การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

นันทภพ วัยคุณา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

นันทภพ วัยคุณา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF DOUBLE PIPE CARBON DIOXIDE CONDENSING UNIT IN DRY ICE JET CLEANER

NANTAPOP WAIKUNA

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

โดย นาย นันทภพ วัยคุณา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาและอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

..... กรรมการ

(รศ.ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

..... กรรมการ

(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
นักศึกษา	นายนันทภพ วัยคุณา
รหัสประจำตัว	57010678
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นซึ่งมีหน้าที่ลดอุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นชนิด R404A จนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเพื่อที่จะพ่นออกสู่ความดันบรรยากาศกลายเป็นละอองน้ำแข็งแห้งแบบเอนทาลปีคงที่ตามปรากฏการณ์ของจูล-ทอมสัน และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นที่สภาวะต่างๆ จากการทดลองพบว่าเมื่อใส่สารทำความเย็นเข้าไปในระบบปริมาณ 300 กรัม ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig และปริมาณสารทำความเย็น 320 กรัม ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 800 psig สามารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองทำการคำนวณแยกเป็นช่วงตามสภาวะของสารทั้งสองชนิดที่มาแลกเปลี่ยนความร้อนกันตลอดความยาวท่อ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากการทดลองจึงมีหลายค่าตลอดความยาวท่อ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองของทั้ง 3 สภาวะดังกล่าวที่อ้างอิงพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อทองแดงมีค่าตั้งแต่ 689.2 ถึง 1192.9 $W/m^2.K$ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทางทฤษฎีมีค่าตั้งแต่ 829.6 ถึง 1084.8 $W/m^2.K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on Overall Heat Transfer Coefficient of Double-Pipe Carbon Dioxide Condensing Unit in Dry Ice Jet Cleaner
Student	Mr.Nantapop Waikuna
Student ID	57010678
Degree	Bacherlor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

This research study the possibility of condensing carbon dioxide gas to liquid carbon dioxide in double-pipe carbon dioxide condensing unit, Which the function of lowering the carbon dioxide temperature by exchanging heat with Refrigerant type R404A becomes liquid carbon dioxide. In order to spray out to atmospheric pressure a constant enthalpy become dry ice according to june- thomson effect, and calculate the overall heat transfer coefficient of double-pipe carbon dioxide condensing unit at various conditions. From the experiments showed that when 300 grams refrigerant was introduced into the system, Input pressure of carbon dioxide gas is 800 psig and 320 grams refrigerant with input pressure of carbon dioxide gas is 700, 800 psig can condense carbon dioxide gas into liquid carbon dioxide. Therefore, it is the suitable condition for producing dry ice. Which the overall heat transfer coefficient calculation of double-pipe carbon dioxide condensing unit is periodic calculations according to the condition of the substance throughout the pipe length. Consequently, the overall heat transfer coefficient calculated from the experiment has many values throughout the pipe length. Which the overall heat transfer coefficient refer inside copper tube heat transfer area of these three conditions form the experiment is 689.2 to 1192.9 $W/m^2.K$ and from theory is 829.6 to 1084.8 $W/m^2.K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำปรึกษา ให้แนวทางในการปฏิบัติงานและฝึกฝนข้าพเจ้าจนสามารถทำงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนคณาจารย์ท่านอื่นในสถาบันที่เคยสอนข้าพเจ้าในวิชาต่างๆที่มอบความรู้ให้ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ข้าพเจ้าได้นำองค์ความรู้เหล่านั้นมาทำงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณบิดา มารดา วงศาคณาญาติทุกท่านและครูอาจารย์ที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่เยาว์วัยให้รู้ผิดชอบชั่วดี ช่วยส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษาที่ดีและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆในชีวิตผ่านมาได้จนมาถึงปัจจุบัน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้

นันทภพ วัยคุณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... i

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ii

กิตติกรรมประกาศ..... iii

สารบัญ..... iv

สารบัญตาราง..... vii

สารบัญรูป..... x

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) 3

2.1.1 น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) 3

2.1.2 การคำนวณความนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ 4

2.2 สารทำความเย็น 5

2.2.1 แบ่งตามกระบวนการผลิต 5

2.2.2 แบ่งตามสมบัติ 5

2.2.3 แบ่งตามสูตรเคมี 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression System) 5

2.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น 7

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) 7

2.4.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) 8

2.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) 9

2.4.4 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นชนิด R404A 12

บทที่ 3 การทดลอง 15

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง 15

3.2 ขั้นตอนการทดลอง 15

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 18

4.1 อุณหภูมิและความนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกของแต่ละสภาวะการทดลอง 18

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ... 19

4.2.1 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 19

4.2.2 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig 21

4.2.3 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีเปรียบเทียบกับการคำนวณจากการทดลอง 23

4.3.1 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 24

4.3.2 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig 25

4.3.3 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 27

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 29

5.1 สรุปผลการทดลอง 29

5.1.1 ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาข้าวของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig .29

5.1.2 ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาข้าวของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig .29

5.1.1 ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาข้าวของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig .30

5.2 วิเคราะห์สภาวะในการทดลอง 30

5.3 วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 31

เอกสารอ้างอิง 32

ภาคผนวก ก ผลการทดลองอุณหภูมิ-ความดันของสารที่สถานะต่างๆ 34

ภาคผนวก ข การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ 48

ภาคผนวก ค ขนาดของท่อสองชั้น 73

ภาคผนวก ง การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น 75

ภาคผนวก จ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละสภาวะการทดลอง 18

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสาร ทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 20

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสาร ทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig 21

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสาร ทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig 22

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 800 psig 24

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 700 psig 25

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 800 psig 27

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉลี่ยจากการทดลองและจากทฤษฎี..28
ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 250 กรัม

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองครั้งที่ 1 34

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองครั้งที่ 2 34

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองครั้งที่ 3 35

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองเฉลี่ย 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 260 กรัม

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองครั้งที่ 1 36

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองครั้งที่ 2 36

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองครั้งที่ 3 37

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองเฉลี่ย 37

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 270 กรัม

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองครั้งที่ 1 38

ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองครั้งที่ 2 38

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองครั้งที่ 3 39

ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองเฉลี่ย 39

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 280 กรัม

ตารางที่ ก-13 ผลการทดลองครั้งที่ 1 40

ตารางที่ ก-14 ผลการทดลองครั้งที่ 2 40

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองครั้งที่ 3 41

ตารางที่ ก-16 ผลการทดลองเฉลี่ย 41

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 290 กรัม

ตารางที่ ก-17 ผลการทดลองครั้งที่ 1 42

ตารางที่ ก-18 ผลการทดลองครั้งที่ 2 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก-19 ผลการทดลองครั้งที่ 3 43

ตารางที่ ก-20 ผลการผลการทดลองเฉลี่ย 43

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 กรัม

ตารางที่ ก-21 ผลการทดลองครั้งที่ 1 44

ตารางที่ ก-22 ผลการทดลองครั้งที่ 2 44

ตารางที่ ก-23 ผลการทดลองครั้งที่ 3 45

ตารางที่ ก-24 ผลการทดลองเฉลี่ย 45

ผลการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 กรัม

ตารางที่ ก-25 ผลการทดลองครั้งที่ 1 46

ตารางที่ ก-26 ผลการทดลองครั้งที่ 2 46

ตารางที่ ก-27 ผลการทดลองครั้งที่ 3 47

ตารางที่ ก-28 ผลการทดลองเฉลี่ย 47

ตารางที่ ข-1 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 250 กรัม 48

ตารางที่ ข-2 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 260 กรัม 51

ตารางที่ ข-3 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 270 กรัม 54

ตารางที่ ข-4 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 280 กรัม 57

ตารางที่ ข-5 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 290 กรัม 60

ตารางที่ ข-6 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 กรัม 63

ตารางที่ ข-7 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 กรัม 66

ตารางที่ ข-8 สรุปอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละสภาวะการทดลอง 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น 2

รูปที่ 2.1 วัฏจักรสารทำความเย็น 6

รูปที่ 2.2 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองชั้น 7

รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังท่อทองแดง 10

รูปที่ 2.4 การไหลสวนทางระหว่างสารทำความเย็น R404A กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหน่วยควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น 12

รูปที่ 2.5 แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ 14

รูปที่ 2.6 แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของสารทำความเย็น R404A 14

รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (300 g 800 psig) ... 19

รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (320 g 700 psig) ... 21

รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (320 g 800 psig) ... 22

รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (300 g 800 psig) 25

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (320 g 700 psig) 26

รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (320 g800 psig) 28

รูปที่ ข-1 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 250 g 69

รูปที่ ข-2 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 260 g 69

รูปที่ ข-3 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 270 g 70

รูปที่ ข-4 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 280 g 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข-5 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 290 g 70

รูปที่ ข-6 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g 71

รูปที่ ข-7 อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g 71

รูปที่ ค-1 ความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดงและท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ [9]

การทำความสะอาดในระดับอุตสาหกรรมเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานหรือสูงกว่า ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องการการทำความสะอาดที่แม่นยำและไม่ทำลายพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ การทำความสะอาดแบบเดิมนั้นมีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การฉีดน้ำแรงดันสูง (High-Pressure Water Cleaning) การใช้สารตัวทำละลาย (Solvent Cleaning) การใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic Cleaning) การทำความสะอาดดังกล่าวนั้นใช้เวลานาน สร้างความเสียหายแก่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เกิดของเสียเนื่องจากมีการใช้สารเคมีในการทำความสะอาดจึงมีค่าใช้จ่ายเพิ่มในการกำจัดของเสียและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่มาของการทำความสะอาดโดยใช้ละอองน้ำแข็งแห้งซึ่งนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการแยกแก๊ส กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊ซให้เปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวแล้วพ่นออกสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็วผ่านรูออริฟิตแบบเอนทาลปีคงที่จึงเกิดเป็นละอองน้ำแข็งแห้ง การทำความสะอาดโดยการใช้ละอองน้ำแข็งแห้งไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่พื้นผิวผลิตภัณฑ์ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ละอองคาร์บอนไดออกไซด์ (คาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็ง) จะระเหิดเป็นสถานะแก๊ซเมื่อกระทบพื้นผิวผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งซึ่งไม่ได้ผ่านการกลายเป็นสถานะของเหลว

จากเหตุผลดังกล่าวจึงเกิดการศึกษาเทคโนโลยีใหม่คือเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเพื่อทดแทนเทคโนโลยีทำความสะอาดแบบเดิม ซึ่งส่วนประกอบสำคัญของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งคือหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น (Double Pipe Carbon dioxide Condensing Unit) ซึ่งมีหน้าที่ในการควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานะแก๊ซให้กลายเป็นสถานะของเหลว

ประสิทธิภาพของการผลิตละอองน้ำแห้งนั้นขึ้นกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับสารทำความเย็น (Refrigerants) หากประสิทธิภาพของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์นี้สูงก็สามารถผลิตละอองน้ำแข็งแห้งได้ดีโดยไม่ศูนย์เสียปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณหนึ่งหรือค่าใช้จ่ายด้านอื่นๆโดยเปล่าประโยชน์ซึ่งความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหัวใจหลักของงานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

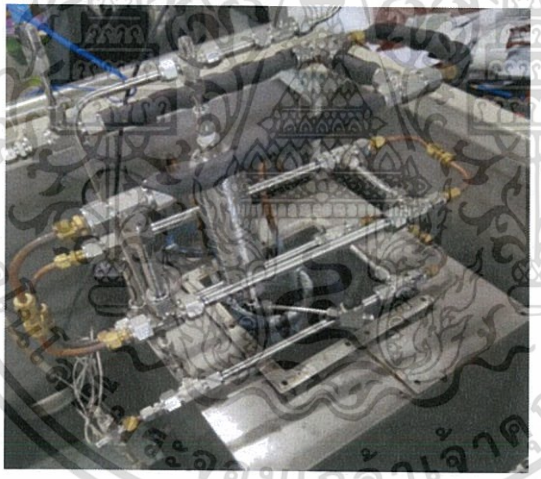
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) ของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการศึกษาการควบคุมความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเมื่อผ่านการควบแน่นในหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการทำงานของส่วนประกอบต่างๆของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆคือ เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องอัดก๊าซสารทำความเย็น (Compressor) หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น (Double Pipe Carbon dioxide Condensing Unit) ซึ่งหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ศึกษารายละเอียดของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์นี้ว่ามีประสิทธิภาพเพียงใดในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนสถานะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว



รูปที่ 1.1 หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) [3]

