

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประหยัดพลังงานในเครื่องทำน้ำแข็ง

ENERGY SAVING FOR ICE MAKER



T110941



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **110941**  
วัน,เดือน,ปี..... 7 S.A. 2553

|        |
|--------|
| b..... |
| i..... |

ปฏิญานีพจนันนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ENERGY SAVING FOR ICE MAKER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

ACADEMIC YEAR 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การประหยัดพลังงานในเครื่องทำน้ำแข็ง  
ENERGY SAVING FOR ICE MAKER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายกฤตยศ อริญญามิตานนท์ รหัสนักศึกษา 49010015  
นายจักรกฤษ เนติศุภลักษณ์ รหัสนักศึกษา 49010105  
นายณัฐพงศ์ ประสงค์ รหัสนักศึกษา 49010251

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม  
ปีการศึกษา 2552

|                          |  |
|--------------------------|--|
| อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท | ลายมือชื่อ   |
| ผศ.เชื้อ นกอยู่          |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์      การประหยัดพลังงานในเครื่องทำน้ำแข็ง  
ENERGY SAVING FOR ICE MAKER

|                  |            |                |              |          |
|------------------|------------|----------------|--------------|----------|
| นักศึกษาผู้จัดทำ | นายกฤตยศ   | อรัญญามิตานนท์ | รหัสนักศึกษา | 49010015 |
|                  | นายจักรกฤษ | เนติศุภลักษณ์  | รหัสนักศึกษา | 49010105 |
|                  | นายณัฐพงศ์ | ประสงค์        | รหัสนักศึกษา | 49010251 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.เชื้อ   | นกออยู่        |              |          |
| ปีการศึกษา       | 2552       |                |              |          |

**บทคัดย่อ**

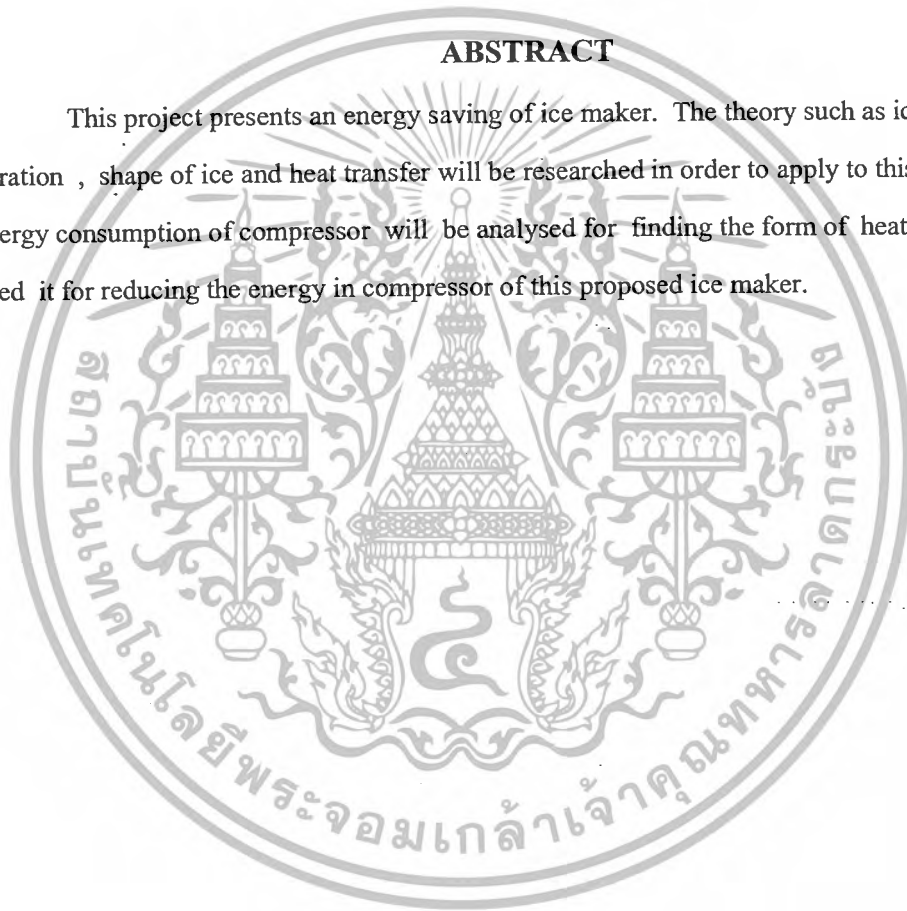
วัตถุประสงค์ของการศึกษาโครงการนี้คือ การศึกษาวิจัยการใช้พลังงานในการผลิตน้ำแข็ง โดยศึกษาทฤษฎีการทำงานของเครื่องทำน้ำแข็ง ระบบการทำความเย็น รูปทรงของน้ำแข็ง ตลอดจน ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ เพื่อนำมาหารูปแบบ การถ่ายเทความร้อนของการทำน้ำแข็งที่เหมาะสมกับระบบ แล้วนำรูปแบบที่ได้ไปศึกษาคำนวณการ ปรับลดการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ในขณะดำเนินกระบวนการผลิตน้ำแข็ง



|                       |                             |               |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| <b>Thesis Title</b>   | Energy Saving For Ice maker |               |
| <b>Authors</b>        | Mr. Kitayote                | Aranyamitanon |
|                       | Mr. Jukkit                  | Netisupaluk   |
|                       | Mr. Nattapong               | Prasong       |
| <b>Thesis Advisor</b> | Asst.Prof. Chuae            | Nokyoo        |
| <b>Year</b>           | 2009                        |               |

### ABSTRACT

This project presents an energy saving of ice maker. The theory such as ice maker, refrigeration , shape of ice and heat transfer will be researched in order to apply to this project . The energy consumption of compressor will be analysed for finding the form of heat transfer , and used it for reducing the energy in compressor of this proposed ice maker.



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความร่วมมือและได้รับการช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่ายและได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เชื้อ นกอยู่ ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความรู้มาโดยตลอด อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ ห้องทำงาน และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำปริญญาานิพนธ์

และขอขอบคุณ นายธนวุฒิ รุ่งรัมย์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่คอยช่วยเหลือทางด้านเทคนิค รวมทั้งเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมรุ่นที่ 29 ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาและเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ คุณความดีที่ได้จากการทำปริญญาานิพนธ์ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งคณะครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

|   | หน้า     |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                      | I        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                   | II       |
| กิตติกรรมประกาศ.....                      | III      |
| สารบัญ.....                               | IV       |
| สารบัญตาราง.....                          | VIII     |
| สารบัญรูป.....                            | IX       |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>                  | <b>1</b> |
| 1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....             | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....          | 1        |
| 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....                | 1        |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....                  | 1        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎี.....</b>                 | <b>3</b> |
| 2.1 กล่าวนำ.....                          | 3        |
| 2.2 ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ.....          | 3        |
| 2.3 อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ..... | 4        |
| 2.3.1 อีวาโปเรเตอร์.....                  | 4        |
| 2.3.1.1 แบบเปลือย.....                    | 4        |
| 2.3.1.2 แบบแผ่น.....                      | 5        |
| 2.3.1.3 แบบครีป.....                      | 5        |
| 2.3.1.4 แบบซิลเลอร์.....                  | 6        |
| 2.3.1.5 อีวาโปเรเตอร์แบบกึ่งเปียก.....    | 6        |
| 2.3.1.6 อีวาโปเรเตอร์แบบเปียก.....        | 7        |
| 2.3.2 คอมเพรสเซอร์.....                   | 8        |
| 2.3.2.1 แบบเปิด.....                      | 8        |
| 2.3.2.2 แบบปิด.....                       | 8        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.3.3 คอนเดนเซอร์.....  | 9    |
| 2.3.3.1 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ.....                            | 9    |
| 2.3.3.2 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ.....                              | 10   |
| 2.3.3.3 คอนเดนเซอร์ที่อาศัยหลักการระเหยของน้ำ.....                        | 11   |
| 2.3.4 ถังเก็บน้ำยา.....   | 11   |
| 2.3.5 วาล์วควบคุมความดัน.....   | 11   |
| 2.3.5.1 ท่อแคปพิลารี.....   | 11   |
| 2.3.5.2 วาล์วขยายตัวปรับด้วยมือ.....                                      | 12   |
| 2.3.5.3 วาล์วขยายตัวทำงานด้วยอุณหภูมิ.....                                | 12   |
| 2.3.5.4 วาล์วลูกกลอยความดันต่ำ.....                                       | 13   |
| 2.3.5.5 วาล์วลูกกลอยความดันสูง.....                                       | 14   |
| 2.3.6 สารทำความเย็น.....  | 15   |
| 2.3.6.1 การเลือกใช้สารทำความเย็น.....                                     | 16   |
| 2.3.7 อุปกรณ์เสริม.....   | 17   |
| 2.4 การทำงานของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ.....                               | 18   |
| 2.5 การวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็นชนิดอัดไอ.....                         | 22   |
| 2.5.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor).....                                      | 24   |
| 2.5.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser).....  | 25   |
| 2.5.3 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Expansion Valve).....                         | 25   |
| 2.5.4 อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator).....                                     | 25   |
| 2.5.5 ประสิทธิภาพการทำทำความเย็น (Coefficient of Performance : COP )..... | 25   |
| 2.5.6 ความสามารถในการทำความเย็น.....                                      | 26   |
| 2.5.7 อัตราการไหลโดยปริมาตรของสารทำความเย็น.....                          | 26   |
| 2.5.8 ความสามารถของคอมเพรสเซอร์ (Compressor capacity).....                | 26   |
| 2.6 การถ่ายเทความร้อน.....  | 27   |
| 2.6.1 การนำความร้อน.....  | 27   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| 2.6.2 การพาความร้อน.....                                   | 28        |
| 2.6.3 การแผ่รังสีความร้อน.....                             | 31        |
| 2.6.4 การนำความร้อนในสถานะสมำเสมอหนึ่งมิติ.....            | 32        |
| 2.6.5 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่นระบบ (พิกัดฉาก) .....       | 33        |
| 2.6.5.1 การวิเคราะห์การนำความร้อนผ่านชั้นตัวกลาง.....      | 35        |
| 2.6.5.2 ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง..... | 36        |
| <b>บทที่ 3 การออกแบบ.....</b>                              | <b>39</b> |
| 3.1 กล่าวนำ.....   | 39        |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                           | 39        |
| 3.2.1 คอมเพรสเซอร์ (compressor).....                       | 40        |
| 3.2.2 คอนเดนเซอร์ (condenser).....                         | 42        |
| 3.2.3 อีวาโปรเตอร์ (evaporator) .....                      | 42        |
| 3.2.3.1 การคำนวณขนาดท่อทองแดง.....                         | 43        |
| 3.2.3.2 ชองน้ำแข็ง.....                                    | 44        |
| 3.2.4 วาล์วควบคุมการไหล (Expansion Valve) .....            | 46        |
| 3.2.5 สารทำความเย็น (Refrigerant) .....                    | 48        |
| 3.2.5 ถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) .....                   | 48        |
| 3.3 ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน.....                        | 49        |
| 3.3.1 อันตรายที่เกิดจากสารทำความเย็น.....                  | 49        |
| 3.3.2 อันตรายที่เกิดจากถังความดัน.....                     | 50        |
| 3.3.3 อันตรายที่เกิดจากการใช้ไฟฟ้า.....                    | 51        |
| 3.4 เครื่องมือบริการ.....                                  | 53        |
| 3.4.1 เกจแมนิโฟลด์.....                                    | 53        |
| 3.4.2 วาล์วบริการ.....                                     | 55        |
| 3.4.3 เครื่องทำสูญญากาศ.....                               | 55        |
| 3.4.4 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า.....                           | 56        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า       |
|---|------------|
| 3.4.4.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....                                    | 56         |
| 3.4.4.2 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า.....                                  | 57         |
| 3.4.5 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า.....                                     | 59         |
| 3.4.6 อินเวอร์เตอร์ .....   | 60         |
| 3.5 การออกแบบวิธีประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำแข็ง.....               | 61         |
| 3.5.1 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากห้องทำน้ำแข็ง.....                | 61         |
| 3.5.2 การหาความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ..... | 65         |
| <b>บทที่ 4 การทดลอง.....</b>  | <b>69</b>  |
| 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                                      | 69         |
| 4.2 ลำดับขั้นเตรียมการทดลอง.....                                      | 69         |
| 4.3 การปรับความถี่.....   | 70         |
| 4.4 ขั้นตอนการทดลองในการถี่ที่ 1.....                                 | 70         |
| 4.5 ผลการทดลองในการถี่ที่ 1 .....                                     | 74         |
| 4.6 ขั้นตอนการทดลองในการถี่ที่ 2.....                                 | 78         |
| 4.7 ผลการทดลองในการถี่ที่ 2 .....                                     | 79         |
| 4.8 ขั้นตอนการทดลองในการถี่ที่ 3.....                                 | 84         |
| 4.9 ผลการทดลองในการถี่ที่ 3.....                                      | 85         |
| <b>บทที่ 5 สรุปการวิจัยและเสนอแนะ.....</b>                            | <b>102</b> |
| <b>บรรณานุกรม.....</b>  | <b>103</b> |
| <b>ภาคผนวก.....</b>   | <b>104</b> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....  | 30   |
| 2.2 ค่าความดันสัมพัทธ์ของโลหะชนิดต่าง ๆ.....   | 37   |
| 2.3 ค่าความต้านทาน ของตัวกลางชนิดต่าง ๆ.....   | 38   |
| 3.1 ข้อมูลของคอมเพรสเซอร์ Huayi AES25DS.....   | 41   |
| 3.2 การเลือกขนาดและความยาวของท่อแคปพิลารี.....   | 46   |
| 3.3 แสดงคุณสมบัติของ TEV ของ Danfoss THER.EXP.VALVE TN2 R-134a.....  | 47   |
| 3.4 แสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านร่างกาย.....   | 52   |
| 3.5 คุณสมบัติของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า FLUKE 41B.....  | 58   |
| 4.1 เวลาในช่วงเช้าทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....   | 74   |
| 4.2 เวลาในช่วงกลางวันทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....  | 75   |
| 4.3 เวลาในช่วงเย็นทดลองที่ความถี่ 50 Hz.....   | 76   |
| 4.4 ปรับความถี่ที่ 50 Hz.....  | 79   |
| 4.5 ปรับความถี่ที่ 45 Hz.....  | 80   |
| 4.6 ปรับความถี่ที่ 40 Hz.....  | 81   |
| 4.7 ปรับความถี่ที่ 35 Hz.....  | 82   |
| 4.8 ความถี่ที่ 50 Hz ยังไม่ได้ทำการปรับลดความถี่.....  | 85   |
| 4.9 R-134a ร้อนยิ่งยวด.....  | 93   |
| 4.10 R-134a อิมตัว.....  | 95   |
| 4.11 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนกับความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร<br>จากการทดลองที่ 4.8.....              | 96   |
| 4.12 เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลเดิมกับอัตราการไหลใหม่ ( $m_n$ ) และความถี่ที่จะทำการ<br>ปรับลดให้กับคอมเพรสเซอร์..... | 98   |
| 4.13 ปรับความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น.....  | 99   |

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แผนภาพระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ.....                             | 3    |
| 2.2 อีวาโปเรเตอร์แบบเปลือย.....                                    | 4    |
| 2.3 อีวาโปเรเตอร์แบบแผ่น.....                                      | 5    |
| 2.4 อีวาโปเรเตอร์แบบครีป.....                                      | 5    |
| 2.5 ซิลเลอร์ (ก) แบบเปียก (ข) แบบแห้ง.....                         | 6    |
| 2.6 อีวาโปเรเตอร์แบบกึ่งเปียก .....                                | 6    |
| 2.7 อีวาโปเรเตอร์แบบเปียก .....                                    | 7    |
| 2.8 คอมเพรสเซอร์แบบเปิด.....                                       | 8    |
| 2.9 คอมเพรสเซอร์แบบปิด.....  | 9    |
| 2.10 คอมเพรสเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ.....                       | 10   |
| 2.11 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ.....                          | 10   |
| 2.12 ถังเก็บน้ำยา.....   | 11   |
| 2.13 ท่อแคปพิลารี .....  | 12   |
| 2.14 วาล์วขยายตัวปรับด้วยมือ (Hand expansion valve).....           | 12   |
| 2.15 ลักษณะภายในและการใช้งาน วาล์วขยายตัวทำงานด้วยอุณหภูมิต่ำ..... | 13   |
| 2.16 วาล์วลูกกลอยความดันต่ำ.....                                   | 14   |
| 2.17 วาล์วลูกกลอยความดันสูง.....                                   | 14   |
| 2.18 โครงสร้างของสารทำความเย็นกลุ่มมีเทนและอีเทน.....              | 15   |
| 2.19 โครงสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในระบบ.....                | 17   |
| 2.20 วงจรน้ำยาของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....                       | 18   |
| 2.21 การระเหยของน้ำยาในห้องระเหย (อีวาโปเรเตอร์) .....             | 19   |
| 2.22 การให้ความร้อนยิ่งยวดกับไออัมตัว.....                         | 19   |
| 2.23 การอัดไออัมตัวในคอมเพรสเซอร์.....                             | 20   |
| 2.24 การระบายความร้อนของไอความร้อนยิ่งยวด.....                     | 20   |
| 2.25 การทำงานของคอนเดนเซอร์.....                                   | 21   |
| 2.26 น้ำยาเหลวและไอน้ำยาในถังรับน้ำยา.....                         | 21   |
| 2.27 การระบายความร้อนของน้ำยาเหลวที่ท่อของน้ำยาทำความเย็นเหลว..... | 22   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.28 แผนภาพมอลเลียร์ (mollier diagram).....  | 23   |
| 2.29 แผนภาพค่าความดัน-เอนโทรปี (P-h diagram).....  | 24   |
| 2.30 การนำความร้อนของวัตถุหนา L ที่อุณหภูมิที่ผิววงที่.....  | 28   |
| 2.31 การพาความร้อนในลักษณะต่างๆ.....   | 28   |
| 2.32 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า.....  | 32   |
| 2.33 เปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า.....   | 33   |
| 2.34 สมมูลระหว่างการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านผนังประกอบ.....                                  | 34   |
| 2.35 อุณหภูมิตัวกลางจะลดลงตรงบริเวณผิวรอยต่อ.....  | 36   |
| 3.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....  | 38   |
| 3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....  | 39   |
| 3.3 ลักษณะภายในและคอมเพรสเซอร์ยี่ห้อ Huayi รุ่น AES25DS.....                                       | 40   |
| 3.4 คอนเดนเซอร์ (Condenser) แบบท่อเหล็กเปลือย.....   | 41   |
| 3.5 อีวาโปเรเตอร์ แบบทองแดงเปลือย.....   | 42   |
| 3.6 วงจรท่อในระบบทำความเย็น.....   | 43   |
| 3.7 (ก) ขนาดของช่องใต้น้ำแข็ง (ข) ขนาดของช่องนอก (ค) ความหนาของท่อทองแดง<br>(ง) ห้องทำน้ำแข็ง..... | 44   |
| 3.8 ท่อแคปพิลารีหรือหลอดรูเล็ก.....  | 46   |
| 3.9 โครงสร้างภายในของ TEV.....   | 47   |
| 3.10 (ก) การติดตั้ง TEV (ข) การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ.....  | 48   |
| 3.11 สารทำความเย็น R-134a.....   | 48   |
| 3.12 ถังเก็บน้ำยาและการติดตั้งในระบบ.....  | 49   |
| 3.13 การเชื่อมต่อสายดิน.....   | 53   |
| 3.14 ส่วนประกอบต่างๆ ของเกจแมนิโฟลด์.....  | 54   |
| 3.15 การติดตั้งและการใช้งานเกจแมนิโฟลด์.....   | 54   |
| 3.16 วาล์วบริการ.....  | 55   |
| 3.17 เครื่องทำสุญญากาศ.....  | 56   |
| 3.18 หัววัดอุณหภูมิ FLUKE 80T-150U.....  | 56   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.19 การวัดอุณหภูมิของหัววัดอุณหภูมิ FLUKE 80T-150U .....   | 57   |
| 3.20 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า FLUKE 41B .....   | 58   |
| 3.21 การต่อเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า 1 เฟส.....  | 59   |
| 3.22 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า.....  | 59   |
| 3.23 อินเวอร์เตอร์.....   | 61   |
| 3.24 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่ใช้ออกแบบในห้องทำน้ำแข็ง.....   | 61   |
| 3.25 การเกิดน้ำแข็ง.....  | 63   |
| 3.26 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่ใช้ออกแบบในห้องทำน้ำแข็งในขณะที่เริ่มเกิดน้ำแข็ง.....   | 64   |
| 3.27 วัฏจักรทำความเย็นชนิดอัดไอ.....  | 65   |
| 4.1 (ก) ปริมาตรน้ำ 100 cc. ตวงจากบีกเกอร์ (ข) ชองทำน้ำแข็ง.....   | 65   |
| 4.2 วัดอุณหภูมิน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์.....   | 70   |
| 4.3 ที่ใช้ในการทำน้ำแข็งอ่านค่าได้จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า.....  | 71   |
| 4.4 (ก.) วัดวัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) ที่ใช้ในการเก็บค่าพลังงานและกระแสไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที<br>(ข.) เกจเติมน้ำยาใช้สำหรับวัดความดันที่จุด 1 และจุด 3 ของวัฏจักร<br>(ค.) อินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับใช้ควบคุมความถี่ที่ง่ายให้แก่คอมเพรสเซอร์ สามารถ<br>ปรับความถี่ได้โดยใช่มือหมุนที่ปุ่มทางด้านขวามือของปุ่ม “สต๊อป”<br>(ง.) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermo Couple) โดยต่ออยู่กับ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์<br>เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ใช้สำหรับวัดวัดอุณหภูมิที่จุด 1 และ 3 ของวัฏจักร..... | 72   |
| 4.5 การใช้เวอร์เนียในการวัดความหนาของน้ำแข็งแต่ละด้าน.....  | 73   |
| 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานของแต่ละช่วงเวลาที่ทดลอง.....   | 77   |
| 4.7 (ก) ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 45 Hz (ข) ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์<br>ไปที่ 40 Hz.....  | 78   |
| 4.8 กราฟแสดงค่าพลังงานของแต่ละช่วงความถี่ที่ปรับลดลง.....   | 83   |
| 4.9 อัตราการถ่ายเทความร้อนของชองน้ำแข็งในสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด.....   | 86   |
| 4.10 การทดลองขณะมีสถานะเป็นน้ำและการวัดความหนาแต่ด้าน.....  | 87   |
| 4.11 อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งในสถานะเป็นน้ำแข็งทั้งหมด.....   | 89   |
| 4.12 การทดลองขณะมีสถานะเป็นน้ำแข็งทั้งหมดและการวัดความหนาแต่ด้าน.....   | 89   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปรีญญานิพนธ์

เนื่องจากสภาวะอากาศของโลกปัจจุบันนี้มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังนั้นในการดำรงชีวิตของคนเราจึงมีการสรรหาสิ่งอำนวยความสะดวก ที่จะมาช่วยบรรเทาความร้อนจากอากาศที่เป็นอยู่ตามธรรมชาติ จึงได้มีการคิดค้นกรรมวิธีต่าง ๆ ที่จะช่วยในการลดอุณหภูมิของอากาศลง โดยมีน้ำเป็นสิ่งจำเป็นอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเราจะต้องใช้ในชีวิตประจำวัน เราจึงอาศัยน้ำมาเป็นตัวช่วยในการดับความร้อน ซึ่งปัจจุบันน้ำแข็งมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนเรามากไม่ว่าจะเป็นการใช้บริโภคในชีวิตประจำวัน ตลอดจนการทำอุตสาหกรรม การประมง จึงทำให้เกิดธุรกิจการผลิตน้ำแข็งขายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเครื่องทำน้ำแข็งจะมีรอบการทำงานที่คงที่ บางครั้งการทำน้ำแข็งอาจจะใช้เวลาไม่เท่ากันหรือเร็วกว่ากำหนด ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปอย่างเปล่าประโยชน์ ในการแช่น้ำแข็งไว้ในช่อง เราจึงศึกษากระบวนการเกิดน้ำแข็งและการถ่ายเทความร้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์กับพลังงานที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็ง เพื่อนำไปใช้ในการลดค่าพลังงานในการผลิตน้ำแข็ง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปรีญญานิพนธ์

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำความเย็นและเครื่องทำน้ำแข็ง
2. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอุณหพลศาสตร์
3. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการประหยัดพลังงาน
4. สามารถออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็น และเครื่องทำน้ำแข็งได้

### 1.3 ขอบเขตของปรีญญานิพนธ์

ในปรีญญานิพนธ์นี้จะเป็นการออกแบบและสร้างชุดเครื่องทำน้ำแข็งโดยใช้อุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาด และสามารถทดลองหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นและลดพลังงานในเครื่องทำน้ำแข็ง

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีการเกิดของน้ำแข็ง และคุณสมบัติของน้ำ เพื่อหาพฤติกรรมของน้ำเมื่อเกิดน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องทำความเย็น และเทอร์โมไดนามิกส์
3. ทำการออกแบบเครื่องทำน้ำแข็ง โดยใช้อุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาด
4. ทำการปรับปรุงเครื่องทำน้ำแข็งด้วยการคิดวาล์วควบคุมการไหล
5. เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงเครื่องทำน้ำแข็ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

## ทฤษฎี

### 2.1 กล่าวนำ

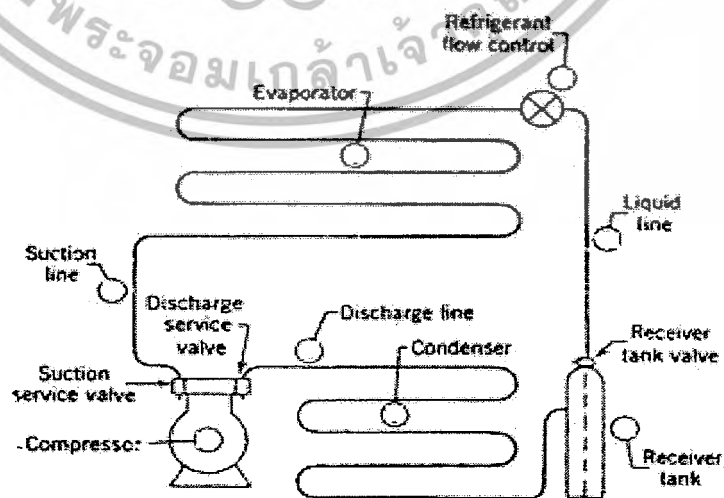
กระบวนการทำความเย็น (Refrigeration) หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็น การทำงานจะเป็นแบบวัฏจักรซึ่งจะเรียกว่า วัฏจักรการทำความเย็น (Refrigeration Cycle) โดยส่วนใหญ่เป็นระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ ซึ่งจะใช้สารทำความเย็นเป็นตัวกลางในการทำงาน โดยจะระเหยเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ และควบแน่นเป็นของเหลวสลับกัน อีกทั้งถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นในขณะที่มีสถานะเป็นไอ โดยมีอุปกรณ์ทำงานอย่างเป็นระบบเรียกว่า ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System)

### 2.2 ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System) ได้รับการออกแบบและถูกสร้างขึ้น โดยอาศัยหลักการเทอร์โมไดนามิกส์ดังนี้

- ของไหลดูดความร้อนได้ขณะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ
- ความร้อนจะไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ
- การเลือกโลหะที่ใช้ทำอีวาโปเรเตอร์จะต้องมีค่าการนำความร้อนสูง
- พลังงานความร้อนและในรูปแบบอื่น สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ ตามกฎข้อที่สอง

ของเทอร์โมไดนามิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 2.1 แผนภาพระบบทำความเย็นชนิดอัดไอนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

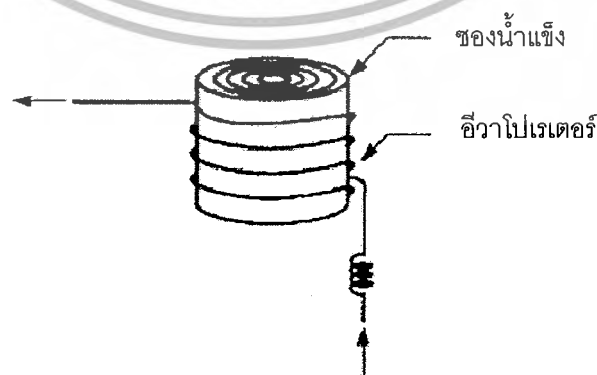
ในวัฏจักรทำความเย็นจะประกอบไปด้วย กระบวนการระเหยการควบแน่นและการหมุนเวียนของสารทำความเย็นในระบบอย่างสม่ำเสมอ การระเหยกลายเป็นไอของสารทำความเย็นเกิดขึ้นเมื่อสารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิต่ำ ส่วนการควบแน่นนั้นจะเกิดเมื่อมีความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งวงจรของระบบการทำความเย็นชนิดอัดไอ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ และมีหน้าที่สำคัญดังนี้

### 2.3.1 อีวาโปเรเตอร์

อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) ทำหน้าที่ดูดซับปริมาณความร้อนจากบริเวณที่ต้องการ โดยจะอาศัยการที่สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำ โดยดูดซับปริมาณความร้อนโดยรอบเอาไว้ ทำให้บริเวณที่ต้องการทำความเย็นนั้นมีอุณหภูมิลดลง เราสามารถจำแนกชนิดของอีวาโปเรเตอร์ ได้โดยแบ่งตามลักษณะทางกายภาพที่มีลักษณะภายนอกหรือวัสดุต่างกันดังนี้

#### 2.3.1.1 แบบเปลือย

อีวาโปเรเตอร์แบบเปลือย (Bar Tube) ส่วนใหญ่จะสร้างจากท่อทองแดงหรือท่อเหล็ก โดยท่อเหล็กจะใช้กับสารทำความเย็นแบบแอมโมเนีย เพราะทองแดงจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเหลว ทำให้ท่อทองแดงเกิดการสึกกร่อน และ มักจะใช้กับสารทำความเย็นขนาดเล็กสำหรับสารทำความเย็นชนิดอื่น ๆ มักจะใช้เป็นท่อทองแดง อีวาโปเรเตอร์แบบท่อเปลือยนี้มีหลายแบบหลายขนาดและมักจะใช้งานในแต่ละอย่างที่แตกต่างกันออกไป เช่น เครื่องน้ำเย็น, เครื่องแช่เย็น, เครื่องทำน้ำแข็งหลอด เป็นต้น

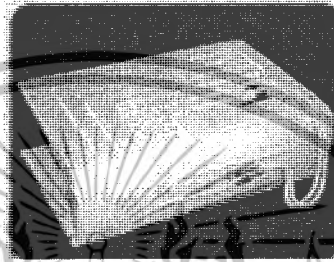


รูปที่ 2.2 อีวาโปเรเตอร์แบบเปลือย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.2 แบบแผ่น

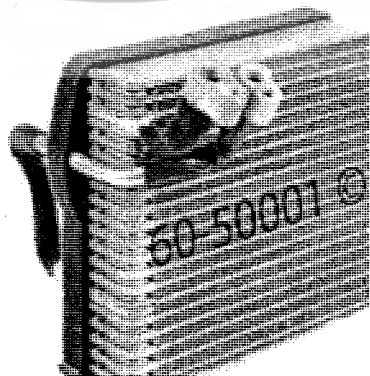
อีวาโฟเรเตอร์แบบแผ่น (Plate) จะเป็นการออกแบบสำหรับห้องทำความเย็นที่มีลักษณะที่ต้องการประหยัดพื้นที่โดยจะใช้โลหะ 2 แผ่นประกบกัน แผ่นหนึ่งกดขึ้นรูปเป็นลอนนูน อีกแผ่นหนึ่งเรียบ แล้วทำการเชื่อมติดกัน และ ช่องที่เป็นลอนนูน จะทำเป็นท่อสำหรับสารทำความเย็น อีวาโฟเรเตอร์แบบนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในตู้เย็นภายในบ้านเพราะทำความสะอาดย่างง่าย และผลิตขายเป็นส่วนมาก นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.3 อีวาโฟเรเตอร์แบบแผ่น

### 2.3.1.3 แบบครีป

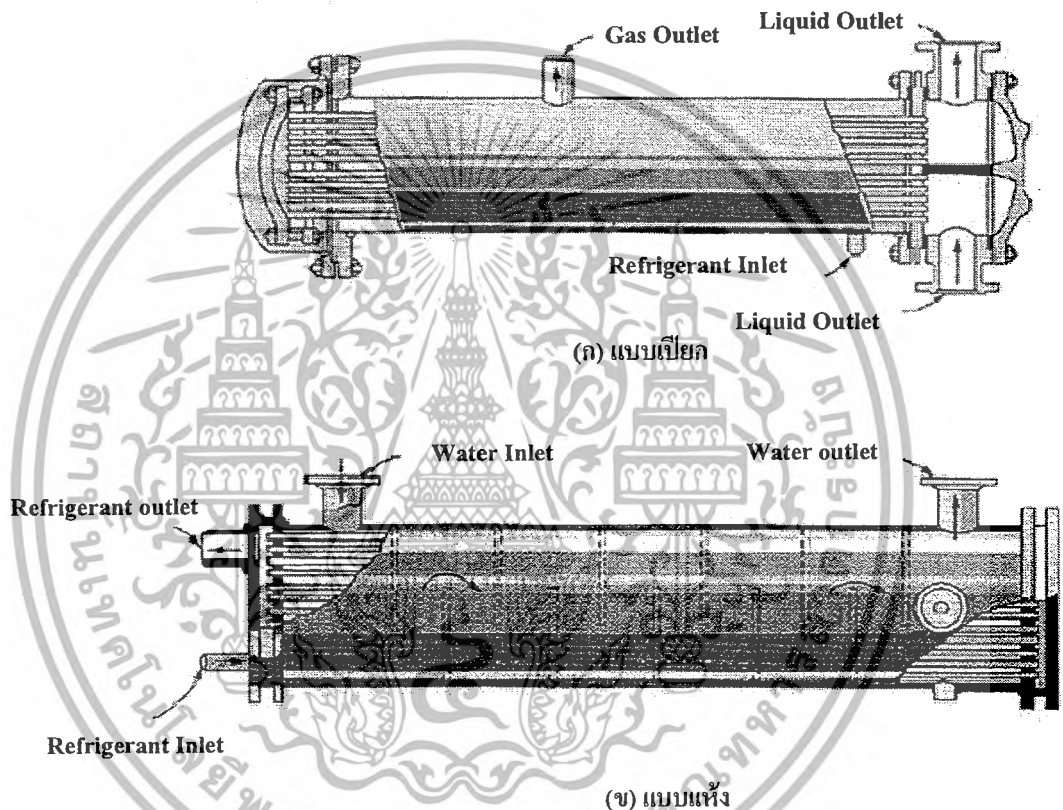
อีวาโฟเรเตอร์แบบครีป (Fin Tube) เป็นการออกแบบจากท่อเปลือยแบบธรรมดา และเพิ่มแผ่นโลหะประกบท่อโดยต่อกันเป็นครีป ตัวครีปจะเป็นลักษณะพื้นที่ผิวชั้นที่ 2 ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวด้านนอกของ อีวาโฟเรเตอร์ อันจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นโดยครีปทำตัวเป็นเสมือนเป็นตัวเก็บความร้อนมาจากบริเวณรอบๆ ที่ไม่ได้สัมผัสกับท่อโดยตรงครีป จะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้กับท่อของสารทำความเย็นอีกต่อหนึ่ง อย่างไรก็ตามผลของครีปจะดีเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับ การติดตั้งครีปให้สัดส่วนช่องระหว่างครีป โดยส่วนมากจะอยู่ในช่วง 40 ถึง 500 ครีปต่อเมตร ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 2.4 อีวาโฟเรเตอร์แบบครีปญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.4 แบบชิลเลอร์

อีวาโปเรเตอร์แบบชิลเลอร์ (Chiller) ถูกออกแบบสำหรับใช้กับเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่มีขนาดตั้งแต่ 100 ตันถึง 2,000 ตัน ซึ่งจะต้องใช้ควบคู่กับระบบเครื่องทำความเย็นชนิด Water Chiller มีทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งอาจใช้คอมเพรสเซอร์แบบหุ้มปิด และคอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ อีวาโปเรเตอร์แบบนี้จะมีท่อต่อผ่านเข้าไป โดยใช้น้ำทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้วิ่งเวียนอยู่ภายในตัวอีวาโปเรเตอร์ และจะถูกส่งไปยังห้องทำความเย็นต่าง ๆ



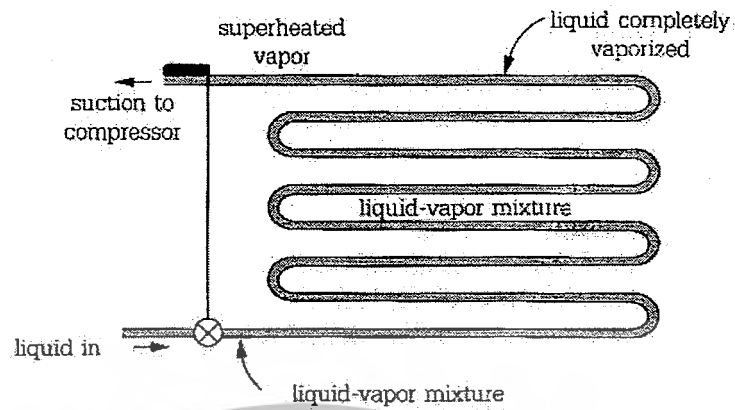
รูปที่ 2.5 ชิลเลอร์ (ก) แบบเปียก (ข) แบบแห้ง

การแบ่งอีวาโปเรเตอร์จะแบ่งตามลักษณะการทำงาน คือ มีการทำงานของสารทำความเย็นที่แตกต่างกันสามารถแบ่งเป็นสองลักษณะคือ

### 2.3.1.5 อีวาโปเรเตอร์แบบกึ่งเปียก (Semi Flood Evaporator)

อีวาโปเรเตอร์แบบกึ่งเปียกหรือเรียกอีกแบบว่าแบบแห้ง (Dry Expansion) นั้นจะมีปริมาณของสารทำความเย็นที่ป้อนให้อีวาโปเรเตอร์ จะถูกจำกัดที่ปริมาณหนึ่งเพื่อให้เกิดการกลายเป็นไอโดยที่สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอเท่านั้นที่จะเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ ดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.6 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

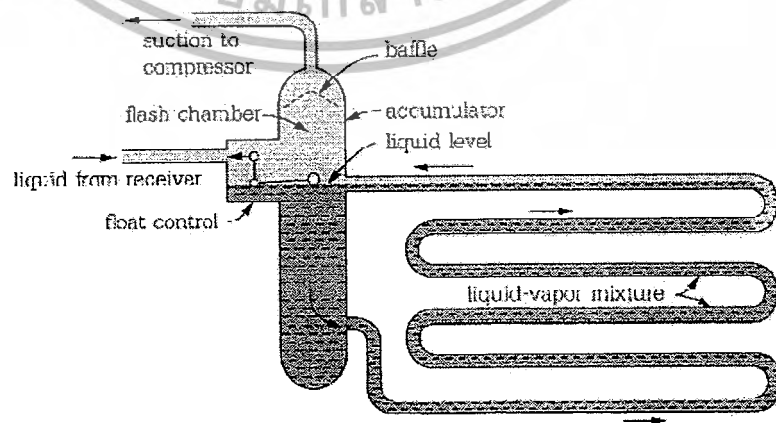


รูปที่ 2.6 Semi Flood Evaporator

ดังนั้นจะเห็นว่าอีวาโปเรเตอร์แบบกึ่งเปียกจะมีสารทำความเย็นที่มีทั้งสถานะเป็นของเหลวผสมกับไอ (liquid-vapor mixture) ไหลผ่าน แต่จะให้เฉพาะสารที่มีสถานะเป็นไอผ่านจึงเรียกอีวาโปเรเตอร์ชนิดนี้ว่า Dry-Expansion Evaporator

### 2.3.1.6 อีวาโปเรเตอร์แบบเปียก (Flooded Evaporator)

อีวาโปเรเตอร์แบบเปียกจะมีถังทำความเย็นดังรูปที่ 2.7 ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายสารทำความเย็นโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก ในการแยกสถานะของสารทำความเย็น โดยสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจะเข้าไปในอีวาโปเรเตอร์ ระดับของเหลวในถังเก็บจะถูกควบคุมด้วยลูกลอย (Float Control) สารทำความเย็นที่เป็นไอจากอีวาโปเรเตอร์จะถูกแยกอยู่ส่วนบนของถังเก็บและถูกดูดออกไปเข้าคอมเพรสเซอร์ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นสูง



รูปที่ 2.7 Flooded Evaporator

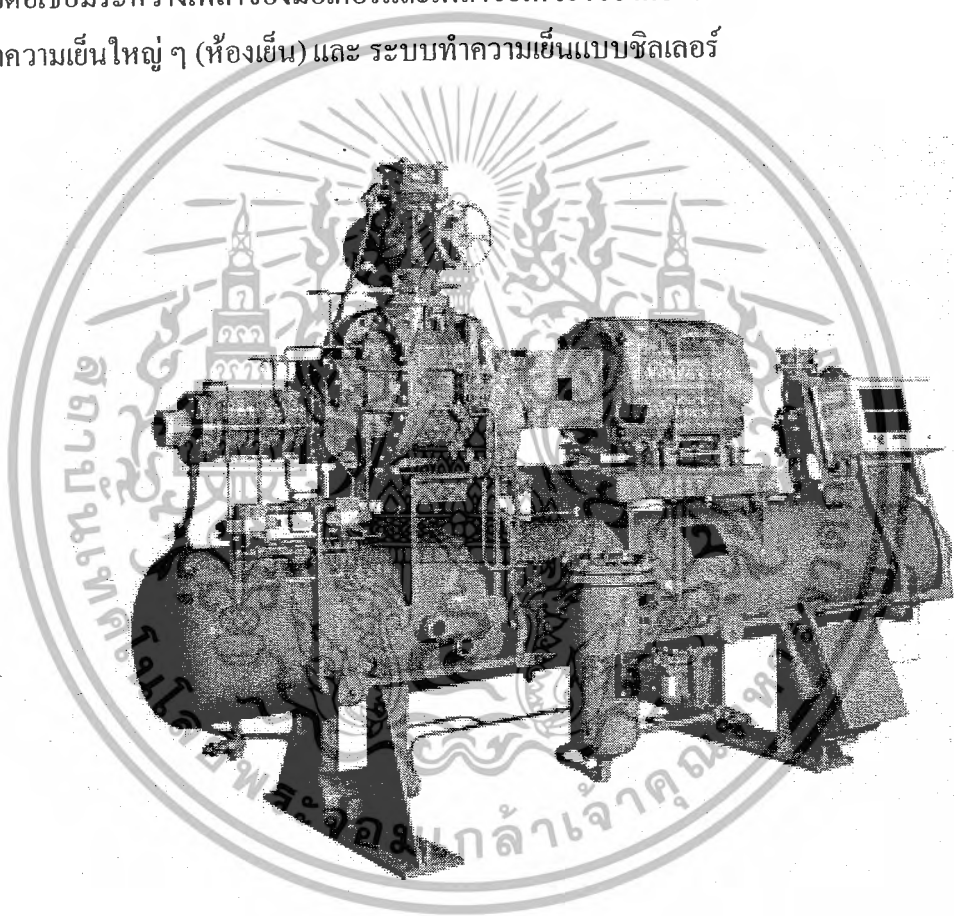
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 คอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดอัดสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอ โดยดูดไอที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำจากอีวาโปเรเตอร์ แล้วอัดให้มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงจนถึงจุดที่ไอสามารถควบแน่นเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์ได้ มีสองแบบคือ

#### 2.3.2.1 แบบเปิด (Open Type)

คอมเพรสเซอร์มีลักษณะที่มีตัวอัดกับมอเตอร์แยกกัน โดยมีสายพานหรือเฟืองเป็นตัวต่อเชื่อมระหว่างเพลลาของมอเตอร์และเพลลาข้อเหวี่ยงของคอมเพรสเซอร์ มักนิยมใช้กับระบบทำความเย็นใหญ่ ๆ (ห้องเย็น) และ ระบบทำความเย็นแบบซิลเลอร์

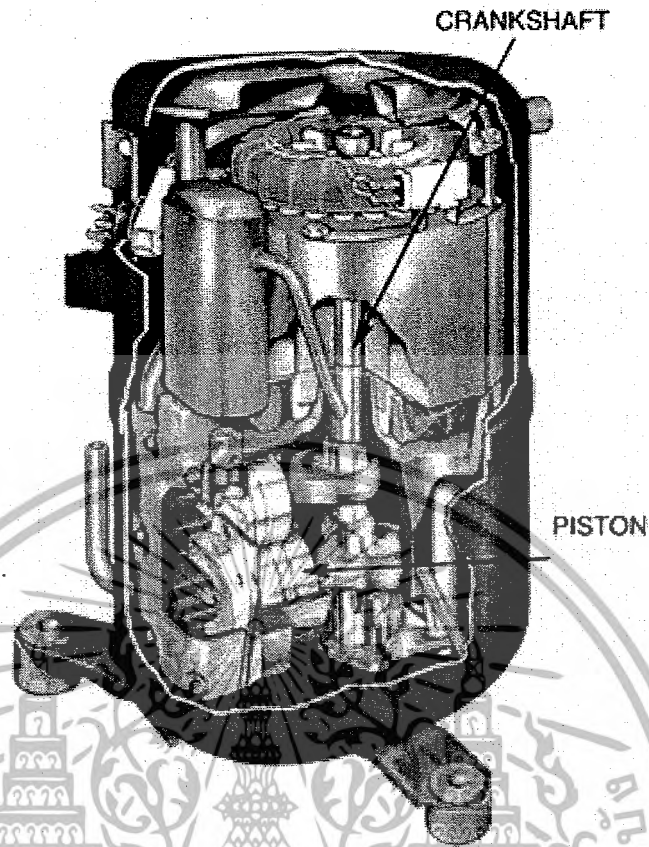


รูปที่ 2.8 คอมเพรสเซอร์แบบเปิด

#### 2.3.2.2 แบบปิด (Close Type)

เป็นคอมเพรสเซอร์ที่มีตัวอัดและตัวมอเตอร์อยู่ภายใน โครงสร้างเดียวกัน โดยมีการห่อหุ้มแบบมิดชิดเรียกว่าคอมเพรสเซอร์แบบหุ้มปิด (Hermetic Compressor) นิยมใช้กับระบบทำความเย็นขนาดเล็กเช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



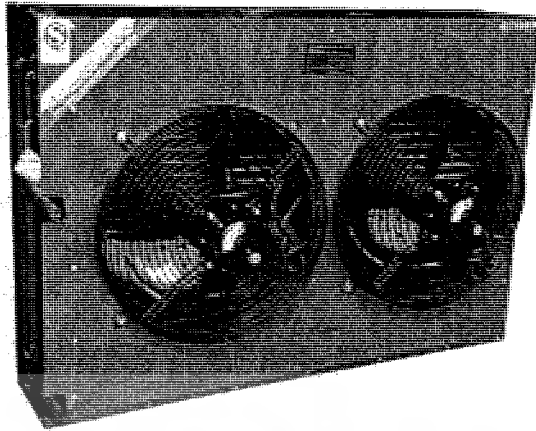
รูปที่ 2.9 คอมเพรสเซอร์แบบปิด

### 2.3.3 คอนเดนเซอร์

คอนเดนเซอร์ (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น ทำให้สารทำความเย็นเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว มีหลายประเภทดังนี้

#### 2.3.3.1 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooled Condenser)

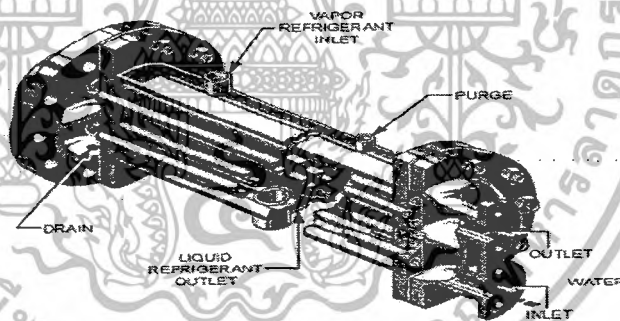
คอนเดนเซอร์ประเภทนี้ประกอบด้วยท่อขนาดเล็กรวมกันหลายชั้น โดยที่ผิวด้านนอกของท่อจะสัมผัสกับครีป (Fin) และมีพัดลมเป่าอากาศเพื่อถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นไปสู่อากาศภายนอก ดังรูปที่ 2.10 การควบแน่นเกิดขึ้นขณะที่สารทำความเย็นไหลผ่านท่อทางด้านขวาเข้าไปสู่ท่อด้านนอกและไปที่ถังเก็บน้ำยา



รูปที่ 2.10 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ

### 2.3.3.2 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled Condenser)

คอนเดนเซอร์ประเภทนี้ประกอบด้วยท่อและเปลือกหุ้ม (shell and tube) ซึ่งจะมีน้ำไหลอยู่ภายในท่อการทำงานคือ ไอของสารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่คอนเดนเซอร์ด้านเปลือกหุ้ม และจะควบแน่นอยู่ที่ผิวด้านนอกของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ

คอนเดนเซอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยท่อที่ปลายสองด้านยาวไปถึงเปลือก การต่อท่อระบายอากาศ (Purge) ที่ด้านบนของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่ระบายอากาศหรือแก๊สที่ไม่ต้องการที่สะสมอยู่ในระบบให้ออกไป ความสามารถในการทำงานของคอนเดนเซอร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ปริมาณน้ำหมุนเวียนและอุณหภูมิของสารทำความเย็น ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของไอสารทำความเย็นและน้ำมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้นความสามารถในการทำงานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการใช้น้ำเย็นจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนเดนเซอร์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.3 คอนเดนเซอร์ที่อาศัยหลักการระเหยของน้ำ (Evaporative)

คอนเดนเซอร์ประเภทนี้ จะทำงานอยู่บนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนจากการควบแน่นสารทำความเย็นที่ในท่อ โดยอาศัยสเปรย์น้ำฉีดไปที่ผิวท่อของคอนเดนเซอร์ที่ร้อน และมีแรงลมช่วยเป่าให้อิอน้ำที่ระเหย ทำให้มีการระเหยตัวได้ดีขึ้น

