 \times 0.017837$$

$$V = 3.5674 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

ในการคำนวณหาความยาวของท่อนั้น ต้องเลือกขนาดของท่อก่อน จึงจะสามารถคำนวณค่าหาของความยาวท่อได้ จากที่ได้ทำการออกแบบวิธีหาความยาวท่อดังนี้ โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลำเลียงสาร = 0.00635 m

จากสูตรหาปริมาตรของทรงกระบอก

$$V = \pi r^2 L \quad (3.2)$$

หาความยาวของท่อทองแดงส่วนที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 34°C แทนค่าหาความยาวในสมการที่ (3.2) จะได้

$$L_{evap} = \frac{1.771 \times 10^{-5}}{\pi \times 0.003175^2}$$

$$L_{evap} = 0.5589 \text{ m}$$

หาความยาวของท่อส่วนที่เป็นของแก๊ส แทนค่าหาความยาวในสมการที่ (3.2) จะได้

$$L_{con} = \frac{3.5674 \times 10^{-4}}{\pi \times 0.003175^2}$$

$$L_{con} = 11.2600 \text{ m}$$

เนื่องจากมีพื้นที่อย่างจำกัดทำให้ต้องลดขนาดของ Condensing coil ลง ให้เหลือ 2 m และเพิ่มการดึงพลังงานความร้อนออกจาก Condensing coil ให้มากขึ้น

### 3.2.3 การเลือกเกจวัดความดัน

ในการเลือกเครื่องวัดแรงดันนั้นสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเลือกมี 4 อย่างดังนี้

1. หน่วยวัด (Unit) คือ หน่วยความดันบนหน้าปัดที่ต้องการให้อุปกรณ์วัดแสดง
2. ย่านการวัด (Range) คือ ช่วงความดันต่ำสุด-สูงสุด ที่สามารถวัดได้
3. ขนาดหน้าปัด (Dial Size) คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าปัดอุปกรณ์วัด
4. ชนิดวัสดุ คือ ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือน ทองเหลืองและวัสดุใช้ทำเกลียว และขนาดของเกลียว (Type/Thread size)

ดังนั้นในการเลือกเครื่องวัดความดันนั้นต้องเลือกเครื่องมือวัดที่สามารถใช้กับสารทำความเย็นได้ทนแรงดันสุญญากาศได้ และต้องคำนึงถึงแรงดันสูงสุดของจุดที่ทำกรวัด สามารถดูเครื่องวัดความดันได้จากภาพที่ 3.1 ซึ่งทางผู้จัดทำได้ทำการวัด 2 ที่ คือ ขณะเป็นของเหลวอุณหภูมิ 34°C ซึ่งมีความดันสูงสุด 862.6 kPa และ 44°C มีความดันสูงสุดที่ 1130.1 kPa ดังนั้นจึงเลือกเกจความดันชนิดบูร์ดอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเกจวัดความดันชนิดอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล ด้วยหลักการยืดตัว หรือโก่งตัวของวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่น หรือเรียกว่า เครื่องมือวัดความดันแบบอิลาสติก ทำงานโดยอาศัยการแปลงความดันที่อุปกรณ์ได้รับให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่ เเกจความดันที่เลือกใช้ดังแสดงในภาพที่ 3.1 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. หน่วยวัด ใช้หน่วย bar แล psia
2. ย่านการวัด -30 ถึง 120 bar
3. ขนาดหน้าปัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 mm
4. ชนิดวัสดุ
  - ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือน เหล็ก
  - วัสดุใช้ทำเกลียว ทองเหลือง
  - ขนาดของเกลียว 1/2 NPT



ภาพที่ 3.1 เครื่องวัดความดันแบบ Bourdon guage [13]

### 3.3 การวางตำแหน่งอุปกรณ์และการทำงานของระบบเทียบเคียง

จากการที่ได้ทำการออกแบบและทำการเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นต่อไปจะทำการเลือกวางตำแหน่งของอุปกรณ์แต่ละตัวตามกระบวนการทำงานของระบบเทียบเคียงที่ออกแบบดังนี้

#### 3.3.1 การวางตำแหน่งอุปกรณ์

การเลือกวางตำแหน่งของอุปกรณ์ ต้องคำนึงถึงสิ่งที่ต้องการทราบจากระบบเทียบเคียงนี้ จากนั้นจึงทำการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

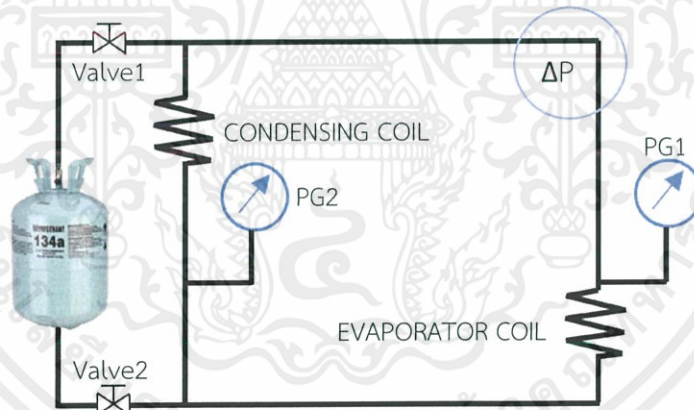
1. การวางตำแหน่งถังเก็บสารทำความเย็น ไม่ควรวางสูงจากพื้น เนื่องจากถ้าวางถังเก็บสารสูงเกินไป จะทำให้ปริมาตรของสารในระบบเยอะมากเกินความจำเป็น ส่งผลต่อการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวางตำแหน่ง Evaporator coil ควรวางขนานกับถังเก็บสาร เนื่องจากต้องการให้ความร้อนกับ Evaporator coil ที่ผิวหน้า ดังนั้นต้องวางให้อยู่ระดับเดียวกับถังเก็บสาร
3. การวางตำแหน่ง Condensing coil ในทิศเมื่อสารถูกดึงพลังงานความร้อน และกลับสู่สถานะของเหลว และไหลลงตามแนวแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของสาร
4. การวางตำแหน่ง Pressure gauge วางตำแหน่งหลัง Evaporator coil และหลัง Condensing coil เพื่อสามารถหาค่าความดันแตกต่างของระบบได้

### 3.3.2 การทำงานของระบบเทียบเคียง

กระบวนการทำงานของระบบ เริ่มจากสาร R134a ที่มีสถานะเป็นของเหลวบรรจุอยู่ภายในท่อทองแดง ให้ความร้อนที่ Evaporator coil ความร้อนถูกถ่ายเทเข้าสู่สารทำความเย็น R134a ซึ่งเมื่อสารทำความเย็น R134a ได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งเกิดการขยายตัว และเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สแรงดันสูง ทำให้เกิดแรงดันแตกต่างระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพลังงานต้นกำลังต่อไป จากนั้นเมื่อสารผ่านเข้ามาทาง Condensing coil ซึ่งเป็นส่วนที่ดึงพลังงานความร้อนออกจากระบบ แก๊สจึงถูกเปลี่ยนสถานะกลับไปอยู่ในสถานะของเหลวหมุนเวียนในระบบเช่นนี้ต่อไปดังแสดงในภาพที่ 3.2



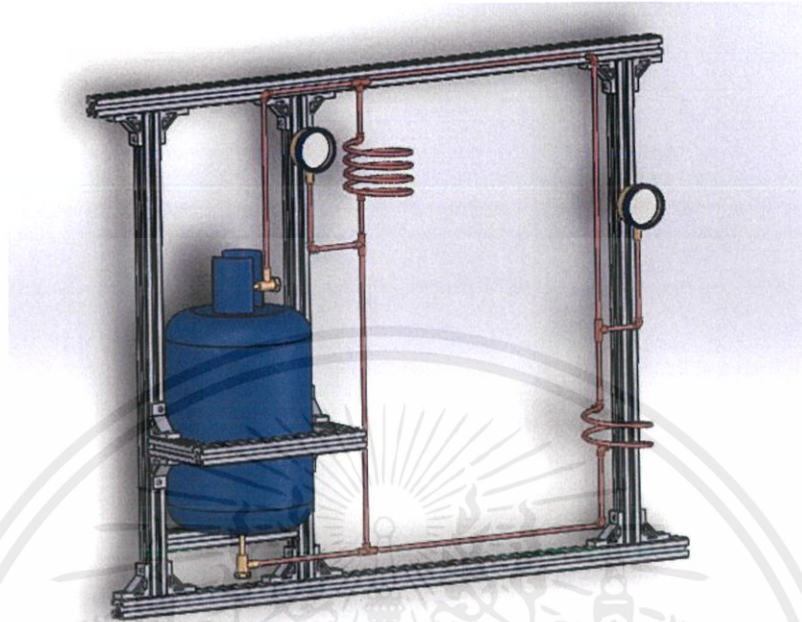
ภาพที่ 3.2 Diagram ของระบบเทียบเคียงเครื่องต้นกำลังพลังงาน