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซในบรรยากาศซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และ ออกซิเจน 2 อะตอม ต่อหนึ่งโมเลกุลและมักแทนด้วยสูตรเคมี CO_2 มีความหนาแน่น 1.98 kg/m^3 ซึ่งเป็นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ โมเลกุลประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ (O=C=O) หรือ น้ำหนักโมเลกุล 44.01 สามารถเปลี่ยนสถานะได้ทั้งหมด 4 สถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว ของแข็งและของไหลเหนือวิกฤติ ไม่ติดไฟ ไม่ทำปฏิกิริยาและไม่กัดกร่อนเป็นก๊าซที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 4 ในอากาศรองจากไนโตรเจน ออกซิเจน และ อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์หรือเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ซึ่งการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-Product) มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศจึงเป็นการชะลอการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกลงได้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก

2.1.1 น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice)

ละอองน้ำแข็งแห้งคือคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็งกับก๊าซผลิตได้โดยการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในถังบรรจุความดันสูงมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวภายใต้ความดันสูงจากนั้นปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวออกสู่ความดันบรรยากาศซึ่งเป็นการลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้คือละอองน้ำแข็งแห้งที่เย็นจัดอุณหภูมิประมาณ -79 °C กระบวนการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งสกปรกจำนวนฝุ่นขนาดเล็กกว่าระดับไมครอนโดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งเป็นกลไกหลักในการทำความสะอาด การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้มุ่งเน้นการทำความสะอาดที่ต้องการความสะอาดในระดับสูงและต้องการความแม่นยำซึ่งไม่ทำความเสียหายแก่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์และไม่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีหลังทำความสะอาดแต่อย่างใด นอกจากนี้น้ำแข็งแห้งยังมีประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมถนอมอาหาร การยับยั้ง การเจริญเติบโตของแบคทีเรียเพื่อรักษาสภาพศพ ใช้ทำหมอกควันในการแสดงต่างๆ การเก็บรักษาเวชภัณฑ์อุปกรณ์ทางการแพทย์ บดเย็นวัสดุสังเคราะห์ที่แตกยาก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การคำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์

ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ ซึ่ง ความดันสามารถปรับเพิ่มลดได้ที่ความดันขาเข้าส่วนอุณหภูมิปรับเพิ่มลดได้จากปริมาณสารทำความเย็นที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใส่เข้าไปในระบบ โดยในที่นี้คำนวณความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder จากสมการของ Peng-Robinson [4]

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha(T)}{v^2+2bv-b^2} \tag{2.1}$$

โดย

$$a = 0.45724\frac{R^2T_c^2}{P_c} \tag{2.2}$$

$$b = 0.0778\frac{RT_C}{P_c} \tag{2.3}$$

$$\alpha(T) = [1+\kappa(1-\sqrt{T_r})]^2 \tag{2.4}$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \tag{2.5}$$

ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์คำนวณจาก

$$\rho = \frac{MW}{v} \tag{2.6}$$

เมื่อ P คือ ความดันที่วัดได้ใน Cylinder (N/m^2, bar)

T คือ อุณหภูมิที่วัดได้ใน Cylinder (K)

R คือ ค่าคงที่แก๊ส (Pa.m^3/mol.K, J/mol.K)

v คือ ปริมาตรเชิงโมล (m^3/mol)

T_C คือ อุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 304.2 K

P_C คือ ความดันวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 73.76 bar

T_r คือ อุณหภูมิลด (Reduce Temperature)

ω คือ Pitzer Acentric Factor ของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.224

MW คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 44.01 g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารทำความเย็น [1]

สารทำความเย็น หมายถึง สารทำงาน (Working Fluid) ที่ทำให้ระบบอุณหภูมิลดลงโดยการดูดความร้อนจากระบบ สารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซจากนั้นเมื่อไอของสารทำความเย็นถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบก็จะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว ซึ่งทำงานหมุนเวียนอยู่ในระบบทำความเย็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆเป็นวัฏจักร สารทำความเย็นแบ่งประเภทได้หลายรูปแบบดังนี้

2.2.1 แบ่งตามกระบวนการผลิต

1. Natural refrigerants เช่น HC-600 (Isobutane), HC-290 (Propane), CO_2, ammonia
2. Synthesis refrigerants เช่น HCFCs, HFCs

2.2.2 แบ่งตามสมบัติ

1. Pure refrigerants เช่น HCFC-22, HFC-134a
2. Mixture refrigerants เช่น HFC-470C, HFC-410A

2.2.3 แบ่งตามสูตรเคมี

1. CFC (Chlorofluorocarbon) ประกอบด้วย คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R-11 R-12 หรือเรียกว่า CFC-11, CFC-12
2. HFC (Hydrofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R-407C หรือเรียกว่า HFC-407C, R404A และ R-134a หรือเรียกว่า HFC-134a ที่นำมาใช้แทน R-12
3. HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R-22 หรือเรียกว่า HCFC-22 แต่สารตัวนี้มีคลอรีนผสมอยู่จึงกำลังจะยกเลิกใช้ภายในปี 2015
4. HC (Hydrocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน และคาร์บอน เช่น R-290 หรือเรียกว่า HC-290

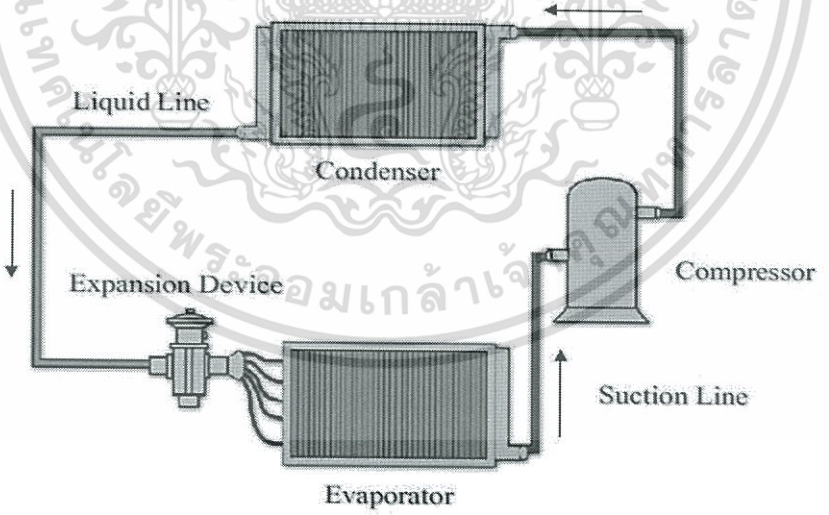
2.3 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression System) [2]

หลักการทำความเย็นเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่หนึ่ง ซึ่งต้องการทำความเย็นโดยความร้อนจะถูกส่งผ่านน้ำยาจากนั้นน้ำยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศภายนอกพื้นที่ น้ำยาจะเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยกระบวนการอัดน้ำยาให้เป็นไอ กระบวนการควบแน่น กระบวนการขยายตัวและกระบวนการระเหย ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะเกิดตามส่วนต่างๆของระบบ เช่น ที่คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ควบคุมการไหล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความเย็น (Refrigeration) คือกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่หรือวัตถุที่ ต้องการทำความเย็นหรือเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิของพื้นที่หรือวัตถุที่ต้องการทำความเย็นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิรอบๆ ระบบทำความเย็นและปรับอากาศที่ใช้ในปัจจุบันอาศัยการทำงานแบบอัดไอน้ำยาทำความเย็นด้วยคอมเพรสเซอร์เพื่อนำน้ำยาที่ทำความเย็นที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีกน้ำยาทำความเย็นจะไหลเวียนภายในระบบปิดอยู่ตลอดเวลา ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ คอยล์เย็น คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุมการไหล ซึ่งอุปกรณ์แต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้

1. คอยล์เย็น (Evaporator) ทำหน้าที่ดูดความร้อนจากพื้นที่หรือวัตถุที่ต้องการทำความเย็นไปใช้ในการเดือดกลายเป็นไอของน้ำยา
2. คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดน้ำยาให้ไหลเวียนภายในระบบพร้อมกับอัดไอน้ำยาที่มีความดันต่ำให้เป็นไอน้ำยาที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง
3. คอนเดนเซอร์ (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับไอน้ำยาที่มีอุณหภูมิสูงออกสู่อากาศภายนอกระบบเมื่อไอน้ำยาได้รับการระบายความร้อนจะเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวดังเดิม
4. อุปกรณ์ควบคุมการไหล (Expansion Valve) ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของน้ำยาที่ไหลเข้าคอยล์เย็น

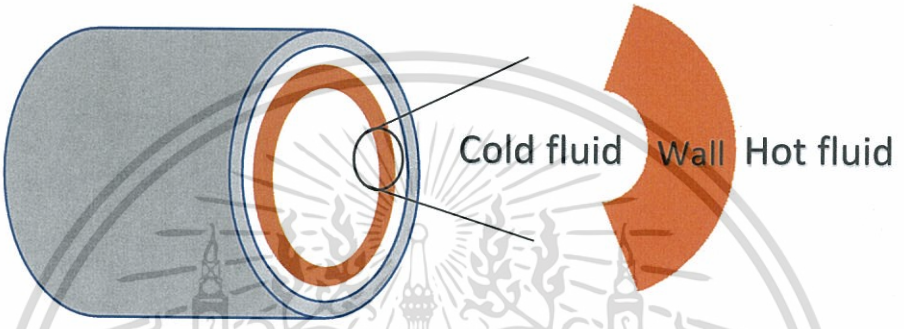


รูปที่ 2.1 วัฏจักรสารทำความเย็น [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น (Double-Pipe Carbon dioxide Condensing Unit) ที่มีหน้าที่ในการลดอุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเป็นท่อสองชั้นซึ่งท่อภายในเป็นท่อทองแดงสำหรับสารทำความเย็น ท่อภายนอกเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์และไหลในทิศทางเดียวกัน (Co-Current Flow)



รูปที่ 2.2 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองชั้น

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เกิดทั้งแบบนำความร้อน (Conduction) และพาความร้อน (Convection) ซึ่งท่อทองแดงเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับสารทำความเย็น สารทำความเย็นที่ใช้คือ R404A

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเกิดขึ้นบริเวณผนังท่อทองแดงซึ่งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นการนำความร้อนตามแนวรัศมี

จาก Fourier's Law of Heat Conduction

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.7}$$

ในที่นี้เป็นการนำความร้อนแบบท่อทรงกระบอก

$$q = -kA_r\frac{dT}{dr} \tag{2.8}$$

$$q\int_{r_i}^{r_o}\frac{dr}{A_r} = -k\int_{T_i}^{T_o}dT \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_r คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อทองแดงตามแนวรัศมี มีค่าเท่ากับ $2\pi rL$ (m^2)

$$q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{2\pi rL} = -k \int_{T_i}^{T_o} dT \tag{2.10}$$

$$\frac{q}{2\pi L} ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) = -k(T_0 - T_i) \tag{2.11}$$

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_0)}{ln(\frac{r_0}{r_i})}$$

$$q = \frac{(T_i - T_0)}{ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)/2\pi kL} \tag{2.12}$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (W)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (W/m.K)

T_i คือ อุณหภูมิผนังท่อภายใน (°C, K)

T_0 คือ อุณหภูมิผนังท่อภายนอก (°C, K)

r_i คือ รัศมีท่อภายใน (m)

r_0 คือ รัศมีท่อภายนอก (m)

L คือ ความยาวของท่อที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน (m)

2.4.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เกิดขึ้นทั้งบริเวณภายในท่อทองแดงซึ่งมีการไหลของสารทำความเย็นและภายนอกท่อทองแดงซึ่งมีการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

จาก Newton's Law of Cooling

$$q = hA(T_W - T_\infty)$$

$$q = \frac{T_W - T_\infty}{\frac{1}{hA}} \tag{2.13}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนภายในท่อทองแดง

$$q = \frac{T_{W_i} - T_\infty}{\frac{1}{h_i A_i}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = \frac{T_{W_i} - T_\infty}{\frac{1}{h_i 2\pi r_i L}} \quad (2.14)$$

ทำนองเดียวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนภายนอกท่อทองแดง

$$q = \frac{T_{W_o} - T_\infty}{\frac{1}{h_o 2\pi r_o L}} \quad (2.15)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W)

T_{W_i} คือ อุณหภูมิของผนังท่อภายใน (^oC, K)

T_{W_o} คือ อุณหภูมิของผนังท่อภายนอก (^oC, K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล (^oC, K)

h_i คือ *สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ* (Heat Transfer Coefficient) (W/m^2.K)

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (W/m^2.K)

r_i *คือ* รัศมีภายในท่อ (m)

r_o *คือ* รัศมีภายนอกท่อ (m)

L คือ ความยาวท่อ (m)

สมการการถ่ายเทความร้อนข้างต้นจะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

2.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) [5]

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลสองชนิดเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลทั้งสอง และพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีหน่วยเป็น W/m^2.K หรือ W/m^2.^{o}C ดังสมการ

