รายงานการวิจัย
เรื่อง

ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อน
The demonstration set of heat pump system

อภิสิทธิ์ เกียรติเจริญ
กลยุทธ ดีจริง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2560)

รายงานการวิจัย
เรื่อง

ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อน
The demonstration set of heat pump system

อภิสิทธิ์ เกียรติเจริญ
กลยุทธ ดีจริง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2560)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้การวิจัยครั้งนี้ สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

อภิสิทธิ์ เกียรติเจริญ
กลยุทธ ดีจริง
2562

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อน
ผู้ดำเนินการวิจัย นายอภิสิทธิ์ เกียรติเจริญ และนายกลยุทธ ดีจริง
หน่วยงาน หลักสูตรฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี พ.ศ. 2562

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและประเมินสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน ส่วนประกอบหลักของปั๊มความร้อนคือ พัดลม เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย โดยใช้สารทำงาน R-22 การทดลองกำหนดอัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยเท่ากับ 0.1 0.3 และ 0.5 kg/s สมรรนะในการทำงานของปั๊มความร้อนแสดงอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP_{hp}) ผลการทดลองพบว่า ค่า COP_{hp} เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลอากาศที่เครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยเพิ่มขึ้น ค่า COP_{hp} อยู่ในช่วง 4.73 ถึง 5.17

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Research Title The demonstration set of heat pump system
Researcher Mr. Apisit Keacharoen and Mr. Konlayut Deejing
Organization Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University
Year 2019

ABSTRACT

The objective of this research was to construct and evaluate performance of a heat pump system. The system mainly consists of a blower, compressor, condenser and evaporator with R-22 as a working fluid. In the experiments, the air mass flow rate through condenser and evaporator of 0.1 0.3 and 0.5 kg/s. The performance of heat pump is expressed in terms of the coefficient of performance (COP_{hp}). The experimental results show that the COP_{hp} increased as mass flow rate through the evaporator and condenser increased. COP_{hp} was found to range from 4.73 to 5.17.

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญภาพ ..... ช
บทที่ 1 บทนำ 1
ความเป็นมาและความสำคัญ 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
ขอบเขตการวิจัย 1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 3
หลักการทำงานของปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น 3
ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ 4
วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ 5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 9
เครื่องมือในการวิจัย 9
การสร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ 9
การทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน 10
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 11
ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ 11
การทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน 11
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 15
สรุปผลการวิจัย 15
อภิปรายผล 15
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ 15
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป 15
บรรณานุกรม 16
ภาคผนวก 17

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ก อุณหภูมิ ความดัน สารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบปั๊มความร้อน ...18
ภาคผนวก ข การคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน.....20
ประวัติผู้วิจัย 23

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ก-1 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.1 kg/s.....19
ก-2 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 kg/s.....19
ก-3 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s.....19

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 หลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น 3
2.2 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... 4
2.3 แผนภูมิแรงดันและเอนทัลปี (P-h Diagram) ของระบบปั๊มความร้อน..... 6
3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบระบบปั๊มความร้อน และตำแหน่งวัดความดัน อุณหภูมิสารงาน..... 9
4.1 ชุดสาธิตระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ..... 11
4.2 อุณหภูมิสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้า-ออกเครื่องควบแน่น และทางออกเครื่องทำระเหย ที่อัตราการไหลอากาศ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s..... 12
4.3 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.1 kg/s... 13
4.4 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.3 kg/s... 13
4.5 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s... 14

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

ระบบปั๊มความร้อน เป็นระบบที่มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องทำความเย็นแต่แตกต่างกันคือ ส่วนที่ต้องการทำความเย็นแทนที่จะเป็นช่องเย็นสำหรับแช่เย็นอาหารกลับเป็นห้องหรืออาคารต่าง ๆ ที่ต้องการความเย็น เครื่องปรับอากาศจะทำให้ห้องเย็นลงโดยการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศภายในห้องและปล่อยความร้อนนั้นออกสู่ภายนอก ปั๊มความร้อนสามารถทำการพิจารณาอย่างง่ายเช่นเดียวกันกับเครื่องจักรความร้อน โดยเครื่องจักรความร้อนรับความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงและให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำแล้วให้งานออกมา ส่วนปั๊มความร้อนต้องการงานเข้าไปเพื่อทำการเพิ่มพลังงานจากที่อุณหภูมิต่ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ปั๊มความร้อนนิยมนำมาใช้เพื่อเป็นการทำความร้อนในฤดูหนาว และการทำความเย็นในฤดูร้อน จากรายงายการวิจัยของ Mustafa et al. (2015); Mahmut et al. (2016) และ Yahya et al. (2016) ได้นำระบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้ในระบบสร้างความร้อนต่าง ๆ เช่น ระบบทำน้ำร้อน เครื่องอบแห้ง เป็นแหล่งพลังงานร่วมกับพลังแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องอบแห้งและระบบทำน้ำร้อน เป็นต้น การเรียนการสอนในหัวข้อเรื่อง ระบบทำความเย็นและปั๊มความร้อน เป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งของรายวิชาอุณหพลศาสตร์ ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นเรื่องที่ยากที่จะเข้าใจถึงวัฏจักการทำงานระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นเพื่อให้อธิบายการทำงานระบบปั๊มความร้อนที่ชัดเจนและนักศึกษามีความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องมีเครื่องมือสาธิตการทำงานหรือชุดทดลองประกอบในการศึกษา