## 3.4 ขั้นตอนของการสร้างระบบเทียบเคียงใน SOLIDWORKS และการติดตั้งอุปกรณ์จริง

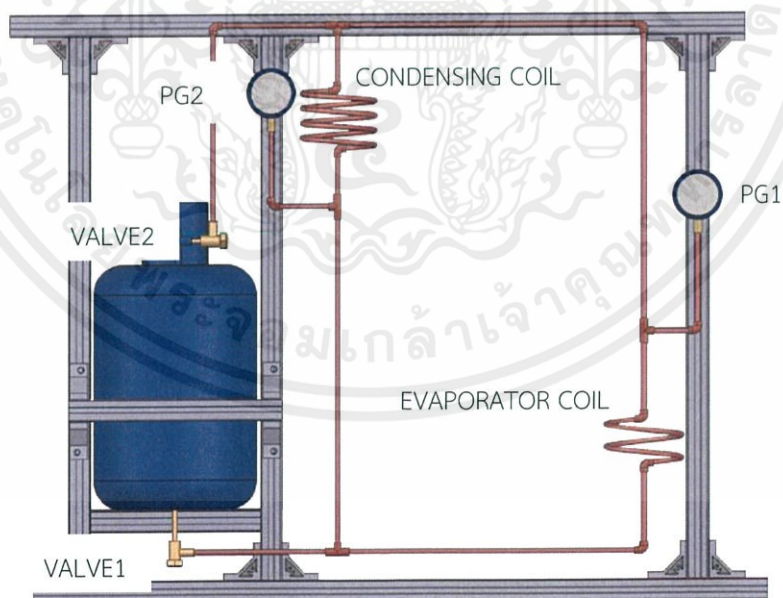
### 3.4.1 การสร้างระบบเทียบเคียงใน SOLIDWORKS

จากการออกแบบเลือกคุณสมบัติขนาดของวัสดุต่าง ๆ แล้วจึงได้ทำการสร้างระบบเทียบเคียงขึ้น โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS ในการวางตำแหน่งต่าง ๆ ของวัสดุ ทำให้ทราบ

จำนวนข้อต่อ ขนาด และความยาวของอลูมิเนียมโปรไฟล์ที่นำมาสร้างระบบเทียบเคียงนี้ ดังภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 ระบบเทียบเคียงแบบ 3 เมตร ของเครื่องต้นกำลังพลังงาน

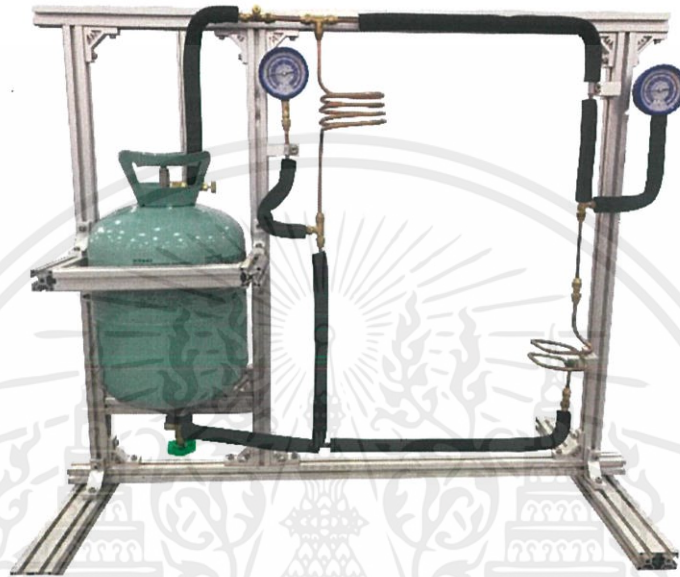


ภาพที่ 3.4 ด้านหน้าของระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การติดตั้งอุปกรณ์จริง

เนื่องจากได้ทำการสร้างระบบเทียบเคียงในโปรแกรม SOLIDWORKS แล้ว ทำให้ทราบถึงจำนวน ขนาด ความยาว และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการประกอบระบบเทียบเคียงทดลองนี้ ทำการจัดซื้อเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ และทำการประกอบระบบเทียบเคียงตามแบบที่สร้างไว้ในโปรแกรม เมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแสดงได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ระบบเทียบเคียงของเครื่องต้นกำลังพลังงาน

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการตรวจสอบ และจัดเตรียมระบบเทียบเคียงก่อนเริ่มทำการทดลอง วิธีการทดลอง และผลการทดลอง ได้แก่ การเตรียมระบบเทียบเคียงให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ การเติมสารทำความเย็นเข้าสู่ระบบ การตรวจสอบสารในถังบรรจ และ การตรวจสอบการไหลของสารในระบบ รวมไปถึงค่าที่บันทึกได้จากการทดลอง และสรุปผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

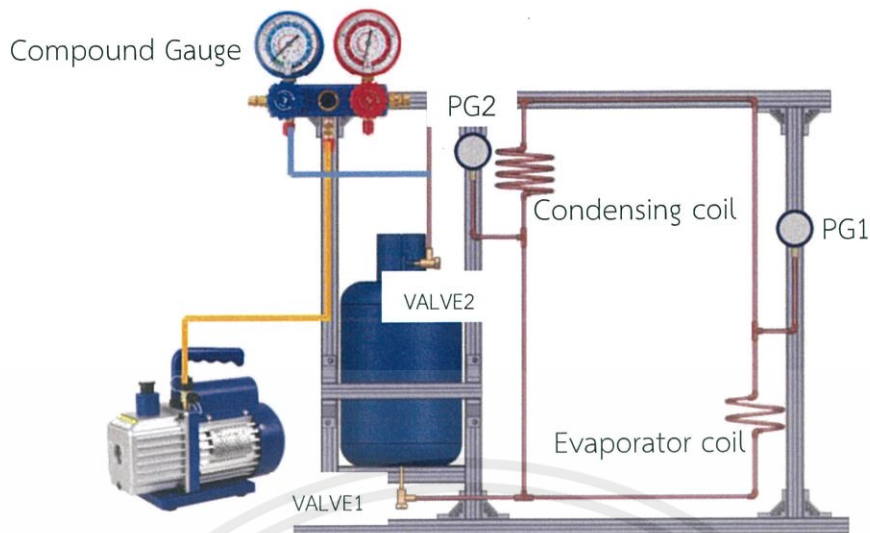
#### 4.2 การตรวจสอบระบบที่สร้างขึ้น

ต้องตรวจสอบในขณะที่สารทำความเย็นอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การเตรียมระบบให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ

ก่อนทำการทดสอบระบบเทียบเคียง ต้องจัดเตรียมถังเก็บสารทำความเย็น R134a และท่อลำเลียงสารให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยทำการแวคคัม (Vacuum) ระบบดังภาพที่ 4.1 มีขั้นตอนการดูดอากาศ และความชื้นดังต่อไปนี้

1. ต่อเครื่องปั๊มสุญญากาศกับระบบเทียบเคียงโดยทางดูดอากาศต่อเข้ากับสายเกจสี่เหลี่ยม
2. หมุนเปิดวาล์วทาง Compound Gauge (วาล์วสีน้ำเงิน)
3. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ ทำการดูดอากาศ และความชื้นออก โดยใช้เวลาประมาณ 45 นาที
4. สังเกต Compound Gauge จะมีค่าต่ำกว่า 0 แสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะสุญญากาศ
5. อ่านค่าและปิดวาล์วทาง Compound Gauge และปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ
6. หลังจากการทำงานของเครื่องปั๊มสุญญากาศเสร็จสิ้น ต้องสังเกตการณ์เป็นระยะเวลาประมาณประมาณ 60 นาที เพื่อสังเกตว่าเข็มที่ Compound Gauge เคลื่อนกลับไปตำแหน่ง 0 เช่นเดิมหรือไม่ ถ้าค่าที่อ่านได้เท่ากับ 0 แสดงว่าภายในระบบยังมีจุดที่รั่วไหลอยู่ ถ้าค่าที่อ่านได้คงที่ แสดงว่าระบบไม่มีจุดที่รั่วไหล และอยู่ในสภาวะสุญญากาศเช่นเดิม



ภาพที่ 4.1 การแวคคัมระบบ

#### 4.2.2 การเติมสารทำความเย็น

หลังจากที่ระบบอยู่ในสภาวะสุญญากาศแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมสาร R134a เข้าสู่ระบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ถอดปลายสายสีเหลืองของ Compound Gauge ออกจากเครื่องปั๊มสุญญากาศ และต่อเข้ากับถังเติมสาร R134a
2. เปิดวาล์วของถังเติมสาร
3. ใช้แก๊สในถังไล่อากาศที่ติดค้างอยู่ในสายกลาง (สายสีเหลือง) ของ Compound Gauge โดยทำการคลายปลายสายเล็กน้อย และปล่อยให้แก๊สจากในถังไล่อากาศออก แล้วหมุนสายที่คลายกลับให้แน่นตามเดิม
4. คว่ำถังเติมสาร R134a ลงเพื่อให้ของเหลวไหลเข้าสู่ระบบ
5. เปิดวาล์วทาง Compound Gauge (วาล์วสีน้ำเงิน) เพื่อให้สารไหลเข้าถังเก็บสารทำความเย็น R134a