### 2.3.4 ถังเก็บน้ำยา

ถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) ทำหน้าที่เก็บสารทำความเย็นที่ควบแน่นกลายเป็นของเหลวจากคอนเดนเซอร์ จะถูกนำมาพักเก็บไว้ก่อนส่งไปยังวาล์วควบคุมการไหล



รูปที่ 2.12 ถังเก็บน้ำยา

### 2.3.5 อุปกรณ์ควบคุมความดัน

ทำหน้าที่ควบคุมความดันของสารทำความเย็นที่ผ่านเข้าไปยังอีวาโปเรเตอร์ โดยลดความดันของสารทำความเย็นให้ต่ำลงจนสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ อีวาโปเรเตอร์ในอุณหภูมิใช้งานและควบคุมความแตกต่างของความดันระหว่างความดันสูงกับความดันต่ำของระบบให้พอดีกับการระเหย อุปกรณ์ควบคุมความดันจะมีสองแบบคือ ท่อแคปพิลารี (Capillary Tube) และวาล์วขยายตัว (Expansion Valve)

#### 2.3.5.1 ท่อแคปพิลารี (Capillary Tube)

ท่อแคปพิลารีหรือหลอดรูเล็ก เป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่ง่ายที่สุดประกอบด้วย ท่อที่มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางตามความสามารถในการทำความเย็น ภาระในการทำความเย็น และปริมาณของสารทำความเย็นติดตั้งอยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์กับอีวาโปเรเตอร์

ท่อแคปพิลารีเป็นตัวจำกัดหรือตัววัดอัตราการไหลของของเหลวจากคอนเดนเซอร์ไปยังอีวาโปเรเตอร์ และยังรักษาความแตกต่างของความดันในการทำงาน การใช้งานควรต้องร่วมกับตัวกรอง (Filter Drier) เพื่อกรองสิ่งสกปรกในระบบไม่ให้ไปอุดตันท่อแคปพิลารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

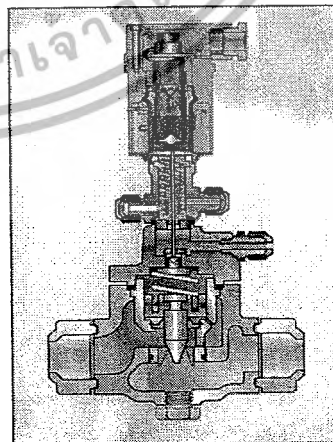
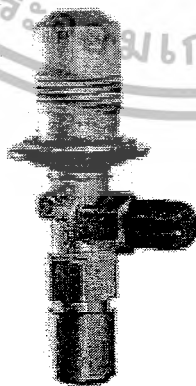


รูปที่ 2.13 ท่อแคบฟิลารี

### 2.3.5.2 วาล์วขยายตัวปรับด้วยมือ (Hand Expansion Valve)

วาล์วชนิดนี้เป็นการปรับด้วยมือ โดยใช้มือหมุนวาล์วเข็ม (Needle Valve) อัตราการไหลของสารทำความเย็นที่ผ่านวาล์วนี้ ขึ้นอยู่กับความดันที่แตกต่างกันที่ผ่านช่องวาล์วเข็ม ถ้าสมมุติว่าความแตกต่างของความดันตรงวาล์วทางผ่านที่คงที่ อัตราการไหลของสารทำความเย็นที่ผ่านวาล์วขยายปรับด้วยมือจะคงที่ โดยไม่คิดความดันของอีวาโปเรเตอร์หรือภาระของอีวาโปเรเตอร์

ข้อเสียของวาล์วปรับด้วยมือคือ ไม่สามารถเปลี่ยนได้ตามภาระ (Load) ของระบบ เพราะฉะนั้นจะต้องปรับทุกครั้งเมื่อภาระของระบบเปลี่ยน เพื่อป้องกันสารทำความเย็นที่เข้าไปยังอีวาโปเรเตอร์น้อยเกินไปหรือมากเกินไป และนอกจากนี้ต้องปรับวาล์วทุกครั้งที่คอมเพรสเซอร์ทำงานและหยุดทำงาน

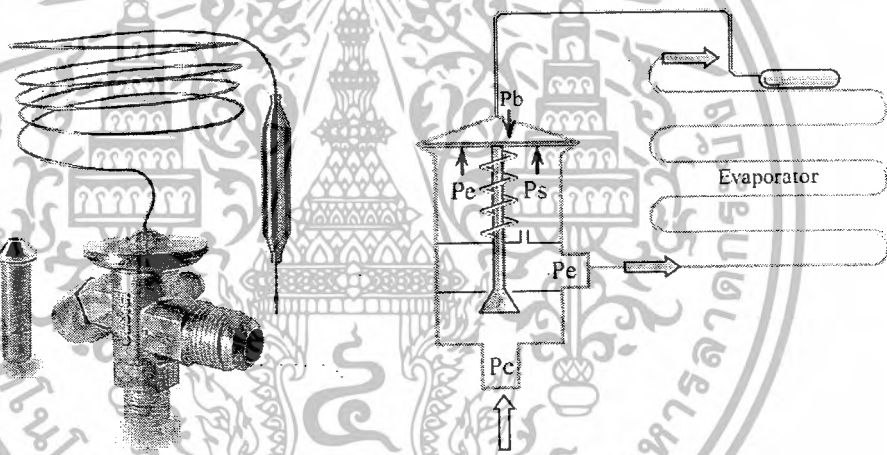


รูปที่ 2.14 วาล์วขยายตัวปรับด้วยมือ (Hand Expansion Valve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5.3 วาล์วขยายตัวแบบทำงานด้วยอุณหภูมิ (Thermostatic Expansion Valve)

การทำงานของวาล์วขยายตัวแบบทำงานด้วยอุณหภูมิ (TEV) จะทำงานที่อุณหภูมิคงที่ของไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated Vapor) สารทำความเย็นมีจุดเดือดที่สูงกว่าจุดอิ่มตัวที่บริเวณทางออกของอีวาโปเรเตอร์โดยใช้กระเปาะ (Bulb) ที่มีของเหลวบรรจุอยู่ในทำหน้าที่ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่เข้าสู่อีวาโปเรเตอร์การทำงานในลักษณะนี้จะทำให้รักษาอุณหภูมิในอีวาโปเรเตอร์ได้อย่างสมบูรณ์ สามารถควบคุมได้ทุกสภาวะของระบบที่มีภาระเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาโดยปราศจากความเสียหายจากสารทำความเย็นเหลว ที่เข้ามาในท่อดูดของคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากสามารถปรับการเปลี่ยนแปลงภาระได้อย่างเหมาะสมทำให้มีประสิทธิภาพการทำความเย็นที่สูง หลักการทำงานจะใช้การสมดุลแรงของ 3 แรงที่กระทำต่อแผ่นไดอะแฟรม คือ ความดันจากกระเปาะ (Pb) , ความดันจากสารทำความเย็นในระบบ (Pe) , แรงจากสปริงใน Plug Valve (Ps) ดังรูปที่ 2.15



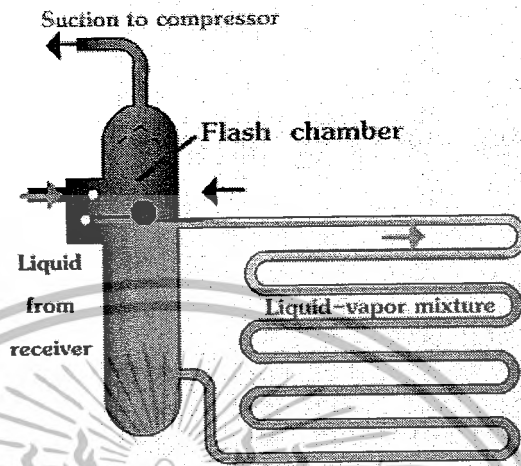
รูปที่ 2.15 วาล์วขยายตัวทำงานด้วยอุณหภูมิและการใช้งาน

### 2.3.5.4 วาล์วลดความดันต่ำ (Low Pressure Float Valve)

วาล์วลดความดันต่ำหรือวาล์วลดความดัน ใช้กับอีวาโปเรเตอร์แบบเปียก (Flooded Evaporator) สารทำความเย็นจะอยู่ในอีวาโปเรเตอร์ที่ระดับคงที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่ไหลเข้าไปในอีวาโปเรเตอร์ในจำนวนที่พอเหมาะกับสารทำความเย็นที่ถูกดูดเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ ถ้าภาระในการทำความเย็นเพิ่มขึ้นอุณหภูมิและความดันของอีวาโปเรเตอร์จะเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดขึ้นชั่วคราว อัตราการไหลโดยมวลของไอสารทำความเย็นที่เข้าไปในคอมเพรสเซอร์จะเพิ่มขึ้นสารทำความเย็นเหลวก็จะเข้ามาทางวาล์วลดความดันที่เปิดมากขึ้น เพื่อรักษาระดับของเหลวให้คงที่ถ้าภาระของการทำความเย็นลดลงความดันในอีวาโปเรเตอร์ลดลงไอสารทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

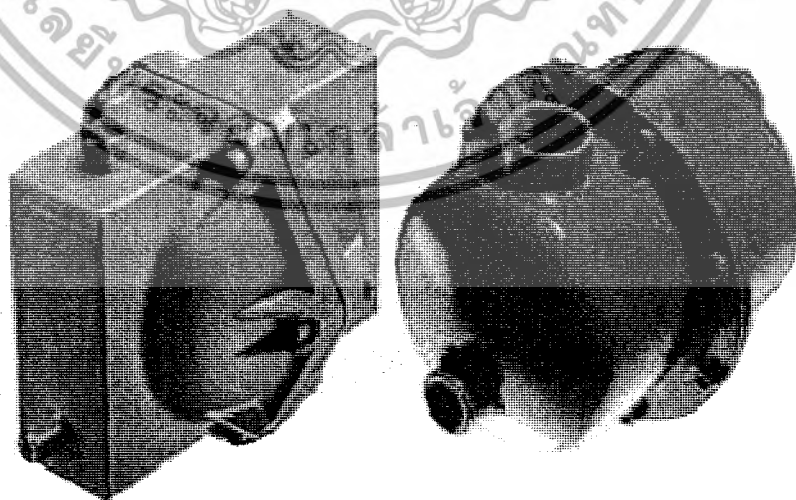
ความเย็นที่เข้าคอมเพรสเซอร์ลดลง ทำให้สารทำความเย็นเหลวเพิ่มขึ้นวาล์วลอยก็จะปิดเพื่อรักษาระดับของสารทำความเย็นเหลวให้ได้ระดับคงที่



รูปที่ 2.16 วาล์วลอยความดันต่ำ

### 2.3.5.5 วาล์วลอยความดันสูง (High Pressure Float Valve)

วาล์วลอยความดันแบบใช้วาล์วลอยความดันสูงมีการใช้งานเหมือนกับวาล์วลอยความดันแบบใช้วาล์วลอยความดันต่ำ ต่างกันที่วาล์วลอยความดันสูงใช้ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นเหลวที่ความดันสูง



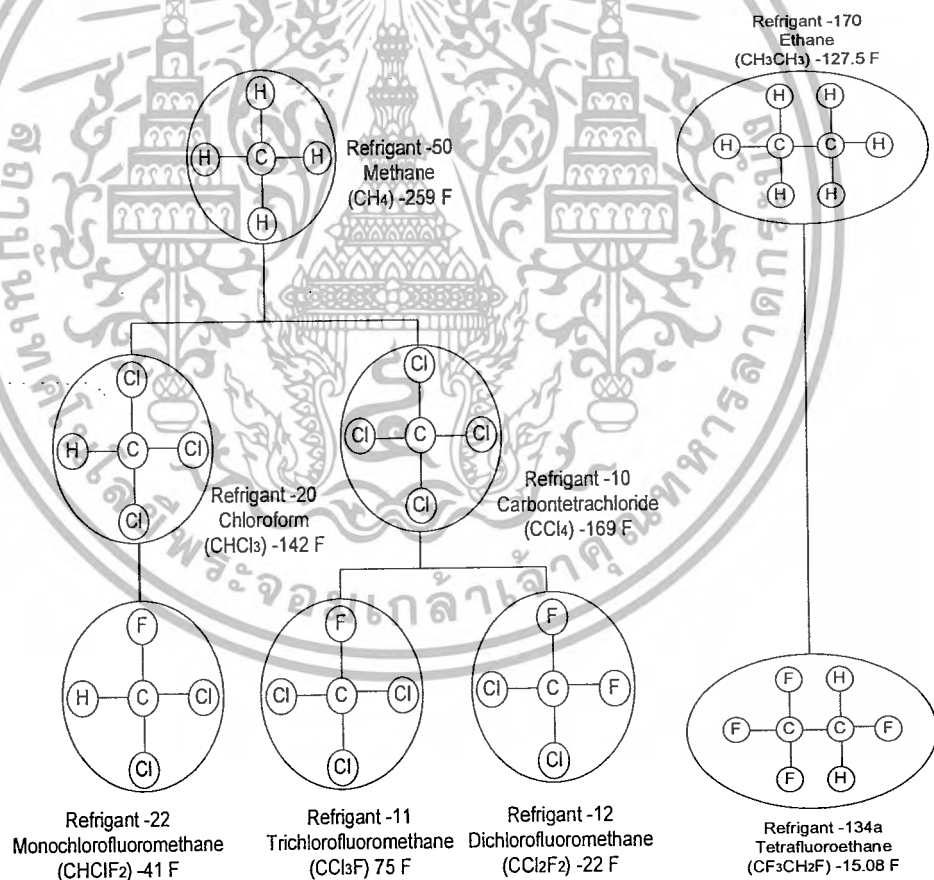
รูปที่ 2.17 วาล์วลอยความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 สารทำความเย็น

สารทำความเย็น (Refrigerant) ทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางพาความร้อนออกจากระบบ เมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอในอีวาโปเรเตอร์และควบแน่นเป็นของเหลวในคอนเดนเซอร์ จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

สารทำความเย็นกลุ่มแรกที่นำมาใช้ในระบบทำความเย็นคือ แอมโมเนีย  $\text{NH}_3$  (R-717) และคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{CO}_2$  (R-744) ซึ่งเป็นสารทำความเย็นกลุ่มอนินทรีย์สาร ต่อมาความต้องการในการใช้ระบบทำความเย็นมีการขยายตัวมากขึ้น จึงต้องการสารทำความเย็นที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น เช่น มีความปลอดภัยสูงขึ้น มีความสามารถในการทำความเย็นดีขึ้น จึงได้มีการพัฒนาสารทำความเย็นกลุ่มฟลูออโรคาร์บอน เช่น ที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ R-11 , R-12 , R-22 , R-134a เป็นต้น โดยสารทำความเย็นดังกล่าวนี้ ได้จากการสังเคราะห์โมเลกุลของมีเทน ( $\text{methane} - \text{CH}_4$ ) และอีเทน ( $\text{ethane} - \text{C}_2\text{H}_6$ ) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของสารทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6.1 การเลือกใช้สารทำความเย็น

R-12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) เป็นสารทำความเย็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดผลิตขึ้นเพื่อจำหน่ายโดยบริษัทดูปองก์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2473 (ค.ศ. 1930) เนื่องจากเป็นสารที่มีความปลอดภัยไม่ติดไฟมีระดับความปลอดภัย A1 แต่ห้ามสารทำความเย็น R-12 สัมผัสกับเปลวไฟเพราะจะกลายเป็นสารพิษได้ มีจุดเดือด  $-21.6^\circ\text{F}$  ( $-29.8^\circ\text{C}$ ) ที่ความดันบรรยากาศใช้งานได้ทั้งระบบที่มีอุณหภูมิสูง ปานกลาง และต่ำ R-12 รวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นได้ดีในทุกสภาวะทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องน้ำมันหล่อลื่นค้างในระบบสารทำความเย็นสามารถพาน้ำมันหล่อลื่นกลับคอมเพรสเซอร์ได้ดี โดยเฉพาะจะไม่มีฟิล์มน้ำมันจับเคลือบที่ผิวท่อ ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดี R-12 มีอัตราการทำความเย็นต่ำจึงมีขนาดของอุปกรณ์ใหญ่กว่า แต่มีข้อดีคือทำงานได้ที่ความดันต่ำ นิยมใช้ทั่วไป เช่น ตู้เย็น ตู้แช่ เครื่องปรับอากาศรถยนต์ เป็นต้น

R-22 ( $\text{CHClF}_2$ ) เป็นสารกลุ่มฟลูออโรคาร์บอน มีค่าความปลอดภัยระดับ A1 มีจุดเดือด  $-41.4^\circ\text{F}$  ( $-40.8^\circ\text{C}$ ) ที่ความดันบรรยากาศ เมื่อเทียบกับ R-12 แล้ว R-22 จะทำงานที่ความดันสูงกว่าแต่ใช้คอมเพรสเซอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าเพราะมีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่า R-22 และสามารถรวมกับน้ำมันหล่อลื่นได้ แต่จะแยกตัวออกที่อุณหภูมิต่ำเมื่ออยู่ในเครื่องระเหยใช้กับเครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก และ ขนาดใหญ่ทั่วไป

R-134a ( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ ) เป็นสารกลุ่มฟลูออโรคาร์บอนมีค่าความปลอดภัยระดับ A1 มีจุดเดือด  $-15.0^\circ\text{F}$  ( $-26.2^\circ\text{C}$ ) ที่ความดันบรรยากาศ เป็นสารทำความเย็นที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทน R-12 ซึ่งได้ถูกยกเลิกการผลิตตามข้อบังคับของพิธีสารมอนทรีออล R-134a มีคุณสมบัติในการรวมตัวกับน้ำได้ดี (Water Solubility) จึงมีโอกาสที่จะเกิดน้ำแยกตัวออกจากสารทำความเย็นไปเป็นน้ำแข็งอุดตันลดความดันได้ และ เนื่องจากไม่สามารถรวมตัวกับสารหล่อลื่นชนิด Mineral Oils ได้ จึงต้องใช้สารหล่อลื่นชนิดพิเศษคือ Polyol Ester (POE) และ เนื่องจาก POE เป็นสารหล่อลื่นที่มีความสามารถในการดูดความชื้นสูง จึงต้องระวังอย่าให้มีโอกาสสัมผัสกับอากาศในปัจจุบัน เครื่องปรับอากาศรถยนต์ และตู้เย็นที่ผลิตใหม่ถูกบังคับให้เปลี่ยนมาใช้ R-134a แทน R-12 ทั้งหมด

Cold-22 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) เป็นสารทำความเย็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอน มีค่าความปลอดภัยระดับ A3 มีจุดเดือด  $-43.6^\circ\text{F}$  ( $-42^\circ\text{C}$ ) ที่ความดันบรรยากาศเป็นสารทำความเย็นที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทน R-22 ไม่มีอันตรายต่อชั้นบรรยากาศโอโซน มีค่า GWP (Global Warming Potential) (GWP)  $< 3$  มีอายุขัย ณ ชั้นบรรยากาศ  $< 1$  ปี มีค่าความเป็นพิษอยู่ในระดับต่ำ เมื่อเทียบกับ R-22 แล้วจะทำงานที่ความดันต่ำกว่าใช้ระบบเดียวกันกับ R-22 ได้ ไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ (Water Insoluble) มีอุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติที่ความดัน 0 psi ที่  $450^\circ\text{C}$  ใช้ทดแทนในระบบ R-22

Cold-134 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3 + \text{CH}(\text{CH}_3)_3$ ) เป็นสารทำความเย็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอนมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารค่าความปลอดภัยระดับ A3 มีจุดเดือด  $-22.9^\circ\text{F}$  ( $-30.5^\circ\text{C}$ ) ที่ความดันบรรยากาศ เป็นสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

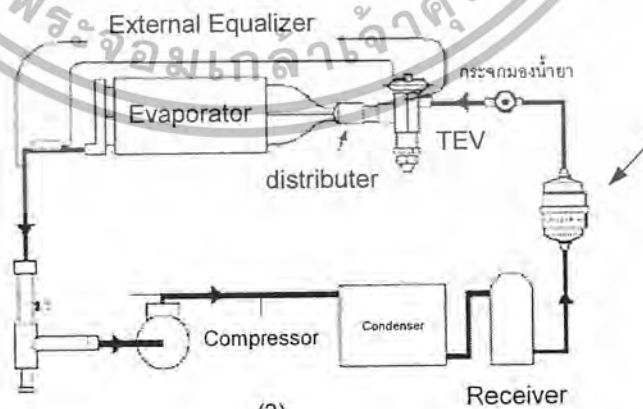
ทำ ความเย็นที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทน R-134a ไม่มีอันตรายต่อชั้นบรรยากาศโอโซน มีค่า GWP (Global Warming Potential (GWP) <3 มีอายุขัย ณ ชั้นบรรยากาศ <1 ปี มีค่าความเป็นพิษอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับ R-134a แล้วจะทำงานที่ความดันต่ำกว่า ใช้ระบบเดียวกันกับ R-134a ได้ และไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ (Water Insolvable) มีอุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติที่ความดัน 0 psi ที่ 460 °C ใช้ทดแทนในระบบ R-134a

2.3.7 อุปกรณ์เสริม

นอกจากอุปกรณ์หลักข้างต้นแล้วนั้น ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นซึ่งอาจมีความจำเป็นในบางระบบคือ ฟิวลเลอร์ไดรียเออร์ (Filter Drier) ทำหน้าที่กรองฝุ่นละอองที่ค้างในระบบ โดยให้ผ่านเพียงสารทำความเย็น นอกจากนี้ยังช่วยลดความชื้นในท่อขณะทำการติดตั้งระบบ การเลือกใช้จะต้องคำนึงถึงชนิดของสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบ ขนาดของเครื่องทำความเย็นขนาดท่อน้ำยา และ ค่าความดันลด (Pressure Drop) นิยมใช้ในเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศทั่วไป



(1)



(2)

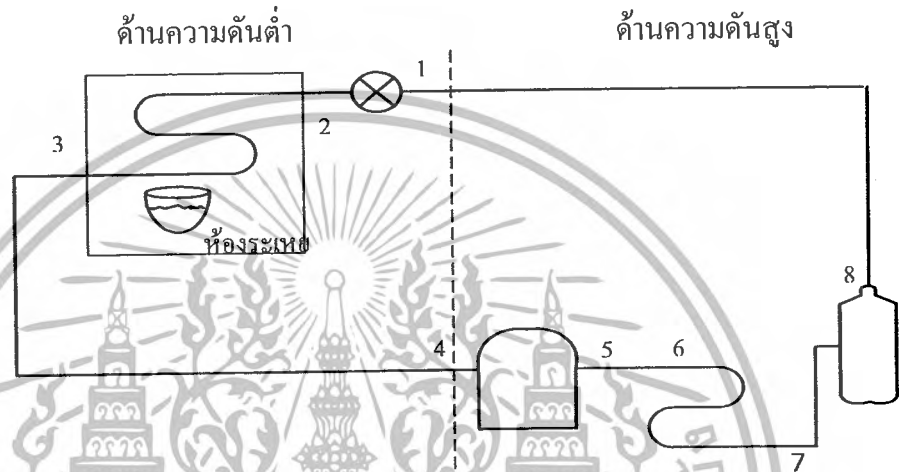
รูปที่ 2.19 (1) แสดงโครงสร้าง (2) การติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110941

## 2.4 การทำงานของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

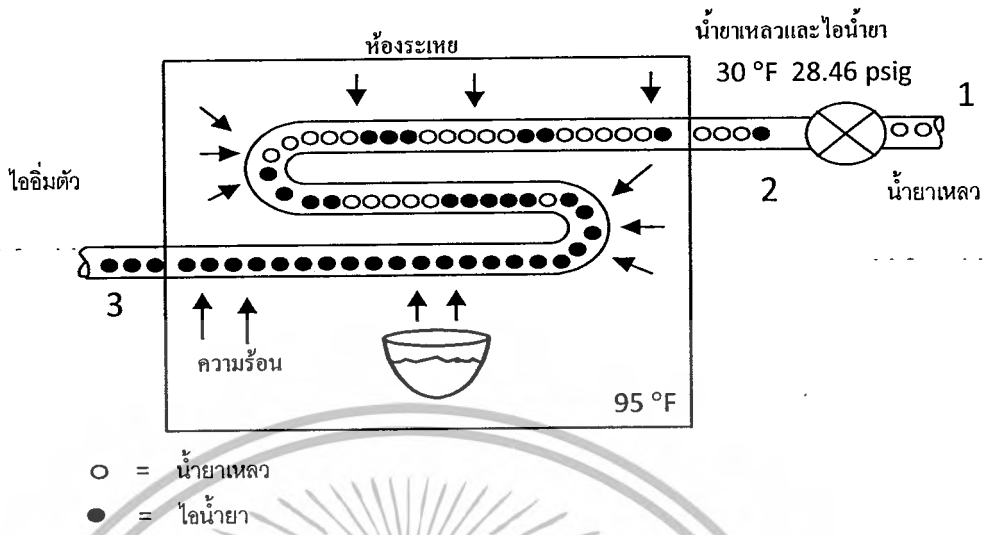
ระบบทำความเย็นจะทำความเย็นได้นั้น สารทำความเย็นภายในระบบจะต้องไหลเวียน อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลเวียนในระบบคือ คอมเพรสเซอร์ซึ่งเปรียบเสมือนเครื่องสูบลมทำหน้าที่สูบลมสารทำความเย็นให้ไหลเวียนอยู่ตลอดเวลาที่ระบบทำงานรูปที่ 2.20 แสดงวงจรของระบบทำความเย็นแบบอัดไอการทำงานของระบบทำความเย็นอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.20 วงจรของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

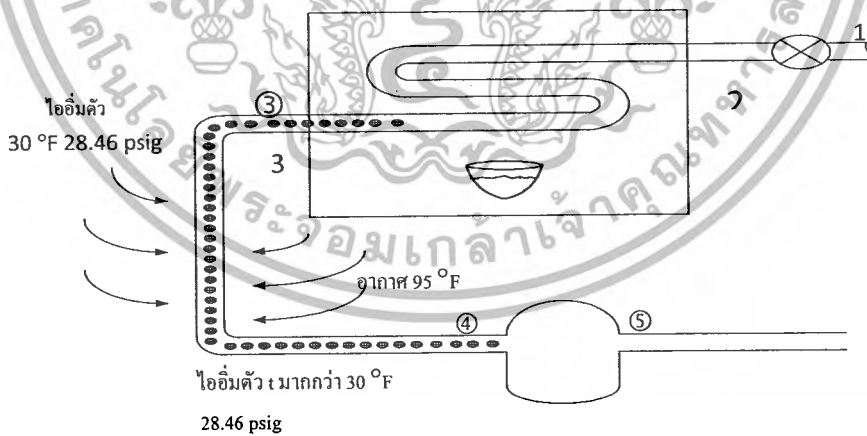
ที่จุด 1 สารทำความเย็นที่ไหลเข้าวาล์วควบคุมการไหล (Expansion Valve) จะอยู่ในสถานะของเหลวที่มีความดันสูง อุปกรณ์ควบคุมการไหลจะลดความดันของสารทำความเย็นลง ทำให้จุดเดือดของสารทำความเย็นลดต่ำลง

ที่จุด 2 สารทำความเย็นที่ออกจากวาล์วควบคุมการไหล จะไหลเข้าฮีวโปเรเตอร์เป็นไอผสมกับของเหลว โดยสารทำความเย็นจะมีจุดเดือดต่ำกว่าอุณหภูมิของวัตถุ ที่แช่อยู่ในห้องทำความเย็น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่ไปยังสารทำความเย็น และ เกิดการเดือดเป็นไอ โดยที่อุณหภูมิ และความดันของสารทำความเย็นคงที่ ความร้อนที่ใช้ในการเดือดเป็นไอ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การระเหยของสารทำความเย็นในห้องระเหย (อีวาโปเรเตอร์)

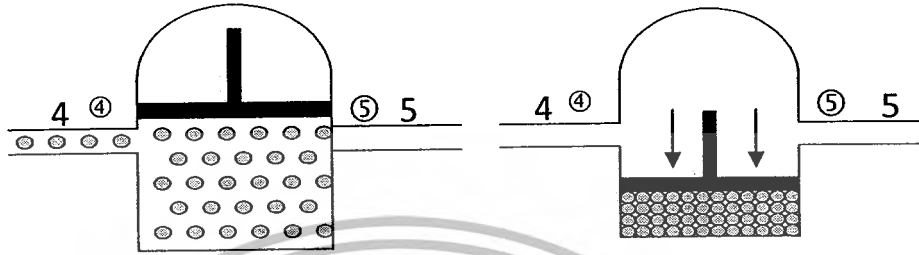
ที่จุด 3 สารทำความเย็นที่ออกจากอีวาโปเรเตอร์ จะอยู่ในสถานะไอที่มีความดันต่ำ และ อุณหภูมิต่ำถูกส่งผ่านทางท่อดูดเข้าคอมเพรสเซอร์ ขณะที่ผ่านท่อดูดไอของสารทำความเย็นจะ ได้รับความร้อนจากอากาศรอบๆ ทำให้ไอของสารทำความเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นแต่ความดันนั้น ยังคงที่ ความร้อนช่วงนี้คือ ความร้อนยิ่งยวด ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การให้ความร้อนยิ่งยวดกับไออิมตัว

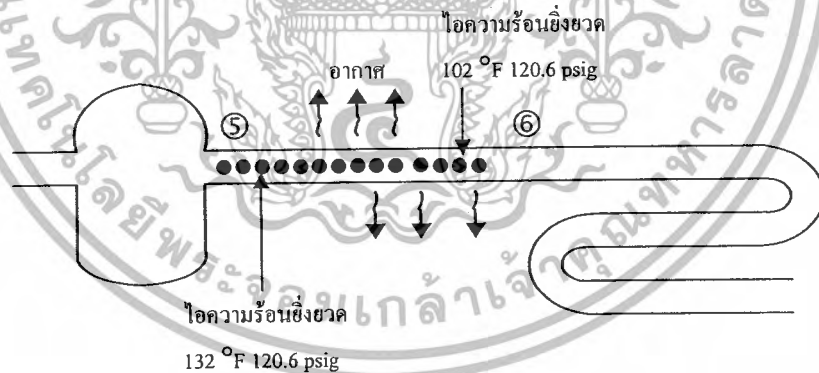
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด 4 สารทำความเย็นที่เข้าคอมเพรสเซอร์จะอยู่ในสถานะไอที่มีความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ จากนั้นคอมเพรสเซอร์จะอัดสารทำความเย็นให้มีปริมาตรลดลง ทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุณหภูมิของไอจะสูงกว่าอุณหภูมิไออิ่มตัว กระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การอัดไออิ่มตัวในคอมเพรสเซอร์

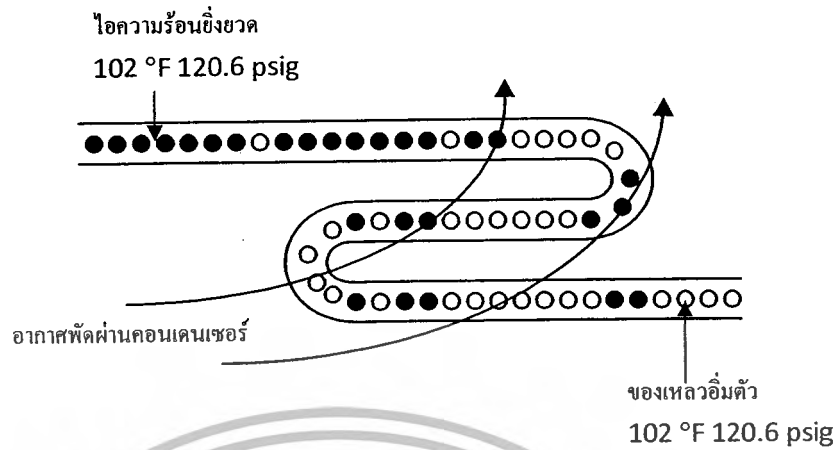
ที่จุด 5 ไอของสารทำความเย็นที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศรอบ ๆ ทำให้เกิดการระบายความร้อนให้กับอากาศขณะถูกส่งผ่านท่อจ่ายไปยังคอนเดนเซอร์ทำให้อุณหภูมิของไอน้ำลดลงเท่ากับอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวแต่ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ คอนเดนเซอร์ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การระบายความร้อนของไอความร้อนยิ่งยวด

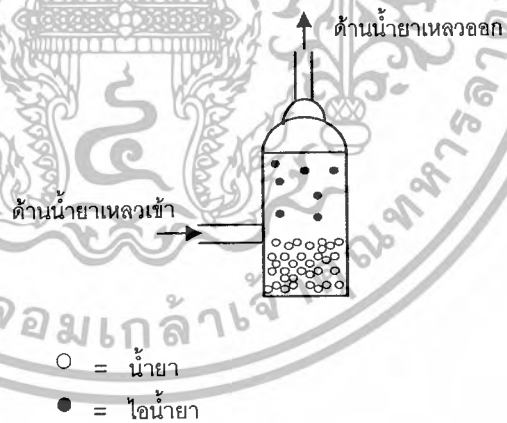
ที่จุด 6 ไอของสารทำความเย็นที่เข้าคอนเดนเซอร์นั้นจะมีความดันสูง และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวแต่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ คอนเดนเซอร์ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นให้กับอากาศรอบ ๆ คอนเดนเซอร์โดยผ่านพื้นผิวคอนเดนเซอร์ ไอของสารทำความเย็นเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวโดยที่ความดันและอุณหภูมียังคงที่ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศคือ ความร้อนแฝงของการควบแน่น กระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่นับว่าผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การทำงานของคอนเดนเซอร์

ที่จุด 7 สารทำความเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์ จะอยู่ในสถานะของเหลวอุณหภูมิสูงและความดันสูงจะไหลเข้าถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) ภายในถังเก็บน้ำยาจะประกอบด้วย สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลวกับสถานะไอซึ่งยังไม่ควบแน่นลอยอยู่ด้านบน

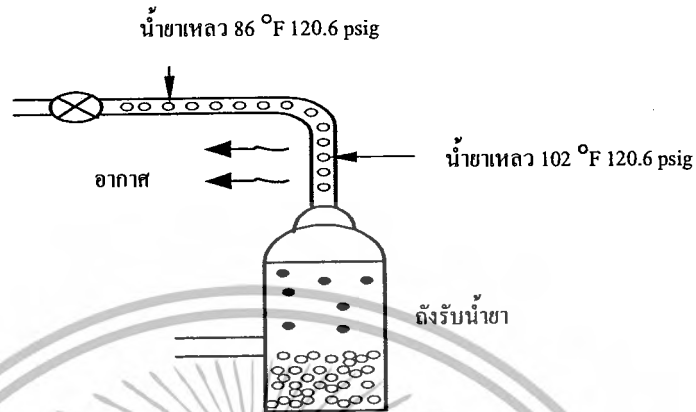


รูปที่ 2.26 น้ำยาเหลวและไอน้ำยาในถังรับน้ำยา

ที่จุด 8 สารทำความเย็นเหลวจะถูกปล่อยออกจากถังเก็บน้ำยา ส่งผ่านทางท่อของเหลวเข้าอุปกรณ์ควบคุมการไหลระหว่างทางสารทำความเย็น ซึ่งเป็นของเหลวอิ่มตัวจะมีอุณหภูมิอิ่มตัวสูงกว่าอากาศรอบ ๆ ท่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นไปยังอากาศ จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของสารทำความเย็นนั้นลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ซึ่งกระบวนการนี้ คือ การซับคูล (Subcooled) และเรียกของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวว่า ของเหลวเย็นยิ่ง ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การระบายความร้อนของสารทำความเย็นเหลวที่ท่อของเหลว

## 2.5 การวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็นชนิดอัดไอ

กระบวนการทำความเย็นแบบอัดไอ มีการทำงานเบื้องต้นซึ่งประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ กระบวนการอัด (Compression Process) โดยคอมเพรสเซอร์ กระบวนการควบแน่น (Condensing Process) โดยคอนเดนเซอร์ กระบวนการขยายตัว (Expansion Process) โดยลิ้นลดความดันหรืออุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล และกระบวนการกลายเป็นไอ (Vaporizing Process) โดยอีวาโปเรเตอร์ ในการศึกษากระบวนการทำความเย็นแบบอัดไออีกรูปหนึ่ง คือ การแทนการทำงานของกระบวนการต่างๆ ลงในแผนภาพมอลเลียร์ (Mollier Diagram) หรือแผนภาพความดัน-เอนทัลปี (Pressure-Enthalpy หรือ P-h Diagram) การวิเคราะห์แผนภาพมอลเลียร์มีดังนี้

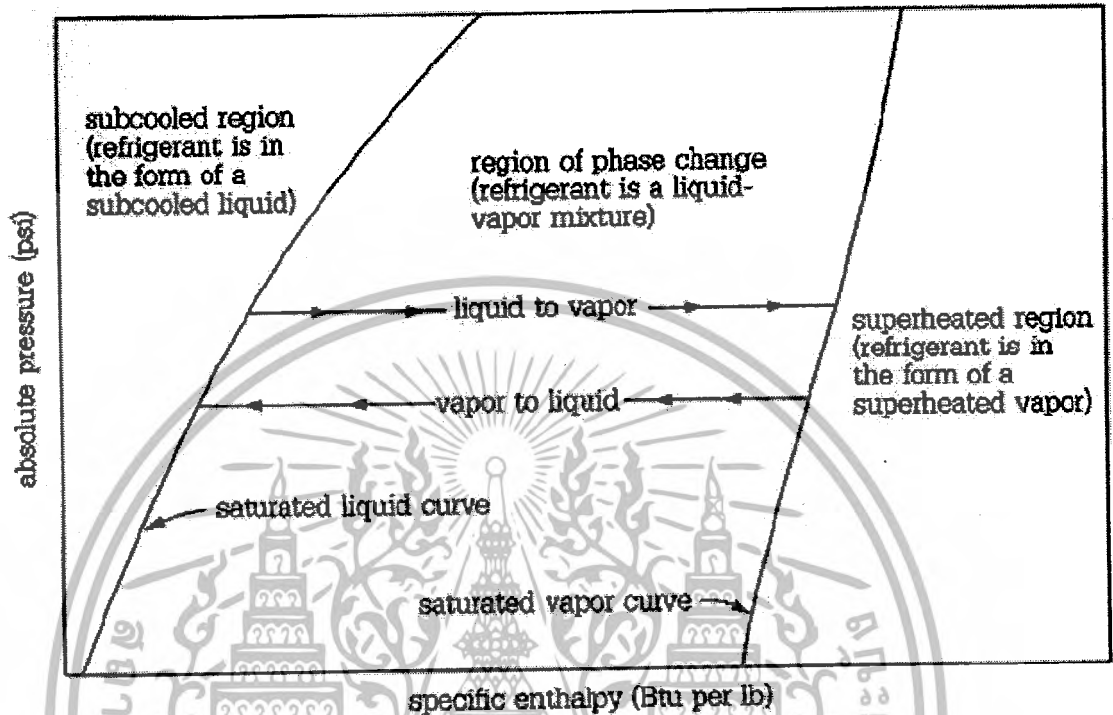
เขตของเหลวเย็นยิ่ง (Subcooled Region) คือ พื้นที่บริเวณด้านซ้ายของเส้นของเหลวอิ่มตัวของสารทำความเย็นที่อยู่ในพื้นที่นี้ จะมีสถานะเป็นของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอิ่มตัว เรียกว่า ของเหลวเย็นยิ่ง (Subcooled Liquid)

เขตไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated Region) คือ พื้นที่บริเวณด้านขวาของเส้นไออิ่มตัวของสารทำความเย็นในพื้นที่นี้จะมีสถานะเป็นไอที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอิ่มตัวเรียกว่า ไอร้อนยวดยิ่งหรือ ใอดง (Superheated Vapor)

เขตเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Region) คือ พื้นที่ระหว่างเส้นของเหลวอิ่มตัว และเส้น ไออิ่มตัวของสารทำความเย็นในพื้นที่นี้ จะมีสถานะผสมระหว่างของเหลวและไอ (Liquid-Vapor Mixture) หรือเป็นเขตเปลี่ยนสถานะคือ การเปลี่ยนแปลงจากด้านซ้ายไปขวาเป็นการเปลี่ยนสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากของเหลวเป็นไอตามกระบวนการกลายเป็นไอ (Vaporization) และเปลี่ยนแปลงจากด้านขวาไปซ้ายเป็นการเปลี่ยนสถานะจากไอเป็นของเหลวตามกระบวนการควบแน่น (Condensation)



รูปที่ 2.28 แผนภาพมอลเลียร์ (Mollier Diagram)

ในการวิเคราะห์วัฏจักรทำความเย็นแบบไออัด โดยใช้แผนภาพความดัน - เอนโทรปี (P-h Diagram) ดังรูปที่ 2.29 จากแผนภาพนี้จะเห็นได้ว่า มีกระบวนการ 3 ใน 4 กระบวนการเป็นเส้นตรง และปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายโอนภายในเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของเส้นของกระบวนการ

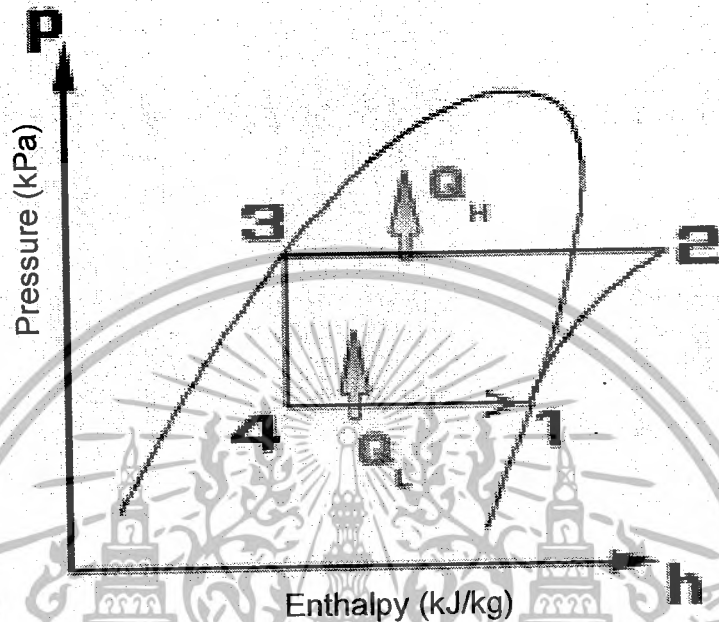
สารทำความเย็นไหลเข้าเครื่องอัดที่สถานะที่ 1 ในสถานะไออิ่มตัวจนความดันนั้นเท่ากับ ความดันในคอนเดนเซอร์ ในช่วงการอัดตัวอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิของ สิ่งแวดล้อม เช่น บรรยากาศ จากนั้นจะไหลเป็นไอร้อนยิ่งยวดในสถานะที่ 2 และถ่ายเทความร้อน ออกจากคอนเดนเซอร์สารทำความเย็นจะเป็นของเหลวอิ่มตัวในสถานะที่ 3 เนื่องจากจะเป็นการคาย ความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ทำให้อุณหภูมิจึงสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

สารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่สถานะที่ 3 ถูกบีบผ่านวาล์วลดความดันหรือ ควบคุมการไหลเรียกว่า กระบวนการขยายตัว (Expansion Process) จนกระทั่งความดันมีค่าเท่ากับ ความดันของอีวาโปเรเตอร์ ช่วงกระบวนการนี้อุณหภูมิจึงลดลงกว่าบริเวณทำ

ความเย็น โดยหลังจากนั้นสารทำความเย็นจะไหลเข้าอีวาโปเรเตอร์ที่สถานะ 4 สถานะของผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ห้ามการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมตัว (Liquid-Vapor Mixture) จะเกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านอิวาโปรเตอร์ และจะไหลเข้าคอมเพรสเซอร์อีกครั้งหนึ่ง จนครบวัฏจักร



รูปที่ 2.29 แผนภาพค่าความดัน-เอนโทรปี (P-h Diagram)

การวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดในกระบวนการทำความเย็นแบบอัดไอ นั้น จะใช้แผนภาพ P-h Diagram จากรูปที่ 2.29 โดยคำนวณจากอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็น พลังงานที่ใช้ในการอัดสารทำความเย็น 1 กก. หาได้ดังนี้

$$W_c = (h_1 - h_2) \quad (2.1)$$

โดยที่  $W_c$  = งานที่ให้แก่คอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

$h_2$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นออกจากคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

ความร้อนที่คายออกจากคอนเดนเซอร์ทำได้ดังนี้

$$Q_c = (h_3 - h_2) \quad (2.2)$$

โดยที่  $Q_c$  = ความร้อนที่ไอของสารทำความเย็นออกจากไอร้อน (kJ/kg)

$h_2$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าคอนเดนเซอร์ (kJ/kg)

$h_3$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์ (kJ/kg)

### 2.5.3 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Expansion Valve)

กระบวนการขยายตัวผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันเป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ นั่นจะไม่มีงานหรือการถ่ายเทความร้อน

$$h_4 = h_3 \quad (2.3)$$

### 2.5.4 อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator)

ความร้อนที่สารทำความเย็น 1 กก. ดูดเอาไว้ขณะที่สารทำความเย็นไหลผ่านอีวาโปเรเตอร์ทำได้ดังนี้

$$Q_E = (h_1 - h_3) \quad (2.4)$$

โดยที่  $Q_E$  = ความร้อนที่สารทำความเย็นดูดไว้ในอีวาโปเรเตอร์ (kJ/kg)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นเข้าคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

$h_3$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นออกจากอีวาโปเรเตอร์ (kJ/kg)

### 2.5.5 ประสิทธิภาพการทำความเย็น (Coefficient of Performance : COP)

$$COP = Q_E / W_c \quad (2.5)$$

โดยที่  $Q_E$  = ความร้อนที่สารทำความเย็นดูดไว้ในอีวาโปเรเตอร์ (kJ/kg)

$W_c$  = งานที่ให้แก่อุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.6 ความสามารถในการทำความเย็น

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (2.6)$$

โดยที่  $Q_L$  = ความสามารถในการทำความเย็น (kW)

$\dot{m}$  = อัตราไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นเข้าคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

$h_3$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นออกจากอีวาโปเรเตอร์ (kJ/kg)

### 2.5.7 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความเย็น

$$\dot{m} = \frac{V_{pt}}{v} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวลสารทำความเย็น (kg/s)

$V_{pt}$  = อัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $m^3/s$ )

$v$  = ปริมาตรจำเพาะของไอสารทำความเย็นที่หมุนเวียน

### 2.5.8 ความสามารถของคอมเพรสเซอร์ (Compressor Capacity)

$$W_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

โดยที่  $W_{comp}$  = ความสามารถในการทำความเย็น (kJ/s หรือ kW.)