จาก $$q = UA\Delta T_{lm}$$

$$U = \frac{q}{A\Delta T_{lm}} \quad (2.16)$$

และการพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนสองแหล่งในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยพิจารณาผลของค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมดจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

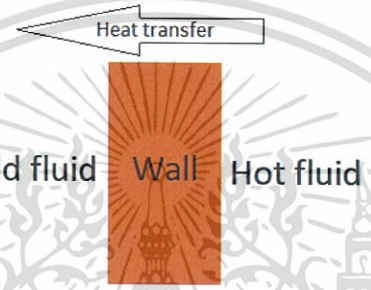
$$q = \frac{\Delta T_{lm}}{R_t} \tag{2.17}$$

เมื่อ R_t คือ ความต้านทานความร้อนรวม (K/W, °C/W)

เพราะฉะนั้น

$$U = \frac{1}{R_t A} \tag{2.18}$$

ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม $(\mathrm{R_t})$ เกิดขึ้นทั้งบริเวณภายใน ผนังท่อและภายนอกของท่อทองแดง



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังท่อทองแดง

ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม

$$R_t = R_i + R_{wall} + R_o \tag{2.19}$$

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} \tag{2.20}$$

$$R_{wall} = ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) / 2\pi kL \tag{2.21}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o A_o} \tag{2.22}$$

เมื่อ R_i คือ ความต้านทานความร้อนบริเวณผิวภายในท่อทองแดง (K/W, °C/W)

R_{wall} คือ ความต้านทานความร้อนบริเวณผนังท่อทองแดง (K/W, °C/W)

R_o คือ ความต้านทานความร้อนบริเวณผิวภายนอกท่อทองแดง (K/W, °C/W)

A_i คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ (m^2)

A_o คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายนอกท่อ (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอ้างอิงค่า A_i

$$U_i = \frac{1}{R_t A_i}$$

$$U_i = \frac{1}{[\frac{1}{h_i A_i} + \frac{ln(\frac{r_0}{r_i})}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}]A_i} \quad (2.23)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอ้างอิงค่า A_o

$$U_o = \frac{1}{R_t A_o}$$

$$U_o = \frac{1}{[\frac{1}{h_i A_i} + \frac{ln(\frac{r_0}{r_i})}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}]A_o} \quad (2.24)$$

จาก $$h_i = \frac{Nu_i k}{D_i} \quad (2.25)$$

$$h_o = \frac{Nu_o k}{D_H} \quad (2.26)$$

เมื่อ Nusselt number เป็นฟังก์ชันกับ Reynold number (Re) และ Prandtl number (Pr)

$$Nu_d = f(Re_d, Pr)$$

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ $Nu_d = 0.145 Re_d^{0.8} Pr^n$

สำหรับ 0.6< Pr < 100 และ2500 < Red < 1.25 x 10^5

n = 0.4 สำหรับ Heating Fluid

n = 0.3 สำหรับ Cooling Fluid

จะได้ $$Nu_i = 0.145 Re_i^{0.8} Pr^{0.3} = 0.145 Re_{R404A}^{0.8} Pr_{R404A}^{0.3} \quad (2.27)$$

$$Nu_o = 0.145 Re_o^{0.8} Pr^{0.3} = 0.145 Re_{CO_2}^{0.8} Pr_{CO_2}^{0.4} \quad (2.28)$$

จาก $$Re = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{\dot{m} D}{\mu a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re_{R404A} = \frac{\dot{m}_i D_{i,c}}{\mu_i a_i} = \frac{\dot{m}_{R404A} D_{i,c}}{\mu_{R404A} a_i} \quad (2.29)$$

$$Re_{CO_2} = \frac{\dot{m}_o D_o}{\mu_o a_o} = \frac{\dot{m}_{CO_2} D_H}{\mu_{CO_2} a_o} \quad (2.30)$$

$$D_H = \frac{4\pi\left(D_{i,s}^2 - D_{o,c}^2\right)}{\pi\left(D_{i,s} + D_{o,c}\right)}$$

$$D_H = D_{i,s} - D_{o,c} \quad (2.31)$$

เมื่อ $D_{i,c}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อทองแดง (m)

D_H คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง hydraulic แบบวงแหวน (m)

$D_{i,s}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (m)

$D_{o,c}$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อทองแดง (m)

a_i คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของสารทำความเย็น (m^2)

a_o คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (m^2)

2.4.4 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นชนิด R404A

อัตราการไหลของสารทำความเย็นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของสารทำความเย็น แต่พารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถวัดได้โดยตรงเพราะสารทำความเย็นไหลวนภายในระบบปิด ดังนั้นต้องใช้วิธีการคำนวณโดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลระหว่างสารทำความเย็น R404A กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหน่วยควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ Energy balance [6]

$$\dot{E_{in}} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{system}}{dt} \tag{2.32}$$

เนื่องจากทำการวัดอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่อเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่

$$\frac{dE_{system}}{dt} = 0$$

$$\dot{E_{in}} = \dot{E}_{out} \tag{2.33}$$

ดังนั้น

$$\dot{m}_{CO_{2_{in}}} h_{CO_{2_{in}}} + \dot{m}_{R404A_{in}} h_{R404A_{in}} = \dot{m}_{CO_{2_{out}}} h_{CO_{2_{out}}} + \dot{m}_{R404A_{out}} h_{R404A_{out}} \tag{2.34}$$

เมื่อ $$\dot{m}_{CO_{2_{in}}} = \dot{m}_{CO_{2_{out}}} = \dot{m}_{CO_2}$$

$$\dot{m}_{R404A_{in}} = \dot{m}_{R404A_{out}} = \dot{m}_{R404A}$$

จะได้ $$\dot{m}_{CO_2}\left(h_{CO_{2_{in}}} - h_{CO_{2_{out}}}\right) = \dot{m}_{R404A}\left(h_{R404A_{out}} - h_{R404A_{in}}\right) \tag{2.35}$$

เมื่อ $\dot{m}_{CO_2}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/s)

$\dot{m}_{R404A}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R404A (kg/s)

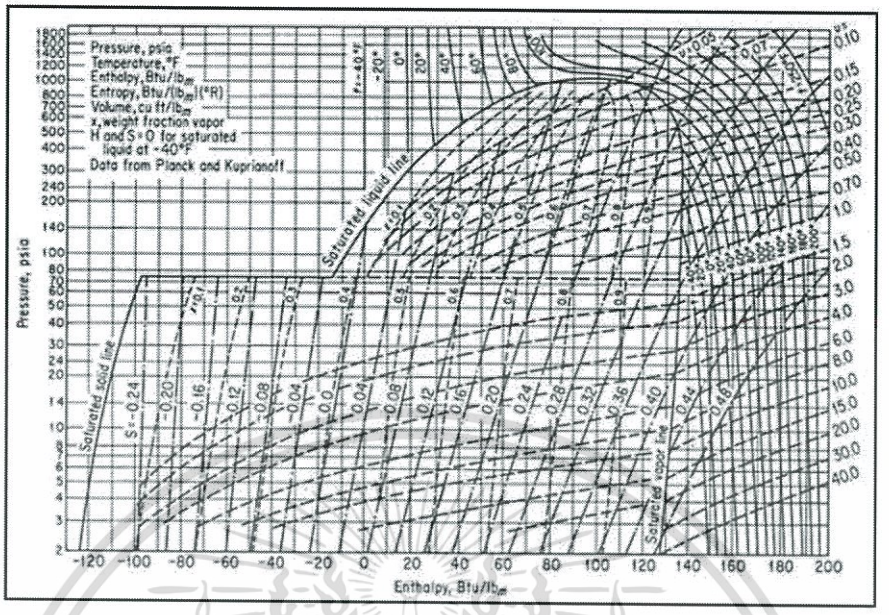
$h_{CO_{2_{in}}}$ คือ เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (kJ/kg)

$h_{CO_{2_{out}}}$ คือ เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (kJ/kg)

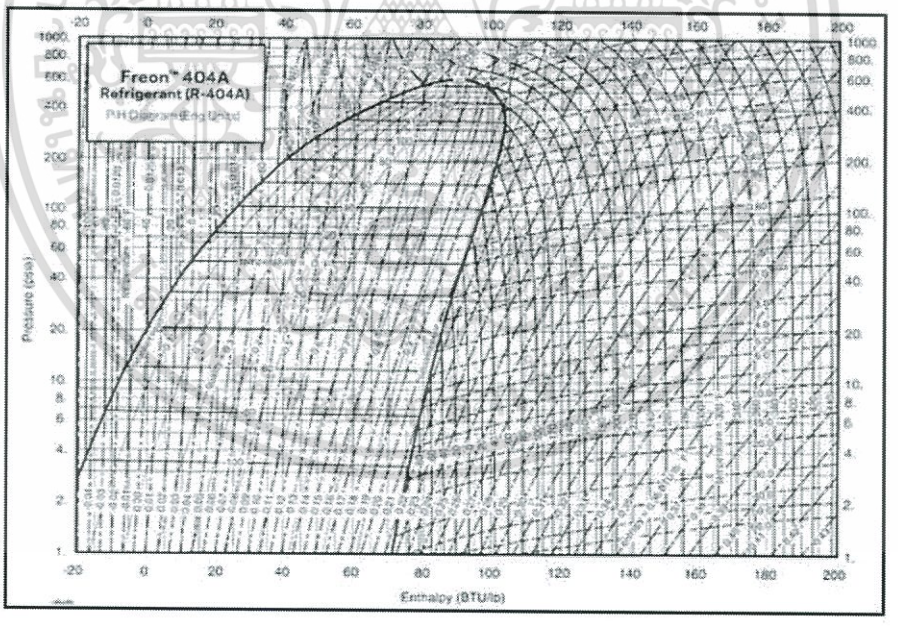
$h_{R404A_{in}}$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็น R404A ขาเข้า (kJ/kg)

$h_{R404A_{out}}$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็น R404A ขาออก (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ [7]



รูปที่ 2.6 แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของสารทำความเย็น R404A [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 ชุดเครื่องพ่นละอองน้ำแข็ง ซึ่งประกอบด้วย

1. หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น (Double-Pipe Carbon dioxide Condensing Unit)
2. เครื่องระเหย (Evaporator)
3. เครื่องอัดก๊าซสารทำความเย็น (Compressor) ขนาด 1/2 แรงม้า
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่จุดต่างๆ คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหลวในที่อยู่ในกระบอก สารทำความเย็นขาเข้า สารทำความเย็นขาออกของทรงกระบอกซึ่งทรงกระบอก (cylinder) ที่มีขนาด 300 cm^3 เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น
5. เกจวัดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์กับสารทำความเย็น

3.1.2 ถังสารทำความเย็น R404A ICEBERG ขนาด 10.9 kg

3.1.3 ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาด 29 kg ความบริสุทธิ์ 99.9% จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4 ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาด 6 kg ความบริสุทธิ์ 99.9% จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.5 วาล์วพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

3.1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบเสถียร (Mettler Toledo รุ่น XS32001L)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะเติมสารทำความเย็นเข้าระบบ 250, 260, 270, 280, 290, 300 และ 320 g โดยทุกปริมาณสารทำความเย็นดังกล่าวจะปรับความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเป็น 600, 700 และ 800 psi ทุกปริมาณของสารทำความเย็นที่เติมเข้าไปในระบบ (ยกเว้นที่ 320 g ปรับความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่ความดัน 400, 450, 500, 600 , 700 และ 800 psi ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. จดบันทึกอุณหภูมิก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าซึ่งคืออุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง
2. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบ 250 g
3. ต่อถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาด 29 kg เปิดถังคาร์บอนไดออกไซด์โดยปรับความดันขาเข้า 600 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปิดระบบผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง (Compressor, Evaporator, Condenser ของวัฏจักรสารทำความเย็นทำงาน)
5. เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทั้งสองชนิดรอให้อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder คงที่
6. จดบันทึกอุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder อุณหภูมิของสารทำความเย็นขาเข้า อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออกและความดันของสารทำความเย็น
7. เพิ่มความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเป็น 700 psi
8. รอให้อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder คงที่
9. จดบันทึกอุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder อุณหภูมิของสารทำความเย็นขาเข้าอุณหภูมิสารทำความเย็นขาออกและความดันของสารทำความเย็น
10. เพิ่มความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเป็น 800 psi
11. รอให้อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder คงที่
12. จดบันทึกอุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์เหลวใน Cylinder อุณหภูมิของสารทำความเย็นขาเข้า อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออกและความดันของสารทำความเย็น
13. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
14. ปิดระบบ
15. เปลี่ยนถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นถังเล็กขนาด 6 kg โดยนำถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วางบนตราชั่ง
16. เปิดถังคาร์บอนไดออกไซด์โดยปรับความดันขาเข้า 600 psi
17. เปิดระบบผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง (Compressor, Evaporator, Condenser ของวัฏจักรสารทำความเย็นทำงาน)
18. ทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไปเทียบกับเวลา 30 วินาที
19. เพิ่มความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า 700 psi
20. ทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไปเทียบกับเวลา 30 วินาที
21. เพิ่มความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า 800 psi
22. ทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไปเทียบกับเวลา 30 วินาที
23. ปิดระบบ
24. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 260 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23
25. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 270 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 280 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23
27. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 290 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23
28. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 300 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23
29. เติมเติมสารทำความเย็นเข้าระบบเป็น 320 g แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 3 ถึง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อุณหภูมิและความนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกของแต่ละสภาวะการทดลอง