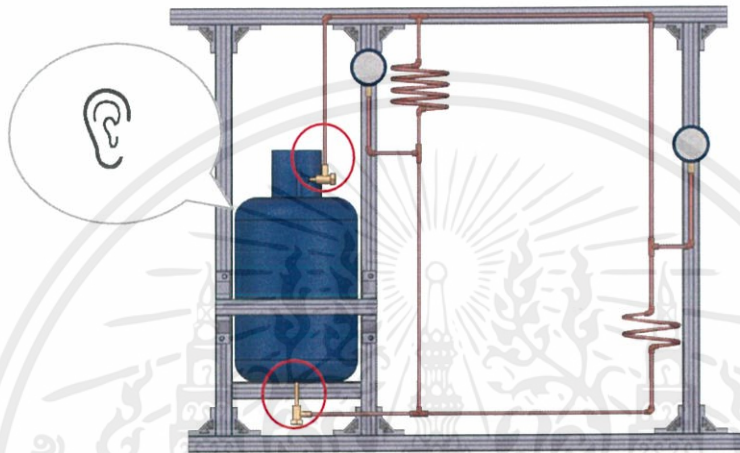
#### 4.2.3 การทดสอบของเหลวในระบบ

วิธีการตรวจสอบของเหลวในถังเก็บสารทำความเย็น ทำได้โดยใช้การแกว่งถังเก็บสารเบา ๆ ถ้ารู้สึกว่ามีสารมีการเคลื่อนตามแรงแกว่ง แสดงว่ามีสารอยู่ในถังเก็บสาร เนื่องจากสาร R134a นั้นมีสถานะเป็นของเหลว

#### 4.2.4 ตรวจสอบการไหลของสารในระบบ

การตรวจสอบการไหลของสารในระบบทำได้ยาก เนื่องจากระบบเป็นระบบปิด และใช้ท่อทองแดงในการลำเลียงสาร ดังนั้นมีขั้นตอนการตรวจสอบการไหลของสารในระบบดังนี้

1. เปิดวาล์วที่ถังเก็บสารทำความสะอาดเย็นทั้งบน และล่างของถัง ดังแสดงในภาพที่ 4.2
2. ให้ความร้อนทางด้าน Evaporator coil
3. ฟังเสียงน้ำหยดภายในถังเก็บสาร



ภาพที่ 4.2 ตำแหน่งที่ต้องเปิด-ปิดวาล์วในการทดสอบการไหลของสาร

ถ้าในระบบเทียบเคียงมีการไหลของสารเกิดขึ้น จะทำให้สามารถได้ยินเสียงของเหลวไหลภายในถังเก็บสาร จากการทดสอบปรากฏว่าได้ยินเสียงของเหลวไหลอยู่ภายในระบบจริง

### 4.3 ผลการทดลอง

#### 4.3.1 ผลการคำนวณจากการออกแบบ

จากบทที่ 3 การเลือกใช้ของเหลว และการเลือกใช้ขนาด และความยาวของท่อทองแดง ทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานความร้อน และพลังงานที่สูญเสียให้กับท่อทองแดง ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1.1 การคำนวณหาพลังงานความร้อน

พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส โดยคิดที่มวลเท่ากับ 0.02 kg

จากสูตรหาพลังงานความร้อน ดังแสดงได้ในสมการที่ (4.1), (4.2) และ(4.3) ตามลำดับ

$$Q = mL \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = mc\Delta T \quad (4.2)$$

$$Q = mc\Delta T + mL \quad (4.3)$$

เมื่อความจุเฉพาะของ R134a เท่ากับ  $1.42 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$  และจากตารางที่ 4.1 เอนทาลปีของสาร R134a ที่อุณหภูมิ  $44^\circ\text{C}$  เท่ากับ  $158.6700 \text{ kJ/kg}$  จากนั้นแทนค่าในสมการที่ (4.3)

$$Q_{Sub} = (0.02 \times 1.42 \times 10) + (0.02 \times 158.6700)$$

$$Q_{Sub} = 3.4574 \text{ kJ}$$

ตารางที่ 4.1 เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R134a [1]

Temp. T, °C	Sat. pressure P <sub>sat</sub> , kPa	Enthalpy, kJ/kg		
		Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>
30	770.64	93.58	173.08	266.66
32	815.89	96.48	171.14	267.62
34	863.11	99.40	169.17	268.57
36	912.35	102.33	167.16	269.49
38	963.68	105.29	165.10	270.39
40	1017.1	108.26	163.00	271.27
42	1072.8	111.26	160.86	272.12
44	1130.7	114.28	158.67	272.95

#### 4.3.1.2 พลังงานความร้อนที่สูญเสียให้ท่อทองแดง

หาพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับท่อทองแดง เมื่อมวลของท่อทองแดงที่มีความยาว  $0.5589 \text{ m}$  ( $1 \text{ m} = 0.187 \text{ kg}$ ) เท่ากับ  $0.1045 \text{ kg}$  ได้

เมื่อความจุเฉพาะของท่อทองแดงเท่ากับ  $0.381 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$  แทนค่าหาพลังงานความร้อนของทองแดงในสมการที่ (4.2)

$$Q_{Cu} = 0.1045 \times 0.3810 \times 10$$

$$Q_{Cu} = 0.3982 \text{ kJ}$$

เพราะฉะนั้นพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{total} = Q_{sub} + Q_{cu}$$

$$Q_{total} = 3.4574 + 0.3982$$

$$Q_{total} = 3.8556 \text{ kJ}$$

#### 4.3.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

##### 4.3.1.1 การทดลองหาเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส

การทดลองทำได้โดย ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เท่ากับ 34°C และให้ความร้อนกับ Evaporator coil 44°C จากนั้นทำการจับเวลา จากนั้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นถึงสภาวะคงที่ ทำการบันทึกผลการทดลอง ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส

ครั้งที่	ความดัน ณ อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม (bar)	ความดันที่วัดหลัง Evaporator coil (bar)	เวลาที่ใช้ (s)
1	7.6	10.80	15.45
2	7.6	10.85	16.32
3	7.5	10.75	14.87
4	7.6	10.90	16.30
5	7.6	10.80	16.65

$$P_{amb(avg)} = 7.6000 \text{ bar}$$

$$P_{evap(avg)} = 10.8200 \text{ bar}$$

$$t = 15.9180 \text{ s}$$

##### 4.3.1.2 การทดลองเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลว

วิธีการทดลองทำโดยการให้ความร้อนที่ Evaporator coil และให้ความดันถึงค่าที่กำหนดไว้ที่ 10.95 bar จากนั้นดึงความร้อนออกจากฝั่ง Condensing coil แล้วจับเวลาเพื่อหาระยะเวลาที่ความดันลดลงถึงสภาวะคงที่ และบันทึกผลการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลว

ครั้งที่	ความดันที่วัดหลัง evaporator coil (bar)	ความดันที่วัดหลัง condensing coil (bar)	เวลาที่ใช้ (s)
1	10.95	7.60	16.45
2	10.85	7.65	17.32
3	10.90	7.65	17.87
4	10.80	7.60	18.30
5	10.95	7.65	17.95

$$P_{evap(avg)} = 10.8900 \text{ bar}$$

$$P_{con(avg)} = 7.6300 \text{ bar}$$

$$t = 17.5780 \text{ s}$$

#### 4.3.1.3 การทดลองหาความดันที่ได้ขณะทำการทดลอง

วิธีการทดลองทำโดยการให้ความร้อนทางฝั่ง Evaporator coil ที่ 44°C และดึงความร้อนออกทางฝั่ง Condensing coil จากนั้นอ่านค่าความดันที่ Evaporator coil และ Condensing coil ตามเวลาที่กำหนด และบันทึกผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความดันขณะทำการทดลอง

เวลา (min)	ความดัน ณ อุณหภูมิ สิ่งแวดลอม (bar)	ความดันที่วัดหลัง Evaporator coil (bar)	ความดันที่วัดหลัง Condensing coil (bar)
0	7.6	10.75	7.95
2	7.6	10.35	8.00
4	7.6	10.75	8.15
6	7.6	10.40	8.20
8	7.6	10.80	8.20
10	7.6	10.70	8.20

$$P_{amb(avg)} = 7.6000 \text{ bar}$$

$$P_{evap(avg)} = 10.6250 \text{ bar}$$

$$P_{con(avg)} = 8.1167 \text{ bar}$$

$$\Delta P_{(avg)} = P_{evap(avg)} - P_{con(avg)}$$

$$\Delta P_{(avg)} = 2.5085 \text{ bar}$$

#### 4.3.3 ผลการคำนวณจากผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 สามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหา อัตราการส่งผ่านความร้อนที่ได้รับของ Evaporator coil อัตราการไหลเมื่อสารมีสถานะเป็นแก๊ส ค่าความดันที่ลดลงระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil การสูญเสียพลังงานความร้อนให้พื้นผิวและอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ถูกต้องของ Condensing coil