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงสนใจในการสร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการและศึกษาสมรรถนะของปั๊มความร้อน เพื่อให้ได้ต้นแบบระบบปั๊มความร้อนสำหรับใช้ในการเรียนการสอน ที่สามารถแสดงหลักการทำงานและนำมาอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน

ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ
2. การศึกษาสมรรถนะระบบปั๊มความร้อนได้แก่ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องควบแน่น อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องทำระเหย และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
PA NAKHON SI AYUTTHAYA UNIVERSITY

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อน
2. ได้ทราบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน
3. ได้ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนสำหรับใช้ในการเรียนการสอน
4. ได้ความเข้ารู้ความเข้าใจในระบบปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

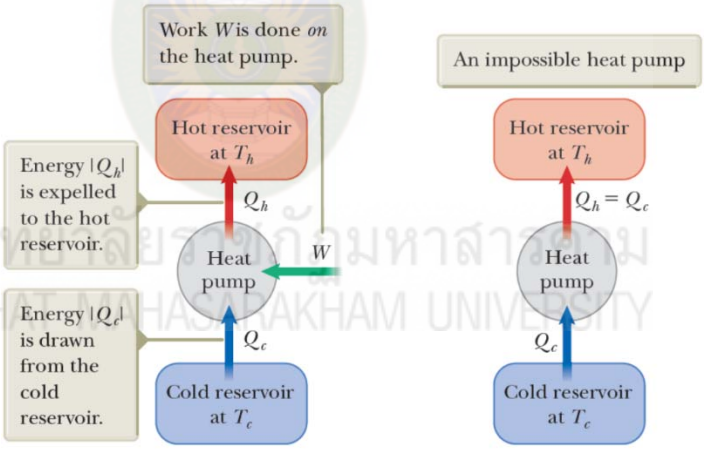
บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาตามเนื้อหา ดังนี้

1. หลักการทำงานของปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น
2. ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ
3. วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น

ปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น (Heat pump and refrigeration system) เป็นอุปกรณ์ที่รับความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำ (Cold reservoir) ถ่ายโอนให้กับสารทำงานพาความร้อนที่ได้รับไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูง (Hot reservoir) ทั้งนี้จะต้องป้อนงานให้แก่วัฏจักรของระบบ จากภาพที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของปั๊มความร้อนและหลักการทำงานระบบทำความเย็น



ภาพที่ 2.1 หลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น
ที่มา (Serway and Jewett, 2014)

จากหลักการทำงานของทั้งสองระบบจะมีการทำงานและส่วนประกอบหลักเหมือนกัน แต่ทั้งสองระบบนี้จะแตกต่างกันที่วัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน โดยในปั๊มความร้อนจะดึงความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำเพื่อใช้ประโยชน์จากการถ่ายความร้อนให้แก่แหล่งอุณหภูมิสูง เช่นงานอบแห้งผลิตภัณฑ์ งานทำน้ำร้อนในโรงงานหรืออุตสาหกรรม และงานที่ต้องควบคุมความชื้น ส่วนระบบทำความเย็นใช้ประโยชน์จากการดูดความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำแล้วนำความร้อนไปถ่ายโอนที่แหล่งอุณหภูมิสูง เช่น ห้องทำความเย็น ตู้เย็น ห้องปรับอากาศ เป็นต้น

2. ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

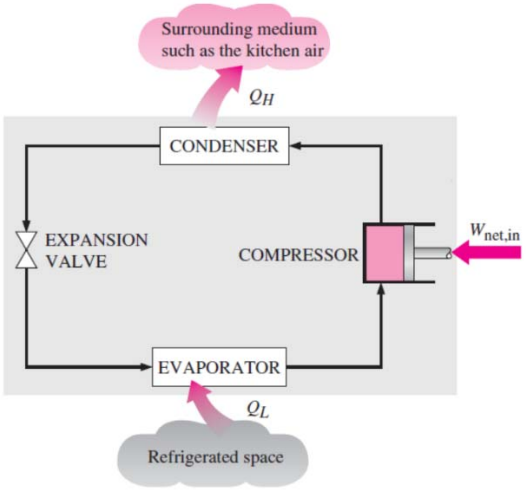
ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น เครื่องทำระเหย วาล์วลดความดัน ดังแสดงในภาพที่ 2.2 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