ในแต่ละสภาวะการทดลองสามารถนำผลที่ได้คือความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิขาออก (อุณหภูมิใน Cylinder) มาคำนวนความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้สมการของ Peng-Robinson (2.1) ซึ่งผลการทดลองที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นผลการทดลองเฉลี่ยจากผลการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละสภาวะการทดลอง

ปริมาสารทำความเย็น R404A (g)	ความดันขาเข้าของ CO_2 (psig)	อุณหภูมิของ CO_2 ขาออก (^oC)	ความหนาแน่นของ CO_2 ขาออก(kg/m^3)	สถานะของ CO_2 ขาออก
250	600	9	121.8	Superheated Vapor
	700	15	149.0	Superheated Vapor
	800	20	182.9	Superheated Vapor
260	600	9	121.8	Superheated Vapor
	700	14.33	151.2	Superheated Vapor
	800	20	182.9	Superheated Vapor
270	600	9	121.8	Superheated Vapor
	700	14.67	150.0	Superheated Vapor
	800	20.33	181.2	Superheated Vapor
280	600	8	121.0	Superheated Vapor
	700	14.33	123.8	Superheated Vapor
	800	20	151.2	Superheated Vapor
290	600	8	123.8	Superheated Vapor
	700	14.67	150.1	Superheated Vapor
	800	19.33	186.8	Superheated Vapor
300	600	8	123.8	Superheated Vapor
	700	14	152.3	Superheated Vapor
	800	19	783.8	Subcooled Liquid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

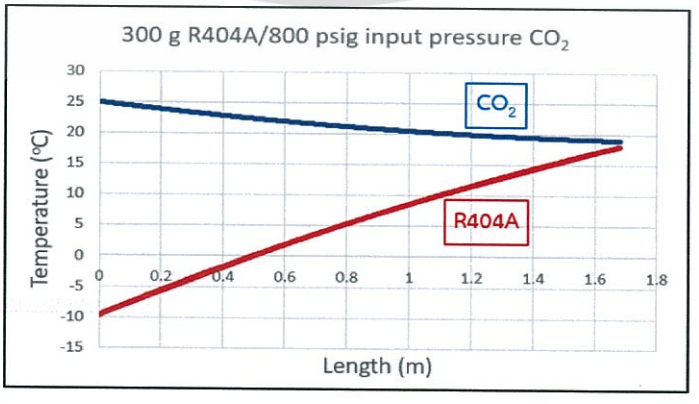
ปริมาสารทำความเย็น R404A (g)	ความดันขาเข้าของ CO_2 (psig)	อุณหภูมิของ CO_2 ขาออก (°C)	ความหนาแน่นของ CO_2 ขาออก (kg/m^3)	สถานะของ CO_2 ขาออก
320	400	-2	73.5	Superheated Vapor
	450	2	85.5	Superheated Vapor
	500	5	94.6	Superheated Vapor
	600	8.33	123.2	Superheated Vapor
	700	13.67	832.4	Subcooled Liquid
	800	19	783.8	Subcooled Liquid

จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 กรัม ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์800 psig ปริมาณสารทำความเย็น 320 กรัม ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig และปริมาณสารทำความเย็น 320 กรัม ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig สามารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ ซึ่งถ้าดำเนินการที่ 3 สภาวะนี้จะมีประสิทธิภาพในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งโดยที่ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทิ้งอย่างสูญเปล่า

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ

ในหัวข้อนี้จะนำผลการทดลองในสภาวะที่คาร์บอนไดออกไซด์สามารถควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นช่วงใดของท่อที่สภาวะต่างๆ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

4.2.1 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (300 g 800psig)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

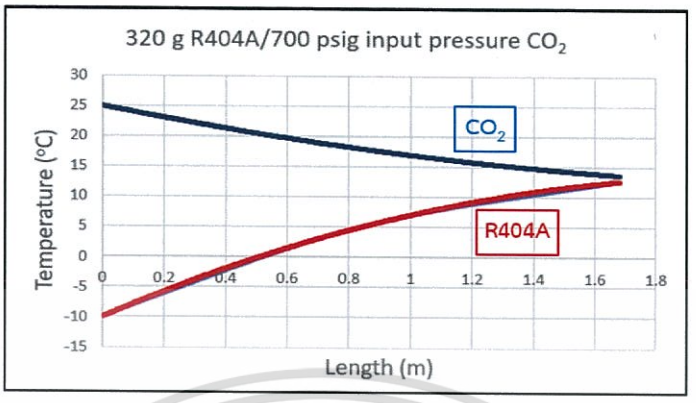
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ความยาวท่อ (m)	อุณหภูมิ CO_2 (°C)	สถานะของ CO_2
0	25.00	Superheated Vapor
0.10	24.39	Superheated Vapor
0.21	23.81	Superheated Vapor
0.32	23.26	Superheated Vapor
0.42	22.75	Superheated Vapor
0.52	22.26	Superheated Vapor
0.63	21.81	Superheated Vapor
0.74	21.39	Superheated Vapor
0.84	21.00	Superheated Vapor
0.94	20.64	Superheated Vapor
1.05	20.31	Superheated Vapor
1.16	20.01	Superheated Vapor
1.26	19.75	Superheated Vapor
1.36	19.51	Superheated Vapor
1.47	19.31	Superheated Vapor
1.58	19.14	Subcooled Liquid
1.68	19.00	Subcooled Liquid

จากผลการทดลองพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวช่วงปลายท่อที่ความยาวประมาณ 1.58 m ส่วนช่วงต้นและกลางท่อมีสถานะเป็นก๊าซเนื่องจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำเกินไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในช่วงต้นและช่วงกลางท่อต่ำเกินไปซึ่งจะทำการวิเคราะห์ต่อไปในหัวข้อ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (320 g 700psig)

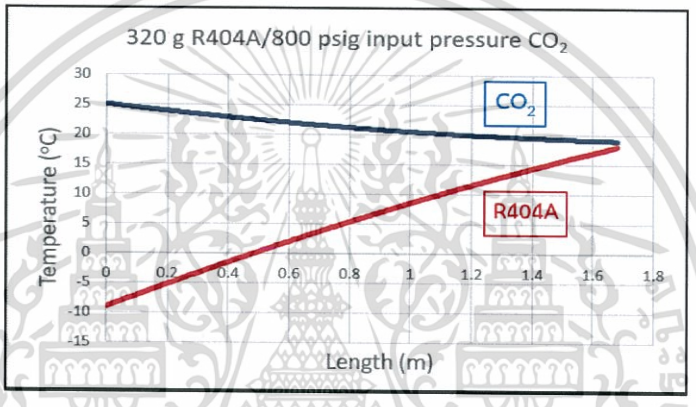
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig

ความยาวท่อ (m)	อุณหภูมิ CO_2 (°C)	สถานะของ CO_2
0	25.00	Superheated Vapor
0.10	23.98	Superheated Vapor
0.21	23.00	Superheated Vapor
0.32	22.06	Superheated Vapor
0.42	21.17	Superheated Vapor
0.52	20.31	Superheated Vapor
0.63	19.50	Superheated Vapor
0.74	18.73	Superheated Vapor
0.84	18.00	Superheated Vapor
0.94	17.31	Superheated Vapor
1.05	16.66	Superheated Vapor
1.16	16.06	Superheated Vapor
1.26	15.50	Superheated Vapor
1.36	14.98	Superheated Vapor
1.47	14.50	Superheated Vapor
1.58	14.06	Superheated Vapor
1.68	13.66	Subcooled Liquid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวช่วงปลายท่อที่ความยาวประมาณ 1.68 m ส่วนช่วงต้นและกลางท่อมีสถานะเป็นก๊าซเนื่องจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำเกินไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในช่วงต้นและช่วงกลางท่อต่ำเกินไปซึ่งจะทำการวิเคราะห์ต่อไปในหัวข้อ 4.3

4.2.3 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นกับความยาวท่อ (320 g 800psig)

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิ สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวท่อช่วงต่างๆที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ความยาวท่อ (m)	อุณหภูมิ CO_2 (°C)	สถานะของ CO_2
0	25.00	Superheated Vapor
0.10	24.39	Superheated Vapor
0.21	23.81	Superheated Vapor
0.32	23.27	Superheated Vapor
0.42	22.75	Superheated Vapor
0.52	22.27	Superheated Vapor
0.63	21.81	Superheated Vapor
0.74	21.39	Superheated Vapor
0.84	21.00	Superheated Vapor
0.94	20.64	Superheated Vapor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวท่อ (m)	อุณหภูมิ CO_2 (°C)	สถานะของ CO_2
1.05	20.31	Superheated Vapor
1.16	20.02	Superheated Vapor
1.26	19.75	Superheated Vapor
1.36	19.52	Superheated Vapor
1.47	19.31	Superheated Vapor
1.58	19.14	Subcooled Liquid
1.68	19.00	Subcooled Liquid

จากผลการทดลองทราบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวช่วงปลายท่อที่ความยาวประมาณ 1.57 m ส่วนช่วงต้นและกลางท่อมีสถานะเป็นก๊าซ เนื่องจากประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำเกินไปหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในช่วงต้นและช่วงกลางท่อต่ำเกินไปซึ่งทำการวิเคราะห์ต่อไปในหัวข้อ 4.3

4.3 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) จากทฤษฎีเปรียบเทียบกับการคำนวณจากการทดลอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อ 4.2 ของแต่ละสภาวะการทดลองทำให้ทราบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นของเหลวช่วงใดของท่อจึงนำข้อมูลมาคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ โดยการคำนวณจะคำนวณแยกตามสถานะของสาร กล่าวคือ สารทำความเย็น R404A จะมีช่วงที่เป็นของเหลวกับก๊าซ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะมีช่วงที่เป็นก๊าซกับของเหลว จึงส่งผลให้ในแต่ละสภาวะการทดลองที่สามารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้จริงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีหลายค่า ได้ผลการทดลองดังนี้

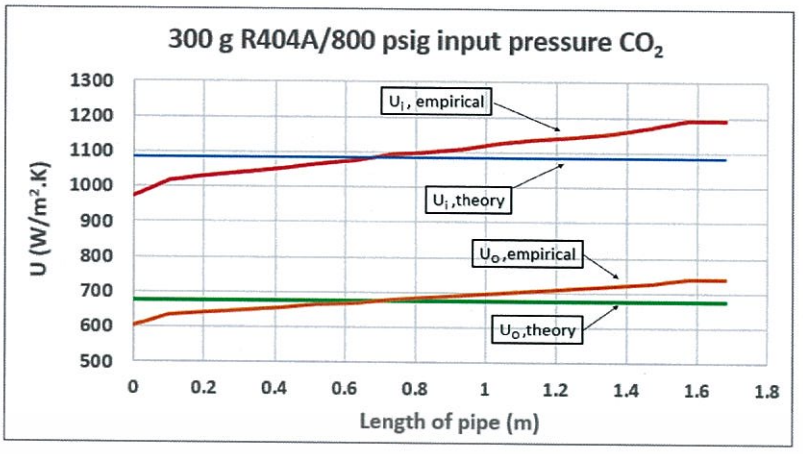
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อ ที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 800 psig

ความยาวท่อ (m)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม			
	การทดลอง		ทฤษฎี	
	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)
0	972.1	604.9	1084.8	674.8
0.10	1017.2	632.8	1084.8	674.8
0.21	1029.8	640.6	1084.8	674.8
0.32	1042.6	648.6	1084.8	674.8
0.42	1051.9	654.3	1084.8	674.8
0.52	1066.5	663.4	1084.8	674.8
0.63	1076.1	669.4	1084.8	674.8
0.74	1090.9	678.6	1084.8	674.8
0.84	1100.7	684.7	1084.8	674.8
0.94	1110.5	690.8	1084.8	674.8
1.05	1125.7	700.2	1084.8	674.8
1.16	1135.6	706.3	1084.8	674.8
1.26	1145.4	712.4	1084.8	674.8
1.36	1155.1	718.5	1084.8	674.8
1.47	1170.2	727.9	1084.8	674.8
1.58	1192.5	741.8	1084.8	674.8
1.68	1192.9	742.0	1084.8	674.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (300 g 800psig)