##### 4.3.3.1 การหาอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ได้รับของ Evaporator coil

จากหัวข้อ 4.3.1.2 พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะ คือ 3.8556 kJ และเวลาเฉลี่ยที่สารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 15.9180 s ดังนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ได้รับของ Evaporator coil ได้

จากสูตรการหาอัตราส่งผ่านความร้อน

$$H = \frac{dQ}{dt} \quad (4.4)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.4)

$$H_{evap} = \frac{3.8556}{15.9180}$$

$$H_{evap} = 0.2422 \text{ kW}$$

##### 4.3.3.2 หาอัตราการไหลเมื่อสารมีสถานะเป็นแก๊ส

จากหัวข้อที่ 3.2.2 ปริมาณของแก๊สที่อุณหภูมิ 44°C เท่ากับ  $3.5674 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  และค่าเวลาเฉลี่ยที่สารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สจากการทดลองเท่ากับ 15.9180 s

จากสูตรหาอัตราการไหล

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.5)$$

แทนค่าจากสมการที่ (4.5)

$$Q = \frac{3.5674 \times 10^{-4}}{15.9180}$$

$$Q = 0.2241 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.3.3 หาค่าความดันที่ลดลงระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil

การหาความดันที่ลดลงระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil

หาได้ดังนี้

จากสูตรการหาความดันแตกต่าง

$$\Delta P = \frac{7.5700 \times Q^{1.85} \times L \times 10^4}{d^5 \times p} \quad (4.6)$$

แทนค่าจากสมการที่ (4.6)

$$\Delta P = \frac{7.5700 \times (0.2241 \times 10^{-4})^{1.85} \times 1.2500 \times 10^4}{6.3500^5 \times 7.4556}$$

$$\Delta P = 3.0759 \times 10^{-9} \text{ kg/cm}^3$$

4.3.3.4 การสูญเสียพลังงานความร้อนให้พื้นผิว

เนื่องจากมีฉนวนในการป้องกันความร้อนออกภายนอกระบบ ทำให้เกิด

การสูญเสียความร้อน 5%

$$\text{การสูญเสียความร้อนให้พื้นผิว} = 3.8556 \times 5\%$$

$$\text{การสูญเสียความร้อนให้พื้นผิว} = 0.1928 \text{ kJ}$$

เพราะฉะนั้นการควมแน่นเพื่อให้สารกลับคืนสถานะเดิม

$$\text{พลังงานความร้อนของสาร} = \text{พลังงานความร้อน} - \text{พลังงานที่สูญเสีย}$$

$$\text{พลังงานความร้อนของสาร} = 3.8556 - 0.1928$$

$$\text{พลังงานความร้อนของสาร} = 3.6628 \text{ kJ}$$

4.3.3.5 หาอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ถูกดึงออกของ Condensing coil

จากหัวข้อที่ 4.3.3.4 ต้องใช้พลังงาน 3.6628 kJ ดังนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ถูกดึงออกของ Condensing coil ได้เท่ากับ

อัตราการส่งผ่านความร้อนที่ถูกดึงออกของ Condensing coil แทนค่าในสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

$$H = \frac{3.6628}{17.5780}$$

$$H = 0.2084 \text{ kW}$$



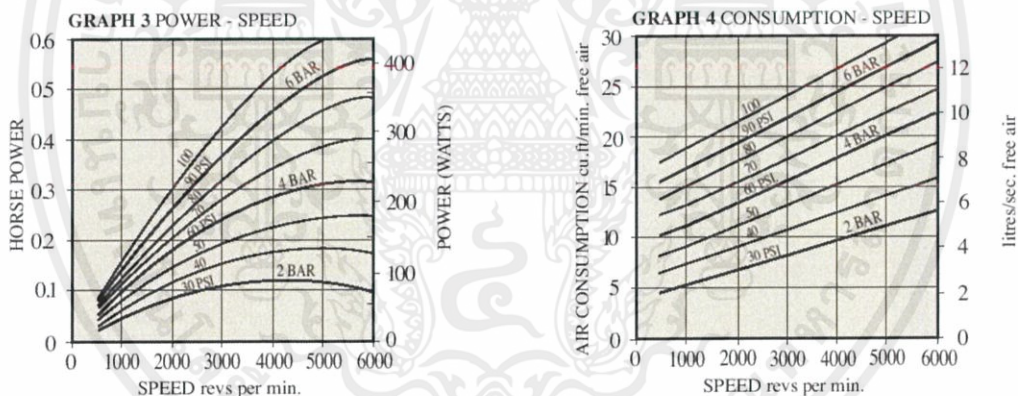
## บทที่ 5

# บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการทดลองระบบเทียบเคียงเครื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าสารทำความเย็น R134a นั้นได้หมุนเวียนภายในระบบ ณ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature) ที่ 34°C ความดัน 7 bar และเมื่อให้ความร้อนในอุณหภูมิ 44°C พบว่า ความดันภายในระบบเพิ่มขึ้นเป็น 10 bar ซึ่งหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นแก๊สเมื่อให้ความร้อนทาง Evaporator coil และจากแก๊สเปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่อดึงพลังงานความร้อนออกที่ Condensing coil

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของระบบเทียบเคียงที่สร้างขึ้น ในที่นี้ขอยกตัวอย่างเป็นมอเตอร์ลม (Vane Air Motors) รุ่น Dimensions V1 มีคุณสมบัติดังภาพที่ 5.1 เห็นได้ว่ามอเตอร์ที่แสดงนี้ต้องการความดันอย่างต่ำ 2 bar ที่อัตราเร็วต่ำสุด 1000 รอบ/นาที มาคำนวณดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของ Dimensions V1 [14]

เนื่องจากต้องการเลือกใช้ความดันที่ 2 bar จากตารางที่ 3.2 เมื่ออ้างอิงค่าจากอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ 34°C มีค่าความดันที่ 8.62 kPa

$$\Delta P = P_{\text{ที่เปลี่ยนไป}} - P_{\text{ที่อุณหภูมิห้อง}}$$

ดังนั้นจึงเลือกการเปลี่ยนสถานะจาก 34°C เป็น 44°C

$$\Delta P = 2.6810 \text{ bar}$$

จากตารางที่ 3.2 ณ ความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 รอบต่อนาที หาปริมาณพลังงานที่ต้องการในการระเหยน้ำหนึ่งหน่วยมวลคือ เอนทาลปีเฉพาะของการระเหย สำหรับ R134a ที่ 44°C ( $h_{fg} = 158.67 \text{ kJ/kg}$ )

ปริมาณที่ต้องการในการระเหย R134a ที่ 1 ลิตรต่อวินาที ( $0.001 \text{ m}^3$ ) เท่ากับ

$$\frac{0.001}{0.0178} = 0.0560$$

หาปริมาตรของของเหลวที่อุณหภูมิ 34°C แทนค่าจากสมการที่ (3.1)

$$V = 0.0560 \times 0.0008536$$

$$V = 4.7801 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

ถ้าใช้ขนาดท่อตามท่อแบบไวท์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ลำเลียงสารคือ 0.00635 m หาความยาวของท่อส่วนที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 34°C จากสูตรหาปริมาตรแทนค่าในสมการที่ (3.2)

$$4.7801 \times 10^{-5} = \pi \times 0.003175^2 \times L$$

$$L = 1.5093 \text{ m}$$

หาความยาวของท่อส่วนที่เป็นของแก๊ส จากสูตรหาปริมาตรแทนค่าในสมการที่ (3.2)

$$0.001 = \pi \times 0.003175^2 \times L$$

$$L = 31.5764 \text{ m}$$

จากสมการที่ (4.3) แทนค่าหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ

$$Q = (0.056 \times 1.42 \times 10) + (0.056 \times 163)$$

$$Q = 9.9232 \text{ kJ}$$

จากสมการที่ (4.4) ต้องใช้อัตราการส่งผ่านความร้อน แทนค่า

$$H = \frac{9.9232}{1}$$

$$H = 9.9232 \text{ kW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองเทียบกับการประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ลมพบว่า

1. ต้องเพิ่มอัตราการส่งผ่านความร้อนจาก 0.2422 kWatt เป็น 9.9232 kWatt
2. ต้องเพิ่มความยาวของ Evaporator coil อีก 2.7005 เท่า
3. ต้องเพิ่มความยาวของ Condensing coil อีก 15.7882 เท่า