1) เครื่องอัดไอ (Compressor) มีหน้าที่ทำให้สารทำงานไหลวนเวียนในระบบ และอัดไอของสารทำงานให้มีความดันสูงมากพอที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวในอุปกรณ์ควบแน่นได้ และมีหน้าที่สร้างความดันในเครื่องควบแน่นกับเครื่องทำระเหยให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ และการดูดสารทำงานจากเครื่องทำระเหยเข้าเครื่องอัดไอนั้น จะต้องมีความเร็วพอดีกันกับการที่สารทำงานระเหยจากของเหลวเป็นไอในเครื่องทำระเหย ดังนั้นเครื่องอัดไอจึงเป็นตัวที่สร้างและรักษาความดันให้พอดีทั้งในเครื่องควบแน่นกับเครื่องทำระเหย โดยมีสมมุติฐานคือ กระบวนการอัดตัวของเครื่องอัดไอเป็นกระบวนการไอเซนทรอปิค (Isentropic Process)

2) เครื่องควบแน่น (Condenser) มีหน้าที่กลั่นสารทำงานที่มีสถานะเป็นไอที่ออกจากเครื่องอัดไอให้เป็นของเหลวเมื่อออกจากเครื่องควบแน่น ดังนั้นสารทำงานที่มีสถานะเป็นไอ เมื่อออกจากเครื่องอัดไอ จะคายความร้อนแฝงและกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่น การคายความร้อนจะต้องมีสารอื่นมารับความร้อน เช่น อากาศรอบ ๆ เครื่องควบแน่นหรือใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน

3) วาล์วลดความดัน (Expansion valve) เป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของสารทำงานในระบบให้มีอัตราพอเหมาะกับความต้องการในการดูดความร้อนที่เครื่องทำระเหย และยังมีหน้าที่ทำให้ความดันทั้งสองด้านแตกต่าง โดยการที่สารทำงานผ่านกระบวนการทรอตทลิ่ง (Throttling Process) จากความดันในเครื่องควบแน่นซึ่งเป็นความดันสูง กลายเป็นสารทำงานความดันต่ำในเครื่องทำระเหยการที่สารทำงานเป็นของเหลวและมีความดันต่ำ จะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย

4) เครื่องทำระเหย (Evaporator) มีหน้าที่ระเหยสารทำงาน โดยเมื่อสารทำงานไหลผ่านมาจากวาล์วลดความดันแล้วรับความร้อนจากสารอื่น ๆ ที่อยู่รอบ ๆ เครื่องทำระเหย ทำให้สารทำงานเดือดและระเหยกลายเป็นไอ ดังนั้นบริเวณรอบ ๆ เครื่องทำระเหยจะมีอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ
ที่มา (Cengel and Boles, 2011)

3. วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

วัฏจักรการทำงานของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอสามารถอธิบายได้จากแผนภูมิความดันและเอนทัลปี ดังแสดงในภาพที่ 2.3 จะได้กระบวนการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

กระบวนการ 1-2 ในทางอุดมคติ ไออิ่มตัว (Saturated Vapor) ของสารทำงานจะถูกอัดตามกระบวนการเอนโทรปีคงที่ (Isentropic Process) ทำให้เอลทัลปี, อุณหภูมิ และความดันสารทำงานเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติการอัดไอเป็นไปตามกระบวนการโพลีทรอปิก (Polytropic Process) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible Process) สาเหตุหลักมาจากการสูญเสียจากความเสียดทาน (Friction Loss) ของเครื่องอัดไอ นอกจากนี้ในความเป็นจริงสภาวะของสารทำงานที่เข้าเครื่องอัดไอจะอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวด (Superheat Vapor) มากกว่าสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapor)

กระบวนการ 2-3 ไอของสารทำงานจะคายความร้อนออกและควบแน่นเป็นของเหลว ซึ่งในทางอุดมคติจะเป็นตามกระบวนการความดันคงที่ ในทางปฏิบัติ ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานจะไม่คงที่ตลอดทั้งเครื่องควบแน่น แต่จะลดลงไปตามระยะทางของท่อสารทำงาน และสารทำงานที่ไหลภายในท่อจะมีลักษณะเป็นสองสถานะ (two phase) สารทำงานก่อนเข้าสู่ถังพักและวาล์วลดความดันอาจอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสารทำงานลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของของเหลวอิ่มตัว (Subcooled liquid) หรืออาจอยู่ในสภาวะของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) ก็ได้