$h_2$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นออกจากคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นเข้าคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

## 2.6 การถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากการทำความเย็นคือการทำให้อุณหภูมิต่ำลงด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุหรือบริเวณที่ต้องการจึงต้องศึกษาการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็น

การถ่ายเทความร้อนเป็นการศึกษาถึงอัตราการถ่ายเทพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบหรือระหว่างระบบหนึ่ง และสิ่งแวดล้อมเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยที่ไม่มี การเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ จะทำให้พลังงานในรูปของความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าอาจจะเกิดความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ขึ้นในระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) เมื่อเราทราบการกระจายของอุณหภูมิก็จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ และสามารถคำนวณหาภาระการทำความเย็นที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนได้

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถแยกพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี อันที่จริงแล้วการกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามดังที่กล่าวมาแล้ว เพราะฉะนั้นตามความเป็นจริงแล้วจึงไม่สามารถแยกแบบหนึ่งแบบใดได้อย่างสิ้นเชิงจากแบบอื่น ๆ ที่เหลือได้ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สามารถแยกพิจารณา ดังนี้

### 2.6.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) เป็นรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic Motion) หรือการชนกันโดยตรงของ โมเลกุล ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้น จะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอนสำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของ โมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น เงิน ทองแดง เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลเนื่องมาจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อน โดยกำเนิดจากนักฟิสิกส์ – คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อนกฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนด จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทาง การไหลของความร้อน และเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารในทิศทางใช้สำคัญของฟูริเยร์กำหนดเป็นในทิศทางใช้สำคัญเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{W/m}^2 \quad (2.9)$$

หรือ

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Watt} \quad (2.10)$$

โดยที่  $Q_x$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่  $A$  ในทิศทางบวก  $x$  มีหน่วยเป็น Watt

$q_x$  คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก  $x$  มีหน่วยเป็น  $\text{W/m}^2$

$k$  คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity of Material) และมีค่าเป็นบวก

$A$  คือ พื้นที่ของวัสดุที่ความร้อนผ่าน



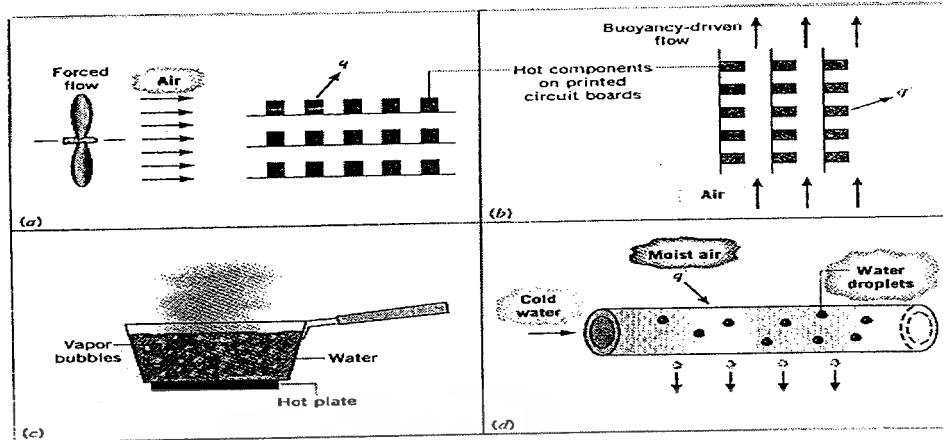
รูปที่ 2.30 การนำความร้อนของวัสดุหนา  $L$  ที่อุณหภูมิที่ผิวคงที่

จากรูปที่ 2.30 แกน  $T$  คือ อุณหภูมิของผิววัสดุ แกน  $x$  คือ ความหนาของวัสดุ โดยที่การถ่ายเทความร้อนจะเริ่มถ่ายเทที่ผิวของวัสดุ โดยถ่ายเทผ่านวัสดุที่มีความต้านทานความร้อน ซึ่งความต้านทานความร้อนจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และการถ่ายเทความร้อนนั้นจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปต่ำ

### 2.6.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในพื้นที่การไหลโดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 การพาความร้อนในลักษณะต่างๆ

ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเอง โดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ” (Forced Convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่น ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ” (Free or Natural Convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หุดหนึ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่ นั้นเพราะระดับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้ระดับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพา ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ  $T_s$  ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

$$q_x = hA[T_w - T_s] \quad W^2/(m^2.K) \quad (2.11)$$

$$Q_x = hA[T_w - T_s] \quad W^2/(m^2.K)$$

โดยที่  $Q_x$  คือ เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $W/(m^2.K)$

$T_w$  คือ อุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวที่ร้อน (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_s$  คือ อุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวที่เย็น (K)

สมการนี้เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซลเซียสหรือเคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) (Convective Heat Transfer Coefficient or Film Convective Coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์หรือเทอร์บูเลนต์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ซึ่งของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้แล้วยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากปั๊มหรือพัดลม) หรือจะเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ  $h$  จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆตามพื้นผิววัตถุ

ดังนั้นในทางวิศวกรรมนั้น เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยโดยตลอดพื้นผิว ( $h_m$ ) แทนค่า  $h$  ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิวจากสมการข้างบนค่า  $h$  จึงถูกแทนด้วยค่า  $h_m$  ดังนั้น  $q$  จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือ การไหลภายในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า  $h$  สามารถหาได้จากวิธีการทดลองซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกันกว้างมากตามแต่ละรูปแบบ สำหรับการประยุกต์ต่างๆ ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงค่า  $h$  ที่ได้จากการไหลในบางรูปแบบ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

| ลักษณะการไหล                         | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $W/(m^2.K)$ |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| การพาความร้อนแบบอิสระ                |                                       |
| ก๊าซ                                 | 2-25                                  |
| ของเหลว                              | 50-1000                               |
| การพาความร้อนแบบบังคับ               |                                       |
| ก๊าซ                                 | 25-250                                |
| ของเหลว                              | 50-20,000                             |
| การเดือดของน้ำและการกลั่นตัวของไอน้ำ | 2,500-100,000                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีความร้อนคือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสาร ซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยที่เราไม่คำนึงถึงรูปแบบของสารการส่งออกของรังสี เชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุลพลังงานของสนาม การแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไป โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลางแต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสูญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่ง จะถูกกำหนดโดยกฎของ สตีเฟน-โบลซ์แมน (Stefan – Boltzman Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (2.13)$$

โดยที่  $T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว  
 $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน – โบลซ์แมน,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

และผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกไปโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ ส่งออกจากตัวแผ่รังสี อุดมคติ (ideal radiator) กำหนดเป็น

$$q = \epsilon \sigma T_s^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (2.14)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity)

คุณสมบัตินี้ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผิวเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำสมการด้านบนใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกของผิว ซึ่งการคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีจะถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิวโดยทั่วไปค่อนข้างยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดขึ้นบ่อยมากในทางปฏิบัติเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวเล็ก ๆ และผิวที่ใหญ่กว่ามากซึ่งอยู่ล้อมรอบผิวที่เล็กกว่านั่นเอง พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่ถูกแยกจากกัน โดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสีนั้น อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q = \frac{Q}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิเช่นนั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการนี้  $A$  เป็นพื้นที่ผิวและ  $\epsilon$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออกในขณะที่  $T_{sur}$  เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม มีการประยุกต์สมการนี้ในรูปอื่นเพื่อให้สะดวกคือ

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (2.16)$$

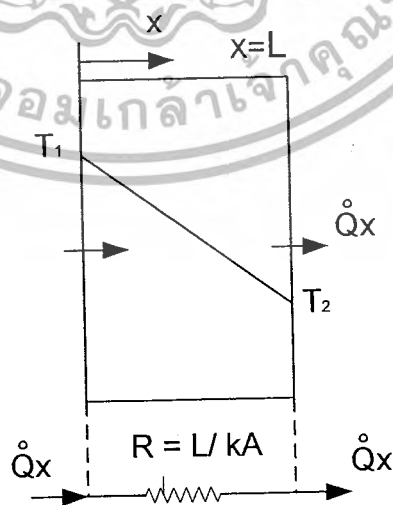
โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ( $h_r$ ) หาได้จาก

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{sur}) (T_s^2 - T_{sur}^2) \quad (2.17)$$

จุดประสงค์ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการพาความร้อน สังเกตว่าค่า  $h_r$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในขณะที่ค่า  $h$  ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

#### 2.6.4 การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimensional Steady-State Conduction)

จะเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับปัญหาการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอในหนึ่งมิติ เพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิ ความร้อนที่ไหลภายในวัตถุที่รูปร่างเป็นแบบผืนเรียบทรงกระบอก และทรงกลมลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้ จะมีเกรเดียนต์หรือการกระจายของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยที่อุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.32 การนำความร้อนจะนำจากด้านที่มีอุณหภูมิมากไปหาน้อย โดยผ่านวัสดุตัวกลางซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีค่าความต้านทานการนำความร้อนที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยจากรูปเรามองวัสดุเหล่านี้เสมือนความต้านทานทางไฟฟ้า นอกจากวัสดุที่ใช้ทำแล้วยังขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุด้วยจากรูป  $\dot{Q}_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ โดยที่ขึ้นอยู่กับความต้านทาน R โดยมองคล้ายกับวงจรไฟฟ้า โดยความร้อนจะเคลื่อนผ่าน  $T_1$  ไปยัง  $T_2$

2.6.5 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่น (ระบบพิกัดฉาก)

พิจารณาการนำความร้อนผ่านแผ่นระนาบ L ภายใต้สภาวะคงตัวในพิกัดฉากบนแกน X ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนในแผ่นระนาบนั้น จะได้การกระจายอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้น หากเปรียบเทียบกับวิชาทางไฟฟ้า อัตราความร้อนที่ไหลผ่านตัวกลาง ( $\dot{Q}_x$ ) เปรียบเสมือนเป็นกระแสไฟฟ้า ผลต่างของอุณหภูมิเปรียบเสมือนความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ในพจน์ของ  $\frac{L}{kA}$  ในสมการฟูเรียร์เปรียบเสมือนความต้านทาน

จากกฎของฟูเรียร์

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\frac{\dot{Q}_x}{A} = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

จะได้

$$\dot{Q}_x = \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{L}{kA}} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond}} \quad \text{มีหน่วยเป็น W} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\frac{L}{kA}$  เรียกว่าความต้านทานต่อการนำความร้อน

และ  $R_{cond} = \frac{L}{kA}$  มีหน่วยเป็น kW

จากรูปที่ 2.33 วิเคราะห์การนำความร้อนของแผ่นระนาบที่ผิวทั้งสองด้านสัมผัสกับของไหล

โดยที่  $T_{\infty 1}, T_{\infty 2}$  อุณหภูมิของของไหลที่บริเวณทางด้านผิว  $x=0$  และ  $x=L$  ตามลำดับ

$T_1, T_2$  อุณหภูมิผิวที่  $x=0$  และ  $x=L$  ตามลำดับ

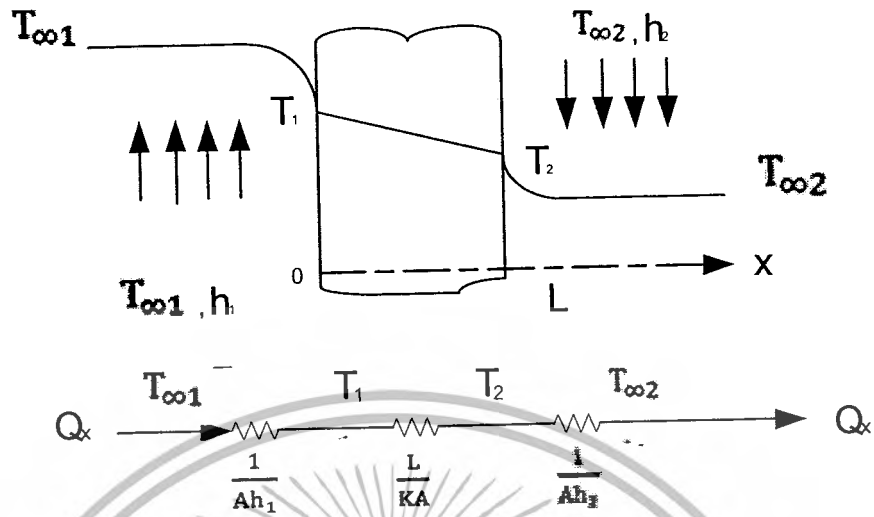
$h_1, h_2$  สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ผิว  $x=0$  และ  $x=L$

$k$  สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลของวัสดุ

จากรูปวัสดุตัวกลางจะทำหน้าที่นำความร้อน โดยมีของไหลไหลผ่านอยู่ทั้งสองด้านเราสามารถหา

อัตราการถ่ายเทความร้อนได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 เปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า

$$\dot{Q}_x = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) \quad \text{ที่ผิว } x=0$$

$$\dot{Q}_x = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad \text{ในแผ่นระนาบ}$$

$$\dot{Q}_x = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad \text{ที่ผิว } x=L$$

$$T_{\infty 1} - T_1 = \left(\frac{1}{h_1 A}\right) \dot{Q}_x$$

$$T_1 - T_2 = \left(\frac{L}{kA}\right) \dot{Q}_x$$

$$T_2 - T_{\infty 2} = \left(\frac{1}{h_2 A}\right) \dot{Q}_x$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$\dot{Q}_x = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{tot}} \quad (2.19)$$

โดยที่  $R_{tot}$  คือความต้านทานรวมซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{conv1}} + R_{\text{cond}} + R_{\text{conv2}}$$

$$= \frac{1}{h_2 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_1 A} \quad \text{มีหน่วยเป็น } ^\circ\text{K/W}$$

โดยที่  $R_{\text{conv}}$  เรียกว่าความต้านทานต่อการพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $^\circ\text{K/W}$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA} \quad \text{มีหน่วยเป็น } ^\circ\text{K/W}$$

### 2.6.5.1 การวิเคราะห์การนำความร้อนผ่านชั้นตัวกลาง

จากรูปที่ 2.34 ความต้านทานความร้อนเมื่อมองให้อยู่ในทางไฟฟ้าซึ่งในรูปนี้วัสดุตัวกลางมีหลายชั้นเปรียบเสมือนเรานำเอาความต้านทานทางความร้อนนั้นมาต่ออนุกรมกัน เราก็จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้โดยพิจารณาการเรียงต่อผนังแบบอนุกรมดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\dot{Q}_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{s1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{s1} - T_2}{\frac{L}{k_A A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{k_B A}} \quad (2.20)$$

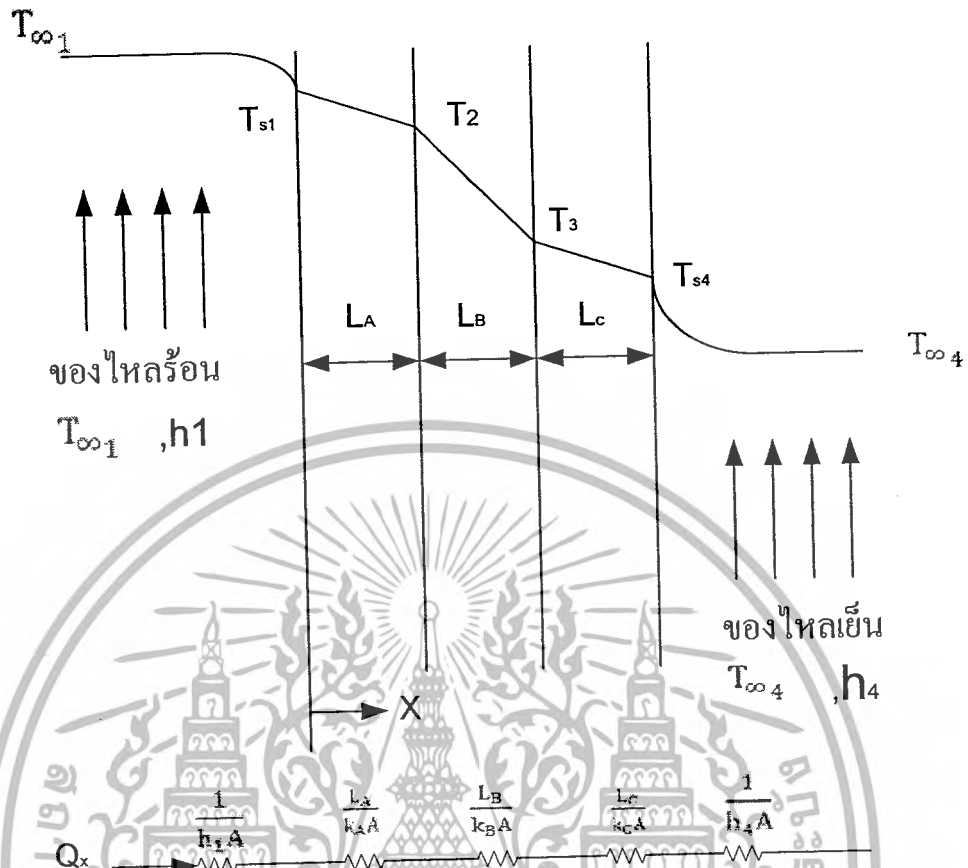
หากพิจารณาผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและไหลเย็น  $T_{\infty 1} - T_{\infty 2}$  จะคำนวณอัตราการนำความร้อนผ่านชั้นตัวกลางได้จาก

$$\dot{Q}_x = UA(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \quad \text{มีหน่วยเป็น } \text{W} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}} A} = \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4}} \quad (2.22)$$

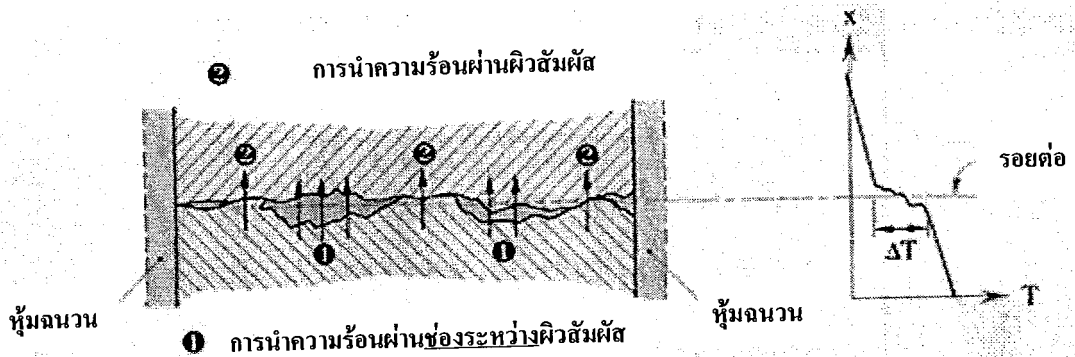
โดยที่  $U$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม มีหน่วยเป็น  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$



รูปที่ 2.34 สมมุติระหว่างการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านผนังประกอบ

### 2.6.5.2 ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง

เนื่องจากระหว่างผิวตัวกลางที่นำมาต่อสัมผัส จะเกิดช่องอากาศหรือช่องของไหลตรงบริเวณผิวตัวกลางสัมผัสกัน โดยจะมีการนำความร้อนผ่านรอยต่อ ส่วนบริเวณที่เป็นช่องอากาศ การถ่ายเทความร้อนผ่านอาจเป็นได้ทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ความต้านทานที่ผิวรอยต่อสามารถ ทำให้ลดลงได้โดยลดความขรุขระของผิวรอยต่อ และเพิ่มความดัน ในการอัดเพื่อให้ผิวรอยต่อแนบสนิทกัน



รูป 2.35 อุณหภูมิตัวกลางจะลดลงตรงบริเวณผิวรอยต่อ

ถ้าฟลักซ์ความร้อนผ่านผิวรอยต่อเป็น  $q''_x$  และผลต่างของอุณหภูมิคร่อมรอยต่อเป็น  $\Delta T$  ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อ  $R_i$  นิยามจาก

$$R_i = \frac{\Delta T}{q''_x} \quad \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$$

ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อของตัวกลางที่เป็นโลหะ ภายใต้สภาวะอากาศที่รอยต่อพิจารณาจากตารางที่ 2.2 ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อของโลหะภายใต้สภาวะอากาศ  $R_i$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W} \times 10^{-4}$ )

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านสัมผัสของโลหะชนิดต่างๆ

| ชนิดผิวรอยต่อ    | ความดันสัมผัส 100 kPa | ความดันอัดสัมผัส 10 MPa |
|------------------|-----------------------|-------------------------|
| เหล็กกล้าไร้สนิม | 6-25                  | 0.7-4.0                 |
| ทองแดง           | 1-10                  | 0.1-0.5                 |
| แมกนีเซียม       | 1.5-3.5               | 0.2-0.4                 |
| อะลูมิเนียม      | 1.5-5.0               | 0.2-0.4                 |

ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อของอะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียม ซึ่งมีของไหลอื่นบรรจุภายในผิวรอยต่อพิจารณาจากตารางที่ 2.3 ความต้านทานความร้อนที่ผิวรอยต่อของอะลูมิเนียมกับอะลูมิเนียม โดยมีผิวรอยต่อของไหลอื่น ๆ บรรจุอยู่

ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทาน ของตัวกลางชนิดต่าง ๆ

| ของไหลในรอยต่อ | ความต้านทาน $R_i$ ( $m^2 \cdot K/W$ ) |
|----------------|---------------------------------------|
| อากาศ          | $2.75 \times 10^{-4}$                 |
| ฮีเลียม        | $1.05 \times 10^{-4}$                 |
| ไฮโดรเจน       | $0.720 \times 10^{-4}$                |
| น้ำมันซิลิโคน  | $0.525 \times 10^{-4}$                |
| กลีเซอริน      | $0.265 \times 10^{-4}$                |

(สภาพผิวขรุขระ  $10 \mu m$  ภายใต้ความดัน 100 kPa)



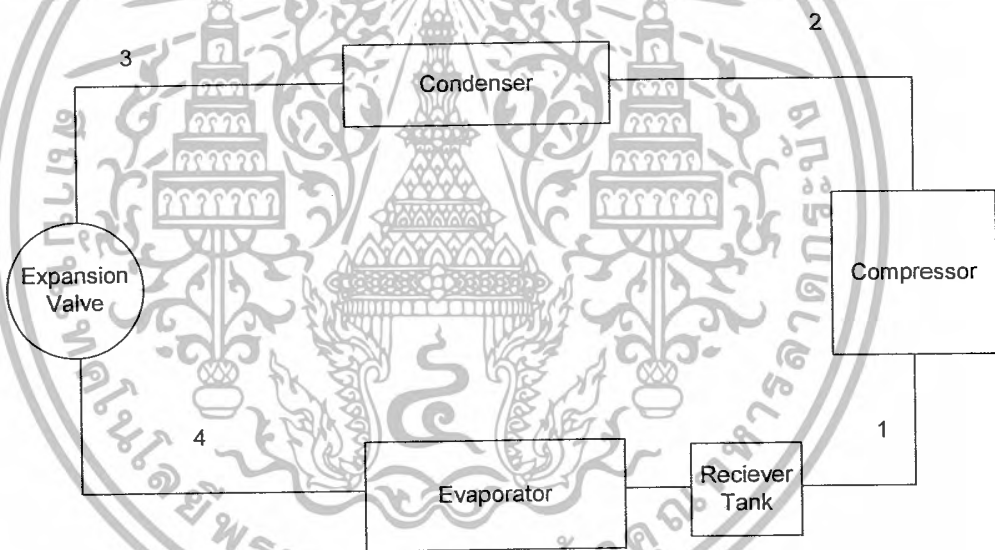
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบ

#### 3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบเครื่องทำน้ำแข็งนั้น ทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบโดยใช้หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์ และระบบทำความเย็นความเย็นชนิดอัดไอ โดยมีอุปกรณ์ทำงานหลัก 4 ส่วนหลัก คือ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) วาล์วควบคุมการไหล (Expansion Valve) และอุปกรณ์เสริมคือถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) โดยที่อุปกรณ์เหล่านี้หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด และมีราคาถูกสามารถนำมาสร้างชุดทดลองสำหรับทำน้ำแข็งได้



รูปที่ 3.1 ระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบชุดทำน้ำแข็งขนาดเล็กขึ้น ซึ่งมีการปรับปรุงมาจากเครื่องทำน้ำเย็นขนาดเล็กโดยออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นดังนี้

- เปลี่ยนวาล์วควบคุมการไหล จากของเดิมใช้ท่อแคบฟิลลารีซึ่งใช้สำหรับภาระการทำงานคงที่ไปเป็นวาล์วขยายตัวแบบทำงานด้วยอุณหภูมิ (TEV) ที่ทำงานด้วยอุณหภูมิของสารทำความเย็น ในอีวาโปเรเตอร์ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนภาระการทำงานของคอมเพรสเซอร์ โดยการเลือกใช้

อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบได้

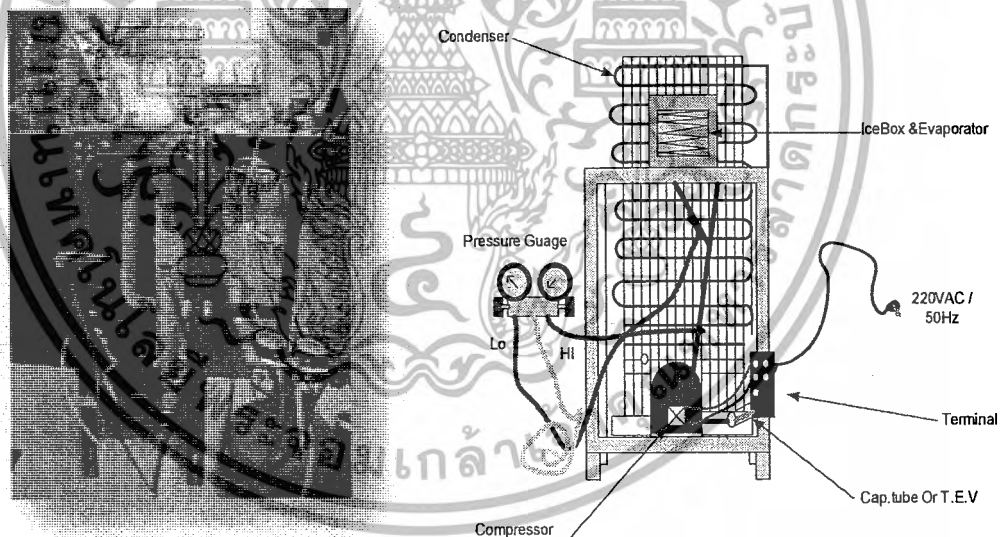
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ติดตั้งถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) เพื่อทำหน้าที่พักน้ำยาเหลวก่อนจะส่งไปยังวาล์วควบคุมการไหล เนื่องจากในการปรับลดความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์นั้นอาจทำให้สารทำความเย็นเกิดเป็นของเหลวได้ เพื่อเป็นการป้องกันของเหลวไหลผ่านเข้าคอมเพรสเซอร์นั้น เราจึงทำการติดตั้งถังเก็บน้ำยาเพื่อเป็นการกรองของเหลวก่อนที่สารทำความเย็นจะเข้าคอมเพรสเซอร์ ซึ่งถ้าของเหลวผ่านเข้าสู่คอมเพรสเซอร์นั้น จะทำให้คอมเพรสเซอร์เสียหายได้

- เปลี่ยนรูปทรงและขนาดของอีวาโปเรเตอร์เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นนั้นจึงต้องออกแบบให้มีพื้นที่สัมผัสกับ Load หรือน้ำให้มากที่สุด ด้วยการใช้ท่อทองแดงขดตัวเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกับช่องน้ำแข็ง มีหน้าที่ดึงความร้อนออกจากน้ำ

- เพิ่มการระบายความร้อนให้กับคอนเดนเซอร์และคอมเพรสเซอร์ การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจำเป็นจะต้องให้คอนเดนเซอร์มีการถ่ายเทความร้อนที่ดี โดยการใช้พัดลมเป่าที่คอนเดนเซอร์

- คิดคำนวณกันความร้อนบริเวณท่อทองแดงและโฝมรอบห้องทำความเย็น เพื่อที่จะช่วยป้องกันความร้อนจากภายนอก



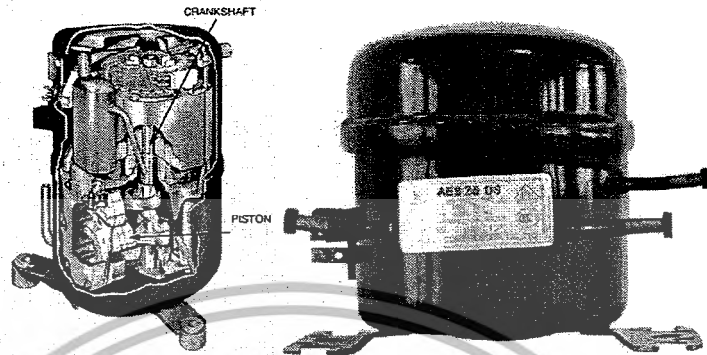
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

คอมเพรสเซอร์ทำหน้าที่อัดไอของสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำให้มีความดันสูง เรียกว่ากระบวนการอัดไอ ในการออกแบบเครื่องทำน้ำแข็งจะใช้แบบหุ้มปิด (Hermetics) ชนิดลูกสูบที่ถูกสร้างขึ้นมาให้กับอุปกรณ์ต้นกำเนิดที่อยู่ภายในเปลือกหุ้มสนิทเดียวกันและแกนโรเตอร์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชิ้นเดียวกับเพลาคือเหียงเป็นอินคักชันมอเตอร์ ชนิด 2 ขั้วใช้แหล่งจ่าย 220V 50Hz กระแส 0.58A มีความเร็วรอบอยู่ที่ 2,850 rpm



รูปที่ 3.3 ลักษณะภายในและคอมเพรสเซอร์ยี่ห้อ Huayi รุ่น AES25DS

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของคอมเพรสเซอร์ Huayi AES25DS

| Model   | Power Supply (V/Hz) | Displacement (cm <sup>3</sup> ) | Oil Charge (ml) | Cooling Type | Motor Type | Cooling Capacity (W) | Rated Current (A) | COP <sub>nom</sub> | ASHRAE Cooling Capacity (W) |       |       |        |        |        | maximum of limited operation in 43°C |                     |
|---------|---------------------|---------------------------------|-----------------|--------------|------------|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------------------------------------|---------------------|
|         |                     |                                 |                 |              |            |                      |                   |                    | -30°C                       | -25°C | -20°C | -15°C  | -10°C  | -5°C   | Running Power (W)                    | Running Current (A) |
| AES25DS | 220-240/50          | 2.96                            | 220             | ST           | RSIR       | 62                   | 0.58              | 0.91               | 43.20                       | 53.00 | 77.00 | 105.80 | 139.00 | 175.00 | 104.00                               | 0.73                |
|         | 110-115/60          | 2.96                            | 220             | ST           | RSIR       | 70                   | 1.00              | 0.97               | 50.00                       | 62.50 | 86.00 | 115.00 | 145.00 | 180.00 | 96.00                                | 1.20                |
|         | 127/60              | 2.96                            | 220             | ST           | RSIR       | 70                   | 1.00              | 0.98               |                             |       |       |        |        |        | 109.00                               | 1.34                |

จากข้อมูลคุณสมบัติของคอมเพรสเซอร์ ในตารางที่ 3.1 สามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้ดังนี้

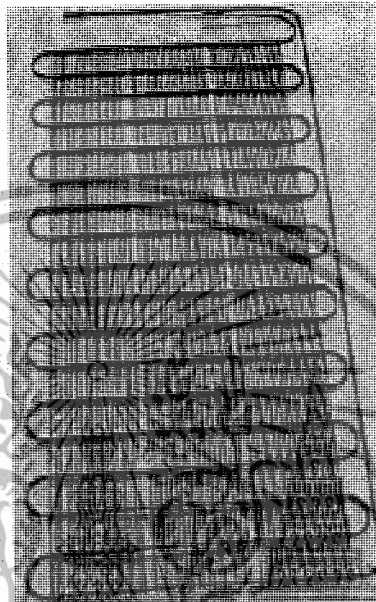
$$V_{pt} = \frac{\pi d^2}{4} \times L \times n \times N \quad (3.1)$$

- โดยที่
- $V_{pt}$  = ปริมาตรระยะคูดของเครื่องอัดไอ
  - $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกสูบ
  - $L$  = ระยะช่วงชัก
  - $n$  = จำนวนกระบอกสูบ
  - $N$  = ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

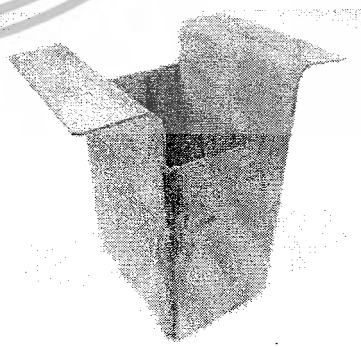
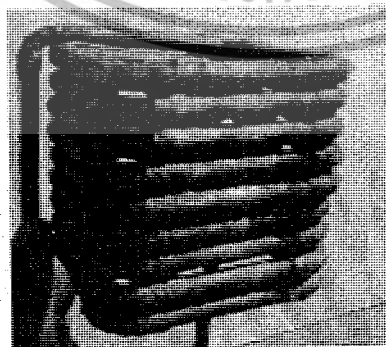
ทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบชุดทดลองเครื่องทำน้ำแข็ง ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นขนาดเล็ก จะใช้คอนเดนเซอร์แบบท่อเหล็กเปลือย มีลวดเหล็กวางขนานเป็นโครงยึดและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.4 คอนเดนเซอร์แบบท่อเหล็กเปลือย

### 3.2.3 อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator)

คณะผู้จัดทำได้ออกแบบอีวาโปเรเตอร์ด้วยท่อทองแดง เพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำแข็งให้มากที่สุด จึงได้ออกแบบให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดเช่นเดียวกับช่องน้ำแข็ง โดยที่สามารถสวมใส่ได้

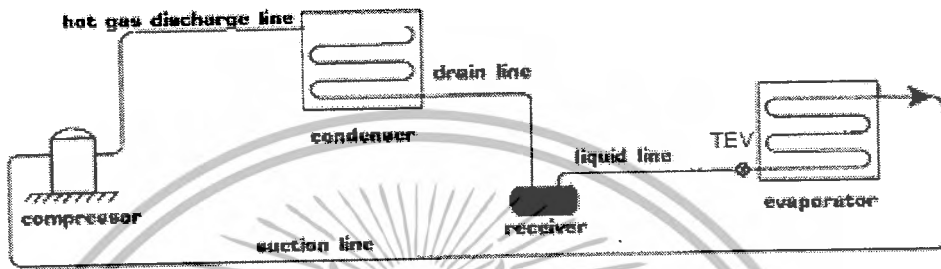


รูปที่ 3.5 อีวาโปเรเตอร์และช่องน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 การคำนวณขนาดท่อทองแดง

วงจรถ่อที่ออกแบบนั้นจะผ่านอุปกรณ์หลักและอุปกรณ์เสริมในวงจรถ่อ มีขนาดและความยาวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แต่ละชนิด โดยจะมีชื่อเรียกตามตำแหน่งหรือสถานะของสารทำความเย็นที่ไหลผ่านเช่น ท่อดูดเย็น (Suction Line) ท่อสารเหลว (Liquid-Line) ท่อแก๊สร้อน (Hot Gas Discharge Line)



รูปที่ 3.6 วงจรถ่อในระบบทำความเย็น

จากความสัมพันธ์

$$A = \frac{\dot{V}}{v} \tag{3.2}$$

และจาก

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

ดังนั้น

$$D = \sqrt{1.27 \frac{\dot{V}}{v}}$$

หรือ

$$v = 1.27 \frac{\dot{V}}{D^2}$$

โดยที่ A แทนพื้นที่หน้าตัดท่อมีหน่วยเป็น in<sup>2</sup> หรือ m<sup>2</sup>

$\dot{V}$  แทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีหน่วยเป็น in<sup>3</sup>/min หรือ m<sup>3</sup>/min

v แทนความเร็วการไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) มีหน่วยเป็น in/min หรือ m/min

ในการออกแบบจะใช้สารทำความเย็น R-134a ซึ่งจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร (ของเหลว) 80 in<sup>3</sup>/min ให้อัตราการไหลโดยมวลสูงสุด 120 ft/min (1440 in/min)

$$D = \sqrt{1.27 \frac{(80)}{(1440)}}$$

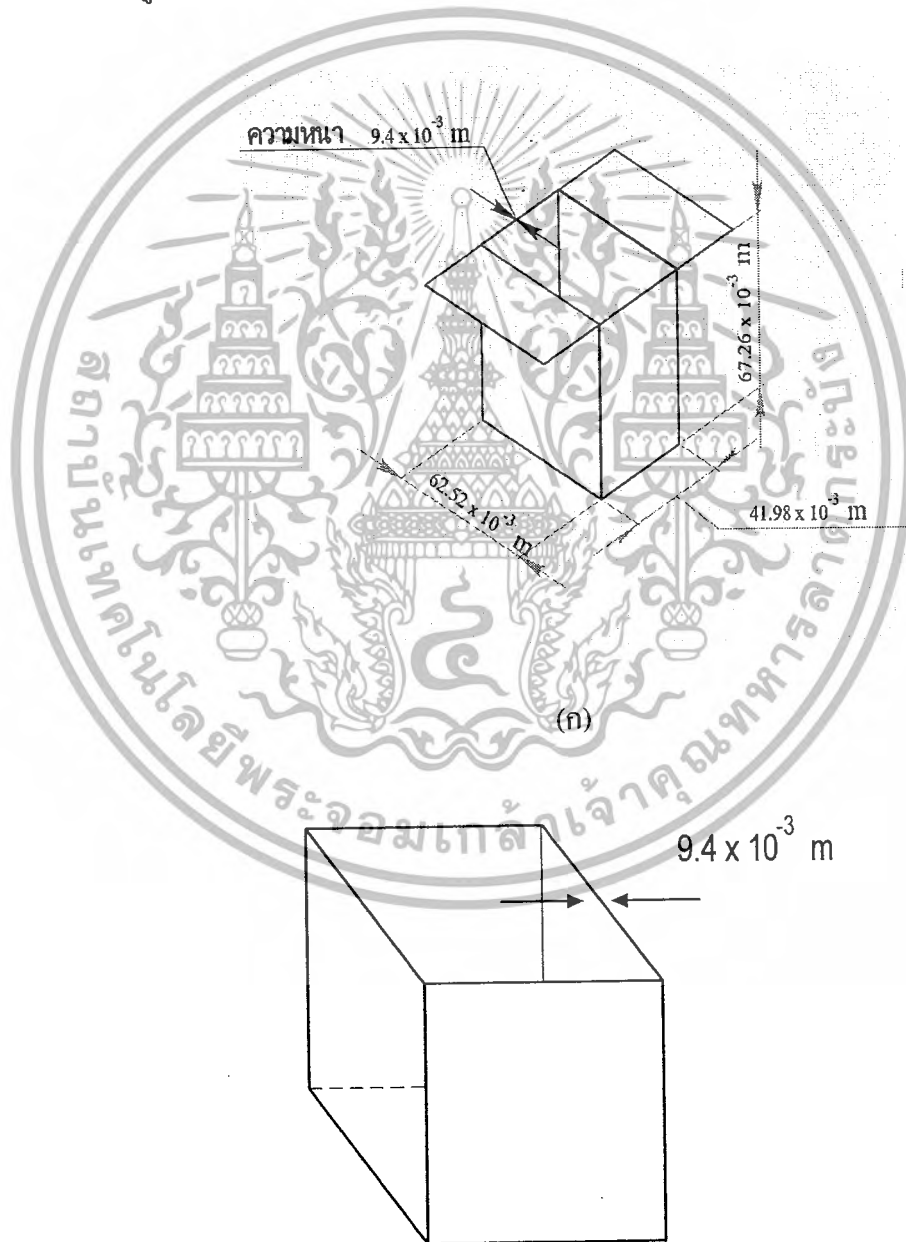
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.26 \text{ in}$$

ดังนั้นใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 0.26 นิ้ว หรือประมาณ 1/4 นิ้ว

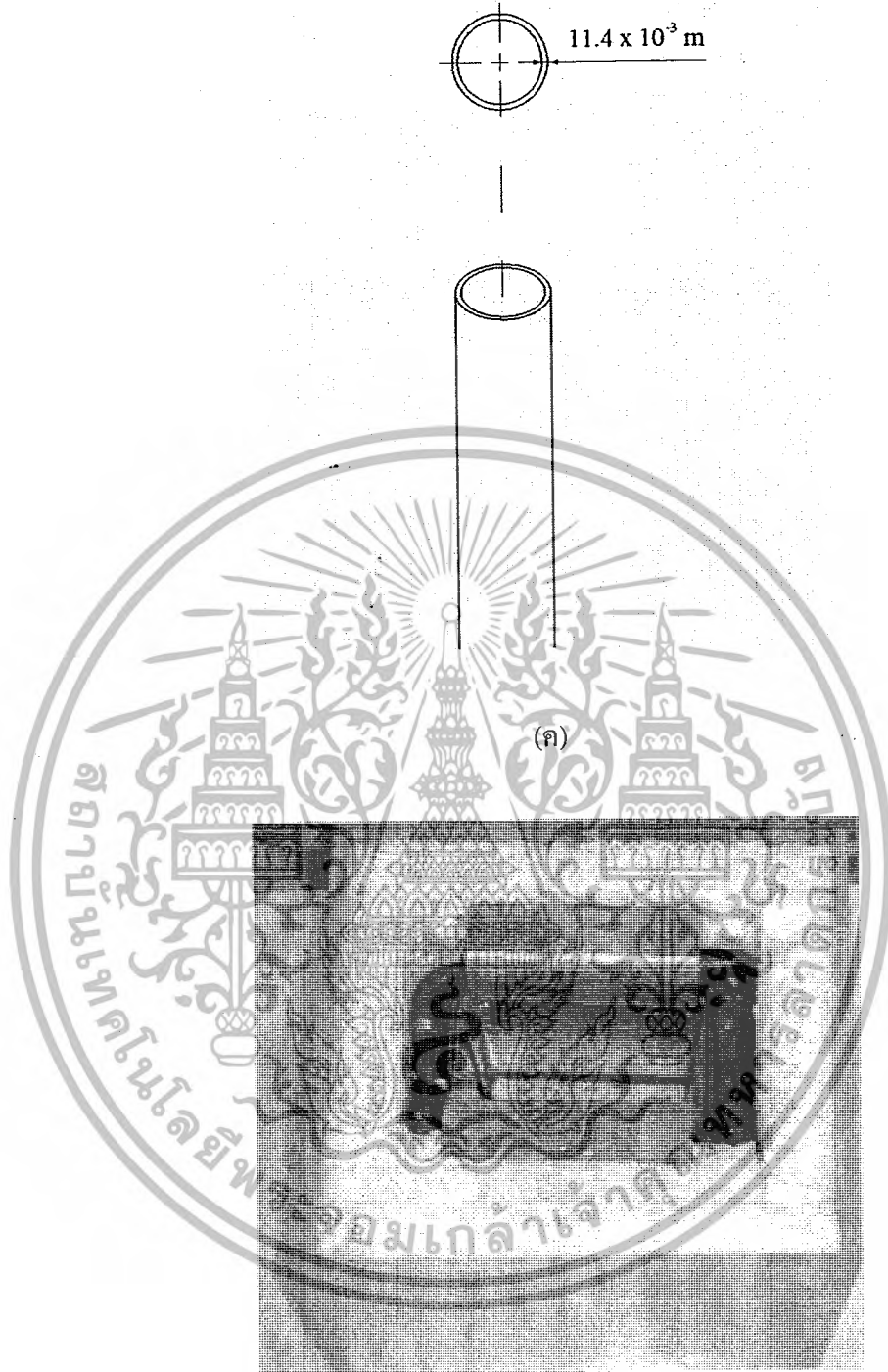
### 3.2.3.2 ช่องน้ำแข็ง (Ice Box)

ช่องน้ำแข็งทำหน้าที่ในการบรรจุน้ำแข็งการเลือกใช้วัสดุจะต้องมีการนำความร้อนที่ดีสังกะสีเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ช่องที่ออกแบบมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำจากแผ่นสังกะสี มีหูหิ้วเพื่อความสะดวกต่อการยกช่องน้ำแข็งมีขนาดดังรูปที่ 3.7



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 3.7 (ก) ขนาดของช่องใส่ น้ำแข็ง (ข) ความหนาของช่องนอก  
(ค) ขนาดของท่อทองแดง (ง) ห้องทำน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

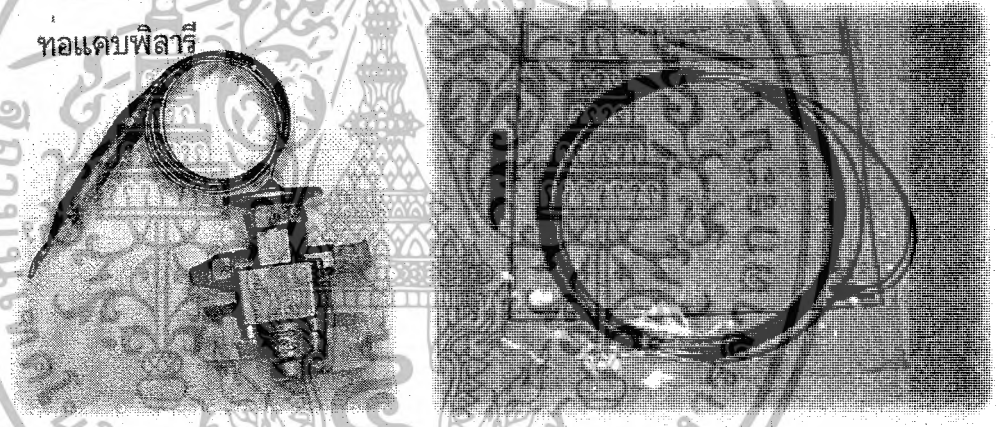
### 3.2.4 วาล์วควบคุมการไหล (Expansion Valve)

เป็นเครื่องควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่ไหลเข้าสู่อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) ให้ได้สัดส่วนกับสารทำความเย็นที่ระเหย และรักษาระดับค่าความแตกต่างความดันระหว่างทางด้านความดันสูงกับความดันต่ำให้อยู่ในระดับเดิม ให้เหมาะสมที่สารทำความเย็นจะระเหยกลายเป็นไอในอีวาโปเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ

ในการออกแบบเครื่องทำน้ำแข็งนั้นจะใช้เครื่องควบคุมการไหล 2 ชนิด คือ ท่อแคปพิลารี (Capillary Tube) และทำการปรับปรุงเปลี่ยนจากท่อแคปพิลารีมาเป็นวาล์วขยายตัวแบบอัตโนมัติทำงานด้วยอุณหภูมิ TEV (Thermostatic Expansion Valve) ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนภาระการทำความเย็นได้

วิธีการเลือกขนาดและความยาวของท่อแคปพิลารีนั้นมีหลากหลายวิธี อาจจะใช้ข้อมูลของอีวาโปเรเตอร์ เครื่องควบแน่นหรืออาจจะใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตคอมเพรสเซอร์

ท่อแคปพิลารี



รูปที่ 3.8 ท่อแคปพิลารีหรือหลอดรูเล็ก

ตารางที่ 3.2 การเลือกขนาดและความยาวของท่อแคปพิลารี

| Evap. Temp. °C | -10 |      |     |      | -5   |      |      |      | 0   |      |      |      | 5  |      |      |      |
|----------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|----|------|------|------|
|                | 25  |      | 32  |      | 25   |      | 32   |      | 25  |      | 32   |      | 25 |      | 32   |      |
| Ambient °C     | L   | Dia. | L   | Dia. | L    | Dia. | L    | Dia. | L   | Dia. | L    | Dia. | L  | Dia. | L    | Dia. |
| LUH Model      | m   | mm   | m   | mm   | m    | mm   | m    | mm   | m   | mm   | m    | mm   | m  | mm   | m    | mm   |
| AES25          | 2.1 | 0.8  | 2.8 | 0.8  | 1.55 | 0.8  | 1.95 | 0.8  | 1.1 | 0.8  | 1.45 | 0.8  |    |      | 1    | 0.8  |
| AES25DS        | 1.1 | 0.6  | 1.6 | 0.8  | 1.55 | 1    | 0.95 | 0.8  | 1.1 | 1    | 1.4  | 1    |    |      | 1.05 | 1    |
|                | 2.2 | 1    |     |      |      |      | 1.95 | 1    |     |      |      |      |    |      |      |      |

การเลือกขนาดและความยาวของท่อแคปพิลารีสามารถพิจารณาเลือกใช้งานได้จากข้อมูลผู้ผลิตคอมเพรสเซอร์และอุณหภูมิของอีวาโปเรเตอร์ยกตัวอย่างเช่น คอมเพรสเซอร์รุ่น AES25DS มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของอีวาโปเรเตอร์ที่ใช้งานที่  $-10^{\circ}\text{C}$  มีอุณหภูมิโดยรอบ  $32^{\circ}\text{C}$  จากตารางที่ 3.2 ควรใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 mm และความยาว 1.6 m

สำหรับการเลือกใช้งานวาล์วอัตโนมัติทำงานด้วยอุณหภูมิหรือ TEV นั้น ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้ยี่ห้อ Danfoss ซึ่งการใช้งานจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำความเย็นและช่วงของอุณหภูมิที่ไหลผ่าน ในการทดลองนี้ได้ใช้สารทำความเย็น R-134a ดังนั้นควรเลือกใช้ TEV รุ่น TN2

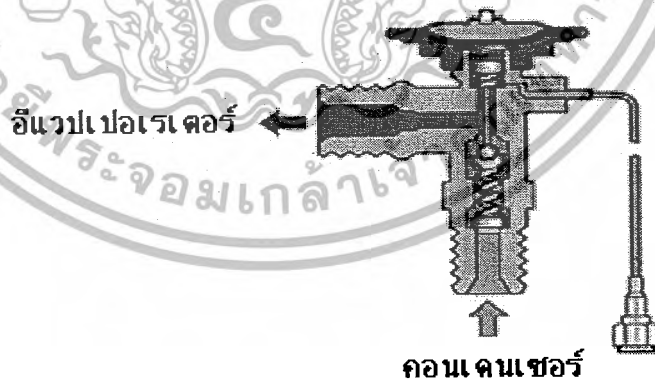
ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของ TEV ของ Danfoss THER.EXP.VALVE TN2 R-134a

Thermostatic element with: bulb strap, without: orifice, filter cone and nuts Flare x flare connection

| Refrigerant | Valve type | Pressure equalization Flare | Capillary tube<br>m | Connection     |         | Code no. <sup>b</sup>   |           |                         |                          |                         |           |
|-------------|------------|-----------------------------|---------------------|----------------|---------|-------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
|             |            |                             |                     | Inlet x outlet |         | Range N<br>-40 to +10°C |           | Range NM<br>-40 to -5°C | Range NL<br>-40 to -15°C | Range B<br>-60 to -25°C |           |
|             |            |                             |                     | in. x in.      | mm x mm | Without MOP             | MOP +15°C | MOP 0°C                 | MOP -10°C                | Without MOP             | MOP -20°C |
| R22         | TX2        | -                           | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3206                | 068Z3208  | 068Z3224                | 068Z3226                 | 068Z3207                | 068Z3228  |
|             | TEX2       | 1/4 in.                     | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3209                | 068Z3211  | 068Z3225                | 068Z3227                 | 068Z3210                | 068Z3229  |
| R407C       | TZ2        | -                           | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3496                | 068Z3516  |                         |                          |                         |           |
|             | TEZ2       | 1/4 in.                     | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3501                | 068Z3517  |                         |                          |                         |           |
| R134a       | TN2        | -                           | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3346                | 068Z3347  | 068Z3393                | 068Z3369                 |                         |           |
|             | TBN2       | 1/4 in.                     | 1.5                 | 3/8 x 1/2      | 10 x 12 | 068Z3348                | 068Z3349  | 068Z3392                | 068Z3370                 |                         |           |

อธิบายการติดตั้ง TEV ในชุดทดลอง

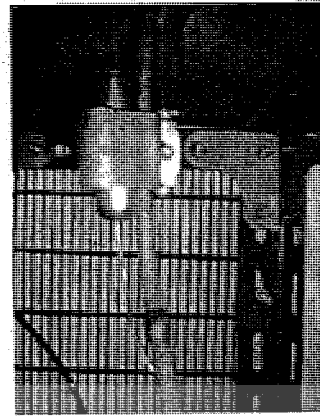
การติดตั้ง TEV จะติดตั้งแทนที่ท่อแคปพิลารี ซึ่งในการติดตั้งนั้นจะเอาท่อแคปพิลารีออกแล้วนำเอา TEV มาใส่ ณ จุดที่ออกจากคอยล์ร้อน (คอนเดนเซอร์) แล้วทางออกจะนำไปเชื่อมต่อเข้ากับท่อที่จะส่งไปยังคอยล์เย็น (อีวาโปเรเตอร์) เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความดันของสารทำความเย็น



รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในของ TEV



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 (ก.) การติดตั้ง TEV (ข.) การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ

### 3.2.5 สารทำความเย็น (Refrigerant)

สารทำความเย็นที่ใช้ในการทดลองคือ Refrigerant-134a เป็นสารที่มีความปลอดภัยสูงและไม่ทำลายชั้นบรรยากาศและนิยมใช้ในปัจจุบัน ราคาถูกสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดมีจุดเดือดที่  $-15.0^{\circ}\text{F}$  ( $-26.2^{\circ}\text{C}$ ) โดยสามารถใช้ได้กับคอมเพรสเซอร์ Huayi AES25DS ได้เป็นอย่างดีเพราะไม่รวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นของคอมเพรสเซอร์