## 5.2 ปัญหาและวิธีแก้ปัญหา

### 5.2.1 ปัญหาที่พบ

#### 5.2.1.1 ไม่สามารถวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็น R134a ได้โดยตรง

เนื่องจากระบบเทียบเคียงที่ได้จัดทำใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 0.00635 m และข้อจำกัดของระบบเป็นระบบปิด ทำให้ไม่มีเครื่องมือที่สามารถวัดอุณหภูมิของสารภายในท่อได้โดยตรง

#### 5.2.1.2 ไม่มีอุปกรณ์วัดความเร็วของสารได้โดยตรง

เนื่องจากสารที่ใช้เป็นสารทำความเย็นชนิด R134a ซึ่งมีความดันที่สูงเกินกว่าเครื่องวัดตามท้องตลาดมี อีกทั้งต้องใช้เครื่องมือเฉพาะในการวัดซึ่งต้องดำเนินการสั่งทำขึ้นเนื่องจากสารมีคุณสมบัติเฉพาะ ทำให้มีราคาที่สูงและขนาดท่อที่เล็กทำให้อุปกรณ์วัดนั้นต้องมีขนาดตามขนาดท่อด้วย

#### 5.2.1.3 ปริมาตรของสารในระบบเยอะเกินไป

เนื่องจากระบบเทียบเคียงมีขนาดเล็กและอุณหภูมิที่ให้ในระบบน้อยทำให้เมื่อให้ความร้อนกับท่อทองแดงไปนั้นกว่าสารภายในระบบจะถึงสภาวะสมดุลใช้ระยะเวลาที่นาน

### 5.2.2 วิธีการแก้ปัญหา

#### 5.2.2.1 ใช้การอุปมานอุณหภูมิของสาร

จากปัญหาข้อที่ 5.2.1.1 ที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็น R134a โดยตรง แก้ปัญหา โดยการวัดอุณหภูมิจากผิวท่อทองแดงโดยการอุปมานว่าอุณหภูมิของสารเท่ากับอุณหภูมิของท่อ ณ จุดนั้น แต่วิธีการนี้อาจจะไม่ได้ค่าที่ตรงตามอุณหภูมิภายในของสารแต่สามารถทำได้เช่นกัน ซึ่งมีค่าความคาดเคลื่อนประมาณ  $\pm 1.5\%$

#### 5.2.2.2 การใช้ค่าความดันแตกต่างระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil

จากปัญหาข้อที่ 5.2.1.2 ที่ไม่มีอุปกรณ์วัดความเร็วของสารได้โดยตรง โดยการวัดความดันแตกต่างระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil. เพื่อนำมาอุปมานได้ว่า

เมื่อสองฝั่งเกิดความดันแตกต่างกันนั้นหมายความว่าสารเกิดการไหลจาก Evaporator coil ไป Condensing coil แต่ไม่สามารถคำนวณออกมาเป็นตัวเลขได้โดยตรง

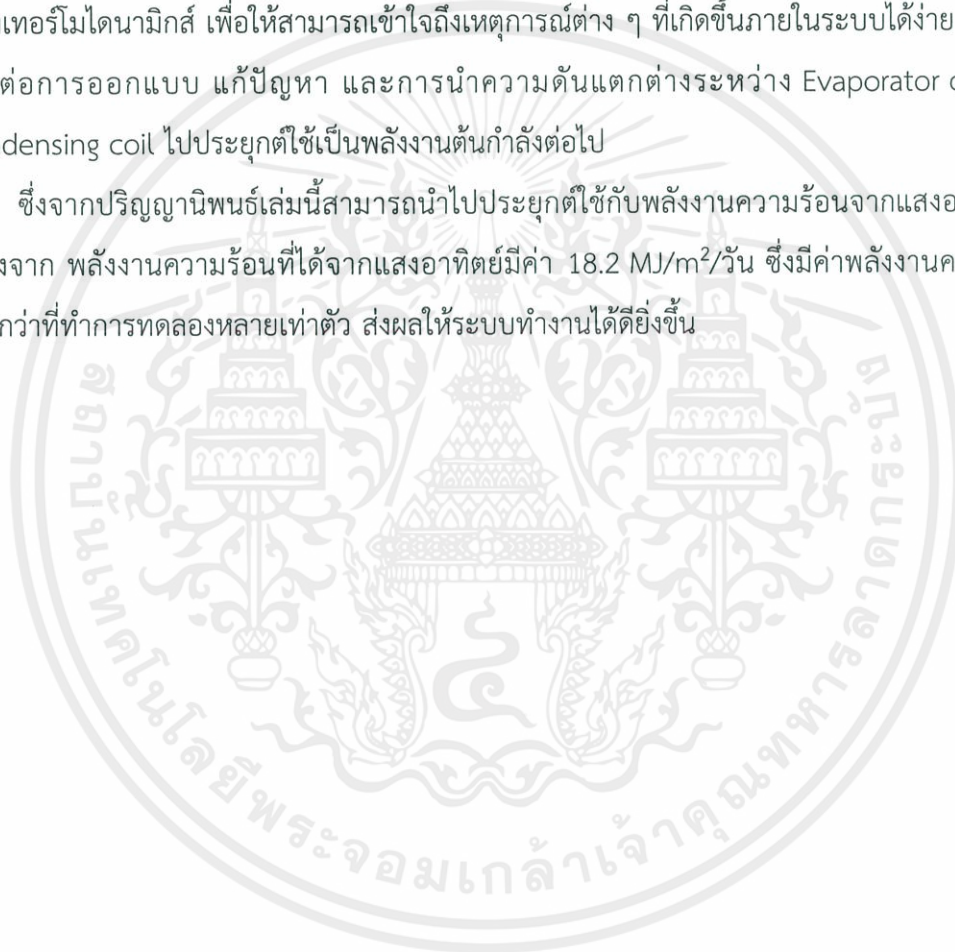
### 5.2.2.3 การควบคุมปริมาตร

จากปัญหาข้อที่ 5.2.1.3 ปริมาตรของสารในระบบเยอะเกินไป โดยทำการปิดวาล์วที่ถังเก็บสารทำความเย็น R134a ทั้งขาเข้าและขาออก ทำให้มีปริมาตรที่ใช้ทดลองลดลง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบระบบเทียบเคียงเรื่องต้นกำลังพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ควรมีพื้นฐานความรู้เรื่องเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ง่าย ส่งผลให้ง่ายต่อการออกแบบ แก้ปัญหา และการนำความดันแตกต่างระหว่าง Evaporator coil และ Condensing coil ไปประยุกต์ใช้เป็นพลังงานต้นกำลังต่อไป