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทางทฤษฎีและจากการทดลองกับความยาวท่อ ที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองจะเท่ากับทางทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 0.74 m หรือช่วงกลางท่อซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงต้นท่อยังต่ำเกินไปในแง่ของการนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน

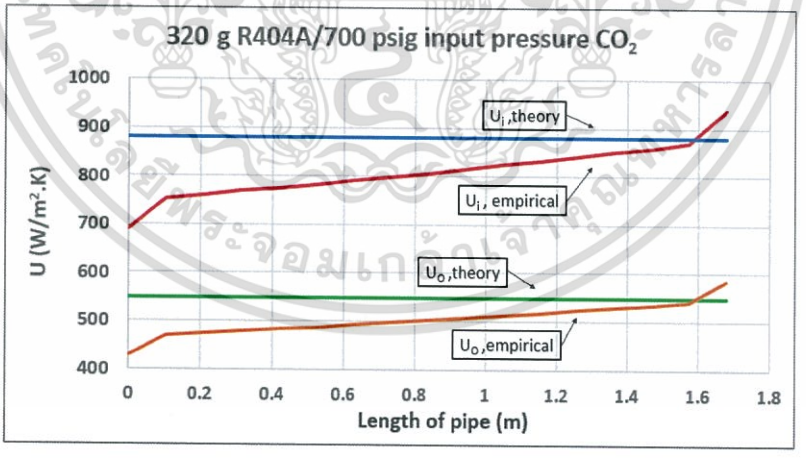
4.3.2 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 700 psig

ความยาวท่อ (m)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม			
	การทดลอง		ทฤษฎี	
	U_i (W/m².K)	U_o (W/m².K)	U_i (W/m².K)	U_o (W/m².K)
0	689.2	428.7	880.2	547.5
0.10	751.7	467.6	880.2	547.5
0.21	760.9	473.3	880.2	547.5
0.32	768.7	478.1	880.2	547.5
0.42	775.1	482.2	880.2	547.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวท่อ (m)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม			
	การทดลอง		ทฤษฎี	
	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)
0.52	781.8	486.3	880.2	547.5
0.63	791.9	492.6	880.2	547.5
0.74	799.0	497.0	880.2	547.5
0.84	806.3	501.6	880.2	547.5
0.94	815.3	507.2	880.2	547.5
1.05	824.6	512.9	880.2	547.5
1.16	832.5	517.8	880.2	547.5
1.26	842.0	523.8	880.2	547.5
1.36	851.8	529.8	880.2	547.5
1.47	858.0	533.8	880.2	547.5
1.58	869.8	541.1	880.2	547.5
1.68	938.8	583.9	880.2	547.5



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (320 g 700psig)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

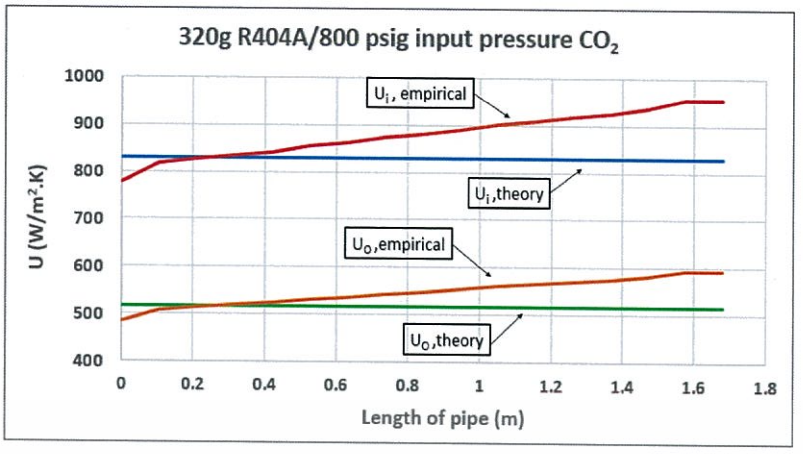
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทางทฤษฎีและจากการทดลองกับความยาวท่อ ที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองจะเท่ากับทางทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 1.58 m หรือช่วงปลายท่อซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงต้นและกลางท่อยังต่ำเกินไปที่จะควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์

4.3.3 การทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีและการทดลองกับความยาวท่อที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าออกสารทำความเย็น 800 psig

ความยาวท่อ (m)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม			
	การทดลอง		ทฤษฎี	
	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)	U_i (W/m^2.K)	U_o (W/m^2.K)
0	779.0	484.5	829.6	516.0
0.10	817.8	508.7	829.6	516.0
0.21	828.0	515.0	829.6	516.0
0.32	834.4	519.0	829.6	516.0
0.42	841.9	532.8	829.6	516.0
0.52	853.8	531.1	829.6	516.0
0.63	861.6	535.9	829.6	516.0
0.74	873.6	543.4	829.6	516.0
0.84	881.5	548.3	829.6	516.0
0.94	889.4	553.2	829.6	516.0
1.05	901.6	560.8	829.6	516.0
1.16	909.5	565.8	829.6	516.0
1.26	917.4	570.7	829.6	516.0
1.36	925.2	575.5	829.6	516.0
1.47	937.3	583.0	829.6	516.0
1.58	955.2	594.2	829.6	516.0
1.68	955.4	594.3	829.6	516.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีและจากการทดลอง (320 g 800psig)

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทางทฤษฎีและจากการทดลองกับความยาวท่อ ที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองจะเท่ากับทางทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 0.21 m หรือช่วงต้นของท่อ ดังนั้นประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะนี้ดีที่สุดในสามสภาวะที่นำมาวิเคราะห์ในแง่ของการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทางทฤษฎีและจากการทดลอง

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉลี่ยจากการทดลองและจากทฤษฎี

ปริมาณสารทำความเย็น (g)	ความดันขาเข้าของ CO_2 (psig)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม			
		การทดลอง		ทฤษฎี	
		U_i (W/m².K)	U_o (W/m².K)	U_i (W/m².K)	U_o(W/m².K)
300	800	1098.5	683.4	1084.8	674.8
320	700	809.3	503.4	880.2	547.5
	800	880.1	547.5	829.6	516.0

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉลี่ยที่คำนวณจากการทดลองและจากทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉลี่ยมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้งของเครื่องผลิตละอองน้ำแข็งแห้งชุดนี้คือที่ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig และที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 700, 800 psig ซึ่งสภาวะดังกล่าวมาสารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ ส่งผลให้สามารถผลิตละอองน้ำแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่สูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ายิ่งปริมาณสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นก็จะมีโอกาสที่สามารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวโดยใช้ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงระบบทำความเย็นด้วยว่าสามารถรองรับปริมาณสารทำความเย็นได้มากน้อยเพียงใด จากหัวข้อที่ 4.3 นำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.1.1 ปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 0.74 m ซึ่งเป็นช่วงกลางท่อแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงต้นของท่อยังต่ำเกินไปในแง่ของการนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน และจากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_i) ที่คำนวณจากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1192.9 $W/m^2.K$ เป็นช่วงที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดและเป็นช่วงที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

5.1.2 ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 1.58 m ซึ่งเป็นช่วงปลายท่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ำในช่วงต้นและกลางของท่อ อาจเป็นผลมาจากความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยเกินไปจึงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยไม่เพียงพอที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_i) ที่คำนวณจากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 938.8 $W/m^2.K$ เป็นช่วงที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดและเป็นช่วงที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

5.1.3 ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีที่ความยาวท่อประมาณ 0.21 m ซึ่งเป็นช่วงต้นของท่อ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนดีกว่าสองกรณีแรกที่นำมาวิเคราะห์ในแง่ของการนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกัน และจากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_i) ที่คำนวณจากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 955.4 $W/m^2.K$ เป็นช่วงที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดและเป็นช่วงที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

5.2 วิเคราะห์สภาวะในการทดลอง

จะเห็นได้ว่าที่สภาวะการทดลองปริมาณสารทำความเย็น 300 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 800 psig มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเฉลี่ยสูงสุดจึงกล่าวได้ว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตละอองน้ำแข็งแห้ง แต่ควรพิจารณาถึงความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder ด้วยเช่นกัน ที่ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 832.4 kg/m^3 ซึ่ง ณ สภาวะนี้ใช้ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าสภาวะแรกที่นำมาวิเคราะห์จึงมีความปลอดภัยมากกว่าและเป็นไปได้มากกว่าที่จะนำไปใช้ในการดำเนินการจริง ส่วนที่สภาวะการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็น 250 ถึง 290 g ทุกความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเนื่องจากว่าอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนกับคาร์บอนไดออกไซด์น้อยและส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าน้อย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 50 ถึง 120 $W/m^2.K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ความคลาดเคลื่อนในการทดลองหรือการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆอาจเกิดจากหลายปัจจัยเช่น อ่านค่าความดันจากเกจวัดความดันได้ไม่แม่นยำพอ การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็นโดยไม่ได้คำนึงถึงเอนทาลปีที่ระบบเสียไปหรือได้รับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทฤษฎีอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเนื่องจากไม่คิดการสูญเสียหรือได้รับเอนทาลปีจากภายนอกระบบ หุ้มฉนวนภายนอกที่หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นไม่มิดชิดเท่าที่ควรทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนเอนทาลปีกับอากาศภายนอกได้ เติมสารทำความเย็นตามน้ำหนักที่ต้องการได้ไม่แม่นยำพอ ผลอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาจากสมการเส้นตรงซึ่งเป็นเส้นที่สมมติขึ้นไม่เที่ยงตรงตามผลการทดลองจริง จดบันทึกผลการทดลองขณะที่ระบบยังไม่เข้าสถานะคงที่ (steady state) เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่างๆได้ ดังนั้นจึงควรใช้วิจารณญาณในการวิเคราะห์ผลการทดลองและระมัดระวังในการนำผลการทดลองไปใช้ต่อในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2560 **สารทำความเย็น** [online] ปทุมธานี MTEC: https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1648-สารทำความเย็น

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ. [PDF] กรุงเทพฯ กระทรวงพลังงาน 2553.

[3] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 2556 **คาร์บอนไดออกไซด์** [online] กรุงเทพฯ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี : http://www.tistr.or.th/ed/?p=566

[4] Milo D. Koretsky, 2012 **Engineering and Chemical Thermodynamics.** International Edition, Department of Chemical Engineering Oregon State University.

[5] YUNUS A. CENGEL, August 1998 **Heat transfer**. Second Edition.

[6] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, 2014 **Thermodynamics.** Eighth Edition in SI Unit.

[7] แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์: http://real-fitness.nl/thermodynamics-chart

[8] แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของสารทำความเย็น R404A: http://www.refrigerationbasics.com/RBIII/definitions2.htm

[9] พัชร พิริยะวิทยะ "การศึกษาการทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.