กระบวนการ 3-4 สารทำงานที่มีสถานะเป็นของเหลวถูกลดความดันตามกระบวนการเอนทัลปีคงที่ (Throttling process) โดยผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิและความดันลดต่ำลง และอยู่ในสถานะสารผสมระหว่างไอและของเหลว ซึ่งพร้อมที่จะรับความร้อนจากระบบ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดความดันตกภายในท่อของเหลว

กระบวนการ 4-1 สารทำงานผสมจะรับความร้อนและเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัว ซึ่งในทางอุดมคติจะเป็นกระบวนการความดันคงที่ แต่ในทางปฏิบัติความดันสารทางานจะลดลงไปตามระยะทางของการไหลในเครื่องทำระเหย และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงสถานะไออิ่มตัวยิ่งยวด ก่อนเข้าเครื่องอัดไอ

ในการวิเคราะห์วัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอจะใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยอาศัยสมมุติฐาน คือ ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ไม่คิดความดันตกคร่อมในอุปกรณ์ สภาวะของสารทำงานก่อนเข้าและออกจากเครื่องอัดไอ มีสภาวะเป็นไออิ่มตัว และไอร้อนยิ่งยวดตามลำดับ และสภาวะของสารทำงานที่ออกจากเครื่องควบแน่น มีสภาวะเป็นของเหลวอิ่มตัว หรือของเหลวเย็นเยือก สำหรับอุปกรณ์ความร้อนต่าง ๆ จะถือว่าเป็นระบบปริมาตรควบคุม (Control Volume) มีสภาวะต่าง ๆ เข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady State) และมีการไหลของสารทำงานแบบสม่ำเสมอ (Steady Flow) ดังนั้นจากแผนภูมิความดันและเอนทัลปี ดังในภาพที่ 2.3 พบว่า ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดการถ่ายโอนพลังงานเข้าและออกจาก ระบบจากการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ดังนี้

เครื่องอัดไอ $W_c = m_r (h_2 - h_1)$ (2.1)

วาล์วลดความดัน $h_3 = h_4$ (2.2)

เครื่องทำระเหย $Q_e = m_r (h_1 - h_4)$ (2.3)

เครื่องควบแน่น $Q_c = m_r (h_2 - h_3)$ (2.4)

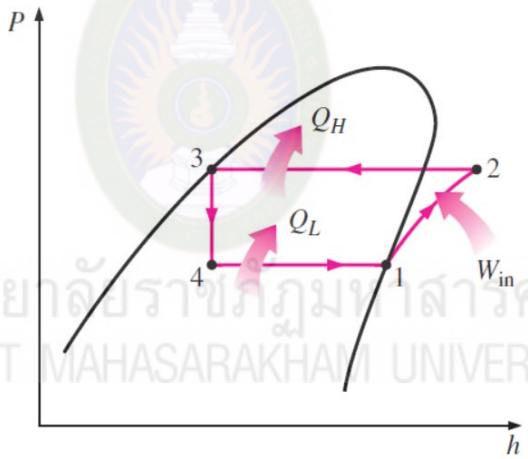
โดยที่ W_c คือ กำลังงานของเครื่องอัดไอ, kW

Q_c คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น, kW

Q_e คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายโอนเข้าสู่เครื่องทำระเหย, kW

m_r คือ อัตราการไหลของสารทำงาน, kg/s

h_1, h_2, h_3, h_4 คือ เอนทัลปีจำเพาะของสารทำงานที่สภาวะต่าง ๆ, kJ/kg



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 2.3 แผนภูมิแรงดันและเอนทัลปี (P-h Diagram) ของระบบปั๊มความร้อน ที่มา (Cengel and Boles, 2011)

การวิเคราะห์วัฏจักรของระบบทำความเย็นสามารถทำได้โดยการพิจารณาจาก พลังงานที่เข้าและออกจากระบบซึ่งจะมีผลดังนี้