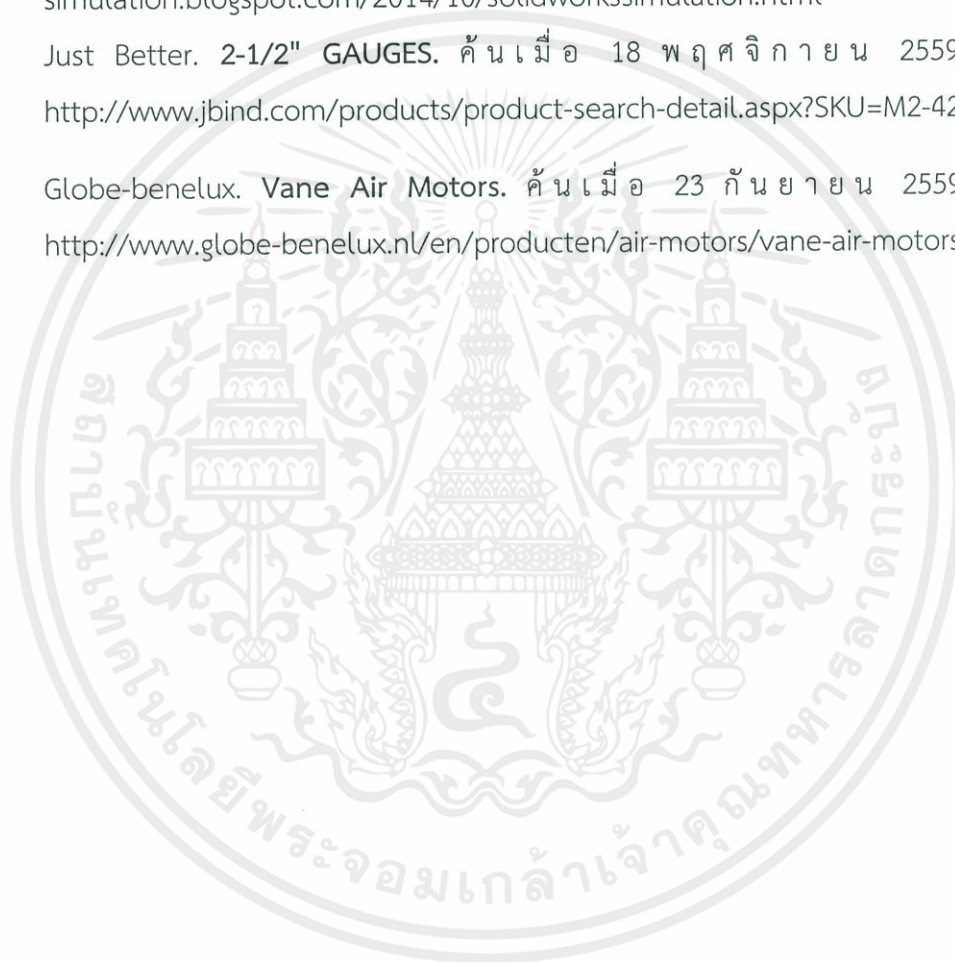
ซึ่งจากปริญญานิพนธ์เล่มนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ เนื่องจาก พลังงานความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์มีค่า  $18.2 \text{ MJ/m}^2/\text{วัน}$  ซึ่งมีค่าพลังงานความร้อนมากกว่าที่ทำการทดลองหลายเท่าตัว ส่งผลให้ระบบทำงานได้ดียิ่งขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] United States Department of Energy. PARABOLIC TROUGH SYSTEMS. ค้นเมื่อ 2 กันยายน 2559, จาก <https://energy.gov/eere/energybasics/articles/linear-concentrator-system-basics-concentrating-solar-power>
- [2] Yunus A.Cengel, และ Michael A.Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach / 7<sup>th</sup> edition. แปลโดย รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, และผศ.ดร.ขวัญจิต วงษ์ชารี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, 2554.
- [3] J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 2548
- [4] School of Engineering Bangkok University. Pure Substance. ค้นเมื่อ 6 กันยายน 2559, จาก <http://eng.bu.ac.th/File%20Thermodynamics/unit2.pdf>
- [5] Sounak Bhattacharjee. PROPERTIES OF PURE SUBSTANCE. ค้นเมื่อ 6 กันยายน 2559, จาก <http://sounak4u.weebly.com/properties-of-pure-substance.html>
- [6] iEnergyGuru. First Law of Thermodynamics. ค้นเมื่อ 14 กันยายน 2559, จาก <https://ienergyguru.com/2015/09/first-law-of-thermodynamics/>
- [7] Dummies. THE ADIABATIC PROCESS. ค้นเมื่อ 27 กันยายน 2559, จาก <http://www.dummies.com/education/science/physics/keeping-a-system-at-constant-heat-the-adiabatic-process/>
- [8] Jack P. Holman. Heat Transfer SI Unit. แปลโดย ผศ.ดร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2547.
- [9] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. เอลท์ลปี. ค้นเมื่อ 27 กันยายน 2559, จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry1/thermodynamics/enthalpy.htm>
- [10] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (ศว.). (2555). สารทำความเย็น (Refrigerant) คือสารประเภทใด มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร. ค้นเมื่อ 30 กันยายน 2559, จาก <https://www.mtec.or.th>

- [11] Erakll. Converting R1 2 to R1 3 4 a. ค้นเมื่อ 30 กันยายน 2559, จาก <http://www.erakii.org/th/80-automotive/97-converting-r12-to-r134a-ac-system.html>
- [12] ผศ.ดร. จตุรงค์ ลังกาพินิจ. คู่มือการใช้โปรแกรม SOLIDWORK ขั้นพื้นฐาน. ค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2559, จาก [https://wiki.stjohn.ac.th/sandbox/groups/poly\\_motorvehicles/wiki/bf3b9/attachments/](https://wiki.stjohn.ac.th/sandbox/groups/poly_motorvehicles/wiki/bf3b9/attachments/)
- [13] Simulation so easy. Solidwork. ค้นเมื่อ 7 ตุลาคม 2559, จาก <http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2014/10/solidworkssimulation.html>
- [14] Just Better. 2-1/2" GAUGES. ค้นเมื่อ 18 พฤศจิกายน 2559, จาก <http://www.jbind.com/products/product-search-detail.aspx?SKU=M2-420>
- [15] Globe-benelux. Vane Air Motors. ค้นเมื่อ 23 กันยายน 2559, จาก <http://www.globe-benelux.nl/en/producten/air-motors/vane-air-motors/>