[10] Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Bruce E. Poling, 1987 **The Properties of Gases and Liquids.** Fourth Edition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองอุณหภูมิ-ความดันของสารที่สถานะต่างๆ

สารทำความเย็น R404A 250 กรัม

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39	166	-13	8
700	25	15	40	166	-13	14
800	25	20	42	166	-12	19

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39	166	-12	8
700	25	15	40	166	-13	14
800	25	20	41	166	-12	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39	166	-13	8
700	25	15	40	166	-12	14
800	25	20	42	166	-12	19

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39	166	-12.67	8
700	25	15	40	166	-12.67	14
800	25	20	41.67	166	-12	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 260 กรัม

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39	168	-14	8
700	25	14	40	168	-13	13
800	25	20	40.5	168	-12	19

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	40	170	-13	8
700	25	14	43.5	170	-11	13
800	25	20	44	170	-10	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	40	170	-14	8
700	25	15	40	170	-12	14
800	25	20	42	170	-10	19

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	39.67	169.33	-13.67	8
700	25	14.33	41.17	169.33	-12	13.33
800	25	20	42.17	169.33	-10.67	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 270 กรัม

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	35	148.75	-16	8
700	25	15	38	148.75	-15	14
800	25	21	40	148.75	-13	20

ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	10	40	155	-13	9
700	25	14	41	155	-12	13
800	25	20	43	155	-11	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	35	142.5	-16	7
700	25	15	38	142.5	-15	14
800	25	20	38.5	142.5	-14	19

ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	9	36.67	148.75	-15	8
700	25	14.67	39	148.75	-14	13.67
800	25	20.33	40.5	148.75	-12.67	19.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 280 กรัม

ตารางที่ ก-13 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	36.5	169	-15	7
700	25	14	36.5	169	-14	13
800	25	20	43.5	169	-11	19

ตารางที่ ก-14 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	40	167	-13	7
700	25	15	44.5	167	-11	14
800	25	20	45.5	167	-10	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	41	167.5	-12	7
700	25	14	43.5	167.5	-11	13
800	25	20	45	167.5	-10	19

ตารางที่ ก-16 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	39.17	167.83	-13.33	7
700	25	14.33	41.5	167.83	-12	13.33
800	25	20	44.67	167.83	-10.33	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 290 กรัม

ตารางที่ ก-17 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	39	167	-13	7
700	25	14	43	167	-12	13
800	25	20	45	167	-11	19

ตารางที่ ก-18 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	43.5	168	-11	7
700	25	15	42	168	-12	14
800	25	19	42	168	-12	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-19 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	40	168	-12	7
700	25	15	42	168	-11	14
800	25	19	43.5	168	-11	18

ตารางที่ ก-20 ผลการผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	40.83	167.67	-12	7
700	25	14.67	42.33	167.67	-11.67	13.67
800	25	19.33	43.5	167.67	-11.33	18.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 300 กรัม

ตารางที่ ก-21 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	44	172	-11	7
700	25	14	43.5	172	-11	13
800	25	19	48	172	-9	18

ตารางที่ ก-22 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	41.5	175	-12	7
700	25	14	42.5	175	-11	13
800	25	19	42	175	-11	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-23 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	42	175	-11	7
700	25	14	43	175	-10	13
800	25	19	43.5	175	-9	18

ตารางที่ ก-24 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
600	25	8	42.5	174	-11.33	7
700	25	14	43	174	-10.67	13
800	25	19	44.5	174	-9.67	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R404A 320 กรัม

ตารางที่ ก-25 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
400	25	-2	40	163	-12	-3
450	25	2	41.5	163	-12	1
500	25	5	46.5	163	-11	4
600	25	8	42	163	-12	7
700	25	15	43	163	-11	14
800	25	19	43.5	163	-11	18

ตารางที่ ก-26 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
400	25	-2	40	172	-12	-3
450	25	2	41.5	172	-12	1
500	25	5	46.5	172	-11	4
600	25	9	45	172	-10	8
700	25	14	48.5	172	-9	13
800	25	19	51	172	-7	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-27 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
400	25	-2	40	175	-12	-1
450	25	2	41.5	175	-12	1
500	25	5	46.5	175	-11	4
600	25	8	48	175	-10	7
700	25	12	45	175	-10	11
800	25	19	46	175	-9	18

ตารางที่ ก-28 ผลการทดลองเฉลี่ย

ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (psig)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (°C)	อุณหภูมิคาร์บอนไดออกไซด์ใน cylinder (°C)	ความดันสารทำความเย็น (psig)		อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้า (°C)	อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออก (°C)
			Low	High		
400	25	-2	40	170	-12	-2.33
450	25	2	41.5	170	-12	1
500	25	5	46.5	170	-11	4
600	25	8.33	45	170	-10.67	7.33
700	25	13.67	45.5	170	-10	12.67
800	25	19	46.83	170	-9	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

1. บันทึกน้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับเวลา

ทำการบันทึกน้ำหนักของถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดเล็กที่ลดลงขณะทำการทดลองที่ปริมาณสารทำความเย็นต่างๆและความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าต่างๆเทียบกับเวลา จากนั้นนำข้อมูลพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา ความชันของกราฟคืออัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ข-1 สารทำความเย็น 250 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	0
1	1	1	2	1	0
2	2	2	3	2	1
3	2	3	3	3	2
4	3	4	4	4	2
5	3	5	5	5	3
6	3	6	5	6	4
7	4	7	6	7	4
8	4	8	6	8	5
9	4	9	7	9	6
10	5	10	7	10	7
11	5	11	8	11	8
12	5	12	9	12	9
13	6	13	9	13	10
14	6	14	9	14	11
15	6	15	10	15	11
16	7	16	11	16	12
17	7	17	11	17	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
18	8	18	12	18	13
19	8	19	12	19	14
20	9	20	13	20	14
21	9	21	14	21	14
22	9	22	14	22	15
23	10	23	15	23	16
24	10	24	16	24	17
25	11	25	16	25	17
26	11	26	16	26	18
27	12	27	17	27	19
28	12	28	18	28	20
29	12	29	18	29	21
30	12	30	18	30	21
31	13	31	19	31	21
32	14	32	20	32	22
33	14	33	20	33	23
34	15	34	20	34	24
35	15	35	21	35	25
36	15	36	22	36	26
37	15	37	23	37	26
38	16	38	23	38	27
39	16	39	23	39	27
40	17	40	24	40	28
41	17	41	24	41	29
42	18	42	25	42	29
43	18	43	26	43	30
44	18	44	26	44	31
45	19	45	26	45	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
46	19	46	27	46	32
47	19	47	27	47	33
48	20	48	28	48	34
49	20	49	29	49	34
50	21	50	29	50	35
51	21	51	30	51	36
52	21	52	30	52	37
53	22	53	31	53	38
54	22	54	31	54	39
55	22	55	32	55	39
56	22	56	33	56	39
57	23	57	33	57	40
58	24	58	34	58	41
59	24	59	34	59	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 สารทำความเย็น 260 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	1
1	0	1	1	1	2
2	1	2	1	2	3
3	1	3	2	3	4
4	2	4	3	4	5
5	2	5	4	5	6
6	3	6	4	6	7
7	3	7	5	7	8
8	4	8	5	8	9
9	4	9	6	9	10
10	4	10	7	10	11
11	4	11	8	11	12
12	5	12	9	12	12
13	5	13	10	13	13
14	6	14	10	14	14
15	6	15	11	15	15
16	6	16	11	16	16
17	7	17	12	17	16
18	7	18	12	18	17
19	8	19	13	19	18
20	9	20	14	20	20
21	9	21	14	21	20
22	9	22	15	22	21
23	10	23	15	23	22
24	10	24	16	24	22
25	11	25	17	25	23
26	12	26	18	26	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
27	12	27	18	27	25
28	12	28	19	28	26
29	13	29	20	29	27
30	13	30	20	30	27
31	13	31	21	31	28
32	14	32	22	32	29
33	14	33	23	33	30
34	14	34	23	34	31
35	15	35	24	35	31
36	15	36	24	36	32
37	15	37	25	37	33
38	16	38	26	38	33
39	17	39	26	39	34
40	17	40	27	40	35
41	18	41	28	41	36
42	18	42	28	42	37
43	18	43	29	43	38
44	19	44	29	44	39
45	19	45	30	45	40
46	19	46	30	46	40
47	20	47	31	47	41
48	21	48	32	48	42
49	21	49	32	49	43
50	21	50	33	50	44
51	22	51	34	51	45
52	23	52	35	52	46
53	23	53	35	53	47
54	23	54	36	54	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
55	24	55	37	55	48
56	24	56	37	56	49
57	24	57	37	57	50
58	25	58	38	58	50
59	25	59	39	59	51

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 สารทำความเย็น 270 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	2
2	2	2	2	2	3
3	2	3	2	3	4
4	2	4	3	4	5
5	3	5	4	5	6
6	4	6	4	6	7
7	4	7	5	7	7
8	4	8	6	8	8
9	5	9	7	9	9
10	5	10	8	10	10
11	5	11	8	11	11
12	6	12	9	12	12
13	6	13	10	13	12
14	7	14	10	14	13
15	7	15	11	15	14
16	8	16	12	16	15
17	8	17	13	17	16
18	9	18	14	18	17
19	10	19	14	19	18
20	10	20	15	20	19
21	10	21	16	21	20
22	10	22	16	22	20
23	11	23	17	23	21
24	12	24	18	24	22
25	12	25	19	25	23
26	12	26	20	26	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
27	13	27	21	27	25
28	13	28	22	28	25
29	14	29	22	29	26
30	14	30	22	30	27
31	15	31	23	31	28
32	15	32	24	32	29
33	15	33	25	33	29
34	16	34	25	34	30
35	17	35	27	35	31
36	17	36	28	36	32
37	17	37	28	37	33
38	17	38	29	38	34
39	18	39	29	39	35
40	18	40	30	40	36
41	19	41	31	41	37
42	20	42	32	42	38
43	20	43	32	43	39
44	20	44	33	44	39
45	21	45	34	45	40
46	21	46	35	46	41
47	22	47	35	47	42
48	22	48	36	48	43
49	23	49	37	49	44
50	24	50	38	50	45
51	24	51	38	51	45
52	24	52	39	52	46
53	24	53	40	53	47
54	24	54	41	54	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
55	25	55	41	55	49
56	26	56	42	56	50
57	26	57	43	57	51
58	27	58	44	58	52
59	27	59	44	59	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 สารทำความเย็น 280 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	2
2	1	2	3	2	3
3	2	3	3	3	4
4	3	4	4	4	5
5	3	5	4	5	6
6	4	6	5	6	7
7	4	7	5	7	8
8	4	8	6	8	9
9	5	9	7	9	10
10	6	10	7	10	11
11	6	11	8	11	12
12	7	12	9	12	13
13	7	13	10	13	13
14	7	14	10	14	14
15	8	15	11	15	16
16	9	16	12	16	17
17	9	17	12	17	18
18	10	18	13	18	19
19	10	19	14	19	19
20	11	20	15	20	20
21	11	21	15	21	21
22	12	22	16	22	22
23	13	23	17	23	23
24	13	24	17	24	24
25	14	25	18	25	25
26	14	26	19	26	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
27	15	27	19	27	27
28	15	28	20	28	29
29	16	29	21	29	29
30	16	30	22	30	30
31	17	31	23	31	31
32	18	32	23	32	32
33	18	33	24	33	33
34	19	34	24	34	34
35	19	35	25	35	35
36	20	36	26	36	36
37	20	37	26	37	37
38	21	38	27	38	38
39	22	39	28	39	39
40	22	40	28	40	40
41	22	41	29	41	41
42	23	42	30	42	43
43	23	43	31	43	44
44	24	44	31	44	45
45	25	45	32	45	46
46	25	46	33	46	47
47	25	47	34	47	48
48	26	48	35	48	49
49	27	49	36	49	51
50	27	50	37	50	52
51	28	51	37	51	53
52	29	52	37	52	54
53	29	53	38	53	55
54	30	54	39	54	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
55	31	55	40	55	57
56	31	56	41	56	58
57	31	57	41	57	59
58	32	58	42	58	60
59	32	59	43	59	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 สารทำความเย็น 290 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
3	2	3	2	3	3
4	3	4	3	4	3
5	3	5	4	5	4
6	4	6	5	6	5
7	4	7	6	7	6
8	5	8	7	8	7
9	5	9	7	9	7
10	6	10	8	10	8
11	6	11	8	11	8
12	7	12	9	12	9
13	8	13	10	13	10
14	8	14	11	14	13
15	9	15	11	15	13
16	9	16	12	16	13
17	10	17	13	17	14
18	10	18	13	18	15
19	11	19	14	19	16
20	11	20	15	20	16
21	12	21	16	21	17
22	12	22	16	22	18
23	13	23	17	23	19
24	13	24	18	24	20
25	14	25	18	25	21
26	14	26	19	26	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
27	15	27	20	27	22
28	16	28	21	28	23
29	16	29	22	29	24
30	17	30	22	30	25
31	18	31	23	31	26
32	19	32	24	32	27
33	19	33	24	33	28
34	19	34	25	34	29
35	20	35	26	35	30
36	20	36	26	36	30
37	20	37	27	37	31
38	21	38	28	38	32
39	21	39	28	39	33
40	22	40	29	40	34
41	23	41	29	41	34
42	23	42	30	42	35
43	23	43	31	43	36
44	24	44	32	44	37
45	25	45	32	45	38
46	26	46	33	46	39
47	26	47	34	47	39
48	26	48	34	48	40
49	27	49	35	49	41
50	27	50	36	50	42
51	28	51	36	51	43
52	29	52	37	52	44
53	29	53	38	53	45
54	29	54	39	54	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
55	30	55	39	55	47
56	31	56	40	56	48
57	31	57	41	57	49
58	32	58	41	58	50
59	32	59	42	59	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 สารทำความเย็น 300 กรัม