1) ปริมาณความร้อนที่ออกจากวัฏจักร คือความร้อนที่สารทำความเย็นถ่ายโอนให้แก่เครื่องควบแน่น ซึ่งเกิดขึ้นในขบวนการที่มีความดันคงที่ (ช่วง 2 – 3) ค่าของ h2 และ h3 สามารถอ่านค่าได้จากแผนภูมิ P-h

$$q_c = q_{23} = h_2 - h_3$$

2) ปริมาณความร้อนเข้าสู่วัฏจักร เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความสามารถในการทำความเย็น (Refrigerating Effect) หมายถึงความร้อนที่สารทำความเย็นรับเข้าสู่ตัวเองภายในเครื่องทำระเหย เกิดขึ้นในขบวนการที่มีความดันคงที่ (ช่วง 4 – 1) ค่าของ h1 และ h4 สามารถอ่านค่าได้จากแผนภูมิ P-h

$$q_e = q_{14} = h_1 - h_4$$

3) งานเข้าสู่วัฏจักร คืองานของเครื่องอัดไอ เกิดขึ้นในขบวนการไอเซ็นโทรปิค (ช่วง 1–2) ค่าของ h1 และ h2 สามารถอ่านค่าได้จากแผนภูมิ P-h

$$W_c = W_{12} = h_2 - h_1$$

4) กระบวนการขยายตัว คือ กระบวนการเอลทัลปีคงที่ไม่มีงานเกิดขึ้น หรือการถ่ายโอนความร้อน (ช่วง 3-4) บนแผนภูมิ P-h จะเป็นเส้นในแนวดิ่ง

$$h_3 = h_4$$

5) สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance; COP) สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น คืออัตราความร้อนที่ถ่ายโอนเข้าสู่เครื่องทำระเหยต่อกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ

$$COP_r = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \qquad (2.5)$$

ค่า COP_r มีค่าเกินหนึ่งได้ ซึ่งตรงข้ามกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั่ว ๆ ไปที่มีค่าไม่เกินหนึ่ง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน คืออัตราการถ่ายโอนความร้อนออกจากเครื่องควบแน่นต่อกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ

$$COP_{hp} = \frac{Q_c}{W_c} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \qquad (2.6)$$

จากหลักการอนุรักษ์พลังงานสำหรับวัฏจักรการทำความเย็นและปั๊มความร้อนแบบอัดไอ จะได้ว่า

$$W_c = Q_c - Q_e \qquad (2.7)$$

จากสมการ (2.5) กับ (2.6) จะสามารถเขียน COP_{hp} ได้ใหม่เป็น

หรือ $$COP_{hp} = \frac{Q_e + W_c}{W_c} = COP_r + 1 \qquad (2.8)$$

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mustafa et al. (2015) ศึกษาการประยุกต์ใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และได้ทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 40-50 ºC ปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 1 m/s (400m^3/h) ถึง 1.5m/s (600 m^3/h) ผลการทดสอบ พบว่า ค่า COP_{hp} ซึ่งคำนวณจากอัตรากการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อกำลังงานที่ให้แก่เครื่องทำระเหย มีค่าอยู่ในช่วง 2.8-3.7

Mustafa et al. (2017) ศึกษาการอบแห้งใบมิ้นด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งปั๊มความร้อนประกอบด้วยเครื่องอัดไอขนาด 0.736 kW สารทำงาน R-410a เครื่องทำระเหยขนาด 3.5 kW เครื่องควบแน่นขนาด 4.0 kW อัตราการไหลอากาศ 1000 800 และ 600 m^3/h พบว่า ค่า COP_{hp} มีค่าอยู่ในช่วง 3.94 - 4.18 อัตราการไหลอากาศที่ 800 m^3/h จะให้ค่า COP_{hp} (4.18) มากที่สุด

Hua et al. (2018) ศึกษาการลดความชื้นอากาศในระบบปั๊มความร้อน โดยใช้สารดูดความชื้น ขนาดเครื่องอัดไอ 736 W สารทำงาน R-410a ทำการทดสอบปั๊มความร้อนในสภาวะอากาศร้อน (อุณหภูมิ 35 ºC ความชื้นสัมพัทธ์ 40%) อากาศชื้น (อุณหภูมิ 30 ºC ความชื้นสัมพัทธ์ 60%) และอากาศหนาว (อุณหภูมิ 8 ºC ความชื้นสัมพัทธ์ 72%) พบว่า ค่า COP อยู่ในช่วง 4.5-70

Wan et al. (2011) ศึกษาการประยุกต์ใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งซานจา (Hawthorn) ซึ่งเป็นผลไม้ประเภทเบอร์รี่ ปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-22 พบว่า อุณหภูมิอากาศจากการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 45ºC และค่า COP_{hp} เท่ากับ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีค่า COP ที่สูงเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