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid		Vapor		Liquid		Vapor	
		Density (kg/m <sup>3</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Entropy (kJ/kg-K)		
-100	0.005594	1582.4	0.039694	75.362	336.85	0.4354	1.9456		
-99	0.0062222	1579.7	0.043901	76.547	337.44	0.44222	1.9403		
-98	0.0069109	1577.1	0.048487	77.731	338.02	0.449	1.9351		
-97	0.007665	1574.5	0.053477	78.916	338.61	0.45575	1.93		
-96	0.0084895	1571.8	0.058902	80.102	339.19	0.46246	1.925		
-95	0.0093899	1569.1	0.06479	81.288	339.78	0.46913	1.9201		
-94	0.010372	1566.5	0.071174	82.474	340.38	0.47578	1.9154		
-93	0.011441	1563.8	0.078087	83.661	340.97	0.48238	1.9107		
-92	0.012605	1561.2	0.085563	84.849	341.56	0.48896	1.9061		
-91	0.013869	1558.5	0.09364	86.037	342.16	0.4955	1.9016		
-90	0.015241	1555.8	0.10236	87.226	342.76	0.50201	1.8972		
-89	0.016728	1553.2	0.11175	88.415	343.36	0.50848	1.8929		
-88	0.018338	1550.5	0.12186	89.606	343.96	0.51493	1.8887		
-87	0.020079	1547.8	0.13274	90.797	344.56	0.52134	1.8846		
-86	0.02196	1545.1	0.14443	91.989	345.17	0.52773	1.8805		
-85	0.02399	1542.5	0.15697	93.182	345.77	0.53409	1.8766		
-84	0.026178	1539.8	0.17042	94.376	346.38	0.54041	1.8727		
-83	0.028535	1537.1	0.18482	95.57	346.99	0.54671	1.8689		
-82	0.03107	1534.4	0.20023	96.766	347.6	0.55298	1.8652		
-81	0.033794	1531.7	0.2167	97.963	348.21	0.55923	1.8616		
-80	0.036719	1529	0.23429	99.161	348.83	0.56544	1.858		
-79	0.039856	1526.3	0.25306	100.36	349.44	0.57163	1.8546		
-78	0.043217	1523.6	0.27307	101.56	350.06	0.5778	1.8512		
-77	0.046816	1520.9	0.29438	102.76	350.67	0.58393	1.8478		
-76	0.050665	1518.2	0.31705	103.96	351.29	0.59004	1.8446		
-75	0.054777	1515.5	0.34116	105.17	351.91	0.59613	1.8414		
-74	0.059168	1512.8	0.36677	106.37	352.53	0.60219	1.8382		
-73	0.063851	1510.1	0.39395	107.58	353.15	0.60823	1.8352		
-72	0.068843	1507.3	0.42278	108.78	353.77	0.61424	1.8322		
-71	0.074158	1504.6	0.45333	109.99	354.4	0.62023	1.8293		
-70	0.079814	1501.9	0.48568	111.2	355.02	0.62619	1.8264		
-69	0.085826	1499.1	0.51991	112.41	355.65	0.63214	1.8236		
-68	0.092213	1496.4	0.5561	113.62	356.27	0.63806	1.8209		
-67	0.098992	1493.7	0.59433	114.83	356.9	0.64395	1.8182		
-66	0.10618	1490.9	0.6347	116.05	357.53	0.64983	1.8155		
-65	0.1138	1488.2	0.67728	117.26	358.16	0.65568	1.813		
-64	0.12187	1485.4	0.72218	118.48	358.79	0.66151	1.8105		
-63	0.13041	1482.6	0.76947	119.7	359.42	0.66732	1.808		
-62	0.13944	1479.9	0.81927	120.92	360.05	0.67311	1.8056		
-61	0.14899	1477.1	0.87167	122.14	360.68	0.67887	1.8033		
-60	0.15906	1474.3	0.92676	123.36	361.31	0.68462	1.801		
-59	0.1697	1471.6	0.98465	124.59	361.94	0.69035	1.7987		
-58	0.18091	1468.8	1.0454	125.81	362.58	0.69605	1.7965		
-57	0.19273	1466	1.1092	127.04	363.21	0.70174	1.7944		
-56	0.20518	1463.2	1.1762	128.27	363.84	0.70741	1.7922		
-55	0.21828	1460.4	1.2463	129.5	364.48	0.71305	1.7902		
-54	0.23206	1457.6	1.3198	130.73	365.11	0.71868	1.7882		
-53	0.24655	1454.8	1.3968	131.96	365.75	0.72429	1.7862		
-52	0.26176	1452	1.4773	133.2	366.38	0.72988	1.7843		
-51	0.27774	1449.1	1.5616	134.44	367.02	0.73546	1.7824		
-50	0.29451	1446.3	1.6496	135.67	367.65	0.74101	1.7806		
-49	0.31209	1443.5	1.7416	136.91	368.29	0.74655	1.7788		
-48	0.33051	1440.6	1.8377	138.15	368.92	0.75207	1.777		
-47	0.34982	1437.8	1.938	139.4	369.56	0.75757	1.7753		
-46	0.37003	1434.9	2.0427	140.64	370.19	0.76305	1.7736		
-45	0.39117	1432.1	2.1518	141.89	370.83	0.76852	1.772		
-44	0.41329	1429.2	2.2655	143.14	371.46	0.77397	1.7704		
-43	0.4364	1426.4	2.384	144.39	372.1	0.77941	1.7688		
-42	0.46055	1423.5	2.5074	145.64	372.73	0.78482	1.7673		
-41	0.48577	1420.6	2.6359	146.89	373.37	0.79023	1.7658		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
		Density (kg/m <sup>3</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Entropy (kJ/kg-K)
-40	0.51209	1417.7	2.7695	148.14	374	0.79561	1.7643
-39	0.53955	1414.8	2.9085	149.4	374.64	0.80098	1.7629
-38	0.56817	1411.9	3.0529	150.66	375.27	0.80633	1.7615
-37	0.59801	1409	3.2031	151.92	375.9	0.81167	1.7602
-36	0.62908	1406.1	3.359	153.18	376.54	0.817	1.7588
-35	0.66144	1403.1	3.5209	154.44	377.17	0.8223	1.7575
-34	0.69512	1400.2	3.689	155.71	377.8	0.8276	1.7563
-33	0.73015	1397.3	3.8633	156.98	378.43	0.83288	1.755
-32	0.76658	1394.3	4.0441	158.25	379.06	0.83814	1.7538
-31	0.80444	1391.4	4.2316	159.52	379.69	0.84339	1.7526
-30	0.84378	1388.4	4.4259	160.79	380.32	0.84863	1.7515
-29	0.88463	1385.4	4.6271	162.07	380.95	0.85385	1.7503
-28	0.92703	1382.4	4.8356	163.34	381.57	0.85906	1.7492
-27	0.97104	1379.5	5.0514	164.62	382.2	0.86425	1.7482
-26	1.0167	1376.5	5.2748	165.9	382.82	0.86943	1.7471
-25	1.064	1373.4	5.5059	167.19	383.45	0.8746	1.7461
-24	1.113	1370.4	5.745	168.47	384.07	0.87975	1.7451
-23	1.1639	1367.4	5.9922	169.76	384.69	0.8849	1.7441
-22	1.2165	1364.4	6.2477	171.05	385.32	0.89002	1.7432
-21	1.271	1361.3	6.5117	172.34	385.94	0.89514	1.7422
-20	1.3273	1358.3	6.7845	173.64	386.55	0.90025	1.7413
-19	1.3857	1355.2	7.0662	174.93	387.17	0.90534	1.7404
-18	1.446	1352.1	7.3571	176.23	387.79	0.91042	1.7396
-17	1.5084	1349	7.6574	177.53	388.4	0.91549	1.7387
-16	1.5728	1345.9	7.9673	178.83	389.02	0.92054	1.7379
-15	1.6394	1342.8	8.287	180.14	389.63	0.92559	1.7371
-14	1.7082	1339.7	8.6168	181.44	390.24	0.93062	1.7363
-13	1.7792	1336.6	8.9568	182.75	390.85	0.93564	1.7355
-12	1.8524	1333.4	9.3074	184.07	391.46	0.94066	1.7348
-11	1.928	1330.3	9.6688	185.38	392.06	0.94566	1.7341
-10	2.006	1327.1	10.041	186.7	392.66	0.95065	1.7334
-9	2.0864	1323.9	10.425	188.02	393.27	0.95563	1.7327
-8	2.1693	1320.8	10.82	189.34	393.87	0.9606	1.732
-7	2.2548	1317.6	11.227	190.66	394.47	0.96556	1.7313
-6	2.3428	1314.3	11.646	191.99	395.06	0.97051	1.7307
-5	2.4334	1311.1	12.077	193.32	395.66	0.97544	1.73
-4	2.5268	1307.9	12.521	194.65	396.25	0.98037	1.7294
-3	2.6228	1304.6	12.978	195.98	396.84	0.98529	1.7288
-2	2.7217	1301.4	13.448	197.32	397.43	0.99021	1.7282
-1	2.8234	1298.1	13.931	198.66	398.02	0.99511	1.7276
0	2.928	1294.8	14.428	200	398.6	1	1.7271
1	3.0356	1291.5	14.939	201.34	399.19	1.0049	1.7265
2	3.1462	1288.1	15.465	202.69	399.77	1.0098	1.726
3	3.2598	1284.8	16.005	204.04	400.34	1.0146	1.7255
4	3.3766	1281.4	16.56	205.4	400.92	1.0195	1.725
5	3.4966	1278.1	17.131	206.75	401.49	1.0243	1.7245
6	3.6198	1274.7	17.717	208.11	402.06	1.0292	1.724
7	3.7463	1271.3	18.319	209.47	402.63	1.034	1.7235
8	3.8761	1267.9	18.938	210.84	403.2	1.0388	1.723
9	4.0094	1264.4	19.573	212.21	403.76	1.0437	1.7226
10	4.1461	1261	20.226	213.58	404.32	1.0485	1.7221
11	4.2863	1257.5	20.896	214.95	404.88	1.0533	1.7217
12	4.4301	1254	21.584	216.33	405.43	1.0581	1.7212
13	4.5776	1250.5	22.29	217.71	405.98	1.0629	1.7208
14	4.7288	1246.9	23.015	219.09	406.53	1.0677	1.7204
15	4.8837	1243.4	23.758	220.48	407.07	1.0724	1.72
16	5.0425	1239.8	24.522	221.87	407.61	1.0772	1.7196
17	5.2052	1236.2	25.305	223.26	408.15	1.082	1.7192
18	5.3718	1232.6	26.109	224.66	408.69	1.0867	1.7188
19	5.5424	1229	26.934	226.06	409.22	1.0915	1.7184