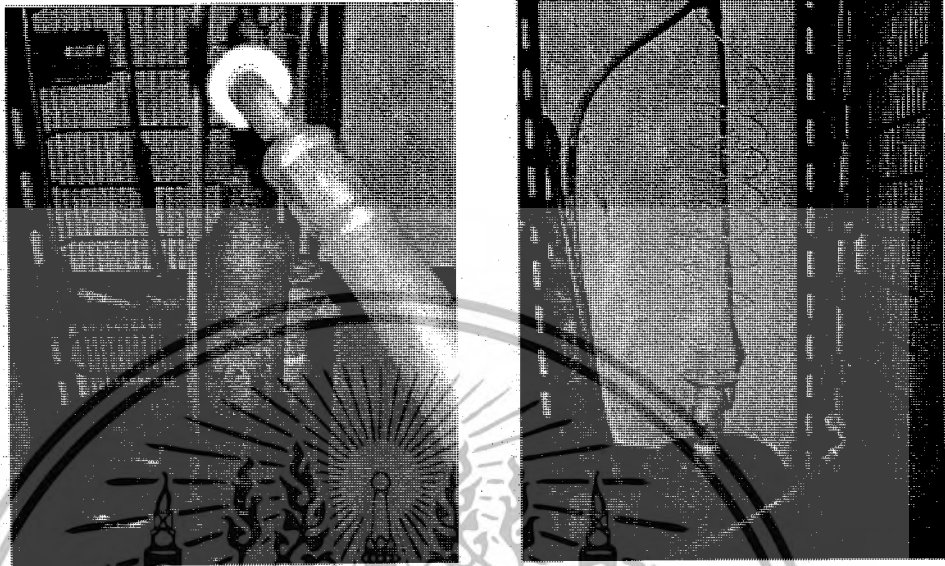
รูปที่ 3.11 สารทำความเย็น R-134a

### 3.2.6 ถังเก็บน้ำยา

ถังเก็บน้ำยา (Receiver Tank) ทำหน้าที่เก็บสารทำความเย็นที่ควบแน่นกลายเป็นของเหลว จากคอนเดนเซอร์จะถูกนำมาพักเก็บไว้ก่อนที่จะส่งไปยังวาล์วอัตโนมัติควบคุมด้วยอุณหภูมิ (TEV)

นอกจากนั้นแล้วยังช่วยป้องกันคอมเพรสเซอร์เสียหายเนื่องจากสารทำความเย็นเหลว เนื่องจาก  
เอกสารนี้เป็นเอกส นอกจกนั้นแล้วยังช่วยป้องกันคอมเพรสเซอร์เสียหายเนื่องจากสารทำความเย็นเหลว เนื่องจาก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่อัดไอเทานั้น การติดตั้งจะติดตั้งในทางเดินที่ก่อนเข้าคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ถังเก็บน้ำยาและการติดตั้งในระบบ

### 3.3 ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน

การปฏิบัติงานทำความเย็นนั้นคือการปฏิบัติที่เกี่ยวกับการติดตั้งและการตรวจสอบการบำรุงรักษา รวมถึงการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจะเป็นการปฏิบัติที่มีโอกาสที่จะเกิดอันตรายได้จากสาเหตุต่างๆ ทั้งจากปัญหาในระบบไฟฟ้าและระบบเครื่องกล เช่น ปัญหาจากสารทำความเย็น ปัญหาจากกระแสไฟฟ้า ความร้อน ความเย็น สารเคมี หรืออันตรายที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบ ดังนั้นผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องทำการศึกษาถึงวิธีที่จะปฏิบัติอย่างถูกต้องปลอดภัยเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอันตรายต่อผู้ปฏิบัติหรือผู้ใช้งานในระบบทำความเย็น

#### 3.3.1 อันตรายที่เกิดจากสารทำความเย็น

ข้อควรระวังในการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทำความเย็นมีดังนี้

- บริเวณที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับสารทำความเย็นจะต้องมีอากาศถ่ายเทได้ดีเพราะอาจจะมีการทำความเย็นรั่วออกจากระบบ และเนื่องจากคุณสมบัติที่หนักกว่าอากาศทำให้สารทำความเย็นกระจายไปแทนที่อากาศในห้อง ทำให้เกิดการขาดออกซิเจนเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปล่องสารทำความเย็นออกจากระบบให้หมด ปล่องไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านก่อนใช้เพื่อเชื่อมหรือตัดอุปกรณ์ในระบบ ห้ามเชื่อมอุดรอยรั่วในขณะที่ภายในระบบยังมี สารทำความเย็นอยู่ เนื่องจากเมื่อสารทำความเย็นได้รับความร้อนจะมีอัตราการขยายตัวสูงมากอาจ จะทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง หรือเมื่อสารทำความเย็นสัมผัสกับเปลวไฟ ขณะเชื่อมจะเกิด การเผาไหม้ได้เกิดพิษที่ไม่มีสีแต่มีกลิ่นฉุนเป็นอันตรายต่อร่างกาย

- สวมถุงมือและใส่แว่นตาเมื่อปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทำความเย็น เนื่องมาจากการที่ สารทำความเย็นทั่วไปมีจุดเดือดต่ำมาก เช่น R-22 ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศและสัมผัสกับผิวหนัง หรือ ดวงตา จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอเป็นอย่างรุนแรงและเกิดความเย็นจัด จึงทำให้ เกิดการบาดเจ็บเนื่องจากผิวหนังหรือดวงตาถูกกดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จะเกิดน้ำแข็งจับบริเวณนั้น เป็นการบาดเจ็บเนื่องจากถูกความเย็นจัด (Frostbite) ซึ่งจะเกิดอาการเจ็บปวดคล้ายถูกไอน้ำหรือน้ำ ร้อนลวกซึ่งถ้าเกิดเหตุดังกล่าวให้รีบแก้ไข โดยการใช้น้ำจากก๊อกที่สะอาดปล่อยผ่านผิวหนัง หรือ ดวงตาที่ถูกสารทำความเย็น เพื่อปรับอุณหภูมิที่เย็นจัดให้คืนสภาพปกติ

- สวมถุงมือเมื่อจะปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับคอมเพรสเซอร์ชนิดปิดหรือกึ่งปิด ที่อาจจะได้รับ ความเสียหายจากมอเตอร์ไหม้ เนื่องจากสารทำความเย็นที่อยู่ในระบบจะเกิดปฏิกิริยากลายเป็นกรด ซึ่งจะทำอันตรายกับผิวหนังได้

- ห้ามใช้ท่อหรือสายยางจุ่มในถังเพื่อดูดสารทำความเย็นจากถัง (Siphoning) เพราะอาจจะ ทำให้สารทำความเย็นเข้าไปในปากเกิดอันตรายได้

- ในกรณีของเหลวค้างอยู่ในท่อหรือถูกกักเก็บอยู่ในอุปกรณ์ ในช่วงที่ระบบมีอุณหภูมิต่ำ จะต้องระมัดระวังการเกิดอันตรายเนื่องจากการขยายตัวของสารทำความเย็นเหลว คือหลังจากระบบ หยุดสร้างความเย็นบริเวณรอบ ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นถ้าไม่มีที่ว่างสำหรับการขยายตัวของสารทำความ เย็นเหลวจะทำให้เกิดความดันภายในสูงขึ้นจนเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้

### 3.3.2 อันตรายที่เกิดจากถังความดัน

ถังความดันที่ใช้เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานทำความเย็น ได้แก่ ถังบรรจุสารทำความเย็น ถังแก๊สออกซิเจนสำหรับใช้ในงานเชื่อมถังแก๊สไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับงาน ตรวจสอบรอยรั่วหรือทำความสะอาดระบบ หรือใช้ช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ขณะทำการเชื่อม เป็นต้น ถังความดันต่าง ๆ เหล่านี้จะต้องนำไปใช้งานอย่างถูกต้องเพื่อความปลอดภัย ซึ่งได้มี ข้อเสนอแนะทาง ด้านความปลอดภัยต่าง ๆ ดังนี้

- ห้ามบรรจุสารทำความเย็นเข้าในถังเกินกว่า 80% ของปริมาตรถัง เนื่องจากเมื่อได้รับความ ร้อนสารทำความเย็นจะขยายตัว จึงต้องมีที่ว่างเพื่อรองรับการขยายตัวดังกล่าว ถ้าบรรจุ สารทำความเย็นจนเต็มถึงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สารทำความเย็นจะขยายตัวเกิดความดันภายในสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถทำให้ถึงระเบิดเกิดอันตรายได้ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถังบรรจุสารทำความเย็นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ผลิตมาสำหรับการใช้งานเพียงครั้งเดียวไม่สามารถนำกลับมาเติมสารทำความเย็นใช้งานใหม่โดยถังประเภทนี้จะเขียนบอกไว้ที่ถังว่า Non-Refillable หรือ Disposable และไม่ควรนำถังประเภทนี้มาใช้ถ่ายสารทำความเย็นเพื่อใช้งานใหม่เมื่อสารทำความเย็นหมด ให้เปิดวาล์วที่ถังทิ้งไว้เพื่อระบายแก๊สที่ค้างอยู่ในถังทิ้งให้หมดก่อนนำไปทำลายทิ้ง และถังประเภทที่สามารถนำกลับไปบรรจุสารทำความเย็นเพื่อใช้งานใหม่ (Refillable) ซึ่งเป็นถังที่มีโครงสร้างแข็งแรงใช้โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า เมื่อใช้หมดแล้วสามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้งานใหม่ได้

- อย่าตั้งถังบรรจุสารทำความเย็นไว้กลางแดดจัด หรือในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 125 °F (52 °C) เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดความดันภายในถังสูงมากขึ้นจนตัวถังระเบิดได้

- ขณะบรรจุสารทำความเย็นเข้าในระบบในสถานะที่เป็นแก๊สนั้น อุณหภูมิและความดันภายในถังจะลดต่ำลง ให้แก้ไขโดยการแช่ถังในอ่างน้ำอุ่นอุณหภูมิไม่เกิน 90 °F (32 °C) ห้ามใช้เปลวไฟจากหัวเชื่อมแก๊สในการเพิ่มความดันภายในถัง

- ถังบรรจุไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งใช้สำหรับการตรวจสอบรอยรั่ว หรือใช้เป่าทำความสะอาดภายในระบบ ซึ่งถูกบรรจุด้วยความดันสูงมากประมาณ 2,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว ในการติดตั้งถังเพื่อใช้งาน หรือเมื่อต้องการที่จะเคลื่อนย้ายถังจะต้องมีโซ่เหล็กมัดถังให้แน่นและมีฝาครอบวาล์ว (Protective Cap) เพื่อป้องกันการกระแทกตัววาล์วเพราะเมื่อถังล้มและวาล์วถูกกระแทกเสียหายแก๊สความดันสูงจะพุ่งออกจากถังเกิดแรงผลักดัน ทำให้ถังพุ่งชนเกิดอันตรายได้ นอกจากนี้ในการปล่อยแก๊สไปใช้งานจะต้องต่อผ่านวาล์วควบคุมความดัน (Pressure Regulator) เสมอ เพื่อจะควบคุมความดันเข้าในระบบไม่เกิน 150 ปอนด์/ตารางนิ้ว และให้รีบปิดวาล์วควบคุมที่ถังทันทีเมื่อได้ความดันตามต้องการแล้ว เพื่อป้องกันอันตรายจากวาล์วควบคุมรั่ว ทำให้ความดันสูงในถังจะเข้าไปในระบบ ท่อสารทำความเย็นหรืออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทำความเย็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมเพรสเซอร์จะไม่สามารถรับความดันสูงที่เกิดขึ้นจึงอาจเกิดการระเบิดได้

- กรณีที่ใช้ออกซิเจน สายหรือท่อแก๊สที่ใช้มันจะต้องสะอาดและปราศจากน้ำมันหรือวัสดุที่เป็นไขเพื่อป้องกันการระเบิดเนื่องจากการติดไฟเพราะออกซิเจนเป็นแก๊สที่ช่วยให้ไฟติด จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษและห้ามใช้ออกซิเจนอัดแทนไนโตรเจนสำหรับทดสอบรอยรั่วโดยเด็ดขาด

### 3.3.3 อันตรายที่เกิดจากการใช้ไฟฟ้า

ข้อควรระวังเกี่ยวกับอันตรายที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ามีดังนี้

- ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายซึ่งอาจจะเกิดจากร่างกายสัมผัสถูกสายไฟทั้งสองเส้นหรืออาจจะสัมผัสถูกวัตถุที่มีกระแสไฟฟ้ารั่วอยู่ในขณะที่ร่างกายส่วนอื่นสัมผัสกับพื้นดิน โดยกระแสไฟฟ้าจะสามารถผ่านร่างกายสู่ดินครบวงจรทำให้เกิดอันตรายได้ ความต้านทานของร่างกาย

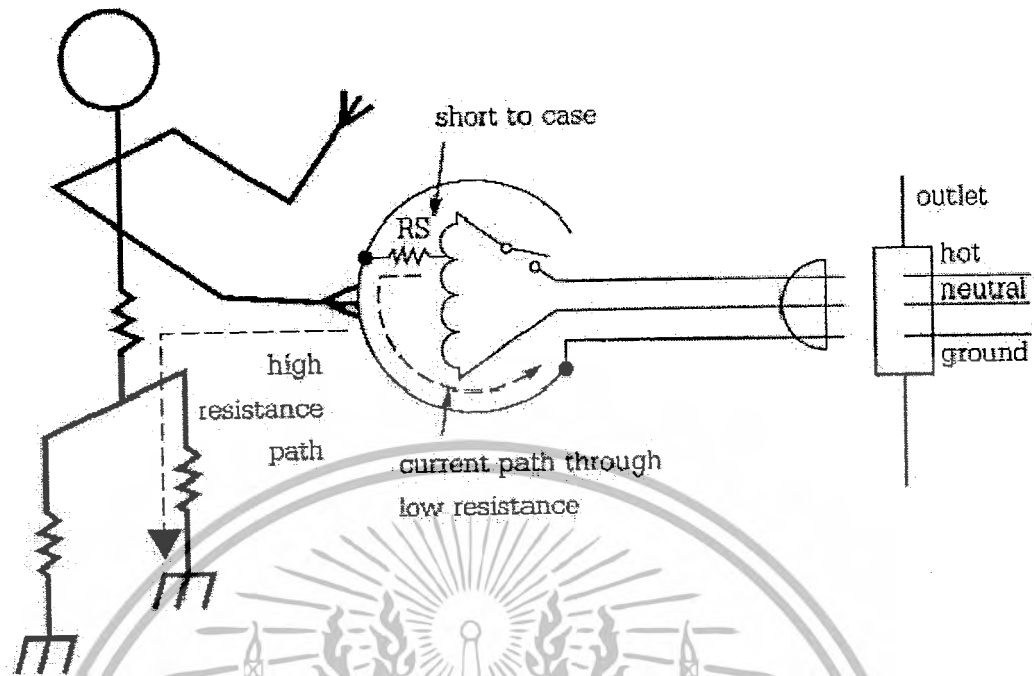
จะแตกต่างกันตามสภาพของผิวหนัง เช่น ผิวแห้งจะมีค่าความต้านทานประมาณ 200,000 – 700,000 โอห์ม แต่ถ้าผิวหนังเปียกชื้นจะมีค่าความต้านทานเพียง 1,000 – 10,000 โอห์มเท่านั้น ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายได้ง่ายกว่า การคำนวณหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายสามารถทำได้โดยใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ซึ่งระบุว่า กระแสไฟฟ้า (I) เท่ากับ แรงดันไฟฟ้า (V) หารด้วยความต้านทาน (R) หรือ  $I = \frac{V}{R}$  ดังนั้น ถ้าแรงดันไฟฟ้าเป็น 240 โวลต์ และความต้านทานของร่างกายเป็น 1,000 โอห์ม กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายจะเป็น 0.24 แอมแปร์ ซึ่งถือว่าเป็นอันตรายได้

โอห์ม แต่ถ้ามีความชื้นหรือแห้งออกเพียงเล็กน้อยความต้านทานจะลดเหลือเพียง 80 – 1,000 โอห์ม เท่านั้นอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าดูดหรือกระแสไฟรั่ว ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟที่ไหลผ่านในร่างกายดังนี้

ตารางที่ 3.4 แสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านร่างกาย

| จำนวนกระแสไฟฟ้า<br>มิลลิแอมแปร์ | อาการหรืออันตรายที่เกิดขึ้น   |
|---------------------------------|---|
| 0 - 0.5                         | ไม่เกิดอาการใด ๆ  |
| 0.5 - 2                         | กล้ามเนื้อกระตุกเล็กน้อย ไม่ถึงขั้นอันตราย  |
| 2 - 10                          | กล้ามเนื้อกระตุกมากขึ้น เกิดอาการเกร็ง  |
| 10 - 50                         | กล้ามเนื้อกระตุกรุนแรง อาจทำให้ล้มพาดหรือตกจากที่สูง ไม่สามารถ<br>ดิ้นหลุดอาจเกิดบาดแผลไหม้พองได้ |
| 50 - 100                        | กล้ามเนื้อกระตุกอย่างรุนแรง ระบบการหายใจขัดข้อง   |
| 100 - 200                       | หัวใจหยุดเต้น เสียชีวิต   |
| มากกว่า 200                     | เกิดบาดแผลไหม้อย่างรุนแรง หยุดการหายใจ เสียชีวิต  |

- วิธีป้องกันอันตรายจากไฟรั่ว - โดยเนื่องจากกระแสไฟฟ้านั้นจะไหลไปในเส้นทางที่มี  
ความต้านทานน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าวัดผ่านร่างกาย จึงต้องป้องกัน  
โดยการต่อสายดิน (Ground) เพื่อเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าที่รั่วมาที่โครงของเครื่องมือหรืออุปกรณ์  
ไหลผ่านลงดินตามสายดินที่ต่อไว้แทนที่จะไหลผ่านร่างกายดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเชื่อมต่อสายดิน

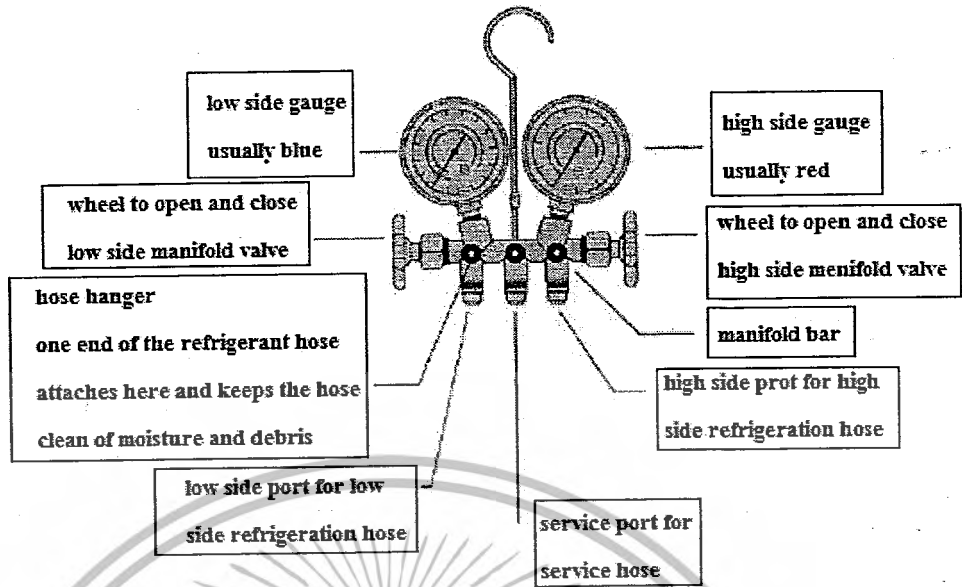
### 3.4 เครื่องมือบริการ

#### 3.4.1 เกจแมนิโฟลด์

เกจแมนิโฟลด์ (Manifold Gauge) คือ เครื่องมือเฉพาะสำหรับช่างเครื่องทำความเย็นใช้สำหรับการบริการและการตรวจวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การทำสุญญากาศเพิ่มเติม สารทำความเย็นการเติมสารหล่อลื่น การตรวจวัดความดันการหาอุณหภูมิระเหย และอุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็นในระบบ

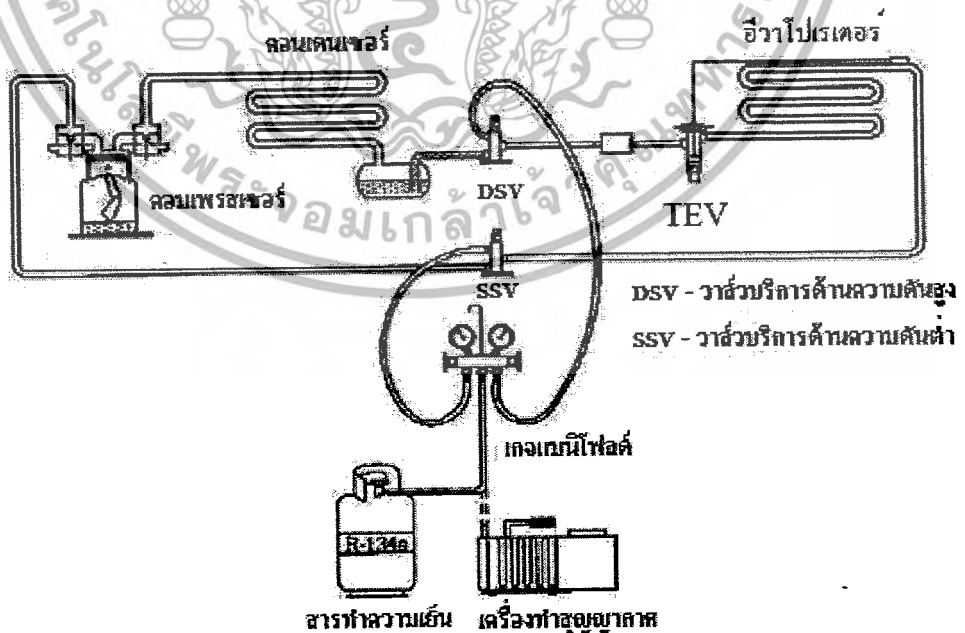
#### ส่วนประกอบของเกจแมนิโฟลด์ (Manifold Gauge Set)

ชุดเกจแมนิโฟลด์ประกอบด้วยเกจความดันต่ำ (Low Side Gauge หรือ Compound Gauge) เกจความดันสูง (High Side Gauge) ท่อร่วม (Manifold Bar) วาล์วควบคุม (Manifold Valve) สายน้ำยา (Charging Hose) ดังแสดงในรูป 3.14



รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบต่างๆ ของเกจแมนิโฟลด์

การติดตั้งเกจแมนิโฟลด์เพื่อการบริการหรือการวิเคราะห์ปัญหาในระบบ ทำได้โดยการต่อสายน้ำยาทางด้านความดันต่ำ (สายสีน้ำเงิน) เข้ากับระบบด้านความดันต่ำสายน้ำยาด้านความดันสูง (สายสีแดง) เข้ากับระบบทางด้านความดันสูง และสายเส้นกลาง (สายสีเหลือง) ต่อเข้ากับเครื่องทำสุญญากาศหรือถังน้ำยาเมื่อต้องการทำสุญญากาศหรือเติมสารทำความเย็นเข้าในระบบดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการติดตั้งและการใช้งานเกจแมนิโฟลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูช่างในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เหมือนญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 วาล์วบริการ

วาล์วบริการ (Service Valve) คือ อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบทำความเย็นประกอบด้วยวาล์วบริการด้านความดันต่ำ (Low Side หรือ Suction Service Valve) ติดตั้งอยู่ด้านความดันต่ำของระบบ เช่น ติดตั้งที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์หรือติดตั้งอยู่กับท่อสารทำความเย็นทางด้านดูดที่ออกจากเครื่องระเหย และวาล์วบริการด้านความดันสูง (High Side หรือ Discharge Service Valve) ซึ่งจะติดตั้งอยู่ทางด้านความดันสูงของระบบ เช่น ติดตั้งที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ หรือติดตั้งอยู่กับท่อสารทำความเย็นเหลวที่ออกจากคอนเดนเซอร์ ในการปฏิบัติงานเพื่อการบริการและตรวจวิเคราะห์ปัญหาในระบบทำความเย็น จะใช้เกจแมนิโพลด์ต่อเข้ากับวาล์วบริการของระบบทำความเย็น

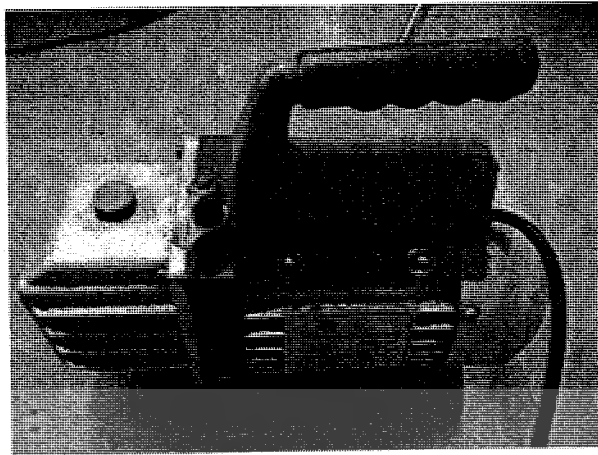


รูปที่ 3.16 วาล์วบริการ (ก) แบบหัวลูกศร (ข) แบบปรับด้วยมือ

### 3.4.3 เครื่องทำสุญญากาศ

เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum Pump) คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบผ่านเกจแมนิโพลด์และวาล์วบริการที่ติดตั้งในระบบ

การทำสุญญากาศในระบบ (Evacuating The System) คือ การใช้เครื่องทำสุญญากาศดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบ เพื่อให้ภายในระบบเกิดเนื้อที่ว่างที่จะใช้บรรจุสารทำความเย็น และเพื่อจะไม่ให้มีอากาศหรือความชื้นปะปนอยู่ในระบบ ดังนั้นหลังจากเครื่องทำความเย็นหรือเครื่องปรับอากาศประกอบชิ้นใหม่มีการตรวจสอบหรือติดตั้งใหม่ซึ่งการปฏิบัติดังกล่าวมีโอกาสที่จะทำให้อากาศและความชื้นเข้าไปในระบบได้นั้น จึงต้องมีการทำสุญญากาศทุกครั้งก่อนเติมสารทำความเย็นเข้าไปในระบบ



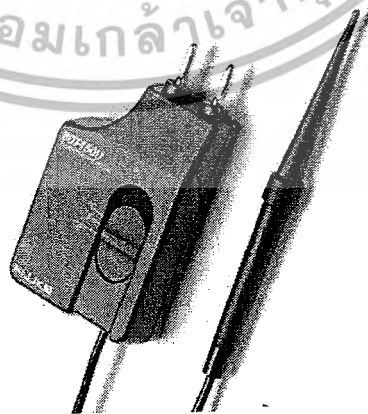
รูปที่ 3.17 เครื่องทำสุญญากาศ

#### 3.4.4 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าในเครื่องทำความเย็นทั่วไปนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนของวงจรกำลัง (Power Circuit) และวงจรควบคุม (Control Circuit) ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ส่วนในวงจร การที่แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าช่วยในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลเพื่อทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป เครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีดังนี้

##### 3.4.4.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ในการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องทำความเย็นนั้น ต้องใช้เครื่องมือวัดที่สามารถสัมผัสกับท่อทองแดงได้ ดังนั้นจึงใช้หัววัดอุณหภูมิของ FLUKE 80T-150U ที่มีคุณสมบัติครบถ้วนและสะดวกต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.18 หัววัดอุณหภูมิ FLUKE 80T-150U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณสมบัติของหัววัดอุณหภูมิ FLUKE 80T-150U

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| ย่านการวัด | -50 to +150 °C หรือ -58 to +302° F |
| ความแม่นยำ | ±1% ที่ 0-100 °C                   |
| ความไว     | 1 mVdc / °C or °                   |

การใช้งานหัววัดอุณหภูมิ โดยนำไปเชื่อมต่อกับมัลติมิเตอร์ และ เลือกลโหมคไปที่ การวัดสัญญาณ mVdc เพื่ออ่านค่าสัญญาณ จากรูปที่ 3.19 มัลติมิเตอร์แสดงค่า 23.9 mV หมายถึง อุณหภูมิ 23.9 °C



รูปที่ 3.19 แสดงการวัดอุณหภูมิของหัววัดอุณหภูมิ FLUKE 80T-150U

#### 3.4.4.2 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า

ใช้ในการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำน้ำแข็ง โดยวัดจากกระแสและแรงดันไฟ เครื่องมือที่ใช้คือ FLUKE 41B สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน กระแส และนอกจากนั้นยังแสดงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) และแสดงผลเป็นกราฟได้



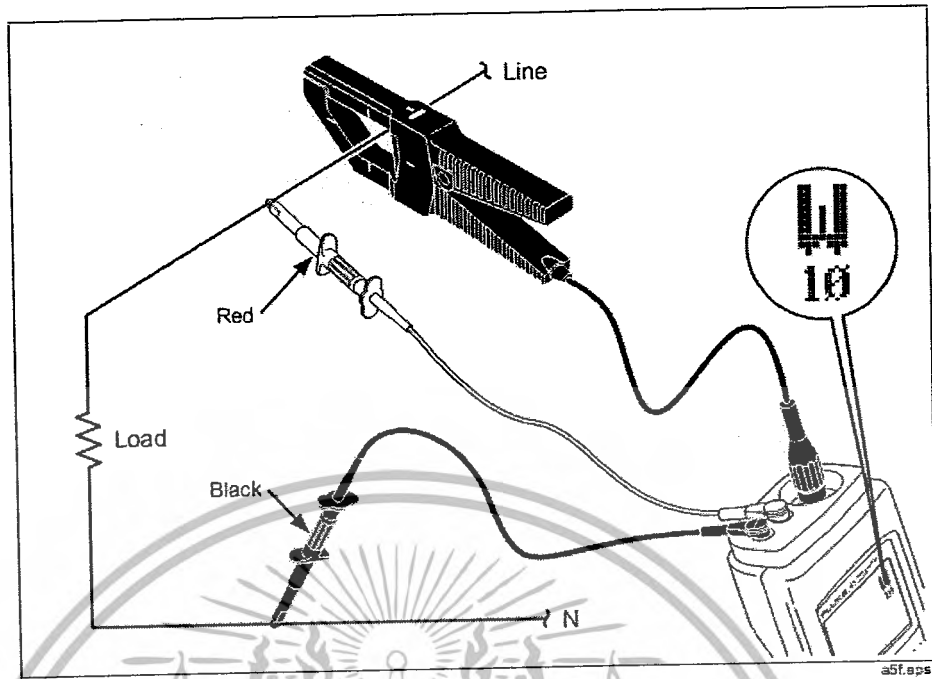
รูปที่ 3.20 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า FLUKE 41B

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า FLUKE 41B

| Measurement Accuracy                              |   |
|---|---|
| Voltage   | <b>Range and Resolution:</b> 5.0 V to 600 V rms (AC+DC); $\pm 5.0$ V to $\pm 933$ V peak<br><b>Accuracy:</b> rms: $\pm(0.5\% + 2 \text{ digits})$ ; Peak or DC: $\pm(2\% + 3 \text{ digits})$ (Add 2 digits if $< 15$ V rms)  |
| Current (1mV/A) Isolated input                    | <b>Range and Resolution:</b> 1.00 A to 1000 A rms (AC+DC); $\pm 1.0$ A to $\pm 2000$ A peak<br><b>Accuracy:</b> rms: $\pm(0.5\% + 3 \text{ digits}) + \text{probe specs}$ ; Peak or DC: $\pm(2\% + 4 \text{ digits}) + \text{probe specs}$                                  |
| Watts/Volt-Amps (1mV/A) isolated input            | <b>Range and Resolution:</b> 0.0W(VA) to 600 kW(kVA) average; 0.0W(VA) to $\pm 2000$ kW(kVA) peak<br><b>Accuracy:</b> AC+DC: $\pm(1\% + 4 \text{ digits}) + \text{probe specs}$   |
| Harmonics (harmonic level $>5\%$ using Smooth 20) | <b>Volts:</b> : Fundamental to 13th $\pm(2\% + 2 \text{ digits})$ ; At 31st $\pm(8\% + 2 \text{ digits})$ ;<br><b>Amperes or Watts:</b> Fundamental to 13th $\pm(3\% + 3 \text{ digits}) + \text{probe specs}$ ; At 31st $\pm(8\% + 3 \text{ digits}) + \text{probe specs}$ |
| Frequency   | <b>Range and Resolution:</b> 6.0 Hz to 99.9 Hz<br><b>Accuracy:</b> $\pm 0.3$ Hz   |

การต่อใช้งานเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า การวัดแรงดัน 1 เฟสโดยใช้หัว Probe ต่อกับสาย L และ N ส่วนการวัดกระแสจะใช้ Clip AMP ในการคล้องสายตามรูปที่ 3.21

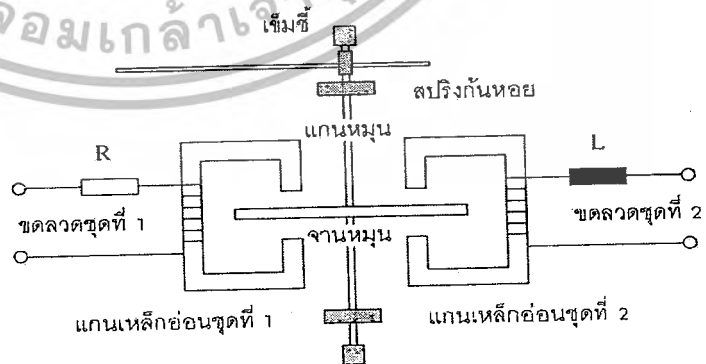
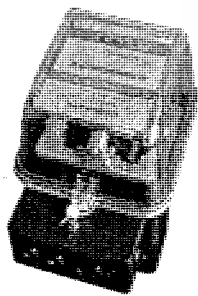
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การต่อเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า 1 เฟส

### 3.4.5 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-Hour Meter) ใช้สำหรับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง หลักการทำงานคือ มีขดลวดเหนี่ยวนำสองขด เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดกระแสไหลวนในขดลวด และมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านจะเกิดแรงบิดขึ้น ทำให้จานหมุนตามกฎมือขวาของเฟรมมิ่ง จากนั้นจานจะไปหมุนสื่อตัวเลขที่แสดงค่าพลังงาน และสามารถวัดไฟกระแสสลับได้ หน่วยที่ได้จะเป็น W.h หรือ Unit ( 1 Unit = 1000W )



รูปที่ 3.22 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-Hour Meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.6 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงหรือควบคุมระดับแรงดันและความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับได้ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ได้นำใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำรองเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเกิดขัดข้องขึ้นที่เรียกกันว่า Stand-by Power Supplies หรือ Uninterruptible Power Supplies หรือเรียกย่อ ๆ ว่า UPS ใช้เป็นระบบไฟฟ้าสำรองสำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญ ๆ เช่น คอมพิวเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลักเกิดขัดข้อง Transfer Switch ซึ่งทำงานด้วยความเร็วถึง 1/1000 วินาที โดยจะต่ออุปกรณ์เข้ากับอินเวอร์เตอร์จ่ายไฟกระแสสลับให้แทน โดยแปลงจากแบตเตอรี่ซึ่งประจุไว้ขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลัก

2. ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับด้วยการเปลี่ยนความถี่เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลง ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$N = \frac{120f}{P} \quad (3.3)$$

โดยที่

$N$  = ความเร็วรอบต่อนาที

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อวินาที

$P$  = จำนวนขั้วของมอเตอร์

ในการควบคุมนี้ถ้าต้องการแรงบิดคงที่ จะต้องรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายเข้ามอเตอร์ให้คงที่ด้วย

3. ใช้แปลงไฟฟ้าจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงชนิดกระแสตรง ให้เป็นชนิดกระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับผู้ใช้

4. ใช้ในเตาถลุงเหล็กที่ใช้ความถี่สูง ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กทำให้ร้อน (Induction Heating)

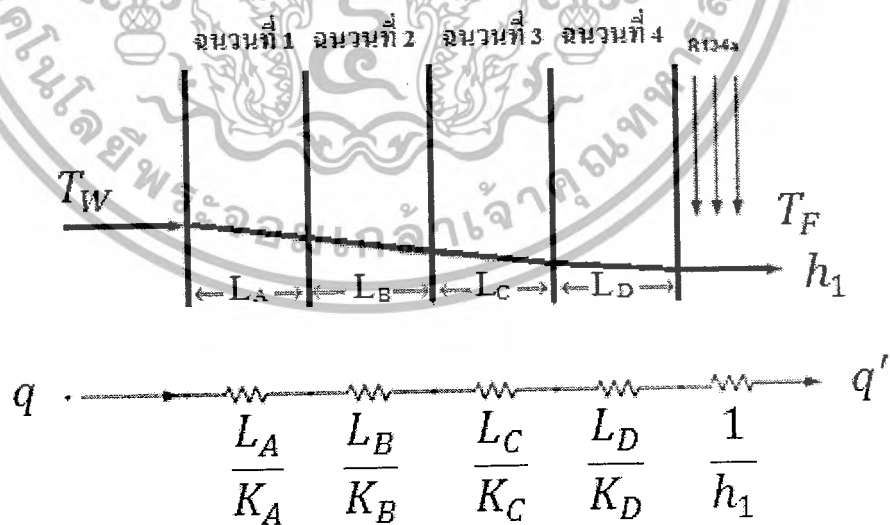


รูปที่ 3.23 อินเวอร์เตอร์

### 3.5 การออกแบบวิธีประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำแข็ง

#### 3.5.1 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากห้องทำน้ำแข็ง

จากสมการการถ่ายเทความร้อน เราจะนำมาคิดค่าความร้อนที่ห้องทำน้ำแข็งสามารถยอมให้ความร้อนถ่ายเทออกมา จากการออกแบบห้องทำความเย็นเราสามารถคิดการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุต่าง ๆ โดยเราจะจัดเรียงวัสดุชนิดต่างๆตามลำดับการถ่ายเทความร้อนในการทดลองแล้วมองว่าฉนวนแต่ละตัวเปรียบเสมือนความต้านทานหนึ่งตัวแล้วนำมาเรียงต่อกันได้ดังนี้



รูปที่ 3.24 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่ใช้ออกแบบในห้องทำน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.24 เป็นอัตรการถ่ายความร้อนของของน้ำแข็งในขณะที่น้ำยังไม่มี การเปลี่ยนสถานะไปเป็นของแข็งโดย  $T_w$  คืออุณหภูมิของน้ำในขณะเวลานั้น ๆ ส่วน  $T_f$  คืออุณหภูมิของสารทำความเย็น R-134a ในขณะเวลานั้น ๆ โดยที่การนำความร้อนนั้นจะนำความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า อุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิของสารทำความเย็น ความร้อนนั้นจะถูกนำจากน้ำไปยังสารทำความเย็นโดยผ่าน สังกะสี ช่องอากาศ สังกะสีและทองแดงดังรูปที่ 4.9 หลังจากนั้นความร้อนที่ผ่านมาจะถูกสารทำความเย็นพาออกไปทิ้งที่ คอลล์ร้อน (Condenser) ตามทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยที่

|             |  |
|-------------|--|
| $L_A$       | แทนความหนาของฉนวนที่ 1 ในการทดลองใช้สังกะสี                      |
| $L_B$       | แทนความหนาของฉนวนที่ 2 ในการทดลองใช้อากาศ                        |
| $L_C$       | แทนความหนาของฉนวนที่ 3 ในการทดลองใช้สังกะสี                      |
| $L_D$       | แทนความหนาของฉนวนที่ 4 ในการทดลองใช้ทองแดง                       |
| $L_E$       | แทนความหนาของน้ำแข็ง   |
| $K_A$       | แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ 1 ในการทดลองใช้สังกะสี |
| $K_B$       | แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ 2 ในการทดลองใช้อากาศ   |
| $K_C$       | แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ 3 ในการทดลองใช้สังกะสี |
| $K_D$       | แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ 4 ในการทดลองใช้ทองแดง  |
| $K_E$       | แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง                        |
| $T_w$       | แทนค่าอุณหภูมิของผิววัสดุด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่า                |
| $T_f$       | แทนค่าอุณหภูมิของผิววัสดุด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า                |
| $A$         | แทนค่าพื้นที่ของห้องทำความเย็น                                   |
| $R_{tot1}$  | แทนค่าฉนวนรวมขณะยังไม่เกิดน้ำแข็ง                                |
| $R_{tot2}$  | แทนค่าฉนวนรวมขณะเกิดน้ำแข็งแล้ว                                  |
| $\dot{Q}_x$ | แทนค่าการถ่ายเทความร้อนรวม                                       |

อัตรการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็ง ( $\dot{Q}_x$ ) หาได้จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) ในบทที่ 2

$$\dot{Q}_x = UA(T_w - T_f) \quad \text{มีหน่วยเป็น } W \quad (3.4)$$

และ

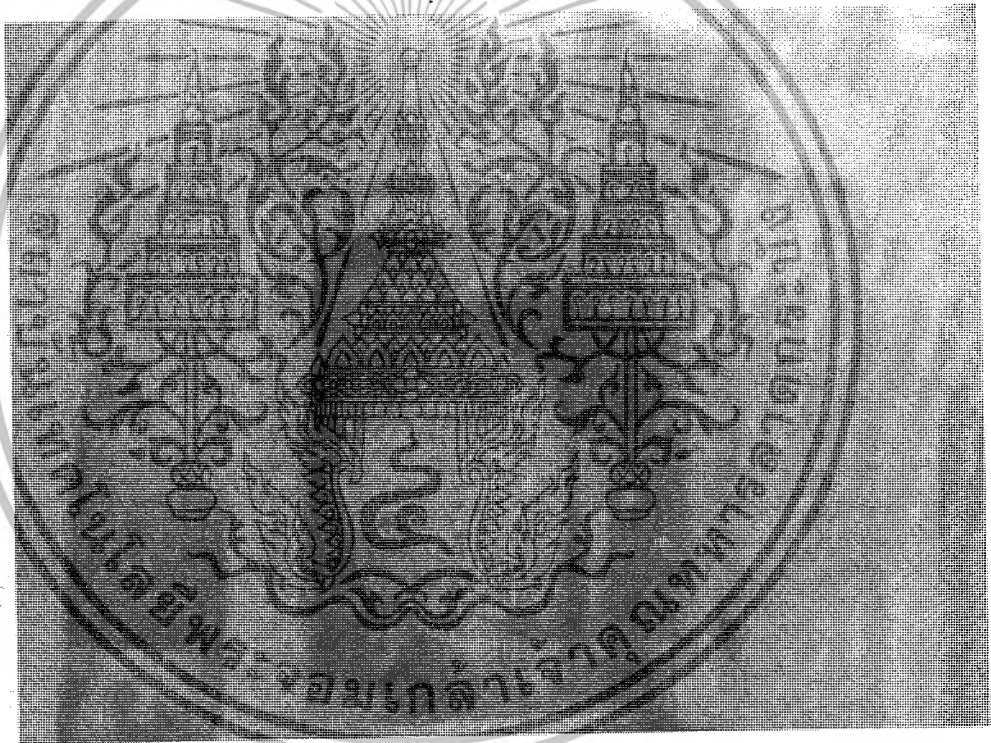
$$U = \frac{1}{R_{totA}} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

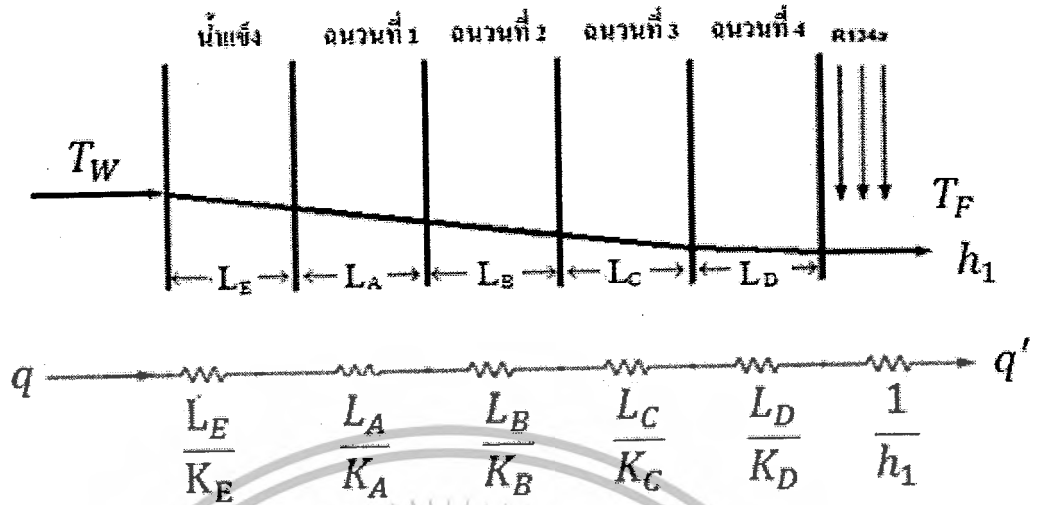
โดยที่

$$AR_{\text{tot}} = \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{L_D}{k_D} + \frac{1}{h_1} \quad \text{มีหน่วยเป็น } ^\circ\text{C/W} \quad (3.6)$$

เมื่อระบบเริ่มทำงานน้ำจะถูกดึงความร้อนออกไปอุณหภูมิของน้ำก็จะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนถึง  $0^\circ\text{C}$  และหลังจากนั้นจะกลายเป็นน้ำแข็งโดยน้ำแข็งจะเริ่มเกิดขึ้นที่ขอบของภาชนะรองน้ำ และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเต็มก่อนดังรูปที่ 3.25 จะเห็นว่า การเกิดน้ำแข็งนั้นเราจะมองว่าน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทความร้อนในห้องทำน้ำแข็งลดลงตามความหนาของน้ำแข็งที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เราจึงคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งใหม่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตอนที่ยังไม่เป็นน้ำแข็งดังนี้



รูปที่ 3.25 การเกิดน้ำแข็ง



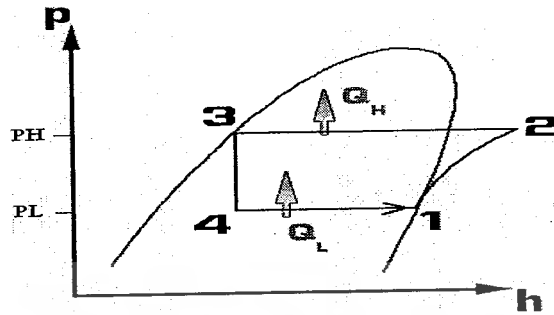
รูปที่ 3.26 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่ใช้ออกแบบในห้องทำน้ำแข็งในขณะที่เริ่มเกิดน้ำแข็ง (เมื่ออุณหภูมิน้ำลดลงเหลือ  $0^{\circ}\text{C}$ )

จากรูปที่ 3.26 จะคล้ายกับอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่เป็นน้ำ แต่ต่างกันตรงที่เมื่อน้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง น้ำแข็งที่เริ่มจะหนาขึ้นจะเป็นเสมือนตัวต้านทานความร้อนอีกชั้นหนึ่ง โดยเราแทนความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้ด้วย  $L_E$  และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง ( $k_{\text{น้ำแข็ง}}$ ) มีค่าประมาณ  $2.18 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  โดยเรากำหนดความต้านทานทางความร้อนใหม่แทนด้วย ( $R_{\text{tot1}}$ ) เมื่อน้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเพื่อให้ง่ายต่อคำนวณหาค่า  $R_{\text{tot1}}$  ได้จาก

$$AR_{\text{tot1}} = AR_{\text{tot}} + \frac{L_E}{k_E} \quad \text{มีหน่วยเป็น } ^{\circ}\text{C}/\text{W} \quad (3.7)$$

แทนค่า  $R_{\text{tot1}}$  ลงในสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับจะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งในขณะที่เริ่มมีน้ำแข็งเกิดขึ้นและน้ำแข็งมีความหนาเท่ากับ  $L_E$

### 3.5.2 การหาความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ



รูปที่ 3.27 P-h Diagram ของวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ

จากรูปที่ 3.27 ในวัฏจักรทำความเย็นความร้อนจากอีวาโปเรเตอร์  $Q_L$  จะถูกนำไปทิ้งที่คอนเดนเซอร์  $Q_H$  โดยจากรูปจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 จะเป็นช่วงการทำงานของคอมเพรสเซอร์คือจะดูดสารทำความเย็นที่เป็นไอทั้งหมดแล้วทำการอัดไอบ้างจุดที่ 2 ในช่วงจุดที่ 2 ไป 3 เป็นการนำความร้อนไปทิ้งโดยผ่านคอนเดนเซอร์ซึ่งในช่วงนี้สารทำความเย็นจะมีทั้งของเหลวและไอ จะเห็นว่าความดันในช่วงนี้คงที่ แต่เอนทาลปีเปลี่ยนไปจนถึงจุดที่ 3 สารทำความเย็นจะเป็นของเหลวทั้งหมด ช่วงที่ 3 ไป 4 จะมีการลดความดันของสารทำความเย็นลงโดยผ่าน TEV เป็นตัวลดความดันช่วงที่ 4 ไป 1 นั้นจะเป็นการดึงความร้อนออกจากน้ำในช่วงนี้สารทำความเย็นจะมีทั้งของเหลวและไอ เมื่อดึงความร้อนออกมาสารทำความเย็นจะเดือดและกลายเป็นไอหมดเพื่อกลับไปเข้าสู่วัฏจักรใหม่อีกครั้งที่จุดที่ 1

จากวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ เราสามารถที่จะหาอัตราการดึงความร้อนของคอยล์เย็นออกไปทิ้งที่คอนเดนเซอร์หรือเรียกว่าความสามารถในการทำความเย็นได้จากสมการที่ (2.6) ในบทที่ 2 ได้ดังนี้

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_3) \quad (3.8)$$

โดยที่  $Q_L$  = ความสามารถในการทำความเย็น (kW)

$\dot{m}$  = อัตราไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่เข้าคอมเพรสเซอร์ที่จุด 1 ของวัฏจักร (kJ/kg)