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	0
1	1	1	2	1	1
2	2	2	3	2	3
3	3	3	3	3	4
4	4	4	4	4	5
5	5	5	6	5	7
6	5	6	7	6	8
7	6	7	7	7	9
8	7	8	8	8	10
9	8	9	10	9	12
10	8	10	11	10	13
11	9	11	12	11	15
12	9	12	12	12	16
13	10	13	13	13	17
14	11	14	14	14	18
15	11	15	15	15	19
16	12	16	16	16	20
17	14	17	17	17	22
18	14	18	18	18	23
19	15	19	19	19	24
20	16	20	20	20	26
21	17	21	21	21	27
22	18	22	21	22	28
23	18	23	22	23	29
24	19	24	23	24	30
25	20	25	23	25	31
26	20	26	25	26	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
27	21	27	26	27	34
28	21	28	27	28	35
29	22	29	28	29	36
30	23	30	29	30	37
31	24	31	30	31	39
32	24	32	31	32	40
33	25	33	32	33	41
34	26	34	32	34	42
35	27	35	33	35	43
36	27	36	34	36	45
37	28	37	35	37	46
38	29	38	36	38	47
39	29	39	37	39	48
40	30	40	38	40	49
41	31	41	39	41	51
42	32	42	40	42	52
43	32	43	41	43	53
44	33	44	42	44	55
45	34	45	43	45	56
46	35	46	44	46	57
47	36	47	45	47	59
48	36	48	46	48	60
49	37	49	46	49	61
50	38	50	47	50	62
51	38	51	48	51	63
52	39	52	49	52	64
53	40	53	50	53	65
54	40	54	51	54	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
55	41	55	51	55	67
56	42	56	52	56	69
57	43	57	52	57	70
58	44	58	54	58	72
59	44	59	55	59	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 สารทำความเย็น 320 กรัม

400 psig		450 psig		500 psig		600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	1	0	1	2	1	1	1	2	1	1
2	1	2	1	2	3	2	2	2	3	2	1
3	1	3	1	3	4	3	3	3	4	3	2
4	2	4	1	4	4	4	3	4	5	4	3
5	2	5	2	5	4	5	5	5	6	5	4
6	2	6	2	6	4	6	5	6	7	6	5
7	2	7	2	7	5	7	6	7	8	7	6
8	3	8	2	8	6	8	6	8	9	8	7
9	3	9	3	9	6	9	7	9	10	9	8
10	3	10	3	10	7	10	8	10	11	10	9
11	4	11	3	11	8	11	8	11	12	11	10
12	4	12	4	12	8	12	9	12	13	12	10
13	4	13	4	13	9	13	10	13	14	13	11
14	4	14	4	14	9	14	11	14	15	14	12
15	5	15	5	15	9	15	11	15	17	15	13
16	5	16	5	16	10	16	11	16	17	16	14
17	5	17	5	17	11	17	11	17	18	17	15
18	5	18	5	18	12	18	12	18	19	18	16
19	6	19	6	19	12	19	12	19	20	19	17
20	6	20	6	20	12	20	13	20	21	20	17
21	6	21	6	21	13	21	14	21	22	21	18
22	6	22	7	22	14	22	14	22	23	22	19
23	7	23	7	23	14	23	15	23	24	23	20
24	7	24	7	24	15	24	16	24	25	24	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 psig		450 psig		500 psig		600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
25	7	25	8	25	15	25	16	25	26	25	22
26	7	26	8	26	16	26	17	26	27	26	23
27	8	27	8	27	16	27	18	27	28	27	24
28	8	28	9	28	16	28	18	28	29	28	24
29	8	29	9	29	17	29	19	29	30	29	25
30	9	30	9	30	17	30	19	30	31	30	26
31	9	31	9	31	18	31	20	31	31	31	27
32	9	32	10	32	19	32	21	32	32	32	28
33	9	33	10	33	19	33	22	33	33	33	29
34	9	34	11	34	20	34	22	34	34	34	30
35	10	35	11	35	20	35	23	35	35	35	31
36	10	36	11	36	21	36	23	36	36	36	32
37	10	37	11	37	21	37	24	37	37	37	32
38	11	38	12	38	21	38	24	38	38	38	33
39	11	39	12	39	22	39	25	39	38	39	34
40	11	40	12	40	23	40	26	40	39	40	34
41	12	41	13	41	23	41	27	41	40	41	35
42	12	42	13	42	24	42	27	42	41	42	35
43	12	43	13	43	24	43	27	43	42	43	36
44	12	44	13	44	25	44	28	44	43	44	37
45	13	45	14	45	26	45	29	45	43	45	38
46	13	46	14	46	26	46	30	46	44	46	39
47	13	47	14	47	26	47	30	47	45	47	40
48	13	48	15	48	27	48	31	48	46	48	41
49	13	49	15	49	28	49	31	49	47	49	42
50	14	50	15	50	28	50	32	50	48	50	42

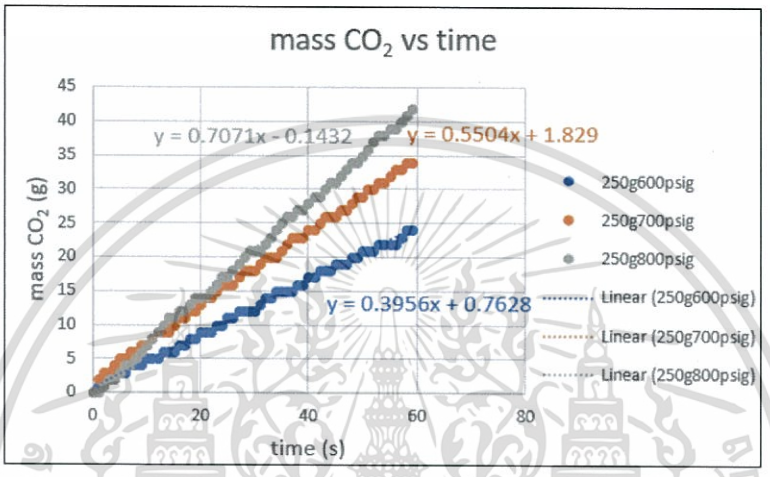
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 psig		450 psig		500 psig		600 psig		700 psig		800 psig	
Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)	Time (s)	Mass CO_2 (g)
51	14	51	16	51	29	51	33	51	49	51	43
52	14	52	16	52	29	52	33	52	49	52	44
53	15	53	16	53	29	53	34	53	50	53	44
54	15	54	17	54	30	54	35	54	51	54	46
55	15	55	17	55	30	55	35	55	52	55	46
56	15	56	17	56	30	56	36	56	53	56	47
57	16	57	17	57	31	57	36	57	54	57	48
58	16	58	18	58	32	58	37	58	55	58	49
59	16	59	18	59	33	59	38	59	56	59	50

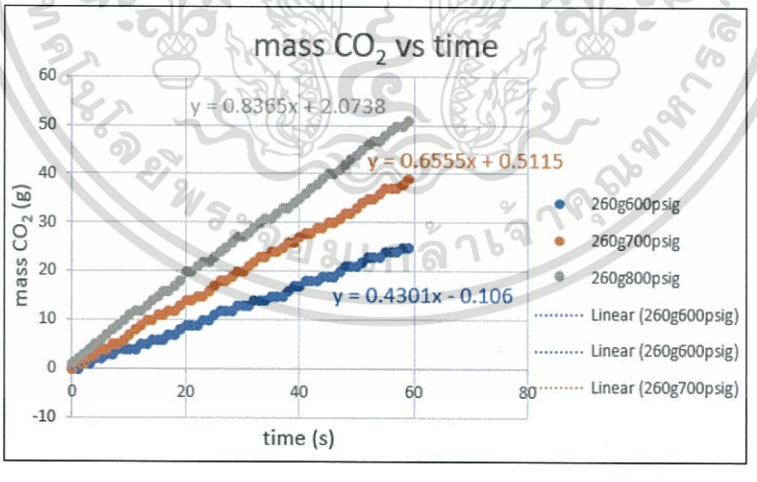
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่สภาวะการทดลองต่างๆ**

จากข้อที่ 1. นำผลการทดลองมาพลอตความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่สภาวะการทดลองต่างๆความชันของกราฟที่ได้คืออัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

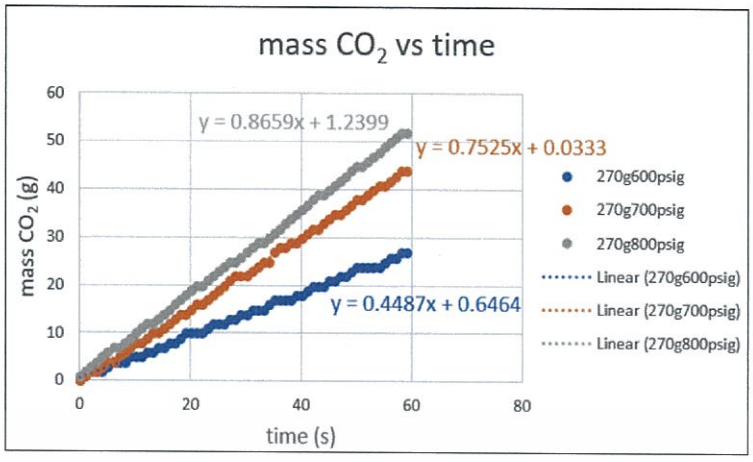


รูปที่ ข-1 ปริมาณสารทำความเย็น 250 g

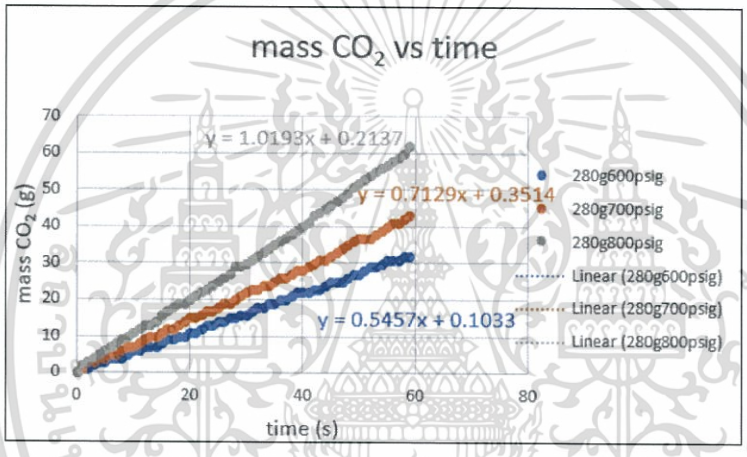


รูปที่ ข-2 ปริมาณสารทำความเย็น 260 g

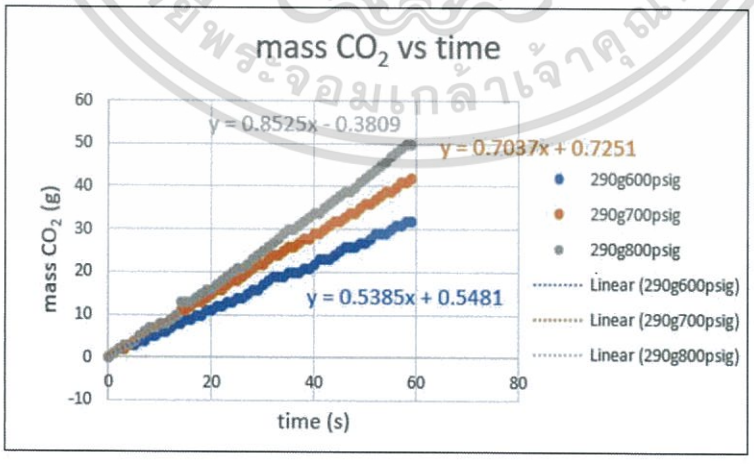
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 ปริมาณสารทำความเย็น 270 g

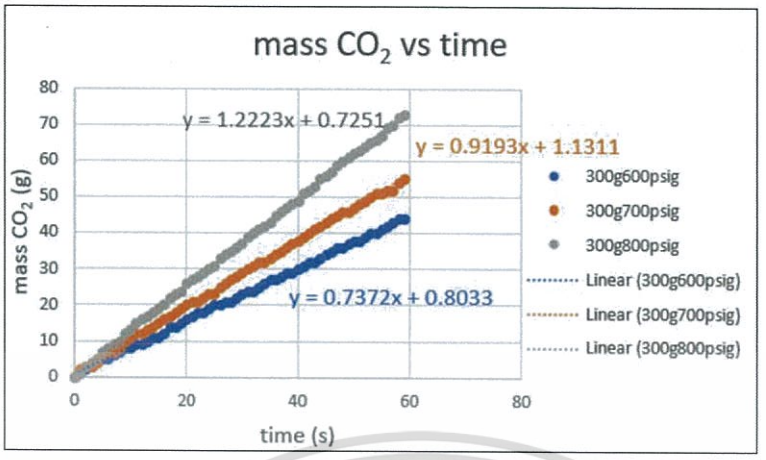


รูปที่ ข-4 ปริมาณสารทำความเย็น 280 g

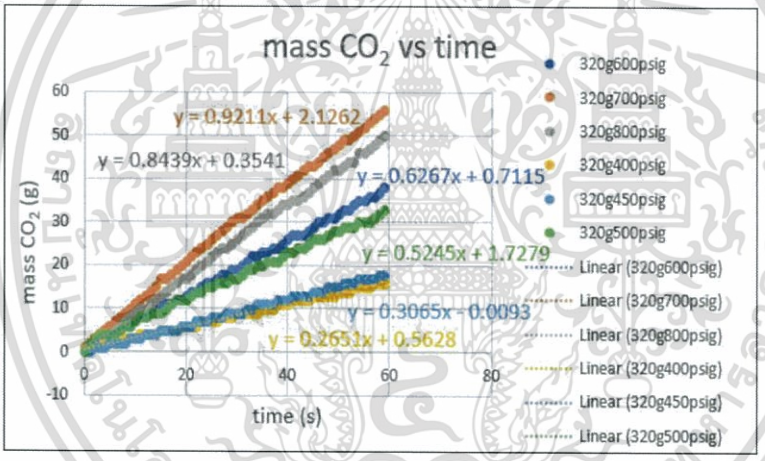


รูปที่ ข-5 ปริมาณสารทำความเย็น 290 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-6 ปริมาณสารทำความเย็น 300 g