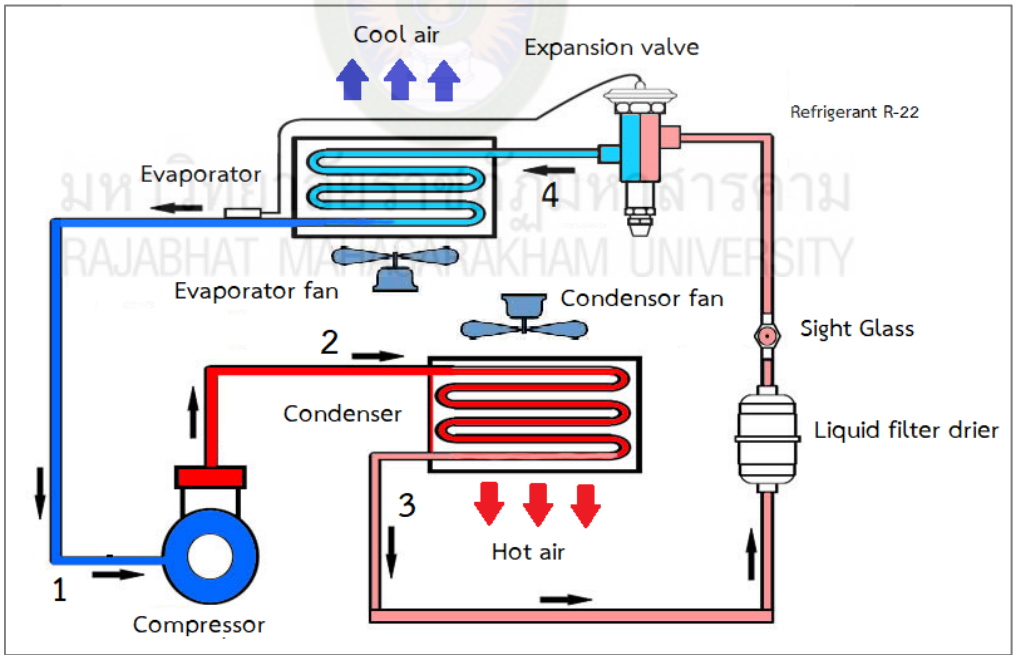
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือในการวิจัย

1. เครื่องบันทึกกำลังไฟฟ้า (ยี่ห้อ Fluke รุ่น 1735)
2. เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34972A)
3. มาตรวัดความดันสารทำงาน R-22

ตอนที่ 1 การสร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ

ดำเนินการสร้างชุดสาธิตระบบปั๊มความร้อนมีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น เครื่องทำระเหย พัดลมที่ติดตั้งบริเวณเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย โดยใช้สารทำความเย็น R-22 เป็นสารทำงานของระบบ รวมทั้งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล Type K สำหรับวัดอุณหภูมิสารทำงาน และมาตรวัดความดันสารทำงาน ซึ่งแผนภาพแสดงส่วนประกอบระบบปั๊มความร้อน ตำแหน่งวัดความดันและอุณหภูมิของสารทำงาน แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบระบบปั๊มความร้อน และตำแหน่งวัดความดันอุณหภูมิของสารทำงาน

ตอนที่ 2 การทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน

1. กำหนดอัตราการไหลอากาศในการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อนมี 3 ระดับ คือ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเท่ากับ 1 ชั่วโมง
2. เมื่อปรับอัตราการไหลอากาศตามกำหนดแล้ว จากนั้นเปิดระบบปั๊มความร้อนทำงาน พร้อมกับวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องอัดไอ ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ขณะที่ปั๊มความร้อนทำงานทำงานอยู่นั้น ให้วัดค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงาน ทุก ๆ 10 นาที ที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องอัดไอ (หมายเลข 1) ทางเข้าเครื่องควบแน่น (หมายเลข 2) และทางออกเครื่องควบแน่น (หมายเลข 3) ดังภาพที่ 3.1
4. นำค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานไปหาค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องอัดไอ และทางเข้าเครื่องควบแน่น (ทางออกเครื่องอัดไอ) แล้วคำนวณหากำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ ดังสมการที่ 2.1
5. นำค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานไปหาค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องควบแน่น (ทางเข้าเครื่องทำระเหย) และทางเข้าเครื่องอัดไอ (ทางออกเครื่องทำระเหย) แล้วคำนวณหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนเข้าเครื่องทำระเหย ดังสมการที่ 2.3
6. นำค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานไปหาค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกเครื่องควบแน่น แล้วคำนวณหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น ดังสมการที่ 2.4
7. นำค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ คำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ดังสมการที่ 2.5 และ 2.8 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