$h_3$  = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากอีวาโปเรเตอร์ที่จุด 3 ของวัฏจักร (kJ/kg)

อัตราการการไหลของสารทำความเย็นหาได้จากสมการที่ 2.7 ในบทที่ 2

$$\dot{m} = \frac{V_{pt}}{v} \quad \text{มีหน่วยเป็น} \quad \text{kg/hr} \quad (3.9)$$

โดยที่  $V_{pt}$  หาจากสมการ 3.1 จะได้ว่า

$$V_{pt} = \frac{\pi d^2}{4} \times L \times n \times N$$

จาก  $\frac{\pi d^2}{4} \times L = V$  และ  $n = 1$  จะได้

$$V_{pt} = V \times N \quad \text{มีหน่วยเป็น} \quad \text{m}^3/\text{hr} \quad (3.10)$$

โดยที่  $V$  คือ ปริมาตรของกระบอกสูบ  
 $N$  คือ ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์

จากคุณสมบัติของคอมเพรสเซอร์ (จากตารางที่ 3.1) จะได้  $V = 2.96 \text{ cm}^3$  และ  $N = 2850 \text{ rpm}$  จะได้  
 จากสมการที่ (3.9)

$$\begin{aligned} V_{pt} &= 2.96 \times 2850 \\ &= 8,436 \quad \text{cm}^3/\text{min} \\ &= 8,436 \times 10^{-6} \times 60 \quad \text{m}^3/\text{hr} \\ &= 0.50616 \quad \text{m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

แนวคิดในการลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทำน้ำแข็งคือ เมื่อความหนาของน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งจะลดลง เนื่องจากความหนาของน้ำแข็งจะเปรียบเสมือนตัวต้านทานความร้อนตัวหนึ่ง เมื่อความหนาของน้ำแข็งเพิ่มขึ้นความต้านทานความร้อนก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเราจึงทำการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งและประสิทธิภาพของการทำความเย็นของวัฏจักรในช่วงเวลาต่าง ๆ จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งสองค่านั้นมาเปรียบเทียบกัน ในกรที่จะลดพลังงานลง เราต้องควบคุมให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งมีค่าเท่ากับความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร คือถ้าอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรจะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียขึ้น ดังนั้นเมื่อเราทำการเปรียบเทียบค่าทั้งสองแล้วจะเห็นว่า เมื่อน้ำเป็นของเหลวทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของห้องทำน้ำแข็งนั้นจะมีค่าสูงกว่าความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร เราจึงไม่จำเป็นที่จะต้องลดความสามารถในการทำความเย็นลง แต่เมื่อความหนาของน้ำแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลงเนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นจนลดต่ำกว่าความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร เราจะทำการลดความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรลงได้โดยการปรับลดความถี่ที่ให้แก่อคอมเพรสเซอร์ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็นลดลง และความสามารถในการทำความเย็นก็จะลดลงตามไปด้วย โดยเราจะปรับความถี่จากอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมให้ความสามารถในการทำความเย็นมีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็ง อยู่ตลอดเวลาจะทำให้ประหยัดพลังงานลงได้โดยเราสามารถปรับความถี่ที่จ่ายให้แก่อคอมเพรสเซอร์ ดังนี้

เนื่องจากคอมเพรสเซอร์เป็นมอเตอร์แบบ Split Phase อินดักชันมอเตอร์ การควบคุมความเร็วรอบสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับความถี่ได้จากสมการ

$$N = \frac{120f}{P} \quad (3.11)$$

โดยที่

N คือ ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์

f คือ ความถี่ที่ป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์

P คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

ดังสมการ

โดยความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของสารทำความเย็น

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_1} = \frac{N_1}{N}$$

โดยที่

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นเดิม

$\dot{m}_1$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นใหม่

N คือ ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์เดิม

$N_1$  คือ ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ใหม่

เมื่อความหนาของน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งลดลงจนกระทั่งลดลงน้อยกว่าความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร เราจึงได้ทำการลดความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรลงให้มีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยจะทำการ

ปรับความถี่ที่จ่ายให้แก่อคอมเพรสเซอร์ สามารถคำนวณหาความถี่ที่จะปรับลดลงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผิดกฎหมายในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.8) จัดรูปใหม่จะได้

$$\dot{m} = \frac{Q_L}{(h_1 - h_3)} \quad (3.12)$$

เมื่อได้  $\dot{m}$  เราจะหา  $\dot{m}_1$  จากการแทนค่า  $\dot{Q}_x$  จากสมการที่ (3.4) ลงใน  $Q_L$  ในสมการที่ (3.8) ซึ่งจะได้

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}_x}{(h_1 - h_3)} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) แทนค่า  $\dot{m}_1$  ลงไปจะได้

$$\dot{m}_1 = \frac{v \times N_1}{v} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) จัดรูปใหม่เพื่อหา  $N_1$  จะได้

$$N_1 = \frac{v \times \dot{m}_1}{v} \quad (3.15)$$

แทนค่า  $N_1$  ลงในสมการที่ (3.11) จะได้ความถี่ที่ต้องจ่ายให้แก่คอมเพรสเซอร์



## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลองเครื่องทำน้ำแข็ง
2. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)
3. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour Meter)
4. เวอร์เนีย
5. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermo Couple)
6. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermo Meter)
7. บีกเกอร์ตวงน้ำ
8. เกจเติมน้ำยา ( Pressure Gauge)
9. อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

#### 4.2 ลำดับขั้นเตรียมการทดลอง

1. ต่อสายเกจวัดความดันเข้ากับทางด้าน Low และ High (ของวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ จุดที่ 1 และ 3 )
2. นำวัตต์มิเตอร์มาคล้องทางด้านสายไฟที่เข้ามาคอมเพรสเซอร์
3. เติมน้ำที่ใช้ทดลองโดยการวัดปริมาตรจากบีกเกอร์
4. วัดอุณหภูมิของน้ำ อุณหภูมิภายในห้องและนอกห้อง โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์
5. นำน้ำเข้าไปในช่องที่เตรียมไว้ในการทำน้ำแข็ง
6. เปิดเครื่องทำความเย็น
7. บันทึกผล ค่าที่วัดได้ในรอบแรก
8. เมื่อระบบคงที่ให้วัดอุณหภูมิที่ทางด้าน Low และ High (ของวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ จุด 1 และ 3)
9. ทำการวัดความดัน อุณหภูมิที่จุดที่ 1 และ 3 ของวัฏจักรเทอร์โมไดนามิกส์ และพลังงานที่ใช้ในทุกๆ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การปรับความถี่ แบ่งออกเป็น 3 กรณี

กรณี 1 ใช้ความถี่ที่ 50 Hz โดยทดลองในช่วงเวลาต่างๆกัน เช้า กลางวัน เย็น เพื่อดูค่าพลังงานที่ใช้จะมีผลอย่างไรเมื่ออุณหภูมิภายในห้องและภายนอกห้องแตกต่างกัน โดยที่จะเราควบคุมอุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิของน้ำตอนเริ่มต้นให้คงที่ เพื่อทดลองดูว่าความร้อนภายนอกห้องที่เวลาต่างๆกัน เพื่อดูว่าจะมีผลอย่างไรกับเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งแต่ละก้อนเมื่ออุณหภูมิภายในห้องคงที่

กรณี 2 ทดลองปรับความถี่ลดลงเป็น 50 Hz , 45 Hz , 40 Hz , 35 Hz ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในแต่ละช่วงความถี่ที่ปรับลด โดยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องและนอกห้องให้คงที่ เพื่อทดลองดูว่าการปรับลดความถี่ลงในช่วงที่น้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งลง จะมีผลอย่างไรกับเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งแต่ละก้อน

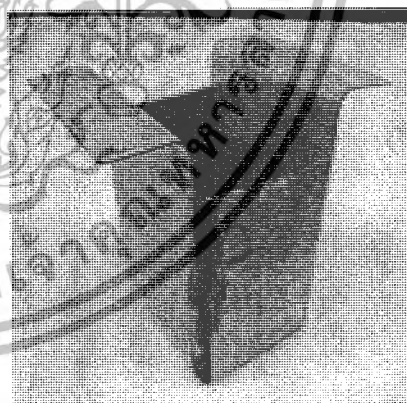
กรณี 3 ทดลองปรับความถี่ตามการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนไป เนื่องจากความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องและนอกห้องให้คงที่เพื่อทดลองดูว่าความหนาที่แนวความคิดที่นำมาใช้ในการประหยัดพลังงานได้ผลมากน้อยเพียงใด

### 4.4 ขั้นตอนการทดลองในกรณีที่ 1

I. ตวงน้ำใส่บีกเกอร์ให้ได้ปริมาตร 100 cc. และนำไปเทใส่ชงน้ำแข็ง



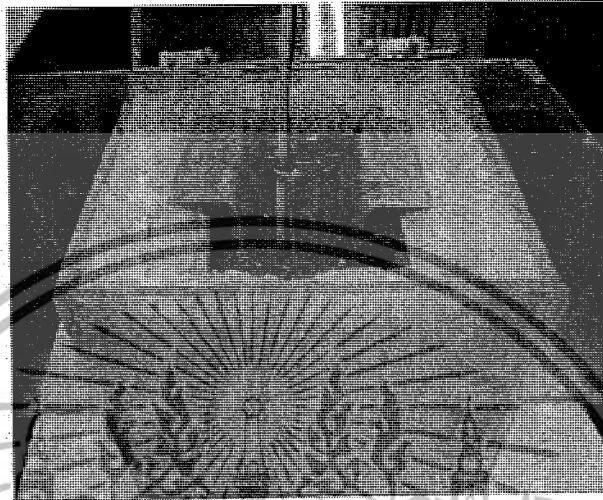
(ก)



(ข)

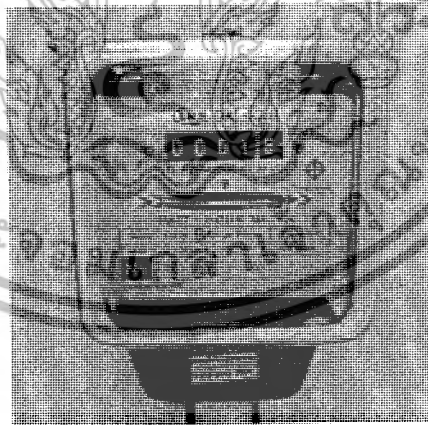
รูปที่ 4.1 (ก) ปริมาตรน้ำ 100 cc. ตวงจากบีกเกอร์  
(ข) ชงทำน้ำแข็ง

2. วัดอุณหภูมิภายในห้อง ภายนอกห้องและอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่โดยการปรับอุณหภูมิของแอร์ไว้ที่  $24^{\circ}\text{C}$  โดยส่วนอุณหภูมิของน้ำก็จะควบคุมให้คงที่เช่นเดียวกัน โดยนำน้ำก๊อกมาทิ้งไว้ในห้องให้มีอุณหภูมิประมาณ  $24^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.2 วัดอุณหภูมิน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์

3. อ่านค่า เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-Hour Meter) ก่อนเริ่มทำการทดลอง



รูปที่ 4.3 พลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งอ่านค่าได้จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-Hour Meter)

4. กดปุ่ม “รัน” ของอินเวอร์เตอร์เพื่อเริ่มทำการทดลอง และทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 50 Hz อ่านค่าความดันที่จุดที่ 1 และ 3 ของวัฏจักร โดยอ่านจากเกจเติมน้ำยา และวัดอุณหภูมิที่จุดที่ 1 และ 3 ของวัฏจักรโดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

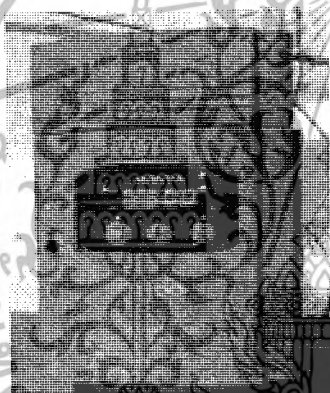
(Thermocouple) และอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจากวัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) โดยเราจะทำการเก็บค่าวัตต์และกระแสในทุก ๆ 10 นาทีเพื่อนำมาทำการพลอตกราฟ



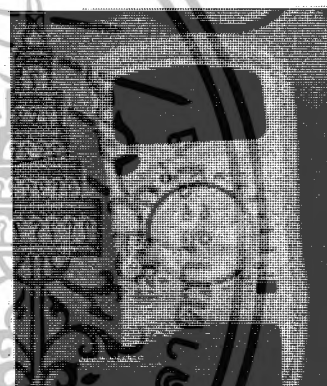
(ก)



(ข)



(ค)

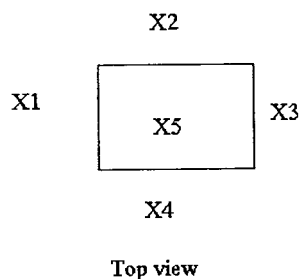
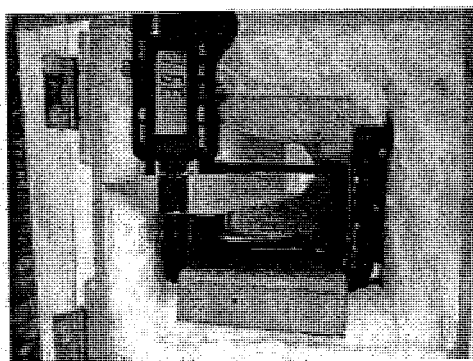


(ง)

- รูปที่ 4.4 (ก) วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) ที่ใช้ในการเก็บค่าพลังงานและกระแสไฟฟ้าทุก ๆ 10 นาที  
 (ข) เกจเติมน้ำยาใช้สำหรับวัดความดันที่จุด 1 และจุด 3 ของวัฏจักร  
 (ค) อินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับใช้ควบคุมความถี่ที่จ่ายให้แก่คอมเพรสเซอร์ สามารถปรับความถี่ได้โดยใช้มือหมุนที่ปุ่มทางด้านขวามือของปุ่ม “สตอป”  
 (ง) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermocouple) โดยต่อกับคิดิจิตอลมัลติมิเตอร์เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิที่จุด 1 และ 3 ของวัฏจักร

5. เมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงจนถึง  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  น้ำจะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง ซึ่งเราจะทำการเก็บค่าความหนาของน้ำแข็งโดยใช้เวอร์เนียในการประมาณค่าดังรูป โดยที่  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  คือความหนาของน้ำแข็งของแต่ละด้านของช่องน้ำแข็งดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การใช้เวอร์เนียในการวัดความหนาของน้ำแข็งแต่ละด้าน

6. ทำการทดลองเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนน้ำกลายเป็นน้ำแข็งทั้งหมด และนำค่าที่อ่านมาบันทึกลงในตาราง หลังจากนั้นเมื่อน้ำเป็นน้ำแข็งหมดก็ทำการอ่านค่าพลังงานที่ใช้จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour Meter) และนำมาลบออกจากค่าที่วัดตอนเริ่มทำการทดลอง ก็จะได้พลังงานที่ใช้ทั้งหมด



#### 4.5 ผลการทดลองกรณีที่ 1

กรณี 1 ปริมาณน้ำ 100 cc ช่วงเข้า ความถี่ 50 Hz

เวลาเริ่ม : 07.02 น.

เวลาสิ้นสุด : 09.00 น.

|                                       |      |    |
|---------------------------------------|------|----|
| ปริมาณน้ำ ( $V_{น้ำ}$ ) =             | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{น้ำ}$ ) =   | 24.3 | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{ภายใน}$ ) =   | 23.6 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{ภายนอก}$ ) = | 27.9 | °C |

ตารางที่ 4.1 เวลาในช่วงเข้าทดลองที่ความถี่ 50 Hz

| เวลา<br>(นาที) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{น้ำ}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอลย์<br>เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                   |                                   |                              |
| 0              | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.40                           | -             | 109              | 0.72         | 24.3              | -                                 | 50                           |
| 10             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.2                            | 24.0          | 0.60                           | -5.5          | 96               | 0.68         | 16.5              | -17.7                             | 50                           |
| 20             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.0                            | 24.8          | 0.38                           | -9.2          | 90               | 0.68         | 5.0               | -20.2                             | 50                           |
| 30             | 2.15                     | 2.28  | 2.37  | 3.94  | 1.27  | 6.7                            | 24.2          | 0.35                           | -9.2          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.7                             | 50                           |
| 40             | 4.48                     | 4.22  | 3.39  | 4.68  | 3.51  | 6.8                            | 25.2          | 0.35                           | -8.9          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.0                             | 50                           |
| 50             | 6.14                     | 6.29  | 4.12  | 6.71  | 5.57  | 6.9                            | 25.0          | 0.35                           | -9.4          | 89               | 0.67         | 0                 | -18.6                             | 50                           |
| 60             | 7.77                     | 7.00  | 5.02  | 8.52  | 9.54  | 7.0                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 89               | 0.68         | 0                 | -18.5                             | 50                           |
| 70             | 9.04                     | 8.60  | 6.58  | 10.06 | 10.98 | 6.8                            | 25.2          | 0.3                            | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                 | -19.3                             | 50                           |
| 80             | 11.04                    | 9.93  | 8.16  | 12.25 | 15.76 | 6.5                            | 25.6          | 0.25                           | -10.2         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 90             | 13.48                    | 12.31 | 9.28  | 14.61 | 21.78 | 6.5                            | 25.0          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -20.3                             | 50                           |
| 100            | 14.65                    | 13.92 | 11.13 | 15.36 | 26.22 | 6.5                            | 24.8          | 0.25                           | -10.6         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 110            | 16.65                    | 18.24 | 13.72 | 20.74 | 31.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -19.1                             | 50                           |
| 120            | 18.88                    | 24.86 | 16.21 | 24.04 | 35.55 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.66         | 0                 | -19.2                             | 50                           |
| 122            | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -9.8          | 88               | 0.66         | 0                 | -18.9                             | 50                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 122 นาที

ค่าพลังงาน 0.183 kW-hr

หมายเหตุ : การใช้ปริมาณน้ำในการทำน้ำแข็งที่ต่างกันจะมีผลกับเวลาในการทำน้ำแข็งแต่ละก้อน คือ ถ้าใช้ปริมาณน้ำที่มากก็จะใช้เวลาในการทำน้ำแข็งนาน เป็นต้น ที่เลือกใช้ปริมาณน้ำ 100 cc. เนื่องจากชองน้ำแข็งมีขนาดเล็ก และถ้าใช้น้ำ 100 cc. เวลาในการทำน้ำแข็งก็จะไม่นานมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรน้ำ 100 cc ช่วงกลางวันที่มีความถี่ 50 Hz

เวลาเริ่ม : 12.21 น.

เวลาสิ้นสุด : 14.23 น.

ปริมาตรน้ำ ( $V_{น้ำ}$ ) = 100 cc

อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{น้ำ}$ ) = 24.7 °C

อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{ภายใน}$ ) = 24 °C

อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{ภายนอก}$ ) = 33.8 °C

ตารางที่ 4.2 เวลาในช่วงกลางวันทดลองที่มีความถี่ 50 Hz

| เวลา<br>(นาท) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัตถุจุดที่ 3<br>(จุด High)    |               | วัตถุจุดที่ 1<br>(จุด Low)     |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{น้ำ}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอยล์<br>เซ็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|---------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|               | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                   |                                   |                              |
| 0             | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.40                           | -             | 110              | 0.72         | 24.3              | -                                 | 50                           |
| 10            | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.2                            | 24.0          | 0.60                           | -5.5          | 97               | 0.68         | 16.5              | -17.7                             | 50                           |
| 20            | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.0                            | 24.8          | 0.38                           | -9.2          | 91               | 0.68         | 5.0               | -20.2                             | 50                           |
| 30            | 2.15                     | 2.28  | 2.37  | 3.94  | 1.27  | 6.7                            | 24.2          | 0.35                           | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                 | -19.7                             | 50                           |
| 40            | 4.48                     | 4.22  | 3.39  | 4.68  | 3.51  | 6.8                            | 25.2          | 0.35                           | -8.9          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.0                             | 50                           |
| 50            | 6.14                     | 6.29  | 4.12  | 6.71  | 5.57  | 6.9                            | 25.0          | 0.35                           | -9.4          | 89               | 0.67         | 0                 | -18.6                             | 50                           |
| 60            | 7.77                     | 7.00  | 5.02  | 8.52  | 9.54  | 7.0                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 89               | 0.68         | 0                 | -18.5                             | 50                           |
| 70            | 9.04                     | 8.60  | 6.58  | 10.06 | 10.98 | 6.8                            | 25.2          | 0.3                            | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                 | -19.3                             | 50                           |
| 80            | 11.04                    | 9.93  | 8.16  | 12.25 | 15.76 | 6.5                            | 25.6          | 0.25                           | -10.2         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 90            | 13.48                    | 12.31 | 9.28  | 14.61 | 21.78 | 6.5                            | 25.0          | 0.25                           | -10.5         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.3                             | 50                           |
| 100           | 14.65                    | 13.92 | 11.13 | 15.36 | 26.22 | 6.5                            | 24.8          | 0.25                           | -10.6         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 110           | 16.65                    | 18.24 | 13.72 | 20.74 | 31.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -19.1                             | 50                           |
| 120           | 18.88                    | 24.86 | 16.21 | 24.04 | 35.55 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.66         | 0                 | -19.2                             | 50                           |
| 123           | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -9.7          | 88               | 0.66         | 0                 | -18.9                             | 50                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 123 นาที

ค่าพลังงาน 0.184 kW-hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรน้ำ 100 cc ช่วงเย็น ความถี่ 50 Hz

เวลาเริ่ม : 19.11 น.

เวลาสิ้นสุด : 21.12 น.

ปริมาตรน้ำ ( $V_{น้ำ}$ ) = 100 cc

อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{น้ำ}$ ) = 24.5 °C

อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{ภายใน}$ ) = 23.4 °C

อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{ภายนอก}$ ) = 27 °C

ตารางที่ 4.3 เวลาในช่วงเย็นทดลองที่ความถี่ 50 Hz

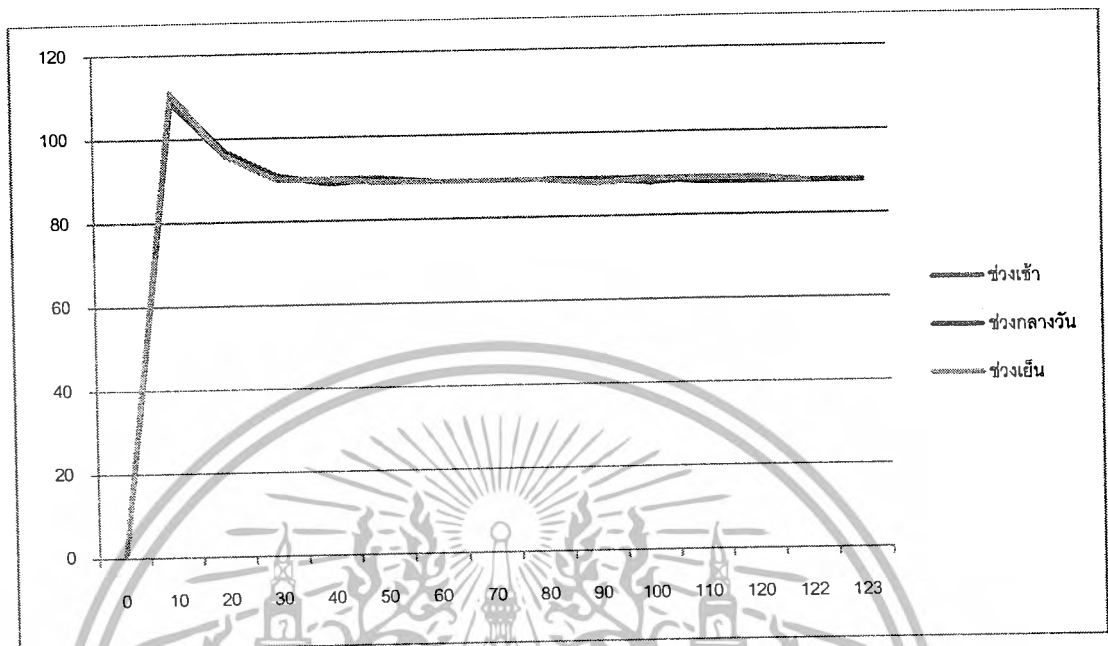
| เวลา<br>(นาที) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{น้ำ}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอลล์เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|
|                | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                   |                               |                              |
| 0              | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.40                           | -             | 111              | 0.72         | 24.3              | -                             | 50                           |
| 10             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.2                            | 24.0          | 0.60                           | -5.5          | 96               | 0.68         | 16.5              | -17.7                         | 50                           |
| 20             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.0                            | 24.8          | 0.38                           | -9.2          | 91               | 0.68         | 5.0               | -20.2                         | 50                           |
| 30             | 2.15                     | 2.28  | 2.37  | 3.94  | 1.27  | 6.7                            | 24.2          | 0.35                           | -9.2          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.7                         | 50                           |
| 40             | 4.48                     | 4.22  | 3.39  | 4.68  | 3.51  | 6.8                            | 25.2          | 0.35                           | -8.9          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.0                         | 50                           |
| 50             | 6.14                     | 6.29  | 4.12  | 6.71  | 5.57  | 6.9                            | 25.0          | 0.35                           | -9.4          | 89               | 0.67         | 0                 | -18.6                         | 50                           |
| 60             | 7.77                     | 7.00  | 5.02  | 8.52  | 9.54  | 7.0                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 89               | 0.68         | 0                 | -18.5                         | 50                           |
| 70             | 9.04                     | 8.60  | 6.58  | 10.06 | 10.98 | 6.8                            | 25.2          | 0.3                            | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                 | -19.3                         | 50                           |
| 80             | 11.04                    | 9.93  | 8.16  | 12.25 | 15.76 | 6.5                            | 25.6          | 0.25                           | -10.2         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                         | 50                           |
| 90             | 13.48                    | 12.31 | 9.28  | 14.61 | 21.78 | 6.5                            | 25.0          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -20.3                         | 50                           |
| 100            | 14.65                    | 13.92 | 11.13 | 15.36 | 26.22 | 6.5                            | 24.8          | 0.25                           | -10.6         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                         | 50                           |
| 110            | 16.65                    | 18.24 | 13.72 | 20.74 | 31.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.25                           | -10.5         | 89               | 0.67         | 0                 | -19.1                         | 50                           |
| 120            | 18.88                    | 24.86 | 16.21 | 24.04 | 35.55 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.5         | 89               | 0.66         | 0                 | -19.2                         | 50                           |
| 121            | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.0         | 88               | 0.66         | 0                 | -18.9                         | 50                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 121 นาที

ค่าพลังงาน 0.183 kW-hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กราฟแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานของแต่ละช่วงเวลาที่ทดลอง

จากการรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนั้นพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งมีค่าใกล้เคียงกันมาก และเวลาที่ใช้ในการทำน้ำแข็งก็ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ

|                                      |             |                  |
|--------------------------------------|-------------|------------------|
| ช่วงเช้า ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง    | 0.183 kW-hr | ใช้เวลา 122 นาที |
| ช่วงกลางวัน ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง | 0.184 kW-hr | ใช้เวลา 123 นาที |
| ช่วงเย็น ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง    | 0.183 kW-hr | ใช้เวลา 121 นาที |

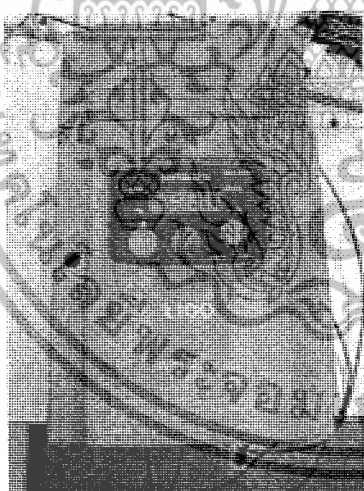
จะเห็นว่าช่วงกลางวันใช้พลังงานในการทำน้ำแข็งมากกว่าช่วงเวลาอื่น แต่ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก ส่วนพลังงานในช่วงเช้าและเย็นมีค่าเท่ากัน และในเรื่องของเวลามีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละช่วงที่ทำการทดลอง

### สรุปผลการทดลองในกรณีที่ 1

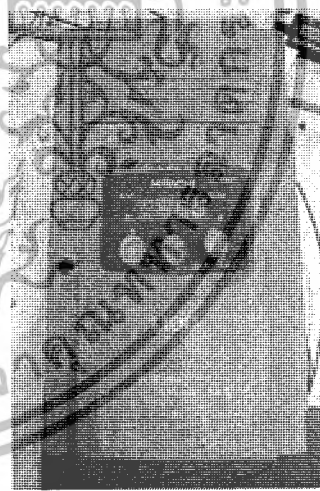
การทำน้ำแข็งในช่วงความถี่เดียวกันและอุณหภูมิภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะใช้พลังงานในการทำน้ำแข็งใกล้เคียงกัน ส่วนอุณหภูมิภายนอกห้องนั้นมีผลกระทบต่อการทำน้ำแข็งน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองปกติทั้งพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งและเวลานั้นไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

#### 4.6 ขั้นตอนการทดลองในกรณีที่ 2

1. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 1 ในกรณีที่ 1
2. วัดอุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่โดยการปรับอุณหภูมิของแอร์ไว้ที่  $24^{\circ}\text{C}$  ส่วนอุณหภูมิของน้ำก็จะควบคุมให้คงที่เช่นเดียวกันโดยนำน้ำก๊อกมาทิ้งไว้ในห้องให้มีอุณหภูมิประมาณ  $24^{\circ}\text{C}$
3. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 3 ในกรณีที่ 1
4. เริ่มทำการทดลอง โดยทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ลดลงเป็น 50 Hz, 45 Hz, 40 Hz, 35 Hz ตามลำดับ โดยที่สามารถปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ได้โดยการหมุนปุ่มปรับความถี่โดยใช้มือดังรูปที่ 4.7 โดยในการปรับลดความถี่นั้นเราจะเริ่มปรับลดเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงจากอุณหภูมิปกติจนเหลือ  $0^{\circ}\text{C}$  หรือเมื่อน้ำเริ่มที่จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งนั่นเอง และทำการอ่านค่าความดันที่จุดที่ 1 และ 3 ของวัฏจักรโดยอ่านจากเกจเดิมน้ำยาและวัดอุณหภูมิที่จุดที่ 1 และ 3 ของวัฏจักรโดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Thermocouple) และอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจากวัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) โดยเราจะทำการเก็บค่าวัดตัดและกระแสในทุก ๆ 10 นาทีเพื่อนำมาทำการพลอตกราฟ เหมือนกับข้อ 4 ของการทดลองในกรณีที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 45 Hz

(ข) ปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ไปที่ 40 Hz

5. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 5 ในกรณีที่ 1

6. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 6 ในกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2

กรณี 2 ปริมาณน้ำ 100 cc ความถี่ 50 Hz

ปริมาณน้ำ ( $V_{\text{น้ำ}}$ ) = 100 cc

อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{\text{น้ำ}}$ ) = 24.3 °C

อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{\text{ภายใน}}$ ) = 23.6 °C

อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{\text{ภายนอก}}$ ) = 27.9 °C

ตารางที่ 4.4 ปรับความถี่ที่ 50 Hz

| เวลา<br>(นาท) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{\text{น้ำ}}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอยล์<br>เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|---------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|               | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                          |                                   |                              |
| 0             | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.40                           | -             | 109              | 0.72         | 24.3                     | -                                 | 50                           |
| 10            | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.2                            | 24.0          | 0.60                           | -5.5          | 96               | 0.68         | 16.5                     | -17.7                             | 50                           |
| 20            | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.0                            | 24.8          | 0.38                           | -9.2          | 90               | 0.68         | 5.0                      | -20.2                             | 50                           |
| 30            | 2.15                     | 2.28  | 2.37  | 3.94  | 1.27  | 6.7                            | 24.2          | 0.35                           | -9.2          | 90               | 0.67         | 0                        | -19.7                             | 50                           |
| 40            | 4.48                     | 4.22  | 3.39  | 4.68  | 3.51  | 6.8                            | 25.2          | 0.35                           | -8.9          | 90               | 0.67         | 0                        | -19.0                             | 50                           |
| 50            | 6.14                     | 6.29  | 4.12  | 6.71  | 5.57  | 6.9                            | 25.0          | 0.35                           | -9.4          | 89               | 0.67         | 0                        | -18.6                             | 50                           |
| 60            | 7.77                     | 7.00  | 5.02  | 8.52  | 9.54  | 7.0                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 89               | 0.68         | 0                        | -18.5                             | 50                           |
| 70            | 9.04                     | 8.60  | 6.58  | 10.06 | 10.98 | 6.8                            | 25.2          | 0.3                            | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                        | -19.3                             | 50                           |
| 80            | 11.04                    | 9.93  | 8.16  | 12.25 | 15.76 | 6.5                            | 25.6          | 0.25                           | -10.2         | 89               | 0.67         | 0                        | -20.0                             | 50                           |
| 90            | 13.48                    | 12.31 | 9.28  | 14.61 | 21.78 | 6.5                            | 25.0          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                        | -20.3                             | 50                           |
| 100           | 14.65                    | 13.92 | 11.13 | 15.36 | 26.22 | 6.5                            | 24.8          | 0.25                           | -10.6         | 89               | 0.67         | 0                        | -20.0                             | 50                           |
| 110           | 16.65                    | 18.24 | 13.72 | 20.74 | 31.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                        | -19.1                             | 50                           |
| 120           | 18.88                    | 24.86 | 16.21 | 24.04 | 35.55 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.66         | 0                        | -19.2                             | 50                           |
| 122           | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -9.9          | 88               | 0.66         | 0                        | -18.9                             | 50                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 122 นาที

ค่าพลังงาน 0.183 kW-hr

หมายเหตุ : การใช้ปริมาณน้ำในการทำน้ำแข็งที่ต่างกันจะมีผลกับเวลาในการทำน้ำแข็งแต่ละก้อน  
คือ ถ้าใช้ปริมาณน้ำที่มากก็จะใช้เวลาในการทำน้ำแข็งนาน เป็นต้น ที่เลือกใช้ปริมาณ  
น้ำ 100 cc. เนื่องจากชองน้ำแข็งมีขนาดเล็ก และถ้าใช้น้ำ 100 cc. เวลาในการทำน้ำแข็ง  
ก็จะไม่นานมากนัก

ปริมาตรน้ำ 100 cc ปรับความถี่ 45 Hz โดยเริ่มปรับลดความถี่ลงในช่วงที่น้ำมีอุณหภูมิ 0 °C

|  |      |    |
|--|------|----|
| ปริมาตรน้ำ ( $V_{\text{น้ำ}}$ ) =            | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{\text{น้ำ}}$ ) =   | 24.5 | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{\text{ภายใน}}$ ) =   | 23.8 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{\text{ภายนอก}}$ ) = | 28.3 | °C |

ตารางที่ 4.5 ปรับความถี่ที่ 45 Hz

| เวลา<br>(นาที) | ความหนาแน่นน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{\text{น้ำ}}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอลย์<br>เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                | X1                        | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                          |                                   |                              |
| 0              | -                         | -     | -     | -     | -     | 3.5                            | -             | 3.3                            | -             | 108              | 0.71         | 24.5                     | -                                 | 50                           |
| 10             | -                         | -     | -     | -     | -     | 6.8                            | 24.0          | 0.5                            | -5.5          | 95               | 0.70         | 17.0                     | -17.7                             | 50                           |
| 20             | -                         | -     | -     | -     | -     | 6.5                            | 24.8          | 0.3                            | -10.6         | 88               | 0.70         | 4.0                      | -20.2                             | 50                           |
| 30             | 3.36                      | 1.78  | 2.09  | 2.85  | 1.01  | 6.4                            | 24.2          | 0.3                            | -9.5          | 84               | 0.68         | 0                        | -19.7                             | 45                           |
| 40             | 5.29                      | 3.95  | 3.35  | 5.71  | 3.55  | 6.4                            | 25.2          | 0.3                            | -8.2          | 83               | 0.68         | 0                        | -19.0                             | 45                           |
| 50             | 7.14                      | 5.34  | 4.35  | 7.08  | 6.41  | 6.4                            | 25.0          | 0.3                            | -9.4          | 83               | 0.68         | 0                        | -18.6                             | 45                           |
| 60             | 8.52                      | 7.20  | 6.02  | 8.29  | 9.03  | 6.4                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 83               | 0.68         | 0                        | -18.5                             | 45                           |
| 70             | 9.43                      | 8.95  | 7.14  | 9.67  | 11.43 | 6.4                            | 25.2          | 0.3                            | -9.8          | 83               | 0.68         | 0                        | -19.3                             | 45                           |
| 80             | 10.47                     | 11.03 | 8.04  | 12.20 | 14.67 | 6.4                            | 25.6          | 0.3                            | -8.8          | 83               | 0.68         | 0                        | -20.0                             | 45                           |
| 90             | 12.48                     | 12.13 | 10.30 | 13.41 | 21.67 | 6.4                            | 25.0          | 0.3                            | -9.5          | 83               | 0.68         | 0                        | -20.3                             | 45                           |
| 100            | 14.07                     | 14.41 | 11.13 | 15.09 | 25.21 | 6.4                            | 24.8          | 0.3                            | -8.6          | 82               | 0.68         | 0                        | -20.0                             | 45                           |
| 110            | 15.72                     | 17.01 | 13.68 | 19.08 | 30.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.3                            | -8.7          | 82               | 0.68         | 0                        | -19.1                             | 45                           |
| 120            | 18.66                     | 23.96 | 15.98 | 21.54 | 35.12 | 6.4                            | 25.4          | 0.3                            | -8.4          | 82               | 0.68         | 0                        | -19.2                             | 45                           |
| 126            | 20.99                     | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.3                            | -8.6          | 82               | 0.68         | 0                        | -18.9                             | 45                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 126 นาที  
ค่าพลังงาน 0.185 kW-hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำ 100 cc ปรับความถี่ 40 Hz โดยเริ่มปรับลดความถี่ลงในช่วงที่น้ำมีอุณหภูมิ 0 °C

|  |      |    |
|--|------|----|
| ปริมาณน้ำ ( $V_{\text{น้ำ}}$ ) =             | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{\text{น้ำ}}$ ) =   | 25   | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{\text{ภายใน}}$ ) =   | 23.6 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{\text{ภายนอก}}$ ) = | 28.1 | °C |

ตารางที่ 4.6 ปรับความถี่ที่ 40 Hz

| เวลา<br>(นาที) | ความหนาแน่นน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{\text{น้ำ}}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอลย์<br>เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                | X1                        | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                          |                                   |                              |
| 0              | -                         | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.35                           | -             | 111              | 0.71         | 24.5                     | -                                 | 50                           |
| 10             | -                         | -     | -     | -     | -     | 7                              | 25.2          | 0.55                           | -7.5          | 91               | 0.69         | 16.0                     | -15.1                             | 50                           |
| 20             | -                         | -     | -     | -     | -     | 6.6                            | 25.2          | 0.4                            | -10.4         | 89               | 0.68         | 6.0                      | -19.1                             | 50                           |
| 30             | 3.61                      | 2.27  | 1.82  | 4.41  | 0.94  | 6.5                            | 24.8          | 0.4                            | -8.8          | 85               | 0.68         | 0                        | -18.7                             | 40                           |
| 40             | 5.37                      | 4.15  | 3.22  | 6.64  | 3.13  | 6.5                            | 24.8          | 0.4                            | -8.6          | 79               | 0.68         | 0                        | -17.7                             | 40                           |
| 50             | 6.50                      | 5.92  | 4.93  | 8.58  | 5.91  | 6.5                            | 24.8          | 0.4                            | -8.7          | 79               | 0.68         | 0                        | -16.7                             | 40                           |
| 60             | 7.79                      | 6.45  | 5.82  | 9.11  | 8.83  | 6.5                            | 25.4          | 0.4                            | -8.4          | 80               | 0.68         | 0                        | -17.3                             | 40                           |
| 70             | 8.89                      | 8.11  | 6.94  | 9.94  | 10.63 | 6.5                            | 24.6          | 0.4                            | -9.0          | 79               | 0.68         | 0                        | -16.9                             | 40                           |
| 80             | 10.02                     | 9.89  | 7.92  | 11.19 | 13.88 | 6.5                            | 24.6          | 0.4                            | -8.0          | 79               | 0.68         | 0                        | -17.4                             | 40                           |
| 90             | 11.57                     | 11.72 | 8.64  | 12.88 | 19.67 | 6.5                            | 24.6          | 0.4                            | -8.7          | 79               | 0.68         | 0                        | -17.6                             | 40                           |
| 100            | 14.21                     | 13.35 | 9.97  | 14.99 | 23.23 | 6.4                            | 24.2          | 0.4                            | -8.9          | 79               | 0.68         | 0                        | -17.7                             | 40                           |
| 110            | 15.52                     | 16.22 | 12.21 | 17.26 | 28.65 | 6.4                            | 24.6          | 0.4                            | -8.7          | 78               | 0.68         | 0                        | -17.4                             | 40                           |
| 120            | 17.54                     | 21.34 | 15.78 | 20.33 | 31.19 | 6.4                            | 24.8          | 0.4                            | -8.4          | 77               | 0.67         | 0                        | -17.6                             | 40                           |
| 128            | 20.99                     | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 24.8          | 0.4                            | -8.5          | 77               | 0.67         | 0                        | -17.8                             | 40                           |

|                    |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| เวลาในการทำน้ำแข็ง | 128   | นาที  |
| ค่าพลังงาน         | 0.180 | kW-hr |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรน้ำ 100 cc ปรับความถี่ 35 Hz โดยเริ่มปรับลดความถี่ลงในช่วงที่น้ำมีอุณหภูมิ 0 °C

|  |      |    |
|--|------|----|
| ปริมาตรน้ำ ( $V_{\text{น้ำ}}$ ) =            | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{\text{น้ำ}}$ ) =   | 25   | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{\text{ภายใน}}$ ) =   | 23.6 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{\text{ภายนอก}}$ ) = | 28.1 | °C |

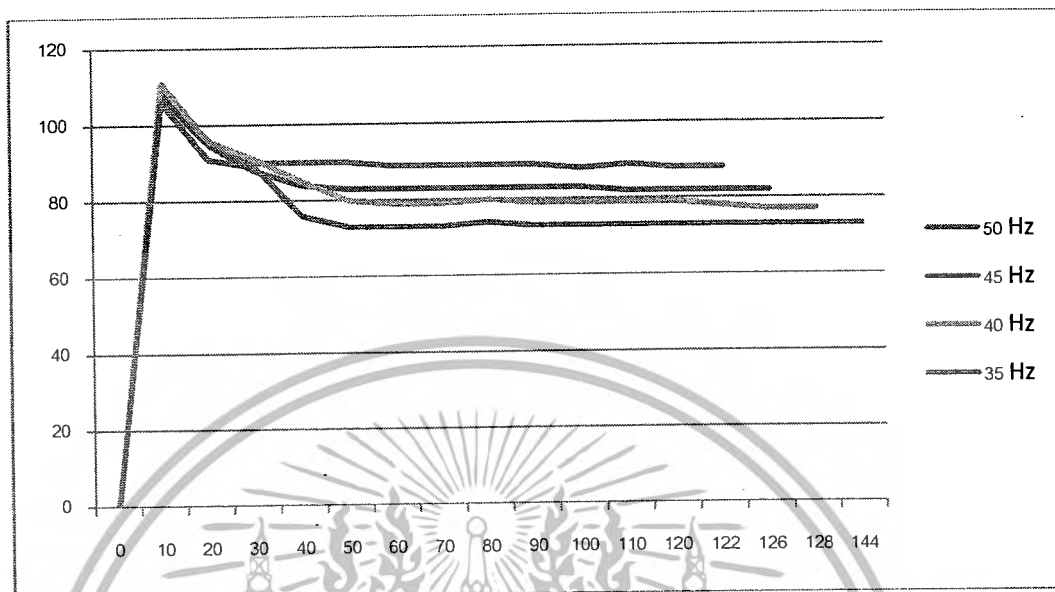
ตารางที่ 4.7 ปรับความถี่ที่ 35 Hz

| เวลา<br>(นาท) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{\text{น้ำ}}$<br>(°C) | อุณห<br>ภูมิ<br>คอลล์<br>เซ็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|---------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
|               | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                          |                                       |                              |
| 0             | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.35                           | -             | 106              | 0.70         | 25                       | -                                     | 50                           |
| 10            | -                        | -     | -     | -     | -     | 7                              | 25.2          | 0.55                           | -7.7          | 91               | 0.70         | 17.0                     | -15.1                                 | 50                           |
| 20            | -                        | -     | -     | -     | -     | 6.6                            | 25.2          | 0.4                            | -8.7          | 89               | 0.69         | 5.5                      | -17.7                                 | 50                           |
| 30            | 3.51                     | 2.17  | 1.85  | 3.14  | 0.94  | 6.5                            | 24.8          | 0.4                            | -8.6          | 76               | 0.68         | 0                        | -18.7                                 | 35                           |
| 40            | 5.37                     | 4.15  | 3.22  | 5.47  | 2.13  | 6.5                            | 24.8          | 0.4                            | -8.5          | 73               | 0.67         | 0                        | -17.7                                 | 35                           |
| 50            | 6.50                     | 5.92  | 4.93  | 8.58  | 4.91  | 6.4                            | 24.8          | 0.4                            | -8.7          | 73               | 0.67         | 0                        | -19.1                                 | 35                           |
| 60            | 7.79                     | 6.45  | 5.82  | 9.11  | 7.81  | 6.2                            | 25.4          | 0.45                           | -8.4          | 73               | 0.67         | 0                        | -17.3                                 | 35                           |
| 70            | 8.89                     | 8.11  | 6.94  | 9.94  | 9.64  | 6.2                            | 24.6          | 0.45                           | -9.0          | 74               | 0.66         | 0                        | -16.9                                 | 35                           |
| 80            | 10.02                    | 9.89  | 7.92  | 11.19 | 12.84 | 6.2                            | 24.6          | 0.45                           | -8.0          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.4                                 | 35                           |
| 90            | 11.57                    | 11.72 | 8.64  | 12.88 | 19.67 | 6.2                            | 24.6          | 0.45                           | -8.7          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.6                                 | 35                           |
| 100           | 14.21                    | 13.35 | 9.97  | 14.99 | 23.23 | 6.2                            | 24.2          | 0.5                            | -8.9          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.7                                 | 35                           |
| 110           | 15.52                    | 16.22 | 12.21 | 16.50 | 28.65 | 6.2                            | 24.6          | 0.5                            | -8.7          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.4                                 | 35                           |
| 120           | 17.54                    | 21.34 | 15.78 | 19.38 | 30.19 | 6.2                            | 24.8          | 0.5                            | -8.4          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.6                                 | 35                           |
| 130           | 18.09                    | 24.46 | 16.78 | 21.57 | 33.65 | 6.2                            | 24.8          | 0.5                            | -8.5          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.8                                 | 35                           |
| 140           | 18.99                    | 27.56 | 18.88 | 25.23 | 35.89 | 6.2                            | 24.6          | 0.5                            | -8.7          | 73               | 0.66         | 0                        | -17.7                                 | 35                           |
| 144           | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.2                            | 24.2          | 0.5                            | -8.9          | 73               | 0.66         | 0                        | -16.9                                 | 35                           |

|                    |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| เวลาในการทำน้ำแข็ง | 144   | นาท   |
| ค่าพลังงาน         | 0.194 | kW-hr |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละช่วงความถี่ที่ปรับลดลงทีละ 5 Hz



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าพลังงานของแต่ละช่วงความถี่ที่ปรับลดลง

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งแต่ละช่วงความถี่ จะเห็นว่าเมื่อปรับลดความถี่ลงทีละ 5 Hz เวลาที่ใช้ในการทำน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้น ส่วนพลังงานที่ใช้นั้นแสดงได้ดังนี้

|               |                          |             |                  |
|---------------|--------------------------|-------------|------------------|
| ความถี่ 50 Hz | ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง | 0.183 kW-hr | ใช้เวลา 122 นาที |
| ความถี่ 45 Hz | ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง | 0.185 kW-hr | ใช้เวลา 126 นาที |
| ความถี่ 40 Hz | ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง | 0.180 kW-hr | ใช้เวลา 128 นาที |
| ความถี่ 35 Hz | ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง | 0.194 kW-hr | ใช้เวลา 144 นาที |

จะเห็นว่าที่ความถี่ 40 Hz ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็งน้อยที่สุดแต่ใช้เวลามากกว่าที่ความถี่ 50 Hz อยู่ 6 นาที และใช้พลังงานลดลงจากปกติ 0.003 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 1.64 % เมื่อเทียบกับที่ความถี่ 50 Hz

#### สรุปผลการทดลองในกรณีที่ 2

จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเราทำการปรับลดความถี่ลง ในช่วงที่เกิดน้ำแข็งมีผลทำให้พลังงานที่ใช้เปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ 40 Hz ใช้พลังงานน้อยที่สุดและสามารถประหยัดพลังงานได้ 1.64 % เมื่อเทียบกับความถี่ 50 Hz แต่เวลาที่ใช้ในการทำน้ำแข็งมากกว่า ความถี่ 50 Hz ซึ่ง

ไม่อาจสรุปได้ว่าที่ความถี่ 40 Hz เป็นค่าที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 ขั้นตอนการทดลองในกรณีที่ 3

1. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 1 ในกรณีที่ 1
2. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 2 ในกรณีที่ 1
3. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 3 ในกรณีที่ 1

4. เริ่มทำการทดลอง โดยทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ลดลงตามแนวคิดที่คิดไว้คือ เมื่อมีความหนาของน้ำแข็งเกิดขึ้น การถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับวัสดุที่ใช้ทำเป็นช่องน้ำแข็งจะมีค่าลดลงตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรนั้นยังเท่าเดิม ดังนั้นเราจึงปรับทำการปรับลดความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรลง เพื่อให้มีค่าสอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้ โดยเราสามารถปรับลดความสามารถในการทำความเย็นลงได้โดยการลดความถี่ที่ให้แก่คอมเพรสเซอร์ ซึ่งจะให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นลดลง

5. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 5 ในกรณีที่ 1
6. ขั้นตอนการทดลองเหมือนกันข้อ 6 ในกรณีที่ 1