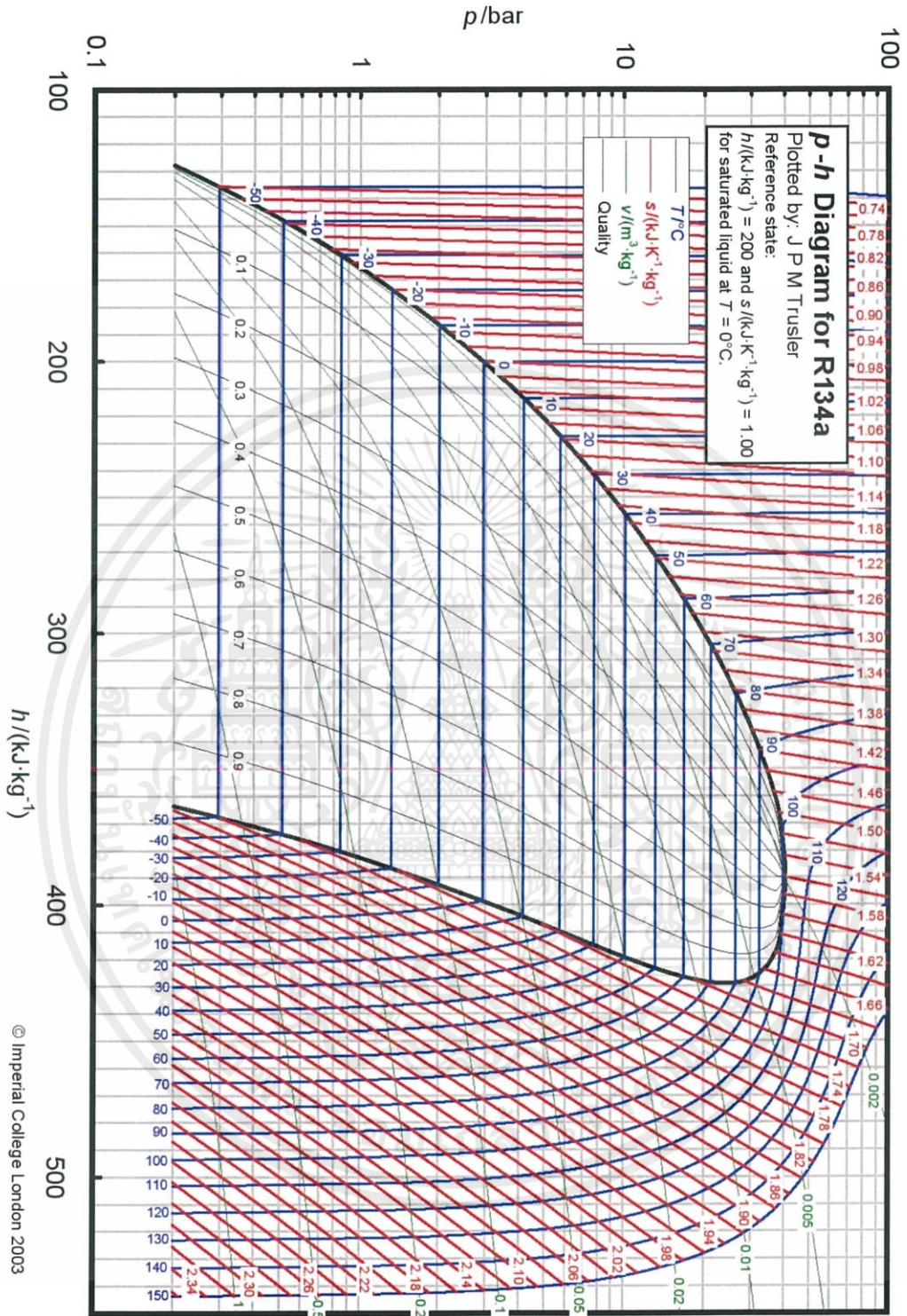
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid Density (kg/m <sup>3</sup> )	Vapor Density (kg/m <sup>3</sup> )	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
20	5.7171	1225.3	27.78	227.47	409.75	1.0962	1.718
21	5.8959	1221.7	28.648	228.88	410.27	1.101	1.7177
22	6.0789	1218	29.539	230.29	410.79	1.1057	1.7173
23	6.2662	1214.2	30.452	231.7	411.31	1.1105	1.7169
24	6.4578	1210.5	31.389	233.12	411.82	1.1152	1.7166
25	6.6538	1206.7	32.35	234.55	412.33	1.1199	1.7162
26	6.8543	1202.9	33.335	235.97	412.84	1.1246	1.7159
27	7.0592	1199.1	34.346	237.4	413.34	1.1294	1.7155
28	7.2688	1195.2	35.382	238.84	413.84	1.1341	1.7152
29	7.483	1191.4	36.445	240.28	414.33	1.1388	1.7148
30	7.702	1187.5	37.535	241.72	414.82	1.1435	1.7145
31	7.9257	1183.5	38.653	243.17	415.3	1.1482	1.7142
32	8.1543	1179.6	39.799	244.62	415.78	1.1529	1.7138
33	8.3878	1175.6	40.974	246.08	416.26	1.1576	1.7135
34	8.6263	1171.6	42.18	247.54	416.72	1.1623	1.7131
35	8.8698	1167.5	43.416	249.01	417.19	1.167	1.7128
36	9.1185	1163.4	44.683	250.48	417.65	1.1717	1.7124
37	9.3724	1159.3	45.983	251.95	418.1	1.1764	1.7121
38	9.6315	1155.1	47.316	253.43	418.55	1.1811	1.7118
39	9.896	1151	48.683	254.92	418.99	1.1858	1.7114
40	10.166	1146.7	50.085	256.41	419.43	1.1905	1.7111
41	10.441	1142.5	51.523	257.91	419.86	1.1952	1.7107
42	10.722	1138.2	52.996	259.41	420.28	1.1999	1.7103
43	11.009	1133.8	54.512	260.91	420.7	1.2046	1.71
44	11.301	1129.5	56.064	262.43	421.11	1.2092	1.7096
45	11.599	1125.1	57.657	263.94	421.52	1.2139	1.7092
46	11.903	1120.6	59.292	265.47	421.92	1.2186	1.7089
47	12.213	1116.1	60.969	267	422.31	1.2233	1.7085
48	12.529	1111.5	62.69	268.53	422.69	1.228	1.7081
49	12.851	1106.9	64.458	270.07	423.07	1.2327	1.7077
50	13.179	1102.3	66.272	271.62	423.44	1.2375	1.7072
51	13.513	1097.6	68.134	273.18	423.8	1.2422	1.7068
52	13.854	1092.9	70.047	274.74	424.15	1.2469	1.7064
53	14.201	1088.1	72.012	276.31	424.49	1.2516	1.7059
54	14.555	1083.2	74.03	277.89	424.83	1.2563	1.7055
55	14.915	1078.3	76.104	279.47	425.15	1.2611	1.705
56	15.282	1073.4	78.235	281.06	425.47	1.2658	1.7045
57	15.656	1068.3	80.426	282.66	425.77	1.2705	1.704
58	16.036	1063.2	82.679	284.27	426.07	1.2753	1.7035
59	16.423	1058.1	84.996	285.88	426.36	1.2801	1.703
60	16.818	1052.9	87.379	287.5	426.63	1.2848	1.7024
61	17.219	1047.6	89.832	289.14	426.89	1.2896	1.7019
62	17.628	1042.2	92.358	290.78	427.14	1.2944	1.7013
63	18.044	1036.8	94.958	292.43	427.38	1.2992	1.7006
64	18.467	1031.2	97.637	294.09	427.61	1.304	1.7
65	18.898	1025.6	100.4	295.76	427.82	1.3088	1.6993
66	19.337	1020	103.24	297.44	428.02	1.3137	1.6987
67	19.783	1014.2	106.18	299.14	428.2	1.3185	1.6979
68	20.237	1008.3	109.21	300.84	428.36	1.3234	1.6972
69	20.698	1002.3	112.34	302.55	428.52	1.3283	1.6964
70	21.168	996.25	115.57	304.28	428.65	1.3332	1.6956
71	21.646	990.06	118.91	306.02	428.77	1.3381	1.6948
72	22.132	983.76	122.37	307.78	428.86	1.343	1.6939
73	22.627	977.33	125.95	309.55	428.94	1.348	1.6929
74	23.13	970.78	129.65	311.33	429	1.353	1.692
75	23.641	964.09	133.49	313.13	429.03	1.358	1.6909
76	24.161	957.25	137.48	314.94	429.04	1.3631	1.6899
77	24.69	950.26	141.62	316.78	429.03	1.3682	1.6887
78	25.228	943.1	145.93	318.63	428.98	1.3733	1.6876
79	25.776	935.77	150.41	320.5	428.91	1.3784	1.6863

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

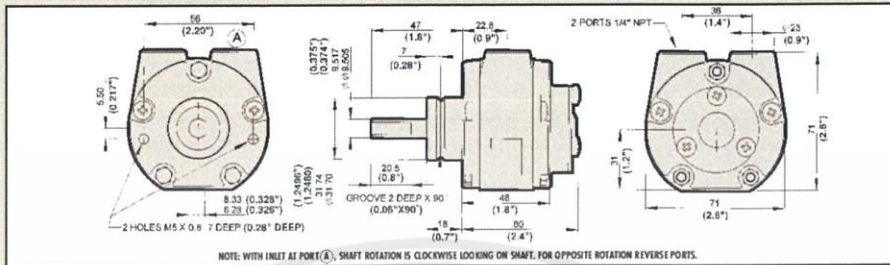
Temperature (°C)	Pressure (bar)	Liquid Density (kg/m <sup>3</sup> )	Vapor Density (kg/m <sup>3</sup> )	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
80	26.332	928.24	155.08	322.39	428.81	1.3836	1.685
81	26.898	920.51	159.95	324.3	428.68	1.3889	1.6836
82	27.473	912.56	165.05	326.24	428.51	1.3942	1.6821
83	28.058	904.37	170.38	328.21	428.3	1.3995	1.6806
84	28.653	895.91	175.97	330.2	428.05	1.4049	1.6789
85	29.258	887.16	181.85	332.22	427.76	1.4104	1.6771
86	29.874	878.1	188.05	334.28	427.42	1.4159	1.6752
87	30.499	868.68	194.59	336.38	427.02	1.4215	1.6732
88	31.136	858.86	201.52	338.51	426.55	1.4273	1.671
89	31.783	848.6	208.89	340.69	426.02	1.4331	1.6687
90	32.442	837.83	216.76	342.93	425.42	1.439	1.6662
91	33.112	826.47	225.2	345.22	424.72	1.4451	1.6634
92	33.793	814.43	234.31	347.59	423.92	1.4514	1.6604
93	34.487	801.58	244.22	350.03	422.99	1.4578	1.6571
94	35.193	787.75	255.08	352.58	421.92	1.4645	1.6534
95	35.912	772.7	267.14	355.25	420.67	1.4715	1.6492
96	36.645	756.09	280.73	358.07	419.18	1.4789	1.6445
97	37.391	737.34	296.41	361.12	417.39	1.4869	1.6389
98	38.152	715.51	315.13	364.47	415.14	1.4957	1.6322
99	38.929	688.6	338.85	368.34	412.16	1.5058	1.6235
100	39.724	651.18	373.01	373.3	407.68	1.5188	1.6109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DIMENSIONS V1



## PERFORMANCE V1 0 - 0.6 HP/0.44 kW REVERSIBLE