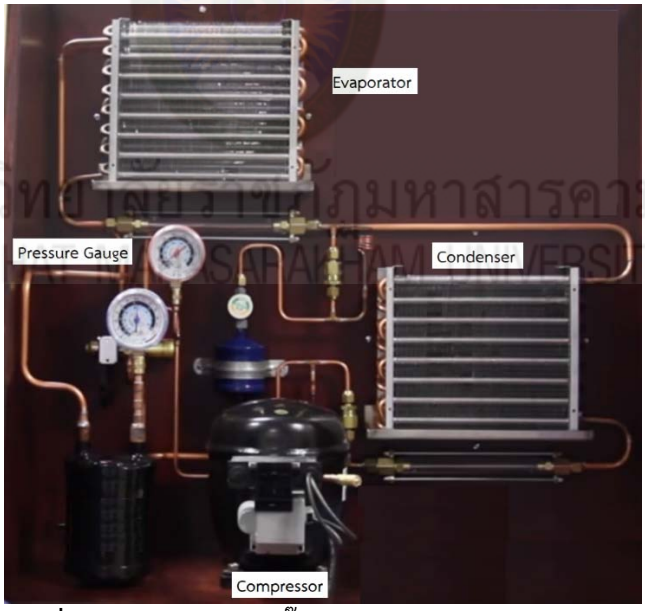
บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ

1. เพื่อสร้างชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน

1. ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ

ชุดสาธิตระบบปั๊มความร้อนแสดงดังภาพที่ 4.1 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด 0.75 kW ใช้สารทำงาน R-22 เครื่องควบแน่น เครื่องทำระเหย และพัดลมขนาด 38 W ใบพัด 9.5 นิ้ว ควบคุมความเร็วรอบการทำงานพัดลมด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบ ติดตั้งมาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) ใช้สำหรับวัดความดันในวงจรสารทำงาน R-22 เพื่อนำค่าความดันและอุณหภูมิของสารทำงานไปหาค่าเอนทัลปีของสารทำงานที่สภาวะต่าง ๆ ในระบบปั๊มความร้อน แล้ววิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนต่อไป



ภาพที่ 4.1 ชุดสาธิตระบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ

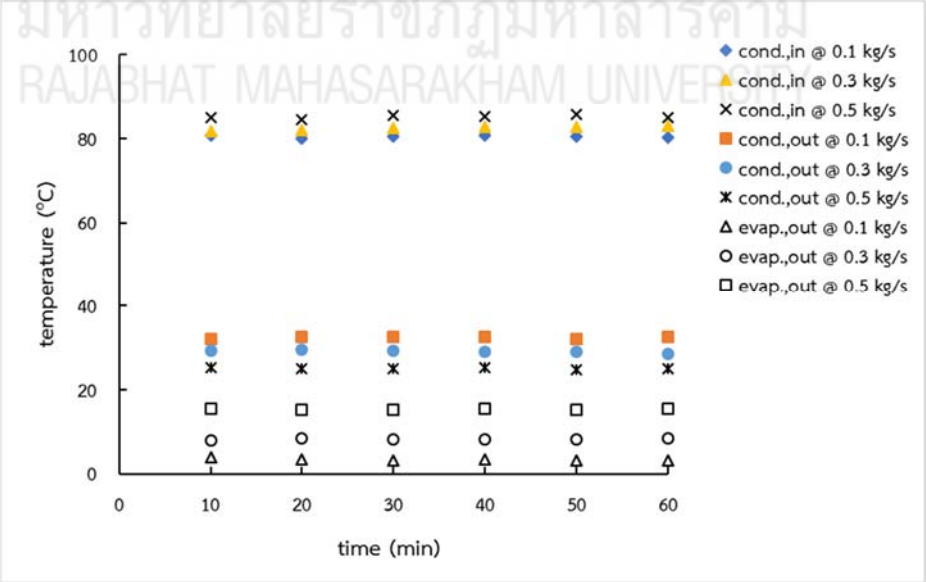
2. การทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อน

การทดสอบสมรรถนะระบบปั๊มความร้อนทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการอุณหภูมิอากาศภายในห้องปฏิบัติการอยู่ในช่วง 24-26 °C เมื่อปั๊มความร้อนทำงาน พบว่า กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องอัดไอเท่ากับ 3.25 A อัตราการไหลของสารทำงาน R-22 เท่ากับ 0.016 kg/s อัตราการไหลอากาศที่เครื่องควบแน่นและเครื่องอัดไอ เท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 kg/s