#### 4.9 ผลการทดลองกรณีที่ 3

กรณี 3 ทดลองที่ความถี่ปกติที่ 50 Hz โดยปรับลดความถี่ตามแนวความคิดที่คิดไว้

|                                       |      |    |
|---------------------------------------|------|----|
| ปริมาตรน้ำ ( $V_{น้ำ}$ ) =            | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{น้ำ}$ ) =   | 24.3 | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{ภายใน}$ ) =   | 23.6 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{ภายนอก}$ ) = | 27.9 | °C |

ตารางที่ 4.8 ความถี่ที่ 50 Hz ยังไม่ได้ทำการปรับลดความถี่

| เวลา<br>(นาที) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | วัฏจักรจุดที่ 3<br>(จุด High)  |               | วัฏจักรจุดที่ 1<br>(จุด Low)   |               | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | $T_{น้ำ}$<br>(°C) | อุณหภูมิ<br>คอลล์<br>เย็น<br>(°C) | ความ<br>ถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $P_3$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_3$<br>(°C) | $P_1$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $T_1$<br>(°C) | watt             | กระแส<br>(A) |                   |                                   |                              |
| 0              | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.6                            | -             | 3.40                           | -             | 109              | 0.72         | 24.3              | -                                 | 50                           |
| 10             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.2                            | 24.0          | 0.60                           | -5.5          | 96               | 0.68         | 16.5              | -17.7                             | 50                           |
| 20             | -                        | -     | -     | -     | -     | 7.0                            | 24.8          | 0.38                           | -9.2          | 90               | 0.68         | 5.0               | -20.2                             | 50                           |
| 30             | 2.15                     | 2.28  | 2.37  | 3.94  | 1.27  | 6.7                            | 24.2          | 0.35                           | -9.2          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.7                             | 50                           |
| 40             | 4.48                     | 4.22  | 3.39  | 4.68  | 3.51  | 6.8                            | 25.2          | 0.35                           | -8.9          | 90               | 0.67         | 0                 | -19.0                             | 50                           |
| 50             | 6.14                     | 6.29  | 4.12  | 6.71  | 5.57  | 6.9                            | 25.0          | 0.35                           | -9.4          | 89               | 0.67         | 0                 | -18.6                             | 50                           |
| 60             | 7.77                     | 7.00  | 5.02  | 8.52  | 9.54  | 7.0                            | 25.4          | 0.3                            | -9.0          | 89               | 0.68         | 0                 | -18.5                             | 50                           |
| 70             | 9.04                     | 8.60  | 6.58  | 10.06 | 10.98 | 6.8                            | 25.2          | 0.3                            | -9.2          | 89               | 0.67         | 0                 | -19.3                             | 50                           |
| 80             | 11.04                    | 9.93  | 8.16  | 12.25 | 15.76 | 6.5                            | 25.6          | 0.25                           | -10.2         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 90             | 13.48                    | 12.31 | 9.28  | 14.61 | 21.78 | 6.5                            | 25.0          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -20.3                             | 50                           |
| 100            | 14.65                    | 13.92 | 11.13 | 15.36 | 26.22 | 6.5                            | 24.8          | 0.25                           | -10.6         | 89               | 0.67         | 0                 | -20.0                             | 50                           |
| 110            | 16.65                    | 18.24 | 13.72 | 20.74 | 31.45 | 6.4                            | 24.8          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.67         | 0                 | -19.1                             | 50                           |
| 120            | 18.88                    | 24.86 | 16.21 | 24.04 | 35.55 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -10.5         | 88               | 0.66         | 0                 | -19.2                             | 50                           |
| 122            | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 6.4                            | 25.4          | 0.25                           | -9.9          | 88               | 0.66         | 0                 | -18.9                             | 50                           |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 122 นาที

ค่าพลังงาน 0.183 kW-hr

หมายเหตุ : การใช้ปริมาตรน้ำในการทำน้ำแข็งที่ต่างกันจะมีผลกับเวลาในการทำน้ำแข็งแต่ละก้อน คือ ถ้าใช้ปริมาตรน้ำที่มากก็จะใช้เวลาในการทำน้ำแข็งนาน เป็นต้น ที่เลือกใช้ปริมาตรน้ำ 100 cc. เนื่องจากของน้ำแข็งมีขนาดเล็ก และถ้าใช้น้ำ 100 cc. เวลาในการทำน้ำแข็งก็จะไม่นานมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากบทที่ 3 รูปที่ 3.7 จะได้ขนาดของห้องทำน้ำแข็งดังนี้

$$L_A = 9.4 \times 10^{-3} \text{ m} \qquad L_B = 9.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

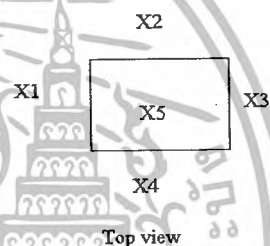
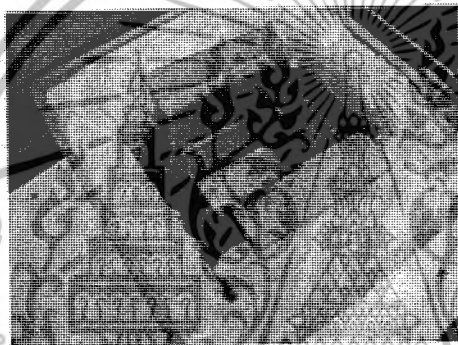
$$L_C = 9.4 \times 10^{-3} \text{ m} \qquad L_D = 11.4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

ส่วน  $k_A, k_B, k_C, k_D$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่างซึ่งดูได้จากภาคผนวกจะได้

$$k_{\text{น้ำแข็ง}} = 2.18 \quad \frac{W}{m \cdot K} \qquad k_{\text{อากาศ}} = 0.024 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

$$k_{\text{ทองแดง}} = 401 \quad \frac{W}{m \cdot K} \qquad k_{\text{น้ำแข็ง}} = 2.18 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

$$k_{\text{สังกะสี}} = 116 \quad \frac{W}{m \cdot K} \qquad h_1 = 2500 \quad W/(m^2 \cdot ^\circ C)$$



รูปที่ 4.10 การทดลองขณะมีสถานะเป็นน้ำและการวัดความหนาแต่ด้าน

จากรูปที่ 4.10 X1, X2, X3, X4, X5 คือความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดย X1 และ X3 คือความหนาทางด้านกว้างของช่องน้ำแข็ง X2 และ X4 คือความหนาทางด้านยาว ส่วน X5 คือความหนาทางด้านลึก

จากตารางที่ 4.8 หาอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะเป็นน้ำที่เวลา 10 นาที ได้ดังนี้  
อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็ง ( $\dot{Q}_x$ ) หาได้ดังนี้  
จากสมการที่ (3.6) ในบทที่ 3 จะได้

$$\begin{aligned} AR_{\text{tot}} &= \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{L_D}{k_D} + \frac{1}{h_1} \quad \text{มีหน่วยเป็น } ^\circ C/W \\ L_A = L_C \text{ จะได้} &= \frac{2(9.4 \times 10^{-3})}{116} + \frac{9.9 \times 10^{-3}}{0.024} + \frac{11.4 \times 10^{-3}}{401} + \frac{1}{2500} \\ &= (0.16207 + 412.5 + 0.02843 + 4) \times 10^{-4} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 416.69 \times 10^{-4} \quad ^\circ\text{C}/\text{W}$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}A} = \frac{1}{416.69 \times 10^{-4}} = 23.9987$$

จากตารางที่ 4.8 ที่เวลา 10 นาที  $T_w = 16.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  ,  $T_f = -17.7 \text{ } ^\circ\text{C}$  และพื้นที่หน้าสัมผัสแต่ละด้านเท่ากับซึ่ง  $A_1$  คือพื้นที่หน้าสัมผัสของผนังด้าน X1 ทำนองเดียวกัน  $A_2, A_3, A_4, A_5$  ก็คือพื้นที่หน้าสัมผัสของด้าน X2, X3, X4, X5 ตามลำดับ โดยที่

$$A_1, A_3 = 23.845 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_2, A_4 = 16.011 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_5 = 26.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

จากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_x = UA(T_w - T_f) \quad \text{W}$$

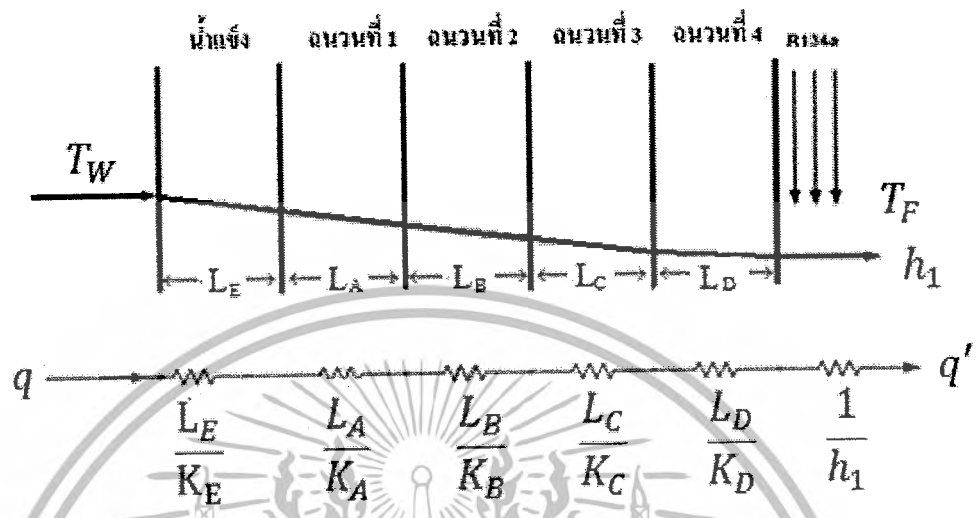
จะได้

$$\dot{Q}_x = U(T_w - T_f)[A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5]$$

$$= 820.754[(23.845 + 16.011 + 23.845 + 16.011 + 26.25) \times 10^{-4}]$$

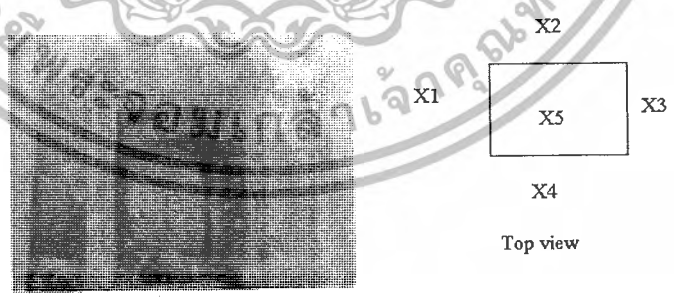
$$= 8.697 \quad \text{W}$$

ขณะที่เป็นน้ำแข็งทั้งหมด



รูปที่ 4.11 อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งในสถานะเป็นน้ำแข็งทั้งหมด

จากรูปที่ 4.11 จะคล้ายกับอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่เป็นน้ำแต่ต่างกันตรงที่เมื่อน้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งน้ำแข็งที่เริ่มหนาขึ้นซึ่งจะเป็นเสมือนตัวต้านทานความร้อนอีกชั้นหนึ่ง โดยเราแทนความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้ด้วย  $L_E$  และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง ( $k_{น้ำแข็ง}$ ) มีค่าประมาณ  $2.18 \frac{W}{m \cdot K}$



รูปที่ 4.12 การทดลองขณะมีสถานะเป็นน้ำแข็งทั้งหมดและการวัดความหนาแต่ด้าน

จากรูปที่ 4.12 X1, X2, X3, X4, X5 คือความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดย X1 และ X3 คือความหนาทางด้านกว้างของช่องน้ำแข็ง X2 และ X4 คือความหนาทางด้านยาว ส่วน X5 คือความหนาทางคานลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดความต้านทานทางความร้อนใหม่แทนด้วย ( $AR_{tot1}$ ) เมื่อน้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเพื่อให้ง่ายต่อคำนวณหาค่า  $AR_{tot1}$  ได้ดังนี้

จากตารางที่ 4.8 หาค่าการถ่ายเทความร้อนขณะเป็นน้ำแข็งเป็นเวลา 122 นาที  $T_w = 0^\circ C$ ,  $T_F = -18.9^\circ C$  และ  $X_1 = 20.99 \times 10^{-3} m$ ,  $A_1 = 23.845 \times 10^{-4} m^2$  จะได้ดังนี้

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$A_1 R_{tot1} = AR_{tot} + \frac{L_E}{k_E} \quad ^\circ C/W$$

$$A_1 R_{tot1} = 416.69 \times 10^{-4} + \frac{20.99 \times 10^{-3}}{2.18}$$

$$A_1 R_{tot1} = 0.0513 \quad ^\circ C/W$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U_1 = \frac{1}{R_{tot1} A_1} = \frac{1}{0.0513} = 19.493$$

และจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_{x1} = U_1 (T_w - T_F) A_1 \quad W$$

$$\dot{Q}_{x1} = 368.421 \times 23.845 \times 10^{-4}$$

$$\dot{Q}_{x1} = 0.878 \quad W$$

ที่  $X_2 = 31.26 \times 10^{-3} m$ ,  $A_2 = 16.011 \times 10^{-4} m^2$  หาค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$A_2 R_{tot1} = 416.69 \times 10^{-4} + \frac{31.26 \times 10^{-3}}{2.18}$$

$$A_2 R_{tot1} = 0.0560 \quad ^\circ C/W$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U_2 = \frac{1}{R_{tot1} A_2} = \frac{1}{0.0560} = 17.857$$

และจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_{x2} = U_2 (T_w - T_F) A_2 \quad W$$

$$\dot{Q}_{x2} = 337.449 \times 16.011 \times 10^{-4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{Q}_{x2} = 0.540 \quad W$$

ที่  $X_3 = 20.99 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $A_3 = 23.845 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้  
จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$A_3 R_{\text{tot1}} = 416.69 \times 10^{-4} + \frac{20.99 \times 10^{-3}}{2.18}$$

$$A_3 R_{\text{tot1}} = 0.0513 \quad ^\circ\text{C}/W$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U_3 = \frac{1}{R_{\text{tot1}} A_3} = \frac{1}{0.0513} = 19.493$$

และจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_{x3} = U_3 (T_w - T_F) A_3 \quad W$$

$$\dot{Q}_{x3} = 368.421 \times 23.845 \times 10^{-4}$$

$$\dot{Q}_{x3} = 0.878 \quad W$$

ที่  $X_4 = 31.26 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $A_4 = 16.011 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้  
จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$A_4 R_{\text{tot1}} = 416.69 \times 10^{-4} + \frac{31.26 \times 10^{-3}}{2.18}$$

$$A_4 R_{\text{tot1}} = 0.0560 \quad ^\circ\text{C}/W$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U_4 = \frac{1}{R_{\text{tot1}} A_4} = \frac{1}{0.0560} = 17.857$$

และจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_{x4} = U_4 (T_w - T_F) A_4 \quad W$$

$$\dot{Q}_{x4} = 337.449 \times 16.011 \times 10^{-4}$$

$$\dot{Q}_{x4} = 0.540 \quad W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $X_5 = 38.14 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $A_5 = 26.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  หาอัตราการถ่ายเทความร้อน ได้ดังนี้ จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$A_5 r_{\text{tot1}} = 416.69 \times 10^{-4} + \frac{38.14 \times 10^{-3}}{2.18}$$

$$A_5 r_{\text{tot1}} = 0.0592 \quad ^\circ\text{C}/\text{W}$$

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$U_5 = \frac{1}{R_{\text{tot1}} A_5} = \frac{1}{0.0592} = 16.892$$

และจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\dot{Q}_{x5} = U_5 (T_w - T_F) A_5 \quad \text{W}$$

$$\dot{Q}_{e5} = 319.449 \times 26.25 \times 10^{-4}$$

$$\dot{Q}_{e5} = 0.839 \quad \text{W}$$

ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนรวมจะได้

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{e1} + \dot{Q}_{e2} + \dot{Q}_{e3} + \dot{Q}_{e4} + \dot{Q}_{e5}$$

$$\dot{Q}_e = 3.675 \quad \text{W}$$

คำนวณทุกช่วงเวลาแล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ในตารางที่ 4.9

อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็น R-134a (m)

จากตารางที่ 4.8 หาอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นที่เวลา 10 นาที อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความเย็นที่คอมเพรสเซอร์ทำได้จากสมการที่ (3.9) และ (3.10)

$$\dot{m} = \frac{V_{\text{pt}}}{v}$$

และ

$$V_{\text{pt}} = V \times N$$

จากคุณสมบัติของคอมเพรสเซอร์ (จากตารางที่ 3.1) จะได้  $V = 2.96 \text{ cm}^3$  และ  $N = 2850 \text{ rpm}$  จะได้ จากสมการที่ (3.10)

$$V_{\text{pt}} = 2.96 \times 2850$$

$$V_{\text{pt}} = 8436 \quad \text{cm}^3/\text{min}$$

$$= 8436 \times 10^{-6} \times 60 \quad \text{m}^3/\text{hr}$$

$$= 0.50616 \quad \text{m}^3/\text{hr}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็น ( $v$ ) หาได้จากการเปิดตาราง R-134a ร้อนยิ่งยวด จากตารางที่ 4.8 ที่เวลา 10 นาที วัฏจักรจุดที่ 1 ได้  $P_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$  และ  $T_1 = -5.5^\circ\text{C}$  เนื่องจากความดันเป็นความดันเกดดังนั้นต้องบวกเข้าด้วยความดันบรรยากาศ จะได้

$$1 \text{ bar} = 1.01968 \text{ kg/cm}^2, \quad P_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ แปลงหน่วย } 0.588 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar}, \quad P_1 = 0.588 + 1.01325$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}, \quad P_1 = 1.602 \text{ bar} = 0.1602 \text{ MPa} \quad \text{และ } T_1 = -5.5^\circ\text{C}$$

ตารางที่ 4.9 R-134a ร้อนยิ่งยวด

| Temp<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $v$<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ | $h$<br>$\text{kJ/kg}$ | $s$<br>$\text{kJ/kg.K}$ | $v$<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ | $h$<br>$\text{kJ/kg}$ | $s$<br>$\text{kJ/kg.K}$ |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                              | 0.15MPa                       |                       |                         | 0.20MPa                       |                       |                         |
| -10                          | 0.13603                       | 393.839               | 1.76058                 | 0.10013                       | 392.338               | 1.73276                 |
| 0                            | 0.14222                       | 402.187               | 1.79171                 | 0.10501                       | 400.911               | 1.76474                 |

ที่  $T_1 = -5.5^\circ\text{C}$  หา  $v$  ที่ 0.15 MPa เท่ากับ

$$v = 0.14222 - \frac{(0.14222 - 0.13603) \times (5.5 - 0)}{10} = 0.1388$$

ที่  $T_1 = -5.5^\circ\text{C}$  หา  $v$  ที่ 0.20 MPa เท่ากับ

$$v = 0.10501 - \frac{(0.10501 - 0.10013) \times (5.5 - 0)}{10} = 0.1023$$

ที่  $T_1 = -5.5^\circ\text{C}$  หา  $v$  ที่ 0.1602 MPa เท่ากับ

$$v = 0.1309 - \frac{(0.1388 - 0.1023) \times (0.1602 - 0.15)}{0.05}$$

$$v = 0.1234 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

จากสมการที่ (3.9) จะได้

$$\dot{m} = \frac{0.50616}{0.1234}$$

$$= 3.646 \quad \text{kg/hr}$$

คำนวณทุกช่วงเวลาแล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ในตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร ( $Q_L$ )

จากตารางที่ 4.8 หาอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะเป็นน้ำที่เวลา 10 นาที  
ความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรสามารถหาได้ดังนี้  
จากสมการที่ (3.8)

$$Q_L = \dot{m} (h_1 - h_3) \quad \text{kJ/hr}$$

โดยที่  $h_1$  และ  $h_3$  หาได้จากการเปิดตารางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R-134a ดังนี้

หา  $h_1$  ได้จากการเปิดตาราง R-134a ร้อนยิ่งยวด เนื่องจากในจุดที่ 1 สารทำความเย็นจะกลายเป็นไอทั้งหมดก่อนที่จะเข้าคอมเพรสเซอร์ จากตารางที่ 4.8 ที่เวลา 10 นาที วัฏจักรจุดที่ 1 ได้  $P_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$  และ  $T_1 = -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากเป็นความดันแก๊สดังนั้นต้องบวกเข้าด้วยความดันบรรยากาศจะได้

$$1 \text{ bar} = 1.01968 \text{ kg/cm}^2, \quad P_1 = 0.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ แปลงหน่วย } 0.588 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar}, \quad P_1 = 0.588 + 1.01325$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}, \quad P_1 = 1.602 \text{ bar} = 0.1602 \text{ MPa} \quad \text{และ } T_1 = -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

จากตารางที่ 4.9

ที่  $T_1 = -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  หา  $h_1$  ที่ 0.15 MPa เท่ากับ

$$h_1 = 402.187 - \frac{(402.187 - 393.839) \times (5.5 - 0)}{10} = 397.596$$

ที่  $T_1 = -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  หา  $h_1$  ที่ 0.20 MPa เท่ากับ

$$h_1 = 400.911 - \frac{(400.911 - 392.338) \times (5.5 - 0)}{10} = 396.196$$

ที่  $T_1 = -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  หา  $h_1$  ที่ 0.1602 MPa เท่ากับ

$$h_1 = 396.196 - \frac{(397.596 - 396.196) \times (0.1602 - 0.15)}{0.05}$$

$$h_1 = 397.015 \text{ kJ/kg}$$

หา  $h_3$  ได้จากการเปิดตาราง R-134a อิ่มตัว เนื่องจากในจุดที่ 3 สารทำความเย็นจะกลายเป็นของเหลวทั้งหมดก่อนที่จะเข้า TEV จากตารางที่ 4.8 ที่เวลา 10 นาที วัฏจักรจุดที่ 1 ได้  $P_3 = 7.2 \text{ kg/cm}^2$  และ  $T_3 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากเป็นความดันแก๊สดังนั้นต้องบวกเข้าด้วยความดันบรรยากาศจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 bar = 1.01968 kg/cm<sup>2</sup>,  $P_3 = 7.2 \text{ kg/cm}^2$  แปลงหน่วย 7.061 bar

1 atm = 1.01325 bar,  $P_3 = 7.061 + 1.01325$

1 bar = 10<sup>5</sup> Pa,  $P_3 = 8.0743 \text{ bar} = 0.80743 \text{ MPa}$  และ  $T_3 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.10 R-134a อิมิตัว

| Abs.<br>Press.<br>(MPa)<br>P | Enthalpy<br>kJ/kg |          |            |
|------------------------------|-------------------|----------|------------|
|                              | Sat. Liquid       | Evap.    | Sat. Vapor |
|                              | $h_f$             | $h_{fg}$ | $h_g$      |
| 0.7710                       | 389.790           | 323.285  | 428.305    |
| 0.8876                       | 398.103           | 318.415  | 429.110    |

หา  $h_3$  ที่ 0.7710 MPa ที่ Sat. Liquid เท่ากับ

หา  $h_3$  ที่ 0.8876 MPa ที่ Sat. Liquid เท่ากับ

หา  $h_3$  ที่ 0.80743 MPa ที่ Sat. Liquid จะได้

$$h_3 = 396.196 - \frac{(397.596 - 396.196) \times (0.1602 - 0.15)}{0.05}$$

$$h_3 = 392.015 \text{ kJ/kg}$$

จากสมการที่ (3.8) ที่  $\dot{m} = 3.646$  จะได้

$$Q_L = 3.646(397.015 - 392.015)$$

$$Q_L = 15.211 \text{ kJ/hr}$$

$$Q_L = 4.225 \text{ W}$$

ทำเช่นนี้ทุกช่วงเวลาแล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ในตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนกับความสามารถในการทำความเย็นของ  
 วัฏจักรจากการทดลองที่ 4.8

| เวลา<br>(นาที) | $\dot{Q}_x$<br>(W) | $Q_L$<br>(W) | $\dot{m}$<br>(kg/hr) |
|----------------|--------------------|--------------|----------------------|
| 10             | 8.697              | 4.225        | 3.646                |
| 20             | 6.408              | 4.258        | 3.635                |
| 30             | 4.888              | 4.301        | 3.653                |
| 40             | 4.687              | 4.238        | 3.698                |
| 50             | 4.514              | 4.311        | 3.704                |
| 60             | 4.410              | 4.259        | 3.679                |
| 70             | 4.307              | 4.276        | 3.649                |
| 80             | 4.158              | 4.264        | 3.623                |
| 90             | 4.069              | 4.253        | 3.654                |
| 100            | 3.945              | 4.248        | 3.658                |
| 110            | 3.857              | 4.253        | 3.644                |
| 120            | 3.774              | 4.246        | 3.639                |
| 122            | 3.675              | 4.251        | 3.641                |

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นที่น้ำยังเป็นของเหลวทั้งหมดอยู่นั้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งมีค่าสูงและจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อน้ำเริ่มกลายเป็นน้ำแข็งและจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรมีค่าค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น จากตารางข้างต้นจะเห็นว่าที่เวลาเริ่มต้นจนถึงช่วงนาทีที่ 70 อัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งมีค่ามากกว่าความสามารถในการทำความเย็นของ วัฏจักร ซึ่งในช่วงนี้เราไม่จำเป็นต้องปรับลดความถี่ลง เราจะเริ่มปรับลดความถี่ลงที่นาทีที่ 80 เนื่องจากความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักร ( $Q_L$ ) มีค่ามากกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็ง ( $\dot{Q}_x$ ) เราต้องทำการลดความสามารถในการทำความเย็นลงให้มีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็ง โดยการปรับลดความถี่ลง เพราะความสามารถในการทำความเย็นมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อน้ำแข็งเกิดขึ้นจากตารางจะเห็นว่าที่เวลา 10 นาที อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่วัฏจักรจะดึงความร้อนออกไปได้เราจึงไม่ทำการลดความสามารถในการทำความเย็นลง แต่ที่เวลา 80 นาที

เป็นต้นไปความร้อนที่วัฏจักรทำได้มีค่ามากกว่าความร้อนที่กลองทำได้ จึงทำให้สูญเสียพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น เราจึงต้องทำการลดความสามารถในการทำความเย็นลง ซึ่งการลดความถี่ลงนั้นจะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็น โดยเราสามารถหาค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็นใหม่ ( $\dot{m}_1$ ) และความถี่ที่จะต้องปรับลดดัง ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้ดังนี้

ที่หน้าที่ 80 ของตารางที่ 4.9

เราจะหาอัตราการไหลใหม่โดยการแทนอัตราการถ่ายเทความร้อนลงในสมการการทำความเย็นดังนี้ จากสมการที่ (3.13)

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}_x}{(h_1 - h_3)}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{4.158}{1.177}$$

$$= 3.533 \text{ kg/hr}$$

หาความถี่ที่จะต้องปรับลดได้ดังนี้ จากสมการที่ (3.15)

$$N_1 = \frac{v \times \dot{m}_1}{v}$$

$$N_1 = \frac{3.533 \times 2328.46}{2.96}$$

$$N_1 = 2780 \text{ rpm}$$

แทนค่า  $N_1$  ลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$N_1 = \frac{120f}{p}$$

$$2780 = \frac{120f}{2.105}$$

$$f = 48.76 \text{ Hz}$$

ทำการคำนวณจนครบและนำค่าที่ได้ไปใส่ในตารางที่ 4.12 จากนั้นก็ทำการทดลองปรับความถี่ตามที่ได้คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลเดิมกับอัตราการไหลใหม่ ( $\dot{m}_n$ ) และความถี่ที่จะทำการปรับลดให้กับคอมเพรสเซอร์

| เวลา<br>(นาทื) | $\dot{m}$<br>(kg/hr) | $\dot{m}_1$<br>(kg/hr) | $N_1$<br>(rpm) | ความถี่ $f$<br>(Hz) |
|----------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------------|
| 10             | 3.646                | 3.646                  | 2850           | 50                  |
| 20             | 3.635                | 3.635                  | 2850           | 50                  |
| 30             | 3.653                | 3.653                  | 2850           | 50                  |
| 40             | 3.698                | 3.698                  | 2850           | 50                  |
| 50             | 3.704                | 3.704                  | 2850           | 50                  |
| 60             | 3.679                | 3.679                  | 2850           | 50                  |
| 70             | 3.649                | 3.649                  | 2850           | 50                  |
| 80             | 3.623                | 3.533                  | 2780           | 48.76               |
| 90             | 3.654                | 3.496                  | 2727           | 47.84               |
| 100            | 3.658                | 3.397                  | 2647           | 46.43               |
| 110            | 3.644                | 3.305                  | 2585           | 45.35               |
| 120            | 3.639                | 3.234                  | 2533           | 44.43               |
| 122            | 3.641                | 3.148                  | 2465           | 43.24               |

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าจากการคำนวณทำให้เราสามารถทราบความถี่ที่ควรปรับลดให้กับคอมเพรสเซอร์ลง โดยจากตารางข้างต้นจะเห็นว่า ในช่วงแรกเมื่อน้ำยังเป็นของเหลวทั้งหมด ไม่ได้ปรับความถี่ แต่เริ่มปรับความถี่ในช่วงนาทืที่ 80 ในช่วงที่น้ำกำลังกลายเป็นน้ำแข็งและความถี่ที่ปรับจะลดลงเรื่อย ๆ

ทดลองปรับความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น

|                                       |      |    |
|---------------------------------------|------|----|
| ปริมาตรน้ำ ( $V_{น้ำ}$ ) =            | 100  | cc |
| อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ( $T_{น้ำ}$ ) =   | 24   | °C |
| อุณหภูมิภายในห้อง ( $T_{ภายใน}$ ) =   | 23.8 | °C |
| อุณหภูมิภายนอกห้อง ( $T_{ภายนอก}$ ) = | 28.3 | °C |

ตารางที่ 4.13 ปรับความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น

| เวลา<br>(นาที่<br>) | ความหนาของน้ำแข็ง<br>mm. |       |       |       |       | เปรียบเทียบอัตราการไหลของสาร<br>ทำความเย็นเดิมและใหม่และ<br>ความเร็วรอบคอมเพรสเซอร์ใหม่ |                        |                | พลังงาน<br>ไฟฟ้า |              | ความถี่ที่<br>ป้อน<br>Hz |
|---------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---|------------------------|----------------|------------------|--------------|--------------------------|
|                     | X1                       | X2    | X3    | X4    | X5    | $\dot{m}$<br>(kg/hr)  | $\dot{m}_1$<br>(kg/hr) | $N_1$<br>(rpm) | watt             | กระแส<br>(A) |                          |
| 0                   | -                        | -     | -     | -     | -     | -   | -                      | -              | 108              | 0.72         | 50                       |
| 10                  | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.646   | 3.646                  | 2850           | 96               | 0.68         | 50                       |
| 20                  | -                        | -     | -     | -     | -     | 3.635   | 3.635                  | 2850           | 90               | 0.68         | 50                       |
| 30                  | 2.23                     | 2.26  | 2.33  | 3.74  | 1.17  | 3.653   | 3.653                  | 2850           | 90               | 0.67         | 50                       |
| 40                  | 4.51                     | 4.14  | 3.40  | 4.61  | 3.54  | 3.698   | 3.698                  | 2850           | 90               | 0.67         | 50                       |
| 50                  | 6.53                     | 6.34  | 4.25  | 6.42  | 5.63  | 3.704   | 3.704                  | 2850           | 89               | 0.67         | 50                       |
| 60                  | 7.89                     | 7.12  | 5.11  | 8.68  | 9.64  | 3.679   | 3.679                  | 2850           | 89               | 0.68         | 50                       |
| 70                  | 9.04                     | 8.66  | 6.71  | 10.16 | 10.98 | 3.649   | 3.649                  | 2850           | 88               | 0.67         | 50                       |
| 80                  | 10.47                    | 11.03 | 8.04  | 12.20 | 14.67 | 3.623   | 3.533                  | 2780           | 87               | 0.68         | 48.76                    |
| 90                  | 12.48                    | 12.13 | 10.30 | 13.41 | 21.67 | 3.654   | 3.496                  | 2727           | 86               | 0.68         | 47.84                    |
| 100                 | 14.07                    | 14.41 | 11.13 | 15.09 | 25.21 | 3.658   | 3.397                  | 2647           | 84               | 0.68         | 46.43                    |
| 110                 | 15.72                    | 17.01 | 13.68 | 19.08 | 30.45 | 3.644   | 3.305                  | 2585           | 82               | 0.68         | 45.35                    |
| 120                 | 18.66                    | 23.96 | 15.98 | 21.54 | 35.12 | 3.639   | 3.234                  | 2533           | 82               | 0.68         | 44.43                    |
| 121                 | 20.99                    | 31.26 | 20.99 | 31.26 | 38.14 | 3.641   | 3.148                  | 2465           | 82               | 0.67         | 43.24                    |

เวลาในการทำน้ำแข็ง 121 นาที่  
ค่าพลังงาน 0.178 kW-hr

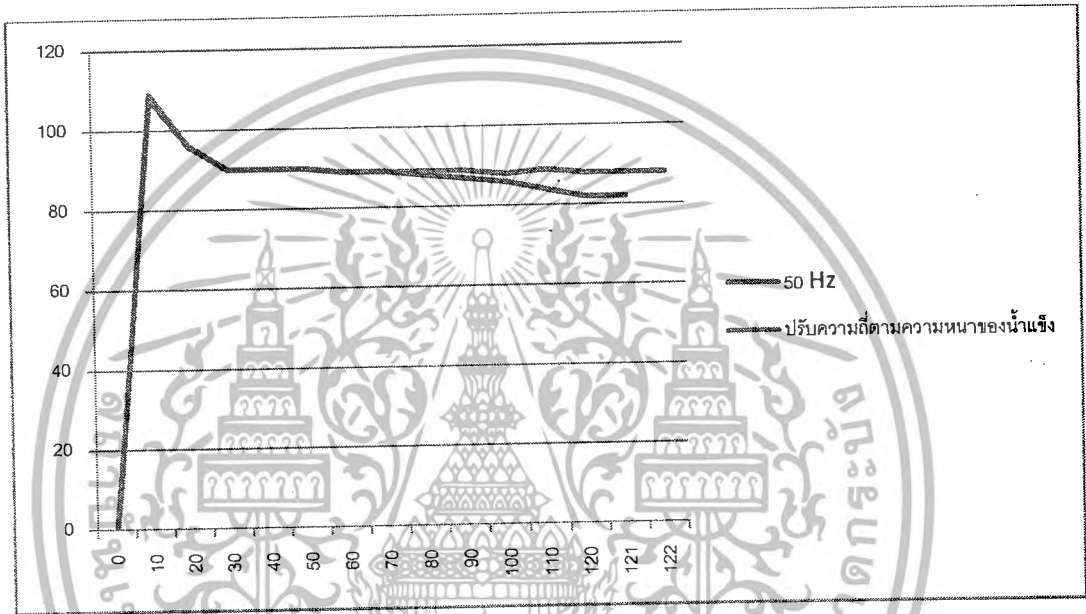
จากตารางที่ 4.13 ปรับลดความถี่ตามแนวความคิด โดยจากตารางมีการเปรียบเทียบอัตรา  
การไหลของสารทำความเย็นเดิม ใหม่และความเร็วรอบคอมเพรสเซอร์ใหม่ ซึ่งจะทำให้เราทราบ  
ความถี่ที่จะปรับลดลงโดยที่ความถี่ที่ปรับลดลงนั้นจะมีผลต่อความสามารถในการทำความเย็นของ  
วัฏจักร โดยเราจะปรับลดความสามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรลงเพื่อให้สอดคล้องกับอัตรา

การถ่ายเทความร้อนของห้องทำน้ำแข็งที่ทำได้ ซึ่งถ้าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถในการทำความเย็นของวัฏจักรเราจะไม่ทำการปรับลดความถี่ แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าเราจึงจะทำการปรับลดความถี่ เนื่องจากการดึงความร้อนไปทิ้ง หรือ ความสามารถในการทำความเย็นนั้นจะต้องเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน หรือ ความสามารถของห้องทำน้ำแข็งที่ยอมให้ความร้อนผ่าน ได้จึงจะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

กราฟแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการทดลองปรับความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าพลังงานในการปรับความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็ง ในการปรับลดความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่า พลังงานที่ใช้จะเริ่มลดลงในช่วงเวลาหลังจากนาที่ที่ 80 เป็นต้นไป และจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการทำน้ำแข็งในขณะที่ปรับลดความถี่และยังไม่ปรับลดความถี่มีความแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำน้ำแข็งแสดงได้ดังนี้

ความถี่ 50 Hz ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง 0.183 kW-hr

เมื่อปรับลดความถี่ ใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง 0.178 kW-hr

จะเห็นว่า เมื่อปรับลดความถี่ลงตามความหนาของน้ำแข็งจะทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งลงจากปกติได้ 0.005 kW-hr คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 2.73 %

### สรุปผลการทดลองในกรณีที่ 3

จากการทดลองเมื่อทำการปรับลดความถี่ตามความหนาของน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นนั้น จะมีผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งลดลง 0.005 kW-hr ส่วนในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการทำน้ำแข็งใช้เวลาค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก และเราสามารถประหยัดพลังงานในการทำน้ำแข็งได้ถึง 2.73 %



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงาน

จากการทดลองเราสามารถนำทฤษฎีในการถ่ายเทความร้อนและ กฎของเทอร์โมไดนามิกส์ มาวิเคราะห์กระบวนการเกิดน้ำแข็งในรูปทรงสี่เหลี่ยม เพื่อศึกษาพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์และหารูปแบบการเกิดน้ำแข็งที่ลดพลังงานให้กับคอมเพรสเซอร์ โดยการปรับความถี่ของกระแสที่ป้อนให้คอมเพรสเซอร์ เพื่อลดอัตราการไหลของสารทำความเย็นลงในช่วงเวลาที่เหมาะสม ผลของการทดลองพบว่าสามารถลดพลังงานให้กับคอมเพรสเซอร์ลงได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในการควบคุมปัจจัยภายนอกไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความชื้นยังไม่คงที่ ทำให้กระบวนการทำน้ำแข็งมีความผิดพลาดเนื่องจากผลของปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น และการออกแบบห้องทำน้ำแข็งควรมีขนาดที่ใหญ่กว่าเดิมเนื่องจากง่ายต่อการวัดความหนาของน้ำแข็ง นอกจากนี้ในการวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดก็ยังมีไม่แน่นอน อีกทั้งการวัดอุณหภูมิของวัฏจักรก็ยังไม่มีความแน่นอนเนื่องจากการใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัสในการวัดอุณหภูมิ

ซึ่งในการหารูปแบบการเกิดน้ำแข็งอาจจะมีทฤษฎีหรือหลักการอื่นๆ ที่มีความแม่นยำมากกว่านี้ในการสร้างรูปแบบเพื่อพัฒนาในอนาคต และการทดลองควรจะมีการวัดความหนาของน้ำที่วิเคราะห์ ลักษณะน้ำแข็งในแบบต่างๆ และควบคุมปัจจัยภายนอกทั้งอุณหภูมิและความชื้น เพื่อที่จะพัฒนารูปแบบให้มีความแม่นยำมากขึ้นในการลดพลังงานให้กับคอมเพรสเซอร์

## บรรณานุกรม

- [1] อัครรัตน์ พูลกระจ่าง. การทำความเย็นและการปรับอากาศ. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพฯ. 2547
- [2] วีรศักดิ์ บุญทน. การทำความเย็น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550
- [3] R.C. Srivastava, Subit K.Saha and Abhay K.Jain. **Thermodynamics**. India :PHI . 2005
- [4] Stoecker , W.F and Jones, W.J. **Refrigeration and Air Conditioning**. Mc Graw-Hill,1982.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก คุณสมบัติสารทำความเย็น R134a  
ที่สถานะของเหลวและไออิ่มตัว

| Temp.<br>(°C) | $p_{sat}$<br>(bar) | Specific Volume                                     |   | Enthalpy         |                     |                  | Entropy            |                       |                    |
|---------------|--------------------|---|---|------------------|---------------------|------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
|               |                    | Liquid<br>$v_f \times 10^3$<br>(m <sup>3</sup> /kg) | Vapour<br>$v_g$<br>(m <sup>3</sup> /kg) | $h_f$<br>(kJ/kg) | $h_{fg}$<br>(kJ/kg) | $h_g$<br>(kJ/kg) | $s_f$<br>(kJ/kg.K) | $s_{fg}$<br>(kJ/kg.K) | $s_g$<br>(kJ/kg.K) |
| -40           | .517               | .705  | .3567                                   | 150.60           | 230.22              | 380.82           | .8009              | .9874                 | 1.7882             |
| -38           | .573               | .708  | .3239                                   | 152.91           | 229.16              | 382.07           | .8110              | .9745                 | 1.7855             |
| -36           | .633               | .711  | .2946                                   | 155.24           | 228.09              | 383.33           | .8211              | .9618                 | 1.7828             |
| -34           | .699               | .714  | .2684                                   | 157.58           | 227.00              | 384.58           | .8312              | .9491                 | 1.7803             |
| -32           | .771               | .717  | .2450                                   | 159.95           | 225.88              | 385.33           | .8412              | .9367                 | 1.7779             |
| -30           | .848               | .720  | .2240                                   | 162.33           | 224.75              | 387.08           | .8513              | .9243                 | 1.7766             |
| -28           | .931               | .723  | .2051                                   | 164.72           | 223.60              | 388.32           | .8613              | .9120                 | 1.7734             |
| -26           | 1.020              | .726  | .1881                                   | 167.13           | 222.42              | 389.55           | .8714              | .8999                 | 1.7713             |
| -24           | 1.117              | .730  | .1727                                   | 169.56           | 221.23              | 390.79           | .8814              | .8879                 | 1.7692             |
| -22           | 1.220              | .733  | .1589                                   | 172.01           | 220.01              | 392.02           | .8913              | .8760                 | 1.7673             |
| -20           | 1.330              | .736  | .1464                                   | 174.47           | 218.77              | 393.24           | .9013              | .8642                 | 1.7655             |
| -18           | 1.449              | .739  | .1350                                   | 176.95           | 217.51              | 394.46           | .9113              | .8525                 | 1.7637             |
| -16           | 1.575              | .743  | .1247                                   | 179.44           | 216.23              | 395.68           | .9212              | .8408                 | 1.7620             |
| -14           | 1.711              | .746  | .1153                                   | 181.96           | 214.93              | 396.89           | .9311              | .8293                 | 1.7601             |
| -12           | 1.855              | .750  | .1067                                   | 184.48           | 213.60              | 398.09           | .9410              | .8179                 | 1.7589             |
| -10           | 2.008              | .753  | .0989                                   | 187.03           | 212.26              | 399.28           | .9509              | .8066                 | 1.7574             |
| -8            | 2.171              | .757  | .0918                                   | 189.59           | 210.89              | 400.48           | .9607              | .7953                 | 1.7561             |
| -6            | 2.344              | .761  | .0853                                   | 192.17           | 209.49              | 401.66           | .9706              | .7841                 | 1.7547             |
| -4            | 2.528              | .764  | .0794                                   | 194.76           | 208.07              | 402.84           | .9804              | .7731                 | 1.7535             |
| -2            | 2.723              | .768  | .0739                                   | 197.37           | 206.63              | 404.01           | .9902              | .7620                 | 1.7522             |
| 0             | 2.929              | .772  | .0689                                   | 200.00           | 205.17              | 405.17           | 1.0000             | .7511                 | 1.7511             |
| 2             | 3.147              | .776  | .0642                                   | 202.64           | 203.68              | 406.32           | 1.0098             | .7402                 | 1.7500             |
| 4             | 3.378              | .780  | .0600                                   | 205.31           | 202.16              | 407.47           | 1.0195             | .7294                 | 1.7489             |
| 6             | 3.621              | .784  | .0561                                   | 207.98           | 200.62              | 408.60           | 1.0293             | .7187                 | 1.7479             |
| 8             | 3.877              | .788  | .0525                                   | 210.68           | 199.05              | 409.73           | 1.0390             | .7080                 | 1.7470             |
| 10            | 4.147              | .793  | .0491                                   | 213.39           | 197.46              | 410.85           | 1.0487             | .6973                 | 1.7460             |
| 12            | 4.431              | .797  | .0460                                   | 216.13           | 195.84              | 411.96           | 1.0584             | .6868                 | 1.7452             |
| 14            | 4.730              | .802  | .0432                                   | 218.87           | 194.19              | 413.06           | 1.0681             | .6762                 | 1.7443             |
| 16            | 5.043              | .806  | .0405                                   | 221.64           | 192.51              | 414.15           | 1.0777             | .6657                 | 1.7435             |
| 18            | 5.372              | .811  | .0381                                   | 224.43           | 190.80              | 415.23           | 1.0874             | .6553                 | 1.7427             |
| 20            | 5.718              | .816  | .0358                                   | 227.23           | 189.06              | 416.29           | 1.0970             | .6449                 | 1.7419             |
| 22            | 6.080              | .821  | .0336                                   | 230.06           | 187.29              | 417.35           | 1.1067             | .6345                 | 1.7418             |
| 24            | 6.459              | .826  | .0317                                   | 232.90           | 185.49              | 418.39           | 1.1163             | .6242                 | 1.7405             |
| 26            | 6.855              | .831  | .0298                                   | 235.76           | 183.65              | 419.41           | 1.1259             | .6139                 | 1.7398             |
| 28            | 7.270              | .836  | .0281                                   | 238.65           | 181.78              | 420.43           | 1.1355             | .6036                 | 1.7391             |
| 30            | 7.703              | .842  | .0265                                   | 241.56           | 179.87              | 421.43           | 1.1451             | .5933                 | 1.7384             |
| 32            | 8.155              | .847  | .0250                                   | 244.48           | 177.93              | 422.41           | 1.1547             | .5831                 | 1.7377             |
| 34            | 8.627              | .853  | .0236                                   | 247.44           | 175.94              | 423.38           | 1.1643             | .5728                 | 1.7371             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก คุณสมบัติสารทำความเย็น R134a  
ที่สภาวะของเหลวและไออิ่มตัว (ต่อ)

| Temp.<br>(°C) | p <sub>sat</sub><br>(bar) | Specific Volume  |  | Enthalpy                  |                            |                           | Entropy                     |                              |                             |
|---------------|---------------------------|--|--|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|               |                           | Liquid<br>v <sub>f</sub> × 10 <sup>3</sup><br>(m <sup>3</sup> /kg) | Vapour<br>v <sub>g</sub><br>(m <sup>3</sup> /kg) | h <sub>f</sub><br>(kJ/kg) | h <sub>fg</sub><br>(kJ/kg) | h <sub>g</sub><br>(kJ/kg) | s <sub>f</sub><br>(kJ/kg.K) | s <sub>fg</sub><br>(kJ/kg.K) | s <sub>g</sub><br>(kJ/kg.K) |
| 36            | 9.119                     | .859   | .0222  | 250.41                    | 173.92                     | 242.33                    | 1.1738                      | .5626                        | 1.7364                      |
| 38            | 9.632                     | .865   | .0210  | 253.41                    | 171.85                     | 425.26                    | 1.1834                      | .5523                        | 1.7357                      |
| 40            | 10.167                    | .871   | .0199  | 256.43                    | 169.74                     | 426.17                    | 1.1930                      | .5420                        | 1.7350                      |
| 42            | 10.723                    | .878   | .0188  | 259.48                    | 167.58                     | 427.07                    | 1.2026                      | .5317                        | 1.7343                      |
| 44            | 11.302                    | .885   | .0177  | 262.56                    | 165.38                     | 427.94                    | 1.2122                      | .5214                        | 1.7336                      |
| 46            | 11.904                    | .892   | .0168  | 265.67                    | 163.12                     | 428.79                    | 1.2218                      | .5111                        | 1.7328                      |
| 48            | 12.530                    | .899   | .0159  | 268.80                    | 160.81                     | 429.61                    | 1.2314                      | .5007                        | 1.7321                      |
| 50            | 13.180                    | .906   | .0150  | 271.97                    | 158.43                     | 430.40                    | 1.2410                      | .4903                        | 1.7312                      |
| 52            | 13.854                    | .914   | .0142  | 275.17                    | 156.00                     | 431.17                    | 1.2506                      | .4798                        | 1.7304                      |
| 54            | 14.555                    | .922   | .0134  | 278.41                    | 153.50                     | 431.91                    | 1.2603                      | .4692                        | 1.7295                      |
| 56            | 15.282                    | .931   | .0127  | 281.68                    | 150.94                     | 432.61                    | 1.2699                      | .4585                        | 1.7285                      |
| 58            | 16.036                    | .940   | .0120  | 284.99                    | 148.29                     | 433.28                    | 1.2796                      | .4478                        | 1.7274                      |
| 60            | 16.817                    | .949   | .0114  | 288.34                    | 145.57                     | 433.91                    | 1.2893                      | .4369                        | 1.7263                      |
| 62            | 17.627                    | .959   | .0108  | 291.74                    | 142.76                     | 434.50                    | 1.2991                      | .4260                        | 1.7250                      |
| 64            | 18.466                    | .969   | .0102  | 295.19                    | 139.86                     | 435.05                    | 1.3089                      | .4148                        | 1.7237                      |
| 66            | 19.336                    | .979   | .0097  | 298.68                    | 136.86                     | 435.54                    | 1.3187                      | .4035                        | 1.7222                      |
| 68            | 20.235                    | .991   | .0091  | 302.23                    | 133.74                     | 435.98                    | 1.3286                      | .3920                        | 1.7206                      |
| 70            | 21.167                    | .003   | .0086  | 305.84                    | 130.51                     | 436.35                    | 1.3386                      | .3803                        | 1.7189                      |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



|     |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |
|-----|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 100 | 0.10587 | 312.98 | 342.62 | 1.2193 | 0.09229 | 312.68 | 342.21 | 1.1076 | 0.07327 | 312.07 | 341.38 | 1.1878 |
| 110 | 0.10897 | 322.27 | 352.78 | 1.2461 | 0.09503 | 322.00 | 352.40 | 1.2345 | 0.07550 | 321.44 | 351.64 | 1.2149 |
| 120 | 0.11205 | 331.71 | 363.08 | 1.2727 | 0.09774 | 331.45 | 362.73 | 1.2611 | 0.07771 | 330.94 | 362.03 | 1.2417 |
| 130 |         |        |        |        |         |        |        |        | 0.07991 | 340.58 | 372.54 | 1.2681 |
| 140 |         |        |        |        |         |        |        |        | 0.08208 | 350.35 | 383.18 | 1.2941 |