รูปที่ ข-7 ปริมาณสารทำความเย็น 320 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 สรุปอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละสภาวะการทดลอง

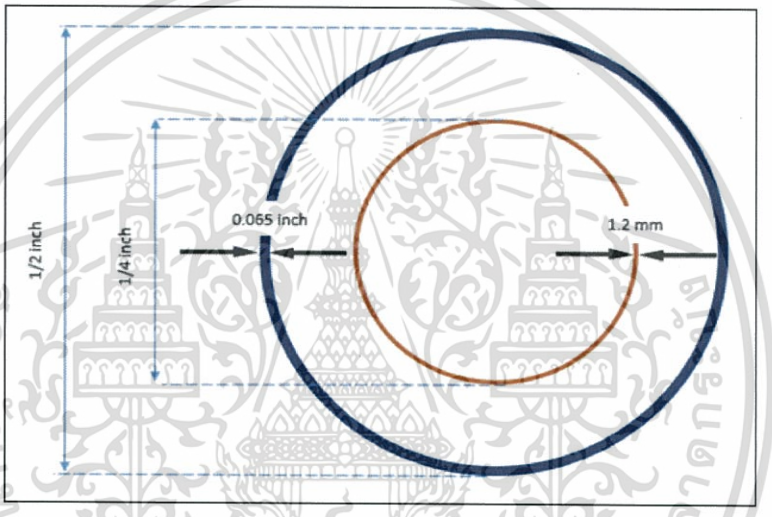
ปริมาณสารทำความเย็น (g)	ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ (psig)	อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/s)
250	600	3.95×10^{-4}
	700	5.50×10^{-4}
	800	7.07×10^{-4}
260	600	4.30×10^{-4}
	700	6.55×10^{-4}
	800	8.36×10^{-4}
270	600	4.48×10^{-4}
	700	7.52×10^{-4}
	800	8.66×10^{-4}
280	600	5.45×10^{-4}
	700	7.13×10^{-4}
	800	10.19×10^{-4}
290	600	5.38×10^{-4}
	700	7.04×10^{-4}
	800	8.52×10^{-4}
300	600	7.37×10^{-4}
	700	9.19×10^{-4}
	800	8.52×10^{-4}
320	400	2.65×10^{-4}
	450	3.06×10^{-4}
	500	5.24×10^{-4}
	600	6.26×10^{-4}
	700	8.44×10^{-4}
	800	9.21×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ขนาดของท่อสองชั้น

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นชนิด R404A กับคาร์บอนไดออกไซด์คือหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นซึ่งท่อภายในเป็นท่อทองแดงสำหรับสารทำวคามเย็น ท่อภายนอกเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาดดังรูปที่ ค-1 และมีความยาวส่วนที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน (L) 1.68 m



รูปที่ ค-1 ความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดงและท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

1. **ท่อทองแดง**

   เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ($D_{o,c}$)1/4 inch = 6.35×10^{-3} m

   ความหนา 1.2 มิลลิเมตร = 1.200×10^{-3} m

   เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ($D_{i,c}$) = $6.350 \times 10^{-3} - 2(1.200 \times 10^{-3}) = 3.950 \times 10^{-3}$ m

2. **ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม**

   เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ($D_{o,s}$) 1/2 inch = 12.700×10^{-3} m

   ความหนา 0.065 inch = 1.651×10^{-3} m

   เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ($D_{i,s}$) = $12.700 \times 10^{-3} - 2(1.651 \times 10^{-3}) = 9.398 \times 10^{-3}$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **พื้นที่หน้าตัดการไหลภายในท่อทองแดง (a_i,สำหรับสารทำความเย็น)**

สารทำความเย็นไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับ

$$a_i = \frac{\pi(3.950 \times 10^{-3})^2}{4} = 1.225 \times 10^{-5}\ \mathrm{m}^2$$

4. **พื้นที่หน้าตัดการไหลภายในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (a_o,สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์)**

คาร์บอนไดออกไซด์ไหลเป็นวงแหวนภายในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและไหลภายนอกท่อทองแดงซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับ

$$a_o = \frac{\pi(9.398 \times 10^{-3})^2}{4} - \frac{\pi(6.350 \times 10^{-3})^2}{4}$$
$$= 3.770 \times 10^{-5}\ \mathrm{m}^2$$

5. **เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (D_H)**

การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการไหลแบบไม่เต็มหน้าตัดเพราะเป็นท่อภายนอกซึ่งมีท่อภายในเป็นท่อทองแดง ดังนั้นการคิดพื้นที่หน้าตัดการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ต้องคิดเป็น Hydraulic diameter (D_H) มีค่าเท่ากับ

$$D_H = \frac{\frac{4\pi(D_{i,s}^2 - D_{o,c}^2)}{4}}{\pi(D_{i,s} + D_{o,c})}$$
$$= D_{i,s} - D_{o,c}$$
$$= 9.398 \times 10^{-3} - 6.350 \times 10^{-3}$$
$$= 3.048 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}$$

6. **พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน (A_i) และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายนอก (A_o) ท่อทองแดง**

$$A_i = \pi D_{i,c} L = \pi(3.950 \times 10^{-3})(1.680)$$
$$= 0.021\ \mathrm{m}^2$$
$$A_o = \pi D_{o,c} L = \pi(6.350 \times 10^{-3})(1.680)$$
$$= 0.034\ \mathrm{m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น

เนื่องจากสารทำความเย็นที่ใช้ไหลวนอยู่ภายในระบบทำความเย็นจึงไม่สามารถวัดโดยตรงจากการทดลองได้ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลของสารทำความที่สภาวะการทดลอง ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig

จากสมการ (2.35)

$$\dot{m}_{CO_2}\left(h_{CO_{2_{in}}} - h_{CO_{2_{out}}}\right) = \dot{m}_{R404A}\left(h_{R404A_{out}} - h_{R404A_{in}}\right)$$

จะได้

$$\dot{m}_{R404A} = \frac{\dot{m}_{CO_2}\left(h_{CO_{2_{in}}} - h_{CO_{2_{out}}}\right)}{\left(h_{R404A_{out}} - h_{R404A_{in}}\right)}$$

ที่สภาวะการทดลอง 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig

$\dot{m}_{CO_2} = 8.440 \text{ x } 10^{-4} \text{ kg/s}$

$h_{CO_{2_{in}}} = 444.000 \text{ kJ/kg}$

$h_{CO_{2_{out}}} = 236.060 \text{ kJ/kg}$

$h_{R404A_{in}} = 184.950 \text{ kJ/kg}$

$h_{R404A_{out}} = 380.560 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{m}_{R404A} = \frac{8.440 \text{ x } 10^{-4}(444.000 - 236.060)}{(380.560 - 184.950)}$$

$$= 8.970 \text{ x } 10^{-4} \text{ kg/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองที่สภาวะการทดลอง ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของแก๊ซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig ที่ความยาวท่อเริ่มต้น (0 m) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากทางทฤษฎีที่สภาวะเดียวกัน

1. ข้อมูลส่วนของสารทำความเย็น

ที่สภาวะการทดลอง 320 g ความดันขาเข้าของแก๊ซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig ที่ความยาวท่อเริ่มต้น (0 m) สารทำความเย็นมีอุณหภูมิ -10 °C ความดัน 170 psig จะได้

$$Re_{R404A} = \frac{\dot{m}_{R404A} D_i}{\mu_{R404A} a_i}$$

$$= \frac{(8.970 \times 10^{-4})(3.950 \times 10^{-3})}{(2.070 \times 10^{-4})\,(1.225 \times 10^{-5})}$$

$$= 1397.279$$

$$Nu_i = 0.145 Re_{R404A}^{0.8} Pr_{R404A}^{0.3}$$

$$= 0.145(1397.279)^{0.8}(3.586)^{0.3}$$

$$= 69.819$$

$$h_i = \frac{Nu_i k_{R404A}}{D_i}$$

$$= \frac{(69.819)(0.078)}{3.950 \times 10^{-3}}$$

$$= 1378.704 \frac{W}{m^2.K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์

ที่สภาวะการทดลอง 320 g ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig ที่ความยาวท่อเริ่มต้น (0 m) คาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิ 25 °C ความดัน 700 psig จะได้

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{CO_2}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{CO_2}} D_H}{\mu_{\mathrm{CO_2}} a_o}$$

$$= \frac{(8.44 \times 10^{-4})(3.048 \times 10^{-3})}{(1.751 \times 10^{-5})\ (3.77\ x\ 10^{-5})}$$

$$= 3896.996$$

$$\mathrm{Nu_o} = 0.145 \mathrm{Re}_{CO_2}^{0.8} \mathrm{Pr}_{\mathrm{CO_2}}^{0.4}$$

$$= 0.145(3896.996)^{0.8}(1.646)^{0.4}$$

$$= 131.984$$

$$h_o = \frac{\mathrm{Nu_o} k_{\mathrm{CO_2}}}{D_H}$$

$$= \frac{(131.984)(0.0271)}{3.048\ x\ 10^{-3}}$$

$$= 1173.480 \frac{W}{m^2.K}$$

3. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม

จากสมการ (2.19)

$$R_t = R_i + R_{wall} + R_o$$

$$= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$= \frac{1}{(1378.704)(0.021)} + \frac{\ln\left(\frac{3.950x\ 10^{-3}}{6.350\ x\ 10^{-3}}\right)}{2\pi(401)(1.680)} + \frac{1}{(1173.480)(0.034)}$$

$$= 0.060\ \frac{K}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (จากการทดลอง)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอ้างอิงพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน (U_i) คำนวณจากสมการ (2.23)

$$U_i = \frac{1}{R_t A_i}$$

$$U_i = \frac{1}{(0.060)(0.021)}$$

$$= 793.650 \frac{W}{m^2.K}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอ้างอิงพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายนอก (U_o) คำนวณจากสมการ (2.24)

$$U_i = \frac{1}{R_t A_o}$$

$$U_i = \frac{1}{(0.060)(0.034)}$$

$$= 490.196 \frac{W}{m^2.K}$$

5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (จากทางทฤษฎี)

ที่สภาวะการทดลอง ปริมาณสารทำความเย็น 320 g ความดันขาเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 psig คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้ามีอุณหภูมิ 25 °C ขาออก (ใน Cylinder) มีอุณหภูมิ 13.67 °C สารทำความเย็นขาเข้ามีอุณหภูมิ -10 °C ขาออกมีอุณหภูมิ 12.67 °C

จาก $$q = UA\Delta T_{lm} = \dot{m}_{CO_2}(h_{CO_{2_{in}}} - h_{CO_{2_{out}}})$$

$$= \dot{m}_{R404A}(h_{R404A_{out}} - h_{R404A_{in}})$$

จะได้ $$U = \frac{\dot{m}_{CO_2}(h_{CO_{2_{in}}} - h_{CO_{2_{out}}})}{A\Delta T_{lm}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,in}) - (T_{hot,out} - T_{cold,out})}{\ln(\frac{T_{hot,in} - T_{cold,in}}{T_{hot,out} - T_{cold,out}})}$$

$$= \frac{(25-(-10)) - (13.67-12.67)}{\ln(\frac{25-(-10)}{13.67-12.67})}$$

$$= 9.563 \text{ ℃}$$

ดังนั้น

$$U_i = \frac{\dot{m}_{CO_2}(h_{CO_{2in}} - h_{CO_{2out}})}{A_i \Delta T_{lm}}$$

$$= \frac{8.440 \times 10^{-4}(444.000-236.060)}{(0.021)(9.563)}$$

$$= 0.874 \frac{kW}{m^2.K}$$

$$= 874 \frac{W}{m^2.K}$$

$$U_o = \frac{\dot{m}_{CO_2}(h_{CO_{2in}} - h_{CO_{2out}})}{A_o \Delta T_{lm}}$$

$$= \frac{8.440 \times 10^{-4}(444.000-236.060)}{(0.034)(9.563)}$$

$$= 0.539 \frac{kW}{m^2.K}$$

$$= 539 \frac{W}{m^2.K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้