| T   | p = 0.5 MPa (T <sub>sat</sub> = 15.74 C) |        |        |        | p = 0.60 MPa (T <sub>sat</sub> = 21.58 C) |        |        |        | p = 0.70 MPa (T <sub>sat</sub> = 26.72 C) |        |        |        |
|-----|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|
|     | v  | u      | h      | s      | v   | u      | h      | s      | v   | u      | h      | s      |
|     | 0.04086                                  | 235.64 | 256.07 | 0.9117 | 0.03408                                   | 238.74 | 259.19 | 0.9097 | 0.02918                                   | 241.42 | 261.85 | 0.9080 |
| 20  | 0.04188                                  | 239.40 | 260.34 | 0.9264 |   |        |        |        |   |        |        |        |
| 30  | 0.04416                                  | 248.20 | 270.28 | 0.9597 | 0.03581                                   | 246.41 | 267.89 | 0.9388 | 0.02979                                   | 244.51 | 265.37 | 0.9197 |
| 40  | 0.04633                                  | 256.99 | 280.16 | 0.9918 | 0.03774                                   | 255.45 | 278.09 | 0.9719 | 0.03157                                   | 253.83 | 275.93 | 0.9539 |
| 50  | 0.04842                                  | 265.83 | 290.04 | 1.0229 | 0.03958                                   | 264.48 | 288.23 | 1.0037 | 0.03324                                   | 263.08 | 286.35 | 0.9867 |
| 60  | 0.05043                                  | 274.73 | 299.95 | 1.0531 | 0.04134                                   | 273.54 | 298.35 | 1.0346 | 0.03482                                   | 272.31 | 296.69 | 1.0182 |
| 70  | 0.05240                                  | 283.72 | 309.92 | 1.0825 | 0.04304                                   | 282.66 | 308.48 | 1.0645 | 0.03634                                   | 281.57 | 307.01 | 1.0487 |
| 80  | 0.05432                                  | 292.80 | 319.96 | 1.1114 | 0.04469                                   | 291.86 | 318.67 | 1.0938 | 0.03781                                   | 290.88 | 317.35 | 1.0784 |
| 90  | 0.05620                                  | 302.00 | 330.10 | 1.1397 | 0.04631                                   | 301.14 | 328.93 | 1.1225 | 0.03924                                   | 300.27 | 327.74 | 1.1074 |
| 100 | 0.05805                                  | 311.31 | 340.33 | 1.1675 | 0.04790                                   | 310.53 | 339.27 | 1.1505 | 0.04064                                   | 309.74 | 338.19 | 1.1358 |
| 110 | 0.05988                                  | 320.74 | 350.68 | 1.1949 | 0.04946                                   | 320.03 | 349.70 | 1.1781 | 0.04201                                   | 319.31 | 348.71 | 1.1637 |
| 120 | 0.06168                                  | 330.30 | 361.14 | 1.2218 | 0.05099                                   | 329.64 | 360.24 | 1.2053 | 0.04335                                   | 328.98 | 359.33 | 1.1910 |
| 130 | 0.06347                                  | 339.98 | 371.72 | 1.2484 | 0.05251                                   | 339.38 | 370.88 | 1.2320 | 0.04468                                   | 338.76 | 370.04 | 1.2179 |
| 140 | 0.06524                                  | 349.79 | 382.42 | 1.2746 | 0.05402                                   | 349.23 | 381.64 | 1.2584 | 0.04599                                   | 348.66 | 380.86 | 1.2444 |
| 150 |  |        |        |        | 0.05550                                   | 359.21 | 392.52 | 1.2844 | 0.04729                                   | 358.68 | 391.79 | 1.2706 |
| 160 |  |        |        |        | 0.05698                                   | 369.32 | 403.51 | 1.3100 | 0.04857                                   | 368.82 | 402.82 | 1.2963 |

| T   | p = 0.80 MPa (T <sub>sat</sub> = 31.33 °C) |        |        |        | p = 0.90 MPa (T <sub>sat</sub> = 35.53 °C) |        |        |        | p = 1.00 MPa (T <sub>sat</sub> = 39.33 °C) |        |        |        |
|-----|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|     | v  | u      | h      | s      | v  | u      | h      | s      | v  | u      | h      | s      |
|     | 0.02547                                    | 243.78 | 264.15 | 0.9066 | 0.02255                                    | 245.88 | 266.18 | 0.9054 | 0.02020                                    | 247.77 | 267.97 | 0.9043 |
| 40  | 0.02691                                    | 252.13 | 273.66 | 0.9374 | 0.02325                                    | 250.32 | 271.25 | 0.9217 | 0.02029                                    | 248.39 | 268.68 | 0.9066 |
| 50  | 0.02846                                    | 261.62 | 284.39 | 0.9711 | 0.02472                                    | 260.09 | 282.34 | 0.9566 | 0.02171                                    | 258.48 | 280.19 | 0.9428 |
| 60  | 0.02992                                    | 271.04 | 294.98 | 1.0034 | 0.02609                                    | 269.72 | 293.21 | 0.9897 | 0.02301                                    | 268.35 | 291.36 | 0.9768 |
| 70  | 0.03131                                    | 280.45 | 305.50 | 1.0345 | 0.02738                                    | 279.30 | 303.94 | 1.0214 | 0.02423                                    | 278.11 | 302.34 | 1.0093 |
| 80  | 0.03264                                    | 289.89 | 316.00 | 1.0647 | 0.02861                                    | 288.87 | 314.62 | 1.0521 | 0.02538                                    | 287.82 | 313.20 | 1.0405 |
| 90  | 0.03393                                    | 299.37 | 326.52 | 1.0940 | 0.02980                                    | 298.46 | 325.28 | 1.0819 | 0.02649                                    | 297.53 | 324.01 | 1.0707 |
| 100 | 0.03519                                    | 308.93 | 337.08 | 1.1227 | 0.03095                                    | 308.11 | 335.96 | 1.1109 | 0.02755                                    | 307.27 | 334.82 | 1.1000 |
| 110 | 0.03642                                    | 318.57 | 347.71 | 1.1508 | 0.03207                                    | 317.82 | 346.68 | 1.1392 | 0.02858                                    | 317.06 | 345.65 | 1.1286 |
| 120 | 0.03762                                    | 328.31 | 358.40 | 1.1784 | 0.03316                                    | 327.62 | 357.47 | 1.1670 | 0.02959                                    | 326.93 | 356.52 | 1.1567 |
| 130 | 0.03881                                    | 338.14 | 369.19 | 1.2055 | 0.03423                                    | 337.52 | 368.33 | 1.1943 | 0.03058                                    | 336.88 | 367.46 | 1.1841 |
| 140 | 0.03997                                    | 348.09 | 380.07 | 1.2321 | 0.03529                                    | 347.51 | 379.27 | 1.2211 | 0.03154                                    | 346.92 | 378.46 | 1.2111 |
| 150 | 0.04113                                    | 358.15 | 391.05 | 1.2584 | 0.03633                                    | 357.61 | 390.31 | 1.2475 | 0.03250                                    | 357.06 | 389.56 | 1.2376 |
| 160 | 0.04227                                    | 368.32 | 402.14 | 1.2843 | 0.03736                                    | 367.82 | 401.44 | 1.2735 | 0.03344                                    | 367.31 | 400.74 | 1.2638 |
| 170 | 0.04340                                    | 378.61 | 413.33 | 1.3098 | 0.03838                                    | 378.14 | 412.68 | 1.2992 | 0.03436                                    | 377.66 | 412.02 | 1.2895 |
| 180 | 0.04452                                    | 389.02 | 424.63 | 1.3351 | 0.03939                                    | 388.57 | 424.02 | 1.3245 | 0.03528                                    | 388.12 | 423.40 | 1.3149 |

| T   | p = 1.20 MPa (T <sub>sat</sub> = 46.32 °C) |        |        |        | p = 1.40 MPa (T <sub>sat</sub> = 52.43 °C) |        |        |        | p = 1.60 MPa (T <sub>sat</sub> = 57.92 °C) |        |        |        |
|-----|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|     | v  | u      | h      | s      | v  | u      | h      | s      | v  | u      | h      | s      |
| it. | 0.01663                                    | 251.03 | 270.99 | 0.9023 | 0.01405                                    | 253.74 | 273.40 | 0.9003 | 0.01208                                    | 256.00 | 275.33 | 0.8982 |
| 50  | 0.01712                                    | 254.98 | 275.52 | 0.9164 |  |        |        |        |  |        |        |        |
| 60  | 0.01835                                    | 265.42 | 287.44 | 0.9527 | 0.01495                                    | 262.17 | 283.10 | 0.9297 | 0.01233                                    | 258.48 | 278.20 | 0.9069 |
| 70  | 0.01947                                    | 275.59 | 298.96 | 0.9868 | 0.01603                                    | 272.87 | 295.31 | 0.9658 | 0.01340                                    | 269.89 | 291.33 | 0.9457 |
| 80  | 0.02051                                    | 285.62 | 310.24 | 1.0192 | 0.01701                                    | 283.29 | 307.10 | 0.9997 | 0.01435                                    | 280.78 | 303.74 | 0.9813 |
| 90  | 0.02150                                    | 295.59 | 321.39 | 1.0503 | 0.01792                                    | 293.55 | 318.63 | 1.0319 | 0.01521                                    | 291.39 | 315.72 | 1.0148 |
| 100 | 0.02244                                    | 305.54 | 332.47 | 1.0804 | 0.01878                                    | 303.73 | 330.02 | 1.0628 | 0.01601                                    | 301.84 | 327.46 | 1.0467 |
| 110 | 0.02335                                    | 315.50 | 343.52 | 1.1096 | 0.01960                                    | 313.88 | 341.32 | 1.0927 | 0.01677                                    | 312.20 | 339.04 | 1.0773 |
| 120 | 0.02423                                    | 325.51 | 354.58 | 1.1381 | 0.02039                                    | 324.05 | 352.59 | 1.1218 | 0.01750                                    | 322.53 | 350.53 | 1.1069 |
| 130 | 0.02508                                    | 335.58 | 365.68 | 1.1660 | 0.02115                                    | 334.25 | 363.86 | 1.1501 | 0.01820                                    | 332.87 | 361.99 | 1.1357 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

|     |         |        |        |        |         |        |        |        |         |        |        |        |
|-----|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 140 | 0.02592 | 345.73 | 376.83 | 1.1933 | 0.02189 | 344.50 | 375.15 | 1.1777 | 0.01887 | 343.24 | 373.44 | 1.1638 |
| 150 | 0.02674 | 355.95 | 388.04 | 1.2201 | 0.02262 | 354.82 | 386.49 | 1.2048 | 0.01953 | 353.66 | 384.91 | 1.1912 |
| 160 | 0.02754 | 366.27 | 399.33 | 1.2465 | 0.02333 | 365.22 | 397.89 | 1.2315 | 0.02017 | 364.15 | 396.43 | 1.2181 |
| 180 | 0.02834 | 376.69 | 410.70 | 1.2724 | 0.02403 | 375.71 | 409.36 | 1.2576 | 0.02080 | 374.71 | 407.99 | 1.2445 |
| 180 | 0.02912 | 387.21 | 422.16 | 1.2980 | 0.02472 | 386.29 | 420.90 | 1.2834 | 0.02142 | 385.35 | 419.62 | 1.2704 |
| 190 |         |        |        |        | 0.02541 | 396.96 | 432.53 | 1.3088 | 0.02203 | 396.08 | 431.33 | 1.2960 |
| 200 |         |        |        |        | 0.02608 | 407.73 | 444.24 | 1.3338 | 0.02263 | 406.90 | 443.11 | 1.3212 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Thermal Conductivity

Thermal conductivity is the quantity of heat transmitted through a unit thickness in a direction normal to a surface of unit area, due to a unit temperature gradient under steady state conditions.

Thermal conductivity, or heat transfer coefficients, of some common materials and products are indicated in the table below.

$$1 \text{ W/(mK)} = 1 \text{ W/(m}^\circ\text{C)} = 0.85984 \text{ kcal/(hr m}^\circ\text{C)} = 0.5779 \text{ Btu/(ft hr}^\circ\text{F)}$$

| Thermal Conductivity - k - (W/mK) |                  |     |     |
|-----------------------------------|------------------|-----|-----|
| Material/Substance                | Temperature (°C) |     |     |
|                                   | 25               | 125 | 225 |
| Acetone                           | 0.16             |     |     |
| Acrylic                           | 0.2              |     |     |
| Air                               | 0.024            |     |     |
| Alcohol                           | 0.17             |     |     |
| Aluminum                          | 250              | 255 | 250 |
| Aluminum Oxide                    | 30               |     |     |
| Ammonia                           | 0.022            |     |     |
| Antimony                          | 18.5             |     |     |
| Argon                             | 0.016            |     |     |
| Asbestos-cement board             | 0.744            |     |     |
| Asbestos-cement sheets            | 0.166            |     |     |
| Asbestos-cement                   | 2.07             |     |     |
| Asbestos, loosely packed          | 0.15             |     |     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |            |  |  |
|---|------------|--|--|
| Balsa                                   | 0.048      |  |  |
| Bitumen                                 | 0.17       |  |  |
| Benzene                                 | 0.16       |  |  |
| Beryllium                               | 218        |  |  |
| Brass                                   | 109        |  |  |
| Brick dense                             | 1.31       |  |  |
| Brick work                              | 0.69       |  |  |
| Cadmium                                 | 92         |  |  |
| Carbon                                  | 1.7        |  |  |
| Carbon dioxide                          | 0.0146     |  |  |
| Cement, portland                        | 0.29       |  |  |
| Cement, mortar                          | 1.73       |  |  |
| Chalk                                   | 0.09       |  |  |
| Chrome Nickel Steel (18% Cr,<br>8 % Ni) | 16.3       |  |  |
| Clay, dry to moist                      | 0.15 - 1.8 |  |  |
| Clay, saturated                         | 0.6 - 2.5  |  |  |
| Cobalt                                  | 69         |  |  |
| Concrete, light                         | 0.42       |  |  |
| Concrete, stone                         | 1.7        |  |  |
| Constantan                              | 22         |  |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                                |       |     |     |
|--------------------------------|-------|-----|-----|
| Copper                         | 401   | 400 | 398 |
| Corian (ceramic filled)        | 1.06  |     |     |
| Corkboard                      | 0.043 |     |     |
| Cork, regranulated             | 0.044 |     |     |
| Cork                           | 0.07  |     |     |
| Cotton                         | 0.03  |     |     |
| Carbon Steel                   | 54    | 51  | 47  |
| Cotton Wool insulation         | 0.029 |     |     |
| Diatomaceous earth (Sil-o-cel) | 0.06  |     |     |
| Earth, dry                     | 1.5   |     |     |
| Ether                          | 0.14  |     |     |
| Epoxy                          | 0.35  |     |     |
| Felt insulation                | 0.04  |     |     |
| Fiberglass                     | 0.04  |     |     |
| Fiber insulating board         | 0.048 |     |     |
| Fiber hardboard                | 0.2   |     |     |
| Fireclay brick 500°C           | 1.4   |     |     |
| Foam glass                     | 0.045 |     |     |
| Freon 12                       | 0.073 |     |     |
| Gasoline                       | 0.15  |     |     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                          |              |     |     |
|--------------------------|--------------|-----|-----|
| Glass                    | 1.05         |     |     |
| Glass, Pearls, dry       | 0.18         |     |     |
| Glass, Pearls, saturated | 0.76         |     |     |
| Glass, window            | 0.96         |     |     |
| Glass, wool Insulation   | 0.04         |     |     |
| Glycerol                 | 0.28         |     |     |
| Gold                     | 310          | 312 | 310 |
| Granite                  | 1.7 - 4.0    |     |     |
| Gypsum or plaster board  | 0.17         |     |     |
| Hairfelt                 | 0.05         |     |     |
| Hardboard high density   | 0.15         |     |     |
| Hardwoods (oak, maple..) | 0.16         |     |     |
| Helium                   | 0.142        |     |     |
| Hydrogen                 | 0.168        |     |     |
| Ice (0°C, 32°F)          | 2.18         |     |     |
| Insulation materials     | 0.035 - 0.16 |     |     |
| Iridium                  | 147          |     |     |
| Iron                     | 80           | 68  | 60  |
| Iron, wrought            | 59           |     |     |
| Iron, cast               | 55           |     |     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |             |  |  |
|---|-------------|--|--|
| Kapok insulation                                  | 0.034       |  |  |
| Kerosene  | 0.15        |  |  |
| Lead Pb   | 35          |  |  |
| Leather, dry                                      | 0.14        |  |  |
| Limestone   | 1.26 - 1.33 |  |  |
| Magnesia insulation (85%)                         | 0.07        |  |  |
| Magnesite   | 4.15        |  |  |
| Magnesium   | 156         |  |  |
| Marble  | 2.08 - 2.94 |  |  |
| Mercury   | 8           |  |  |
| Methane   | 0.030       |  |  |
| Methanol  | 0.21        |  |  |
| Mica  | 0.71        |  |  |
| Mineral insulation materials,<br>wool blankets .. | 0.04        |  |  |
| Molybdenum  | 138         |  |  |
| Monel   | 26          |  |  |
| Nickel  | 91          |  |  |
| Nitrogen  | 0.024       |  |  |
| Nylon 6   | 0.25        |  |  |
| Oil, machine lubricating SAE<br>50                | 0.15        |  |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรทำงานเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |             |    |    |
|---|-------------|----|----|
| Olive oil                               | 0.17        |    |    |
| Oxygen                                  | 0.024       |    |    |
| Paper                                   | 0.05        |    |    |
| Paraffin Wax                            | 0.25        |    |    |
| Perlite, atmospheric pressure           | 0.031       |    |    |
| Perlite, vacuum                         | 0.00137     |    |    |
| Plaster, gypsum                         | 0.48        |    |    |
| Plaster, metal lath                     | 0.47        |    |    |
| Plaster, wood lath                      | 0.28        |    |    |
| Plastics, foamed (insulation materials) | 0.03        |    |    |
| Plastics, solid                         |             |    |    |
| Platinum                                | 70          | 71 | 72 |
| Plywood                                 | 0.13        |    |    |
| Polyethylene HD                         | 0.42 - 0.51 |    |    |
| Polypropylene                           | 0.1 - 0.22  |    |    |
| Polystyrene expanded                    | 0.03        |    |    |
| Porcelain                               | 1.5         |    |    |
| PTFE                                    | 0.25        |    |    |
| PVC                                     | 0.19        |    |    |
| Pyrex glass                             | 1.005       |    |    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                              |             |    |    |
|------------------------------|-------------|----|----|
| Quartz mineral               | 3           |    |    |
| Rock, solid                  | 2 - 7       |    |    |
| Rock, porous volcanic (Tuff) | 0.5 - 2.5   |    |    |
| Rock Wool insulation         | 0.045       |    |    |
| Sand, dry                    | 0.15 - 0.25 |    |    |
| Sand, moist                  | 0.25 - 2    |    |    |
| Sand, saturated              | 2 - 4       |    |    |
| Sandstone                    | 1.7         |    |    |
| Sawdust                      | 0.08        |    |    |
| Silica aerogel               | 0.02        |    |    |
| Silicone oil                 | 0.1         |    |    |
| Silver                       | 429         |    |    |
| Snow (temp < 0°C)            | 0.05 - 0.25 |    |    |
| Sodium                       | 84          |    |    |
| Softwoods (fir, pine ..)     | 0.12        |    |    |
| Soil, with organic matter    | 0.15 - 2    |    |    |
| Soil, saturated              | 0.6 - 4     |    |    |
| Steel, Carbon 1%             | 43          |    |    |
| Stainless Steel              | 16          | 17 | 19 |
| Straw insulation             | 0.09        |    |    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                                    |       |       |  |
|------------------------------------|-------|-------|--|
| Styrofoam                          | 0.033 |       |  |
| Tin Sn                             | 67    |       |  |
| Zinc Zn                            | 116   |       |  |
| Urethane foam                      | 0.021 |       |  |
| Vermiculite                        | 0.058 |       |  |
| Vinyl ester                        | 0.25  |       |  |
| Water                              | 0.58  |       |  |
| Water, vapor (steam)               |       | 0.016 |  |
| Wood across the grain, white pine  | 0.12  |       |  |
| Wood across the grain, balsa       | 0.055 |       |  |
| Wood across the grain, yellow pine | 0.147 |       |  |
| Wood, oak                          | 0.17  |       |  |
| Wool, felt                         | 0.07  |       |  |

$$1 \text{ W/(m K)} = 1 \text{ W/(m}^\circ\text{C)} = 0.85984 \text{ kcal/(h m}^\circ\text{C)} = 0.5779 \text{ Btu/(ft h}^\circ\text{F)}$$

ที่มา: [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Configuring Drive Parameters

# 3

| In This Chapter....                               | page |
|---|------|
| — Choosing a Programming Device .....             | 2    |
| — Using Keypad Devices .....                      | 3    |
| — “D” Group: Monitoring Functions .....           | 6    |
| — “F” Group: Main Profile Parameters .....        | 8    |
| — “A” Group: Standard Functions .....             | 9    |
| — “B” Group: Fine Tuning Functions .....          | 22   |
| — “C” Group: Intelligent Terminal Functions ..... | 32   |

# Choosing a Programming Device

## Introduction

Hitachi variable frequency drives (inverters) use the latest electronics technology for getting the right AC waveform to the motor at the right time. The benefits are many, including energy savings and higher machine output or productivity. The flexibility required to handle a broad range of applications has required ever more configurable options and parameters—inverters are now a complex industrial automation component. And this can make a product seem difficult to use, but the goal of this chapter is to make this easier for you.

As the powerup test in Chapter 2 demonstrated, you do not have to program very many parameters to run the motor. In fact, most applications would benefit only from programming just a few, specific parameters. This chapter will explain the purpose of each set of parameters, and help you choose the ones that are important to your application.

If you are developing a new application for the inverter and a motor, finding the right parameters to change is mostly an exercise in optimization. Therefore, it is okay to begin running the motor with a loosely tuned system. By making specific, individual changes and observing their effects, you can achieve a finely tuned system.

## Introduction to Inverter Programming

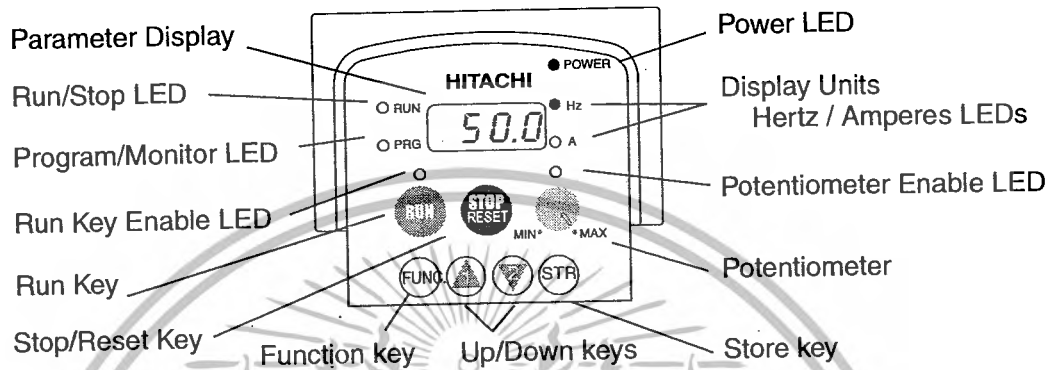
The front panel keypad is the first and best way to get to know the inverter's capabilities. Every function or programmable parameter is accessible from the keypad. The other devices simply imitate the keypad's layout and inverter access, while adding another valuable aspect to the system. For example, the Copy Unit can transfer one inverter's parameter settings to another inverter, while still providing standard operator keypad control. In this way, you can use a variety of programming devices with basically the same keypad skills. The following table shows various programming options, the features unique to each device, and the cables required.

| Device                             | Part Number | Parameter Access    | Parameter setting storage | Cables (choose one)      |          |
|------------------------------------|-------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|----------|
|                                    |             |                     |                           | Part number              | Length   |
| Inverter keypad                    | —           | Monitor and program | EEPROM in inverter        | —                        | —        |
| DOP Professional Software (for PC) | DOP-PRO     | Monitor and program | PC hard drive or diskette | (Included with software) | 2 meters |
| Digital Operator/ Copy Unit        | SRW-0EX     | Monitor and program | EEPROM in operator panel  | ICS-1                    | 1 meter  |
|                                    |             |                     |                           | ICS-3                    | 3 meters |
| Operator Monitor                   | OPE-J       | Monitor only        | none on operator monitor  | ICJ-1L                   | 1 meter  |
|                                    |             |                     |                           | ICJ-3L                   | 3 meters |

# Using Keypad Devices

## Inverter Front Panel Keypad

The L100 Series inverter front keypad contains all the elements for both monitoring and programming parameters. The keypad layout is pictured below. All other programming devices for the inverter have a similar key arrangement and function.

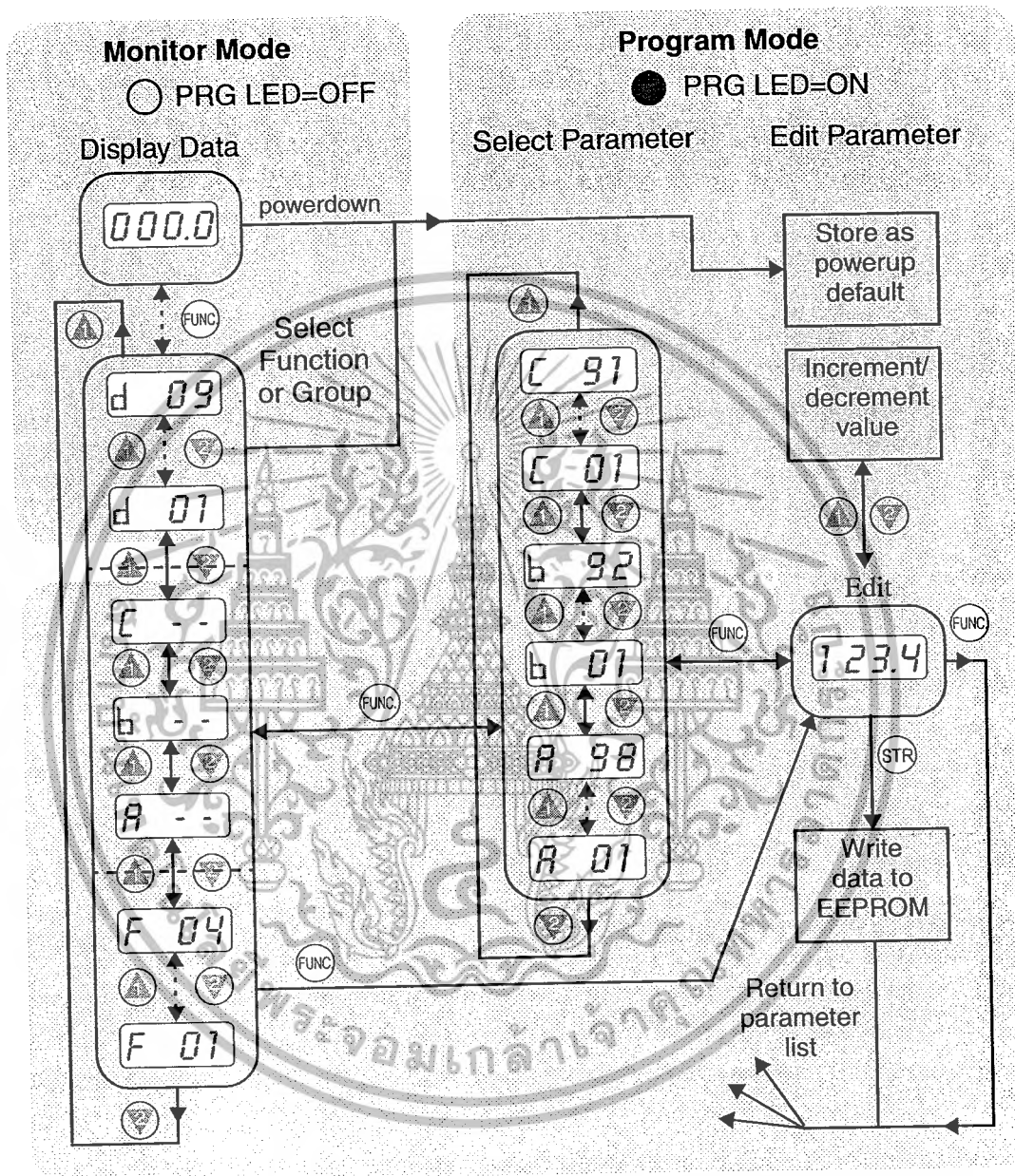


### Key and Indicator Legend

- **Run/Stop LED** - ON when the inverter output is ON and the motor is developing torque (Run Mode), and OFF when the inverter output is OFF (Stop Mode).
- **Program/Monitor LED** - This LED is ON when the inverter is ready for parameter editing (Program Mode). It is OFF when the parameter display is monitoring data (Monitor Mode).
- **Run Key Enable LED** - is ON when the inverter is ready to respond to the Run key, OFF when the Run key is disabled.
- **Run Key** - Press this key to run the motor (the Run Enable LED must be ON first). Parameter F\_04, Keypad Run Key Routing, determines whether the Run key generates a Run FWD or Run REV command.
- **Stop/Reset Key** - Press this key to stop the motor when it is running (uses the programmed deceleration rate). This key will also reset an alarm that has tripped.
- **Potentiometer** - Allows an operator to directly set the motor speed when the potentiometer is enabled for output frequency control.
- **Potentiometer Enable LED** - ON when the potentiometer is enabled for value entry.
- **Parameter Display** - A 4-digit, 7-segment display for parameters and function codes.
- **Display Units, Hertz/Amperes** - One of these LEDs will be ON to indicate the units associated with the parameter display.
- **Power LED** - This LED is ON when the power input to the inverter is ON.
- **Function Key** - This key is used to navigate through the lists of parameters and functions for setting and monitoring parameter values.
- **Up/Down (  $\triangle$ ,  $\nabla$  ) Keys** - Use these keys alternately to move up or down the lists of parameter and functions shown in the display, and increment/decrement values.
- **Store (  $\text{STR}$  ) Key** - When the unit is in Program Mode and you have edited a parameter value, press the Store key to write the new value to the EEPROM.

### Keypad Navigational Map

You can use the inverter’s front panel keypad to navigate to any parameter or function. The diagram below shows the basic navigational map to access these items.



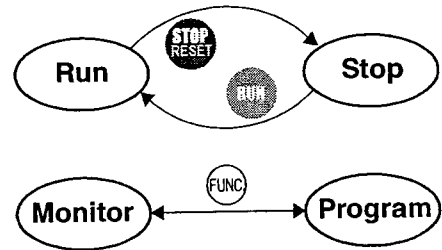
**NOTE:** The inverter 7-segment display shows lower case “b” and “d,” meaning the same as the upper case letters “B” and “D” used in this manual (for uniformity “A to F”).



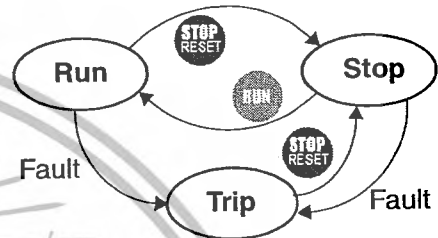
**NOTE:** The Store Key saves the edited parameter (shown in the display) to the inverter’s EEPROM. Upload or download of parameters to/from external devices is accomplished through a different command—do not confuse Store with Download or Upload.

### Operational Modes

The RUN and PGM LEDs tell just part of the story; Run Mode and Program Modes are independent modes, not opposite modes. In the state diagram to the right, Run alternates with Stop, and Program Mode alternates with Monitor Mode. This is a very important ability, for it shows that a technician can approach a running machine and change some parameters without shutting down the machine.



The occurrence of a fault during operation will cause the inverter to enter the Trip Mode as shown. An event such as an output overload will cause the inverter to exit the Run Mode and turn OFF its output to the motor. In the Trip Mode, any request to run the motor is ignored. You must clear the error by pressing the Stop/Reset switch. See page “Monitoring Trip Events, History, & Conditions” on page 6-5.



### Run Mode Edits

The inverter can be in Run Mode (inverter output is controlling motor) and still allow you to edit certain parameters. This is useful in applications that must run continuously, yet need some inverter parameter adjustment.

The parameter tables in this chapter have a column titled “Run Mode Edit.” An Ex mark ✕ means the parameter cannot be edited; a Check mark ✓ means the parameter can be edited. The Software Lock Setting (parameter B\_31) determines when the Run Mode access permission is in effect and access permission in other conditions, as well. It is the responsibility of the user to choose a useful and safe software lock setting for the inverter operating conditions and personnel. Please refer to “Software Lock Mode” on page 3-26 for more information.

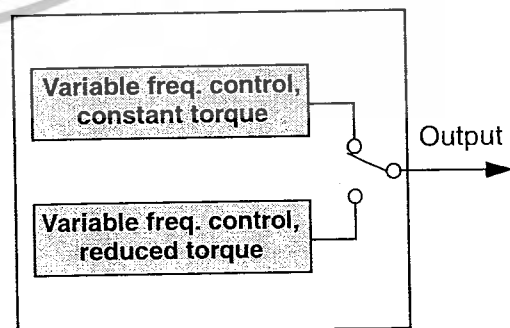
|  | Run Mode Edit |
|--|---------------|
|  | ✕             |
|  | ✓             |

Configuring Drive Parameters

### Control Algorithms

The motor control program in the L100 inverter has two PWM sinusoidal switching algorithms. The intent is that you select the best algorithm for the motor characteristics in your application. Both algorithms generate the frequency output in a unique way. Once configured, the algorithm is the basis for other parameter settings as well (see “Torque Control Algorithms” on page 3-13). Therefore, choose the best algorithm early in your application design process.

Inverter Control Algorithms



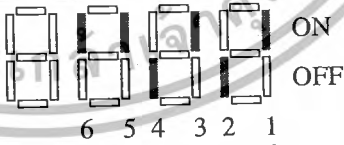
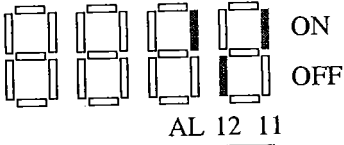
# "D" Group: Monitoring Functions

## Parameter Monitoring Functions

You can access important system parameter values with the "D" Group monitoring functions, whether the inverter is in Run Mode or Stop Mode. After selecting the function code number for the parameter you want to monitor, press the Function key once to show the value on the display. In Functions D\_05 and D\_06, the intelligent terminals use individual segments of the display to show ON/OFF status.

If the inverter display is set to monitor a parameter and powerdown occurs, the inverter stores the present monitor function setting. For your convenience, the display automatically returns to the previously monitored parameter upon the next powerup.

DIVE Parameters

| "D" Function |   |   | Run Mode Edit | Range and Units |
|--------------|---|---|---------------|-----------------|
| Func. Code   | Name / SRW Display                          | Description   |               |                 |
| D_01         | Output frequency monitor                    | Real-time display of output frequency to motor, from 0.0 to 360.0 Hz  | —             | 0.0 to 360.0 Hz |
|              | FM 0000.00Hz                                |   |               |                 |
| D_02         | Output current monitor                      | Filtered display of output current to motor (100 ms internal filter time constant)  | —             | A               |
|              | Im 0.0A 0.0%                                |   |               |                 |
| D_03         | Rotation direction monitor                  | Three different indications:<br>"F".... Forward<br>"I" .. Stop<br>"r".... Reverse   | —             | —               |
|              | Dir STOP                                    |   |               |                 |
| D_04         | Process variable (PV), PID feedback monitor | Displays the scaled PID process variable (feedback) value (A_75 is scale factor)  | —             | —               |
|              | PID-FB 0000.00%                             |   |               |                 |
| D_05         | Intelligent input terminal status           | Displays the state of the intelligent input terminals:<br><br><br>Terminal numbers  | —             | —               |
|              | TERM LLL LLLLLL                             |   |               |                 |
| D_06         | Intelligent output terminal status          | Displays the state of the intelligent output terminals:<br><br><br>Terminal numbers | —             | —               |
|              | TERM LLL LLLLLL                             |   |               |                 |

# Operations and Monitoring

# 4

| In This Chapter....                                | page |
|--|------|
| — Introduction .....                               | 2    |
| — Connecting to PLCs and Other Devices .....       | 4    |
| — Using Intelligent Input Terminals .....          | 8    |
| — Using Intelligent Output Terminals .....         | 21   |
| — Analog Input Operation .....                     | 29   |
| — Analog and Digital Monitor Output .....          | 30   |
| — PID Loop Operation .....                         | 32   |
| — Configuring the Inverter for Multiple Motors ... | 33   |

# Introduction

The previous material in Chapter 3 gave a reference listing of all the programmable functions of the inverter. We suggest that you first scan through the listing of inverter functions to gain a general familiarity. This chapter will build on that knowledge in the following ways:

- 1. Related functions** – Some parameters interact with or depend on the settings in other functions. This chapter lists “required settings” for a programmable function to serve as a cross-reference and an aid in showing how functions interact.
- 2. Intelligent terminals** – Some functions rely on an input signal on a control logic connector terminal, or generate output signals in other cases.
- 3. Electrical interfaces** – This chapter shows how to make connections between the inverter and other electrical devices.
- 4. PID Loop Operation** – The L100 has a built-in PID loop that calculates the optimal inverter output frequency to control an external process. This chapter shows the parameters and input/output terminals associated with PID loop operation.
- 5. Multiple motors** – A single L100 inverter may be used with two or more motors in some types of applications. This chapter shows the electrical connections involved in multiple-motor applications.

The topics in this chapter can help you decide the features that are important to your application, and how to use them. The basic installation covered in Chapter 2 concluded with the powerup test and running the motor. Now, this chapter starts from that point and shows how to make the inverter part of a larger control or automation system.

## Caution Messages for Operating Procedures

Before continuing, please read the following Caution messages.



**CAUTION:** The heat sink fins will have a high temperature. Be careful not to touch them. Otherwise, there is the danger of getting burned.



**CAUTION:** The operation of the inverter can be easily changed from low speed to high speed. Be sure check the capability and limitations of the motor and machine before operating the inverter. Otherwise, it may cause injury to personnel.



**CAUTION:** If you operate a motor at a frequency higher than the inverter standard default setting (50Hz/60Hz), be sure to check the motor and machine specifications with the respective manufacturer. Only operate the motor at elevated frequencies after getting their approval. Otherwise, there is the danger of equipment damage.

CAUTION

## Warning Messages for Operating Procedures

Before continuing, please read the following Warning messages.



**WARNING:** Be sure to turn ON the input power supply only after closing the front case. While being energized, be sure not to open the front case. Otherwise, there is the danger of electric shock.



**WARNING:** Be sure not to operate electrical equipment with wet hands. Otherwise, there is the danger of electric shock.



**WARNING:** While the inverter is energized, be sure not to touch the inverter terminals even when the motor is stopped. Otherwise, there is the danger of electric shock.



**WARNING:** If the Retry Mode is selected, the motor may suddenly restart after a trip stop. Be sure to stop the inverter before approaching the machine (be sure to design the machine so that safety for personnel is secure even if it restarts.) Otherwise, it may cause injury to personnel.



**WARNING:** If the power supply is cut OFF for a short period of time, the inverter may restart operation after the power supply recovers if the Run command is active. If a restart may pose danger to personnel, so be sure to use a lock-out circuit so that it will not restart after power recovery. Otherwise, it may cause injury to personnel.



**WARNING:** The Stop Key is effective only when the Stop function is enabled. Be sure to enable the Stop Key separately from the emergency stop. Otherwise, it may cause injury to personnel.



**WARNING:** During a trip event, if the alarm reset is applied and the Run command is present, the inverter will automatically restart. Be sure to apply the alarm reset only after verifying the Run command is OFF. Otherwise, it may cause injury to personnel.



**WARNING:** Be sure not to touch the inside of the energized inverter or to put any conductive object into it. Otherwise, there is a danger of electric shock and/or fire.



**WARNING:** If power is turned ON when the Run command is already active, the motor will automatically start and injury may result. Before turning ON the power, confirm that the RUN command is not present.



**WARNING:** When the Stop key function is disabled, pressing the Stop key does not stop the inverter, nor will it reset a trip alarm.



**WARNING:** Be sure to provide a separate, hard-wired emergency stop switch when the application warrants it.

## Connecting to PLCs and Other Devices

Hitachi inverters (drives) are useful in many types of applications. During installation, the inverter keypad (or other programming device) will facilitate the initial configuration. After installation, the inverter will generally receive its control commands through the control logic connector or serial interface from another controlling device. In a simple application such as single-conveyor speed control, a Run/Stop switch and potentiometer will give the operator all the required control. In a sophisticated application, you may have a *programmable logic controller* (PLC) as the system controller, with several connections to the inverter.

It is not possible to cover all the possible types of application in this manual. It will be necessary for you to know the electrical characteristics of the devices you want to connect to the inverter. Then, this section and the following sections on I/O terminal functions can help you quickly and safely connect those devices to the inverter.



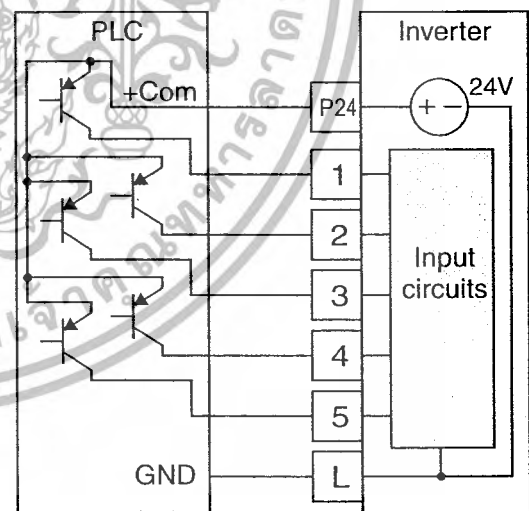
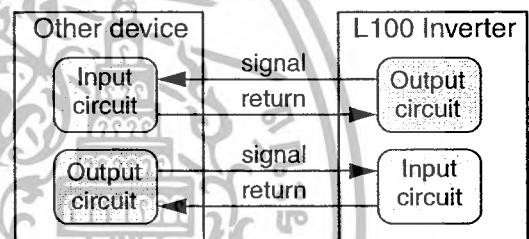
**CAUTION:** It is possible to damage the inverter or other devices if your application exceeds the maximum current or voltage characteristics of a connection point.

The connections between the inverter and other devices rely on the electrical input/output characteristics at both ends of each connection, shown in the diagram to the right. The inverter's inputs require a sourcing output from an external device (such as a PLC). This chapter shows the inverter's internal electrical component(s) at each I/O terminal. In some cases, you will need to insert a power source in the interface wiring.

In order to avoid equipment damage and get your application running smoothly, we recommend drawing a schematic of each connection between the inverter and the other device. Include the internal components of each device in the schematic, so that it makes a complete circuit loop.

After making the schematic, then:

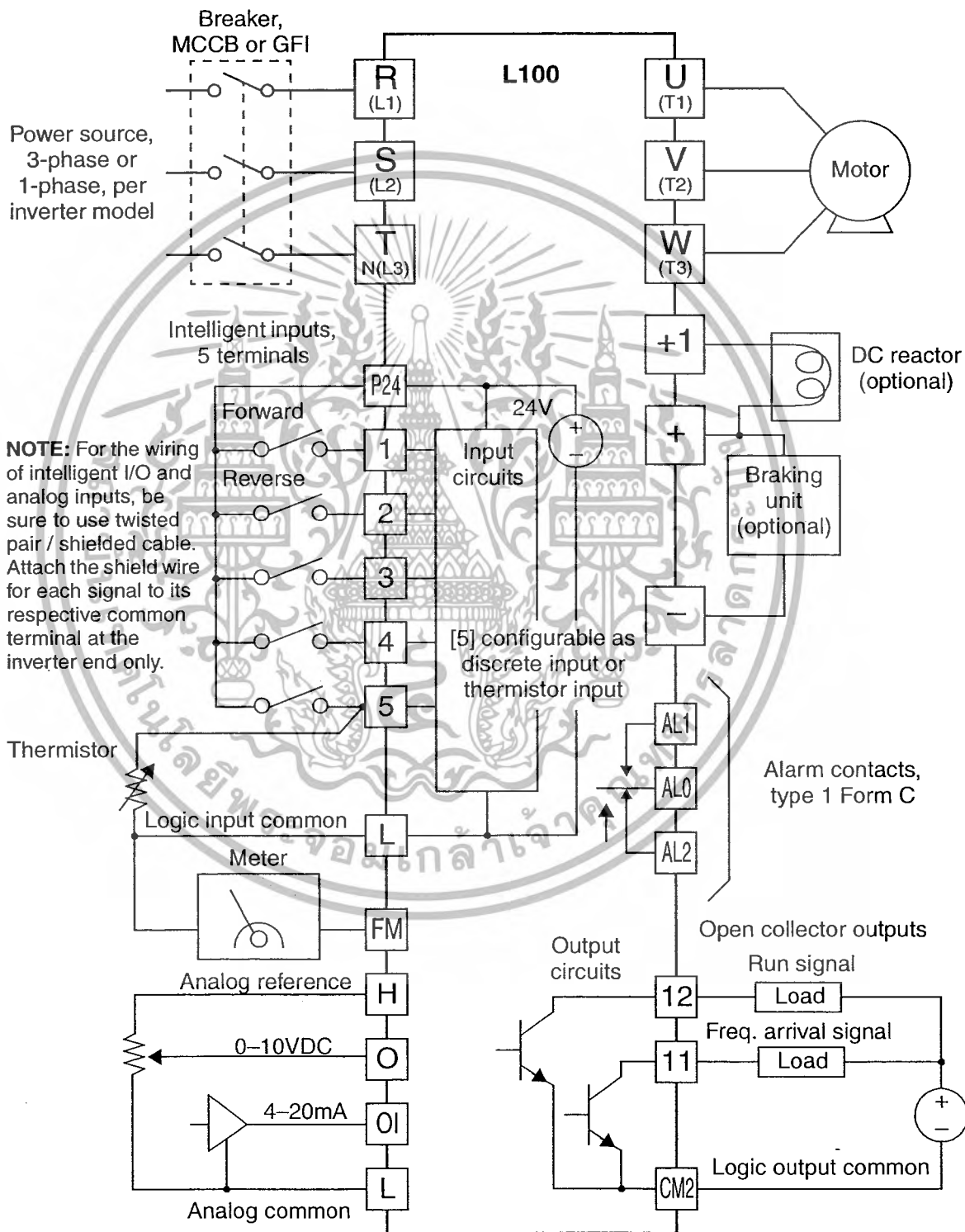
1. Verify that the current and voltage for each connection is within the operating limits of each device.
2. Make sure that the logic sense (active high or active low) of any ON/OFF connection is correct.
3. Check the zero and span (curve end points) for analog connections, and be sure the scale factor from input to output is correct.
4. Understand what will happen at the system level if any particular device suddenly loses power, or powers up after other devices.



Operations and Monitoring

## Example Wiring Diagram

The schematic diagram below provides a general example of logic connector wiring, in addition to basic power and motor wiring covered in Chapter 2. The goal of this chapter is to help you determine the proper connections for the various terminals shown below for your specific application needs.

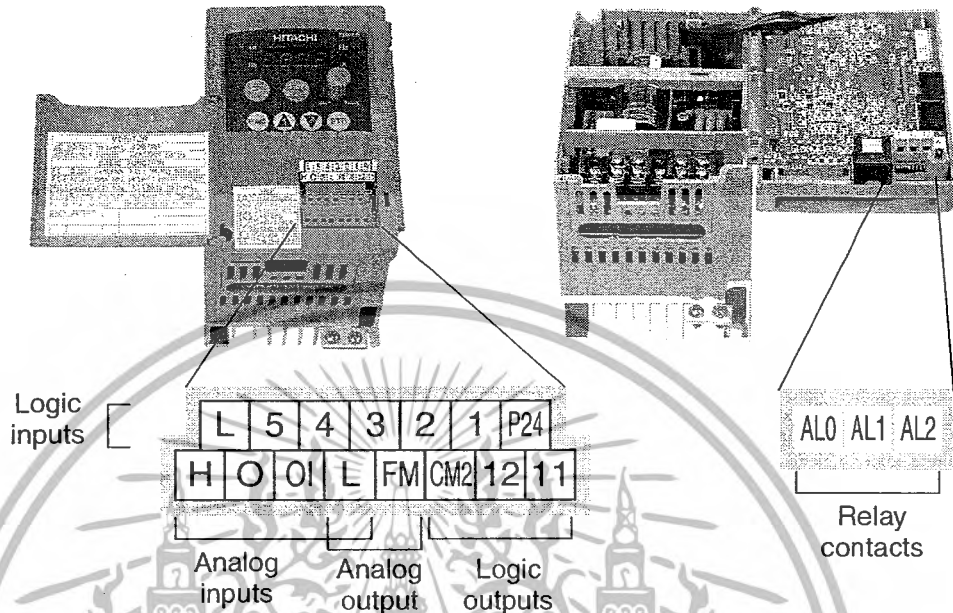


and Monitoring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Specifications of Control and Logic Connections

The control logic connectors are located just behind the front panel half-door. The relay contacts are accessible behind the main door. Connector labeling is shown below.



Specifications for the logic connection terminals are in the following table:

| Terminal Name           | Description                               | Ratings   |
|-------------------------|---|---|
| [P24]                   | +24V for logic inputs                     | 24VDC, 30 mA max (do not short to terminal L)                       |
| [1], [2], [3], [4], [5] | Discrete logic inputs                     | 27VDC max. (use P24 or an external supply referenced to terminal L) |
| [L] (top row) *1        | GND for logic inputs                      | sum of input 1-5 currents (return)                                  |
| [11], [12]              | Discrete logic outputs                    | 50mA maximum ON state current, 27 VDC maximum OFF state voltage     |
| [CM2]                   | GND for logic outputs                     | 100 mA: sum of 11 and 12 currents (return)                          |
| [FM]                    | PWM (analog/digital) output               | 0 to 10VDC, 1 mA, PWM and 50% duty digital                          |
| [L] (bottom row) *1     | GND for analog inputs                     | sum of OI, O, and H currents (return)                               |
| [OI]                    | Analog input, current                     | 4 to 19.6 mA range, 20 mA nominal                                   |
| [O]                     | Analog input, voltage                     | 0 to 9.6 VDC range, 10VDC nominal, input impedance 10 kΩ            |
| [H]                     | +10V analog reference                     | 10VDC nominal, 10 mA max  |
| [AL0]                   | Relay common contact                      | 250 VAC, 2.5A (R load) max., 250 VAC, 0.2A (I load, P.F.=0.4) max.  |
| [AL1]                   | Relay contact, normally closed during RUN | 100 VAC, 10mA min. 30 VDC, 3.0A (R load) max.                       |
| [AL2]                   | Relay contact, normally open during RUN   | 30 VDC, 0.7A (I load, P.F.=0.4) max. 5 VDC, 100mA min.              |

**Note 1:** The two terminals [L] are electrically connected together inside the inverter.

## Terminal Listing

Use the following tables to locate pages for intelligent input and output material in this chapter.

| Intelligent Inputs |      |                                       |      |
|--------------------|------|---------------------------------------|------|
| Symbol             | Code | Name                                  | Page |
| FW                 | 00   | Forward Run/Stop                      | 4-9  |
| RV                 | 01   | Reverse Run/Stop                      | 4-9  |
| CF1                | 02   | Multi-speed Select, Bit 0 (LSB)       | 4-10 |
| CF2                | 03   | Multi-speed Select, Bit 1             | 4-10 |
| CF3                | 04   | Multi-speed Select, Bit 2             | 4-10 |
| CF4                | 05   | Multi-speed Select, Bit 3             | 4-10 |
| JG                 | 06   | Jogging                               | 4-12 |
| 2CH                | 09   | 2-stage Acceleration and Deceleration | 4-13 |
| FRS                | 11   | Free-run Stop                         | 4-14 |
| EXT                | 12   | External Trip                         | 4-15 |
| USP                | 13   | Unattended Start Protection           | 4-16 |
| SFT                | 15   | Software Lock                         | 4-17 |
| AT                 | 16   | Analog Input Voltage/current Select   | 4-18 |
| RS                 | 18   | Reset Inverter                        | 4-19 |
| TH                 | 19   | Thermistor Thermal Protection         | 4-20 |

| Intelligent Outputs |      |   |      |
|---------------------|------|---|------|
| Symbol              | Code | Name                                      | Page |
| RUN                 | 00   | Run Signal                                | 4-22 |
| FA1                 | 01   | Frequency Arrival type 1 – Constant Speed | 4-23 |
| FA2                 | 02   | Frequency arrival type 2 – Over-frequency | 4-23 |
| OL                  | 03   | Overload Advance Notice Signal            | 4-25 |
| OD                  | 04   | Output Deviation for PID Control          | 4-26 |
| AL                  | 05   | Alarm Signal                              | 4-27 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Using Intelligent Input Terminals

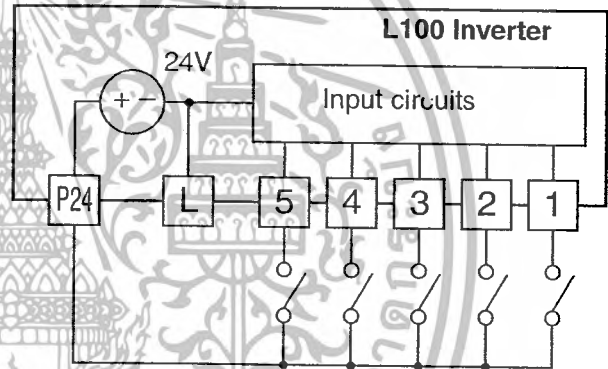
Terminals [1], [2], [3], [4], and [5] are identical, programmable inputs for general use. The input circuits can use the inverter's internal (isolated) +24V field supply (P24) to power the inputs. The input circuits are internally connected to the power supply ground. As the diagram shows, you can use a switch (or jumper) to activate an input terminal that has been configured.

If you use an external supply, its GND terminal must connect to the [L] terminal on the inverter to complete the input circuit. Current can only flow *into* each input, so they are sinking inputs, whether powered internally or externally.

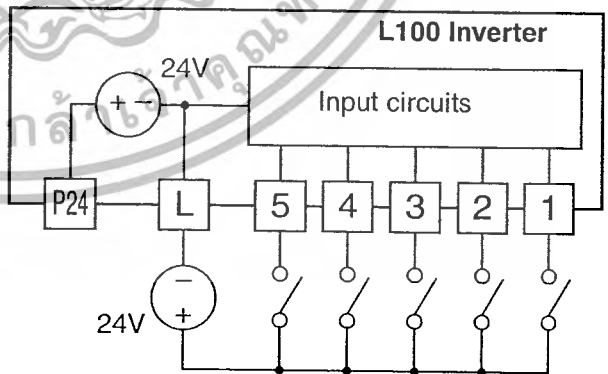


**NOTE:** We recommend using the top row [L] logic GND for logic input circuits and the [L] GND on the bottom row of terminals for analog I/O circuits.

Sinking inputs, internal supply



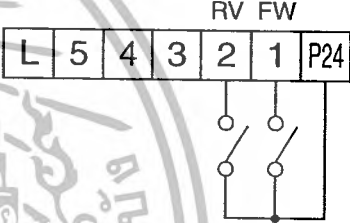
Sinking inputs, external supply



Operations  
and Monitoring

## Forward Run/Stop and Reverse Run/Stop Commands:

When you input the Run command via the terminal [FW], the inverter executes the Forward Run command (high) or Stop command (low). When you input the Run command via the terminal [RV], the inverter executes the Reverse Run command (high) or Stop command (low).

| Option Code                | Terminal Symbol | Function Name   | State | Description  |
|----------------------------|-----------------|---|-------|--|
| 00                         | FW              | Forward Run/Stop  | ON    | Inverter is in Run Mode, motor runs forward  |
|                            |                 |   | OFF   | Inverter is in Stop Mode, motor stops  |
| 01                         | RV              | Reverse Run/Stop  | ON    | Inverter is in Run Mode, motor runs reverse  |
|                            |                 |   | OFF   | Inverter is in Stop Mode, motor stops  |
| <b>Valid for inputs:</b>   |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05  |       | Example (default input configuration shown—see page 3-32):<br><br> |
| <b>Required settings:</b>  |                 | A_02 = 01   |       |  |
| <b>Notes:</b>              |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>When the Forward Run and Reverse Run commands are active at the same time, the inverter enters the Stop Mode.</li> <li>When a terminal associated with either [FW] or [RV] function is configured for <i>normally closed</i>, the motor starts rotation when that terminal is disconnected or otherwise has no input voltage.</li> </ul> |       |  |
| See I/O specs on page 4-6. |                 |   |       |  |



**NOTE:** The parameter F\_04, Keypad Run Key Routing, determines whether the single Run key issues a Run FWD command or Run REV command. However, it has no effect on the [FW] and [RV] input terminal operation.



**WARNING:** If the power is turned ON and the Run command is already active, the motor starts rotation and is dangerous! Before turning power ON, confirm that the Run command is not active.

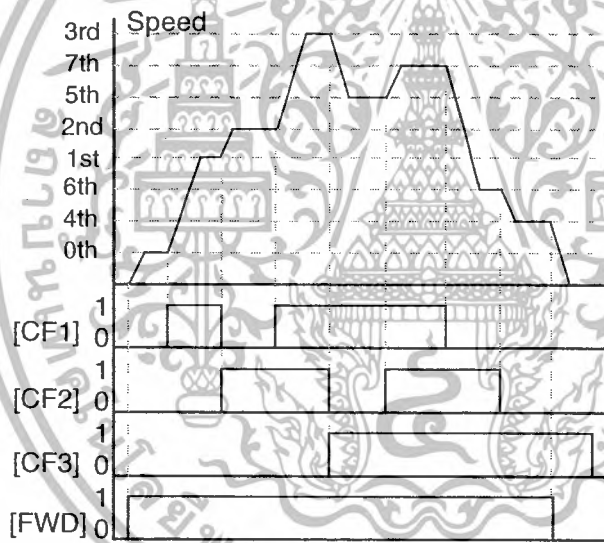
### Multi-Speed Select

The inverter can store up to 16 different target frequencies (speeds) that the motor output uses for steady-state run condition. These speeds are accessible through programming four of the intelligent terminals as binary-encoded inputs CF1 to CF4 per the table to the right. These can be any of the five inputs, and in any order. You can use fewer inputs if you need eight or fewer speeds.



**Note:** When choosing a subset of speeds to use, always start at the top of the table, and with the least-significant bit: CF1, CF2, etc.

The example with eight speeds in the figure below shows how input switches configured for CF1–CF3 functions can change the motor speed in real time.

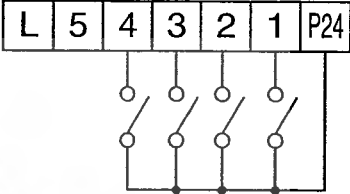


| Multi-speed | Input Function |     |     |     |
|-------------|----------------|-----|-----|-----|
|             | CF4            | CF3 | CF2 | CF1 |
| Speed 0     | 0              | 0   | 0   | 0   |
| Speed 1     | 0              | 0   | 0   | 1   |
| Speed 2     | 0              | 0   | 1   | 0   |
| Speed 3     | 0              | 0   | 1   | 1   |
| Speed 4     | 0              | 1   | 0   | 0   |
| Speed 5     | 0              | 1   | 0   | 1   |
| Speed 6     | 0              | 1   | 1   | 0   |
| Speed 7     | 0              | 1   | 1   | 1   |
| Speed 8     | 1              | 0   | 0   | 0   |
| Speed 9     | 1              | 0   | 0   | 1   |
| Speed 10    | 1              | 0   | 1   | 0   |
| Speed 11    | 1              | 0   | 1   | 1   |
| Speed 12    | 1              | 1   | 0   | 0   |
| Speed 13    | 1              | 1   | 0   | 1   |
| Speed 14    | 1              | 1   | 1   | 0   |
| Speed 15    | 1              | 1   | 1   | 1   |

**NOTE:** Speed 0 is set by the A\_20 parameter value.

Operations and Monitoring

| Option Code | Terminal Symbol | Function Name                   | Input State | Description                                   |
|-------------|-----------------|---------------------------------|-------------|---|
| 02          | CF1             | Multi-speed Select, Bit 0 (LSB) | ON          | Binary encoded speed select, Bit 0, logical 1 |
|             |                 |                                 | OFF         | Binary encoded speed select, Bit 0, logical 0 |
| 03          | CF2             | Multi-speed Select, Bit 1       | ON          | Binary encoded speed select, Bit 1, logical 1 |
|             |                 |                                 | OFF         | Binary encoded speed select, Bit 1, logical 0 |
| 04          | CF3             | Multi-speed Select, Bit 2       | ON          | Binary encoded speed select, Bit 2, logical 1 |
|             |                 |                                 | OFF         | Binary encoded speed select, Bit 2, logical 0 |
| 05          | CF4             | Multi-speed Select, Bit 3 (MSB) | ON          | Binary encoded speed select, Bit 3, logical 1 |
|             |                 |                                 | OFF         | Binary encoded speed select, Bit 3, logical 0 |

| Option Code  | Terminal Symbol | Function Name                 | Input State | Description  |
|--|-----------------|-------------------------------|-------------|--|
| <b>Valid for inputs:</b>   |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05  |             | Example (some CF inputs require input configuration; some are default inputs—see page 3–32):<br><br><div style="text-align: center;">           (MSB)                      (LSB)<br/>           CF4    CF3    CF2    CF1<br/>  </div> |
| <b>Required settings:</b>  |                 | F_01, A_01 = 02, A_20 to A_35 |             |  |
| <b>Notes:</b>  |                 |                               |             | See I/O specs on page 4–6.   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• When programming the multi-speed settings, be sure to press the Store key each time and then set the next multi-speed setting. Note that when the key is not pressed, no data will be set.</li> <li>• When a multi-speed setting more than 50Hz(60Hz) is to be set, it is necessary to program the maximum frequency A_04 high enough to allow that speed.</li> </ul> |                 |                               |             |  |

While using the multi-speed capability, you can monitor the current frequency with monitor function D\_01 during each segment of a multi-speed operation. There are two ways to program the speeds into the registers A\_20 to A\_35:

1. Standard keypad programming:

- a. Select each parameter A\_20 to A\_35.
- b. Press the **(FNC)** key to view the parameter value.
- c. Use the **(▲)** and **(▼)** keys to edit the value.
- d. Use the **(STR)** key to save the data to memory.

2. Programming using the CF switches. Set the speed by following these steps:

- a. Turn the Run command OFF (Stop Mode).
- b. Turn each switch ON and set it to Multi-speed. Display the value of F\_01 on the digital operator.
- c. Set the desired output frequency by pressing the **(▲)** and **(▼)** keys.
- d. Press the **(STR)** key once to store the set frequency. When this occurs, F\_01 indicates the output frequency of Multi-speed n.
- e. Press the **(FNC)** key once to confirm that the indication is the same as the set frequency.
- f. Repeat operations in 2. a) to 2. e) to set the frequency of other Multi-speeds. It can be set also by parameters A\_20 to A\_35 in the first procedure 1. a) to 1. d).

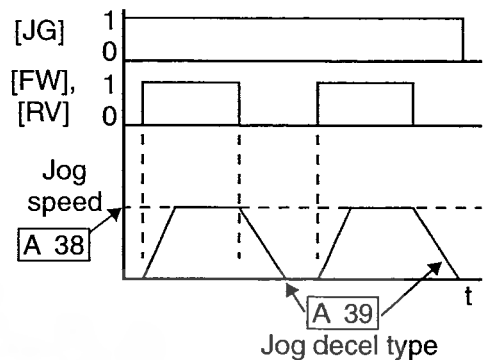
### Jogging Command

The Jog input [JG] is used to command the motor to rotate slowly in small increments for manual operation. The speed is limited to 10 Hz. The frequency for the jogging operation is set by parameter A\_38. Jogging does not use an acceleration ramp, so we recommend setting the jogging frequency A\_38 to 5 Hz or less to prevent tripping.

When the terminal [JG] is turned ON and the Run command is issued, the inverter outputs the programmed jog frequency to the motor. To enable the Run key on the digital operator for jog input, set the value 01 (terminal mode) in A\_02 (Run command source).

The type of deceleration used to end a motor jog operation is selectable by programming function A\_39. The options are:

- 00 Free-run stop (coasting)
- 01 Deceleration (normal level) and stop
- 02 Use DC braking and stop

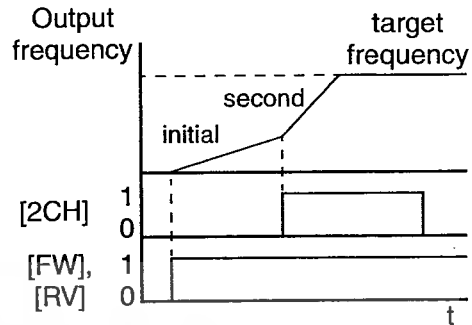


Operations and Monitoring

| Option Code   | Terminal Symbol | Function Name                         | Input State | Description   |
|---|-----------------|---------------------------------------|-------------|---|
| 06  | JG              | Jogging                               | ON          | Inverter is in Run Mode, output to motor runs at jog parameter frequency  |
|   |                 |                                       | OFF         | Inverter is in Stop Mode  |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05          |             | Example (requires input configuration—see page 3-32):   |
| <b>Required settings:</b>   |                 | A_02= 01, A_38 > B_82, A_38 > 0, A_39 |             |   |
| <b>Notes:</b>   |                 |                                       |             |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• No jogging operation is performed when the set value of jogging frequency A_38 is smaller than the start frequency B_82, or the value is 0 Hz.</li> <li>• Be sure to stop the motor when switching the function [JG] ON or OFF.</li> </ul> |                 |                                       |             | <p>The diagram shows a terminal block with terminals L, 5, 4, 3, 2, 1, and P24. Terminal 3 is connected to terminal 1 through a switch. Terminal 1 is connected to terminal P24 through another switch. The label 'JG' is positioned above the terminals.</p> |
|   |                 |                                       |             | See I/O specs on page 4-6.  |

### Two-stage Acceleration and Deceleration

When terminal [2CH] is turned ON, the inverter changes the rate of acceleration and deceleration from the initial settings (F\_02 and F\_03) to use the second set of acceleration/deceleration values. When the terminal is turned OFF, the inverter is returned to the original acceleration and deceleration time (F\_02 acceleration time 1, and F\_03 deceleration time 1). Use A\_92 (acceleration time 2) and A\_93 (deceleration time 2) to set the second stage acceleration and deceleration times.



In the graph shown above, the [2CH] becomes active during the initial acceleration. This causes the inverter to switch from using acceleration 1 (F\_02) to acceleration 2 (A\_92).

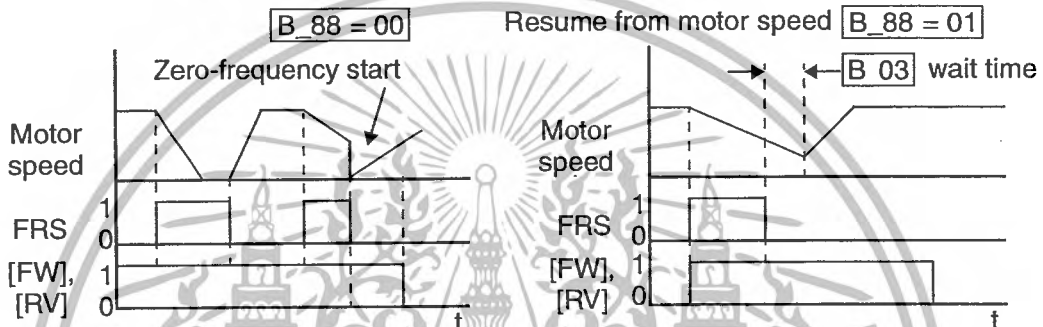
| Option Code               | Terminal Symbol | Function Name  | Input State   | Description  |
|---------------------------|-----------------|--|---|--|
| 09                        | 2CH             | 2-stage Acceleration and Deceleration  | ON  | Frequency output uses 2nd-stage acceleration and deceleration values       |
|                           |                 |  | OFF   | Frequency output uses the initial acceleration 1 and deceleration 1 values |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05   | Example (requires input configuration—see page 3-32): |  |
| <b>Required settings:</b> |                 | A_92, A_93, A_94=00  |   |  |
| <b>Notes:</b>             |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Function A_94 selects the method for second stage acceleration. It must be set = 00 to select the input terminal method in order for the [2CH] terminal assignment to operate.</li> </ul> |   |  |
|                           |                 | <p>See I/O specs on page 4-6.</p>  |   |  |

### Free-run Stop

When the terminal [FRS] is turned ON, the inverter stops the output and the motor enters the free-run state (coasting). If terminal [FRS] is turned OFF, the output resumes sending power to the motor if the Run command is still active. The free-run stop feature works with other parameters to provide flexibility in stopping and starting motor rotation.

In the figure below, parameter B\_88 selects whether the inverter resumes operation from 0 Hz (left graph) or the current motor rotation speed (right graph) when the [FRS] terminal turns OFF. The application determines the best setting.

Parameter B\_03 specifies a delay time before resuming operation from a free-run stop. To disable this feature, use a zero delay time.



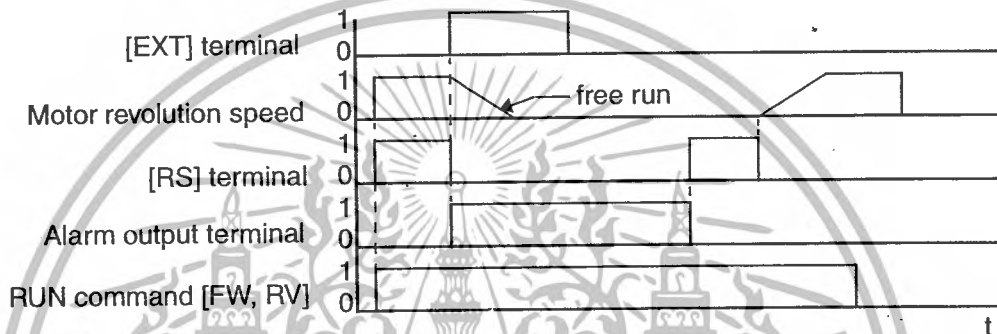
| Option Code  | Terminal Symbol | Function Name                | Input State | Description   |
|--|-----------------|------------------------------|-------------|---|
| 11   | FRS             | Free-run Stop                | ON          | Causes output to turn OFF, allowing motor to free run (coast) to stop |
|  |                 |                              | OFF         | Output operates normally, so controlled deceleration stops motor      |
| <b>Valid for inputs:</b>   |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05 |             | Example (requires input configuration—see page 3-32):                 |
| <b>Required settings:</b>  |                 | B_03, B_88, C_11 to C_15     |             |   |
| <b>Notes:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>When you want the [FRS] terminal to be active low (normally closed logic), change the setting (C_11 to C_15) that corresponds to the input (C_01 to C_05) that is assigned the [FRS] function.</li> </ul> |                 |                              |             |   |
| <div style="text-align: center;"> </div> <p>See I/O specs on page 4-6.</p>   |                 |                              |             |   |

and monitoring

### External Trip

When the terminal [EXT] is turned ON, the inverter enters the trip state, indicates error code E12, and stops the output. This is a general purpose interrupt type feature, and the meaning of the error depends on what you connect to the [EXT] terminal. Even if the [EXT] input is turned OFF, the inverter remains in the trip state. You must reset the inverter or cycle power to clear the error, returning the inverter to the Stop Mode.

In the graph below, the [EXT] input turns ON during normal Run Mode operation. The inverter lets the motor free-run to a stop, and the alarm output turns ON immediately. When the operator initiates a Reset command, the alarm and error are cleared. When the Reset is turned OFF, the motor begins rotation since the Run command is already active.

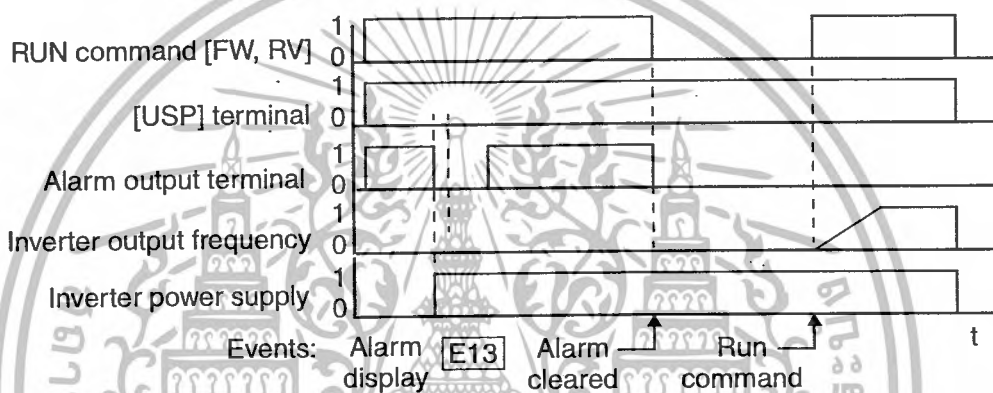


| Option Code   | Terminal Symbol | Function Name                | Input State   | Description   |
|---|-----------------|------------------------------|---|---|
| 12  | EXT             | External Trip                | ON  | When assigned input transitions OFF to ON, inverter latches trip event and displays E12 |
|   |                 |                              | OFF   | No trip event for ON to OFF, any recorded trip events remain in history until Reset     |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05 | Example (requires input configuration—see page 3-32): |   |
| <b>Required settings:</b>   |                 | (none)                       |   |   |
| <b>Notes:</b>   |                 |                              |   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>If the USP (Unattended Start Protection) feature is in use, the inverter will not automatically restart after cancelling the EXT trip event. In that case, it must receive either another Run command (OFF-to-ON transition), a keypad Reset command, or an [RS] intelligent terminal input signal.</li> </ul> |                 |                              |   |   |
|   |                 |                              | <p>See I/O specs on page 4-6.</p>                     |   |

### Unattended Start Protection

If the Run command is already set when power is turned ON, the inverter starts running immediately after powerup. The Unattended Start Protection (USP) function prevents that automatic startup, so that the inverter *will not* run without outside intervention. When USP is active and you need to reset an alarm and resume running, either turn the Run command OFF, or perform a reset operation by the terminal [RS] input or the keypad Stop/reset key.

In the figure below, the [UPS] feature is enabled. When the inverter power turns ON, the motor does not start, even though the Run command is already active. Instead, it enters the USP trip state, and displays E13 error code. This requires outside intervention to reset the alarm by turning OFF the Run command per this example (or applying a reset). Then the Run command can turn ON again and start the inverter output.



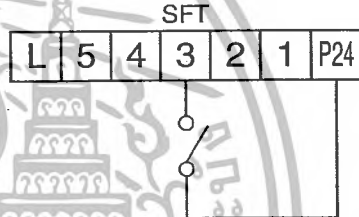
| Option Code   | Terminal Symbol | Function Name                | Input State  | Description  |
|---|-----------------|------------------------------|--|--|
| 13  | USP             | Unattended Start Protection  | ON   | On powerup, the inverter will not resume a Run command (mostly used in the US)       |
|   |                 |                              | OFF  | On powerup, the inverter will resume a Run command that was active before power loss |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05 | Example (default input configuration shown for -FU models; -FE and -FR models require input configuration— see page 3-32): |  |
| <b>Required settings:</b>   |                 | (none)                       |  |  |
| <b>Notes:</b>   |                 |                              |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Note that when a USP error occurs and it is canceled by a reset from a [RS] terminal input, the inverter restarts running immediately.</li> <li>Even when the trip state is canceled by turning the terminal [RS] ON and OFF after an under voltage protection E09 occurs, the USP function will be performed.</li> <li>When the running command is active immediately after the power is turned ON, a USP error will occur. When this function is used, wait for at least three (3) seconds after the powerup to generate a Run command.</li> </ul> |                 |                              |  |  |
| <p>See I/O specs on page 4-6.</p>   |                 |                              |  |  |

and monitoring

## Software Lock

When the terminal [SFT] is turned ON, the data of all the parameters and functions (except the output frequency, depending on the setting of B\_31) is locked (prohibited from editing). When the data is locked, the keypad keys cannot edit inverter parameters. To edit parameters again, turn OFF the [SFT] terminal input.

Use parameter B\_31 to select whether the output frequency is excluded from the lock state or is locked as well.

| Option Code  | Terminal Symbol | Function Name                | Input State  | Description  |
|--|-----------------|------------------------------|--|--|
| 15   | SFT             | Software Lock                | ON   | The keypad and remote programming devices are prevented from changing parameters |
|  |                 |                              | OFF  | The parameters may be edited and stored  |
| <b>Valid for inputs:</b>   |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05 | Example (requires input configuration—see page 3-32):<br> |  |
| <b>Required settings:</b>  |                 | B_31 (excluded from lock)    |  |  |
| <b>Notes:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• When the [SFT] terminal is turned ON, only the output frequency can be changed.</li> <li>• Software lock can include the output frequency by setting B_31.</li> <li>• Software lock by the operator is also possible without the [SFT] terminal being used (B_31).</li> </ul> |                 |                              |  |  |
| See I/O specs on page 4-6.   |                 |                              |  |  |

### Analog Input Current/Voltage Select

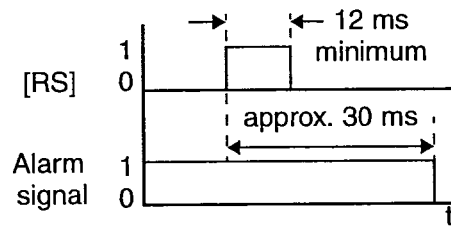
The [AT] terminal selects whether the inverter uses the voltage [O] or current [OI] input terminals for external frequency control. When intelligent input [AT] is ON, you can set the output frequency by applying a current input signal at [OI]-[L]. When the [AT] input is OFF, you can apply a voltage input signal at [O]-[L] to set the output frequency. Note that you must also set parameter A\_01 = 01 to enable the analog terminal set for controlling the inverter frequency.

| Option Code  | Terminal Symbol | Function Name                       | Input State   | Description  |
|--|-----------------|-------------------------------------|---|--|
| 16   | AT              | Analog Input Voltage/current Select | ON  | Terminal OI is enabled for current input (uses terminal L for power supply return) |
|  |                 |                                     | OFF   | Terminal O is enabled for voltage input (uses terminal L for power supply return)  |
| <b>Valid for inputs:</b>   |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05        | Example (default input configuration shown for -FU models; -FE and -FR models require input configuration—see page 3-32): |  |
| <b>Required settings:</b>  |                 | A_01 = 01                           |   |  |
| <p><b>Notes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• If the [AT] option is not assigned to any intelligent input terminal, then inverter uses the algebraic sum of both the voltage and current inputs for the frequency command (and A_01=01).</li> <li>• When using either the analog current and voltage input terminal, make sure that the [AT] function is allocated to an intelligent input terminal.</li> <li>• Be sure to set the frequency source setting A_01=01 to select the analog input terminals.</li> </ul> |                 |                                     |   |  |
| <p>See I/O specs on page 4-6.</p>  |                 |                                     |   |  |

Copyright © 2011 ABB

### Reset Inverter

The [RS] terminal causes the inverter to execute the reset operation. If the inverter is in Trip Mode, the reset cancels the Trip state. When the signal [RS] is turned ON and OFF, the inverter executes the reset operation. The minimum pulse width for [RS] must be 12 ms or greater. The alarm output will be cleared within 30 ms after the onset of the Reset command.



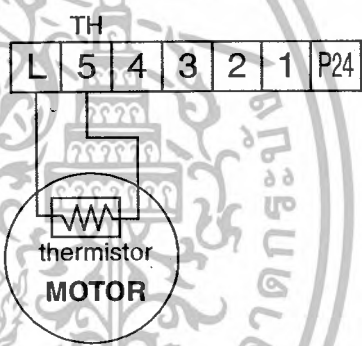
**WARNING:** After the Reset command is given and the alarm reset occurs, the motor will restart suddenly if the Run command is already active. Be sure to set the alarm reset after verifying that the Run command is OFF to prevent injury to personnel.

| Option Code   | Terminal Symbol | Function Name                | Input State  | Description   |
|---|-----------------|------------------------------|--|---|
| 18  | RS              | Reset Inverter               | ON   | The motor output is turned OFF, the Trip Mode is cleared (if it exists), and powerup reset is applied |
|   |                 |                              | OFF  | Normal power-ON operation   |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_01, C_02, C_03, C_04, C_05 | Example (default input configuration shown—see page 3-32): |   |
| <b>Required settings:</b>   |                 | (none)                       |  |   |
| <p><b>Notes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>When the control terminal [RS] input is already ON at powerup for more than 4 seconds, the remote operator display is “R-ERROR COMM&lt;2&gt;” (the display of the digital operator [OPE-J] is — — —). However, the inverter has no error. To clear the digital operator error, turn OFF the terminal [RS] input and press one of the operator keys.</li> <li>Pressing the Stop/Reset key of the digital operator can generate a reset operation only when an alarm occurs.</li> <li>A terminal configured with the [RS] function can only be configured for normally open operation. The terminal cannot be used in the normally closed contact state.</li> <li>When input power is turned ON, the inverter performs the same reset operation as it does when a pulse on the [RS] terminal occurs.</li> <li>The Stop/Reset key on the inverter is only operational for a few seconds after inverter powerup when a hand-held remote operator is connected to the inverter.</li> <li>If the [RS] terminal is turned ON while the motor is running, the motor will be free running (coasting).</li> </ul> |                 |                              |  |   |
| <div style="text-align: center;"> <p>See I/O specs on page 4-6.</p> </div>  |                 |                              |  |   |

Operations and Monitoring

### Thermistor Thermal Protection

Motors that are equipped with a thermistor can be protected from overheating. Input terminal [5] has the unique ability to sense a thermistor resistance. When the resistance value of the thermistor connected to terminal [TH] (5) and [L] is more than 3 k Ohms  $\pm 10\%$ , the inverter enters the Trip Mode, turns OFF the output to the motor, and indicates the trip status E35. Use this function to protect the motor from overheating.

| Option Code               | Terminal Symbol | Function Name  | Input State  | Description  |
|---------------------------|-----------------|--|--|--|
| 19                        | TH              | Thermistor Thermal Protection  | Sensor   | When a thermistor is connected to terminals [5] and [L], the inverter checks for over-temperature and will cause trip (E35) and turn OFF the output to the motor |
|                           |                 |  | Open   | An open circuit in the thermistor causes a trip, and the inverter turns OFF the output   |
| <b>Valid for inputs:</b>  |                 | C_05 only  | Example (requires input configuration—see page 3-32):<br> |  |
| <b>Required settings:</b> |                 | (none)   |  |  |
| <b>Notes:</b>             |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Be sure the thermistor is connected to terminals [5] and [L]. If the resistance is above the threshold the inverter will trip. When the motor cools down enough, the thermistor resistance will change enough to permit you to clear the error. Press the STOP/Reset key to clear the error.</li> </ul> |  |  |
|                           |                 |  |  | See I/O specs on page 4-6.   |

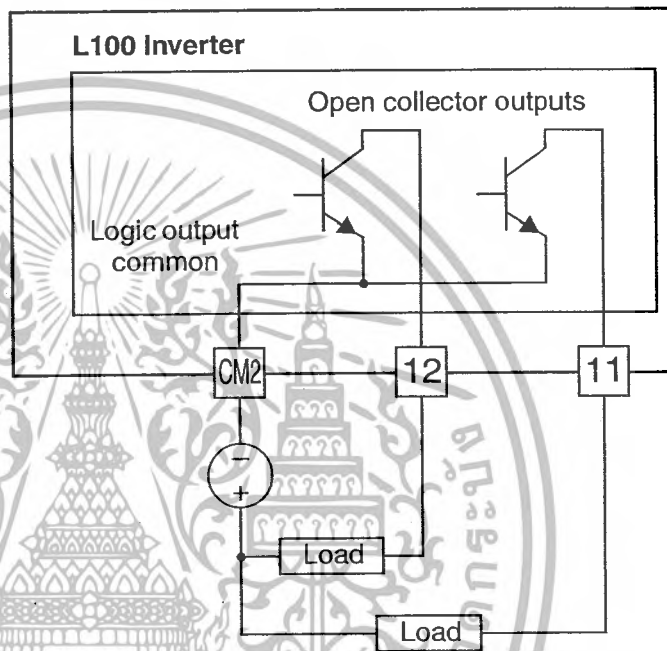
and monitoring

## Using Intelligent Output Terminals

The intelligent output terminals are programmable in a similar way to the intelligent input terminals. The inverter has several output functions that you can assign individually to three physical logic outputs. Two of the outputs are open-collector transistors, and the third output is the alarm relay (form C – normally open and normally closed contacts). The relay is assigned the alarm function by default, but you can assign it to any of the functions that the open-collector outputs use.

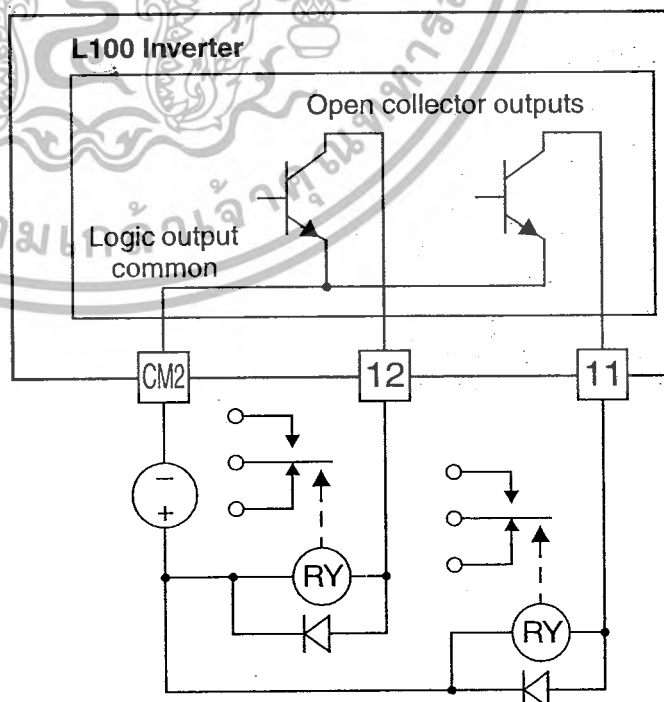
### Sinking Outputs, Open Collector

The open-collector transistor outputs can handle up to 50mA each. We highly recommend that you use an external power source as shown. It must be capable of providing at least 100mA to drive both outputs at full load. To drive loads that require more than 50mA, use external relay circuits as shown below.



### Sinking Outputs, Open Collector with External Relays

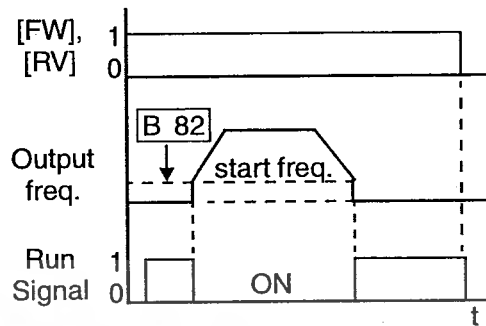
If you need output current greater than 50mA, use the inverter output to drive a small relay. Be sure to use a diode across the coil of the relay as shown (reverse-biased) in order to suppress the turn-off spike, or use a solid-state relay.



Operations and Monitoring

### Run Signal

When the [RUN] signal is selected as an intelligent output terminal, the inverter outputs a signal on that terminal when it is in Run Mode. The output logic is active low, and is the open collector type (switch to ground).



| Option Code               | Terminal Symbol | Function Name  | Output State  | Description                   |
|---------------------------|-----------------|--|---|-------------------------------|
| 00                        | RUN             | Run Signal   | ON  | when inverter is in Run Mode  |
|                           |                 |  | OFF   | when inverter is in Stop Mode |
| <b>Valid for outputs:</b> |                 | 11, 12   | Example (default output configuration shown—see page 3–36): |                               |
| <b>Required settings:</b> |                 | (none)   |   |                               |
| <b>Notes:</b>             |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>The inverter outputs the [RUN] signal whenever the inverter output exceeds the start frequency specified by parameter B_82. The start frequency is the initial inverter output frequency when it turns ON.</li> </ul> |   |                               |
|                           |                 | <p>See I/O specs on page 4–6.</p>  |   |                               |

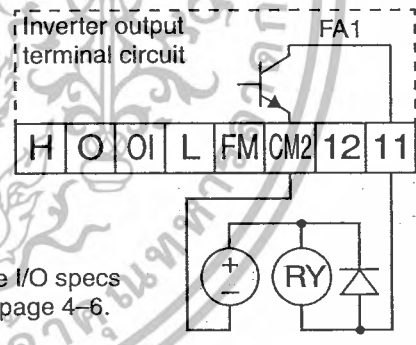


**NOTE:** The example circuit in the table above drives a relay coil. Note the use of a diode to prevent the negative-going turn-off spike generated by the coil from damaging the inverter’s output transistor.

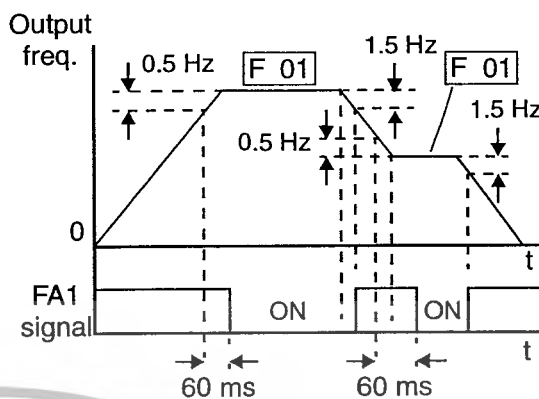
and monitoring

## Frequency Arrival Signals

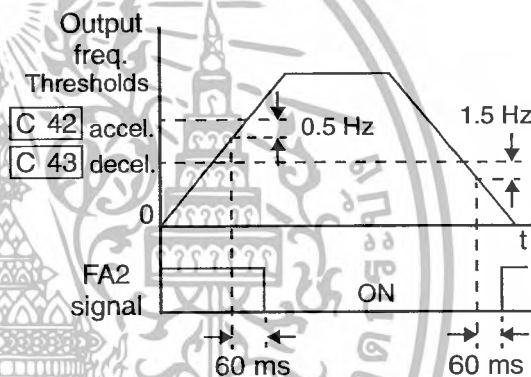
The *Frequency Arrival* group of outputs help coordinate external systems with the current velocity profile of the inverter. As the name implies, output [FA1] turns ON when the output *frequency arrives* at the standard set frequency (parameter F\_01). Output [FA2] relies on programmable accel/ decel thresholds for increased flexibility. For example, you can have an output turn ON at one frequency during acceleration, and have it turn OFF at a different frequency during deceleration. All transitions have hysteresis to avoid output chatter if the output frequency is near one of the thresholds.

| Option Code   | Terminal Symbol | Function Name                             | Output State  | Description   |
|---|-----------------|---|---|---|
| 01  | FA1             | Frequency Arrival Type 1 – Constant Speed | ON  | when output to motor is at the set frequency  |
|   |                 |   | OFF   | when output to motor is OFF, or in any acceleration or deceleration ramp  |
| 02  | FA2             | Frequency Arrival Type 2 – Over-frequency | ON  | when output to motor is at or above the set frequency thresholds for, even if in acceleration or deceleration ramps |
|   |                 |   | OFF   | when output to motor is OFF, or during acceleration or deceleration before the respective thresholds are crossed    |
| <b>Valid for outputs:</b>   |                 | 11, 12                                    | Example (default output configuration shown—see page 3-36): |   |
| <b>Required settings:</b>   |                 | (none)                                    |   |   |
| <p><b>Notes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>For most applications you will need to use only one type of frequency arrival outputs (see examples). However, it is possible assign both output terminals to output functions [FA1] and [FA2].</li> <li>For each frequency arrival threshold, the output anticipates the threshold (turns ON early) by 1.5Hz.</li> <li>The output turns OFF as the output frequency moves away from the threshold, delayed by 0.5Hz.</li> <li>The delay time of the output signal is 60 ms (nominal).</li> </ul> |                 |   |   |   |
|   |                 |   |   |   |

Frequency arrival output [FA1] uses the standard output frequency (parameter F\_01) as the threshold for switching. In the figure to the right, Frequency Arrival [FA1] turns ON when the output frequency gets within 0.5 Hz below or 1.5 Hz above the target constant frequency. This provides hysteresis that prevents output chatter near the threshold value. The hysteresis effect causes the output to turn ON slightly *early* as the speed approaches the threshold. Then the turn-OFF point is slightly *delayed*. The timing is further modified by a small 60 ms delay. Note the active low nature of the signal, due to the open collector output.



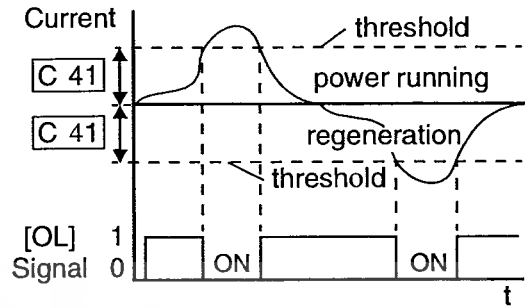
Frequency arrival output [FA2] works the same way; it just uses two separate thresholds as shown in the figure to the right. These provide for separate acceleration and deceleration thresholds to provide more flexibility than for [FA1]. [FA2] uses C\_42 during acceleration for the ON threshold, and C\_43 during deceleration for the OFF threshold. This signal also is active low and has a 60 ms delay after the frequency thresholds are crossed. Having different accel and decel thresholds provides an asymmetrical output function. However, you can use equal ON and OFF thresholds, if desired.



การควบคุม

### Overload Advance Notice Signal

When the output current exceeds a preset value, the [OL] terminal signal turns ON. The parameter C\_41 sets the overload threshold. The overload detection circuit operates during powered motor operation and during regenerative braking. The output circuits use open-collector transistors, and are active low.



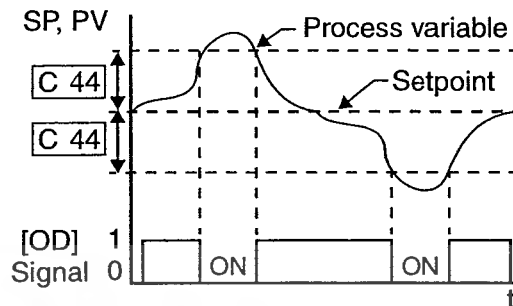
| Option Code                | Terminal Symbol | Function Name  | Output State   | Description  |
|----------------------------|-----------------|--|--|--|
| 03                         | OL              | Overload Advance Notice Signal   | ON   | when output current is more than the set threshold for the overload signal |
|                            |                 |  | OFF  | when output current is less than the set threshold for the overload signal |
| <b>Valid for outputs:</b>  |                 | 11, 12   | Example (requires output configuration—see page 3-36):<br> |  |
| <b>Required settings:</b>  |                 | C_41   |  |  |
| <b>Notes:</b>              |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>The default value is 100%. To change the level from the default, set C_41 (overload level).</li> <li>The accuracy of this function is the same as the function of the output current monitor on the [FM] terminal (see page “Analog and Digital Monitor Output” on page 4-30).</li> </ul> |  |  |
| See I/O specs on page 4-6. |                 |  |  |  |



**NOTE:** The example circuit in the table above drives a relay coil. Note the use of a diode to prevent the negative-going turn-off spike generated by the coil from damaging the inverter’s output transistor.

### Output Deviation for PID Control

The PID loop error is defined as the magnitude (absolute value) of the difference between the Setpoint (target value) and the Process Variable (actual value). When the error magnitude exceeds the preset value for C\_44, the [OD] terminal signal turns ON. Refer to “PID Loop Operation” on page 4-32.



| Option Code               | Terminal Symbol | Function Name   | Output State   | Description  |
|---------------------------|-----------------|---|--|--|
| 04                        | OD              | Output Deviation for PID Control  | ON   | when PID error is more than the set threshold for the deviation signal |
|                           |                 |   | OFF  | when PID error is less than the set threshold for the deviation signal |
| <b>Valid for outputs:</b> |                 | 11, 12  | Example (requires output configuration—see page 3-36):<br> |  |
| <b>Required settings:</b> |                 | C_44  |  |  |
| <b>Notes:</b>             |                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>The default difference value is set to 3%. To change this value, change parameter C_44 (deviation level).</li> </ul> |  |  |

See I/O specs on page 4-6.

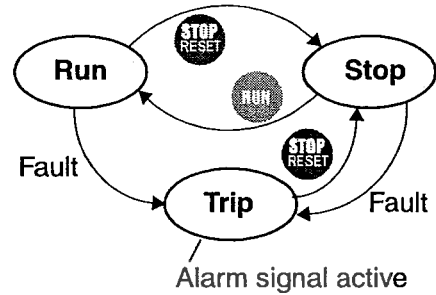
**NOTE:** The example circuit in the table above drives a relay coil. Note the use of a diode to prevent the negative-going turn-off spike generated by the coil from damaging the inverter’s output transistor.

การควบคุม

### Alarm Signal

The inverter alarm signal is active when a fault has occurred and it is in the Trip Mode (refer to the diagram at right). When the fault is cleared the alarm signal becomes inactive.

We must make a distinction between the alarm *signal* AL and the alarm relay *contacts* [AL0], [AL1] and [AL2]. The signal AL is a logic function, which you can assign to the open collector output terminals [11] or [12]. The relay is dedicated to the function AL, thus the labeling of its terminals. Use an open collector output (terminal [11] or [12]) for a low-current logic signal interface or to energize a small relay (50 mA maximum). Use the relay output to interface to higher voltage and current devices (10 mA minimum).



| Option Code  | Terminal Symbol | Function Name | Output State   | Description  |
|--|-----------------|---------------|--|--|
| 05   | AL              | Alarm Signal  | ON   | when an alarm signal has occurred and has not been cleared     |
|  |                 |               | OFF  | when no alarm has occurred since the last clearing of alarm(s) |
| <b>Valid for outputs:</b>  |                 | 11, 12        | Example for terminal [11] or [12] (requires output configuration—see page 3-36): |  |
| <b>Required settings:</b>  |                 | C_33          |  |  |
| <p><b>Notes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• When the alarm output is set to normally closed, a time delay of less than 2 seconds occurs until the contact is closed when the power is turned ON.</li> <li>• Terminals 11 and 12 are open collector outputs, so the electric specifications of [AL] are different from the contact output terminals [AL0], [AL1], [AL2].</li> <li>• When the inverter power supply is turned OFF, the alarm signal output is valid as long as the external control circuit has power.</li> <li>• This signal output has the delay time (300 ms nominal) from the fault alarm output.</li> <li>• The relay contact specifications are in “Specifications of Control and Logic Connections” on page 4-6. The contact diagrams for different conditions are on the next page.</li> </ul> |                 |               |  |  |
| <p>Example for terminals [AL0], [AL1], [AL2] (default output configuration shown—see page 3-36):</p> <p>See I/O specs on page 4-6.</p>   |                 |               |  |  |

Operations and Monitoring

The alarm output terminals are connected as shown below (left) by default. The contact logic can be inverted as shown (below right) by using the parameter setting C\_33. The relay contacts normally open (N.O.) and normally closed (N.O.) convention uses “normal” to mean the inverter has power and is in Run or Stop Mode. The relay contacts switch to the opposite position when it is in Trip Mode or when input power is OFF.

| N.C. contacts (after initialization) |       |   |         |         | N.O. contact (inverted by C_33 setting)      |       |                      |         |         |
|--------------------------------------|-------|---|---------|---------|--|-------|----------------------|---------|---------|
| During normal running                |       | When an alarm occurs or power is turned OFF |         |         | During normal running or power is turned OFF |       | When an alarm occurs |         |         |
|                                      |       |   |         |         |  |       |                      |         |         |
| Contact                              | Power | Run State                                   | AL0-AL1 | AL0-AL2 | Contact                                      | Power | Run State            | AL0-AL1 | AL0-AL2 |
| N.C.<br>(after initialize, C_33=01)  | ON    | Normal                                      | Closed  | Open    | N.O.<br>(set C_33=00)                        | ON    | Normal               | Open    | Closed  |
|                                      | ON    | Trip  | Open    | Closed  |  | ON    | Trip                 | Closed  | Open    |
|                                      | OFF   | —   | Open    | Closed  |  | OFF   | —                    | Open    | Closed  |