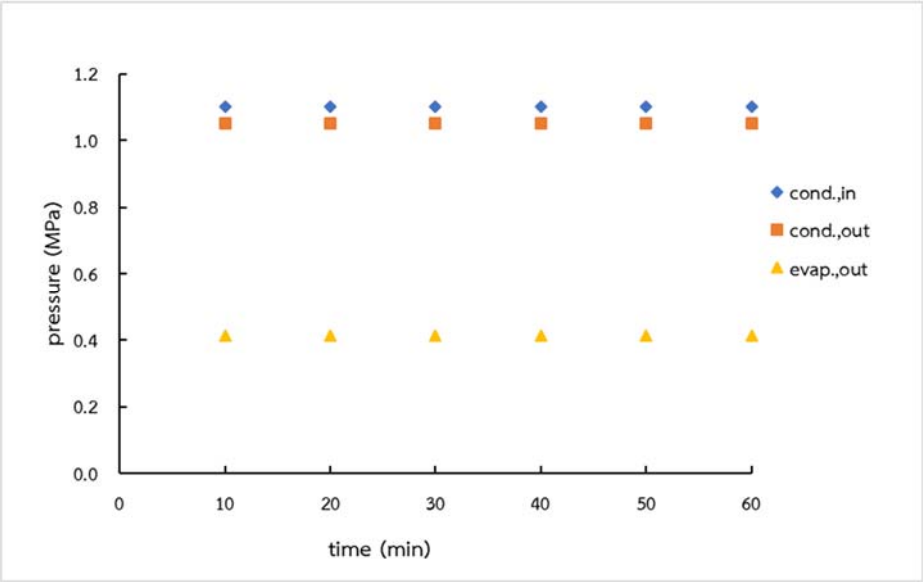
อัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องควบแน่นคำนวณจากค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกเครื่องควบแน่น จากภาพที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกเครื่องควบแน่นมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง เมื่อทำการปรับอัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s ทำให้อุณหภูมิสารทำงานที่ทางออกของเครื่องควบแน่นลดลง โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 32.4, 29.2 และ 25.1 °C ตามลำดับ ความดันสารทำงานทางเข้าและออกเครื่องควบแน่มีค่าต่างกันเล็กน้อยอยู่ในช่วง 1.11-1.13 MPa ดังภาพที่ 4.3-4.5 เมื่อคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากเครื่องควบแน่น พบว่า เมื่อทำการปรับอัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.41, 3.58 และ 3.72 kW ตามลำดับ

อัตราการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย พิจารณาจากค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่งตำแหน่งทางออกเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย จากภาพที่ 4.2 พบว่า อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องทำระเหยมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องทำระเหยเพิ่มขึ้น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 3.4, 8.2 และ 15.4 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.3-4.5 แสดงค่าความดันของสารทำงานในการทดสอบสมรรถนะปั๊มความร้อนที่อัตรากรไหลอากาศ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s พบว่าความดันของสารทำงานที่ทางออกเครื่องทำระเหยเท่ากับ 0.413-0.434 MPa ส่วนทางออกเครื่องควบแน่นมีความดันเท่ากับ 1.10-1.17 MPa เมื่อคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเข้าเครื่องทำระเหย พบว่า เมื่อทำการปรับอัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีค่าเท่ากับ 2.69, 2.86 และ 3.00 kW ตามลำดับ

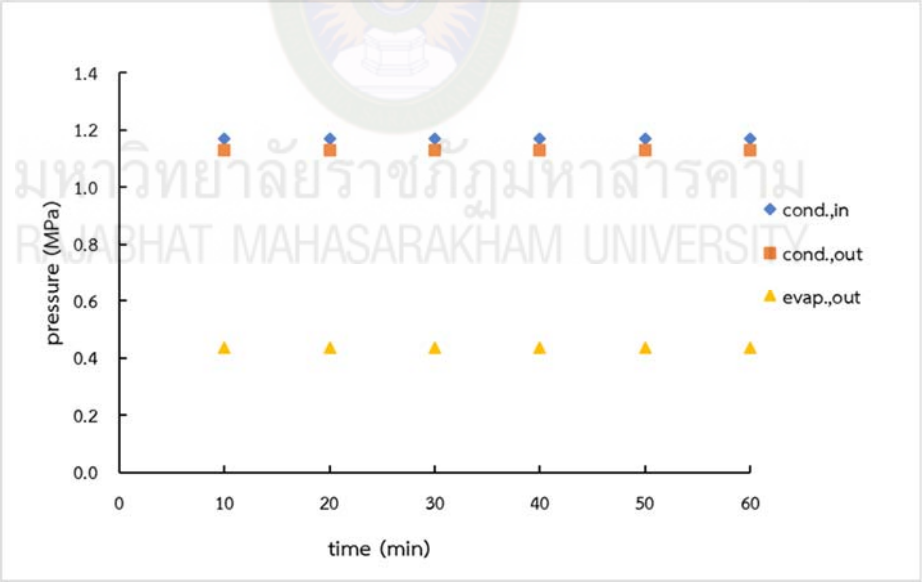
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้า-ออกเครื่องควบแน่น และทางออกเครื่องทำระเหย ที่อัตราการไหลอากาศ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s

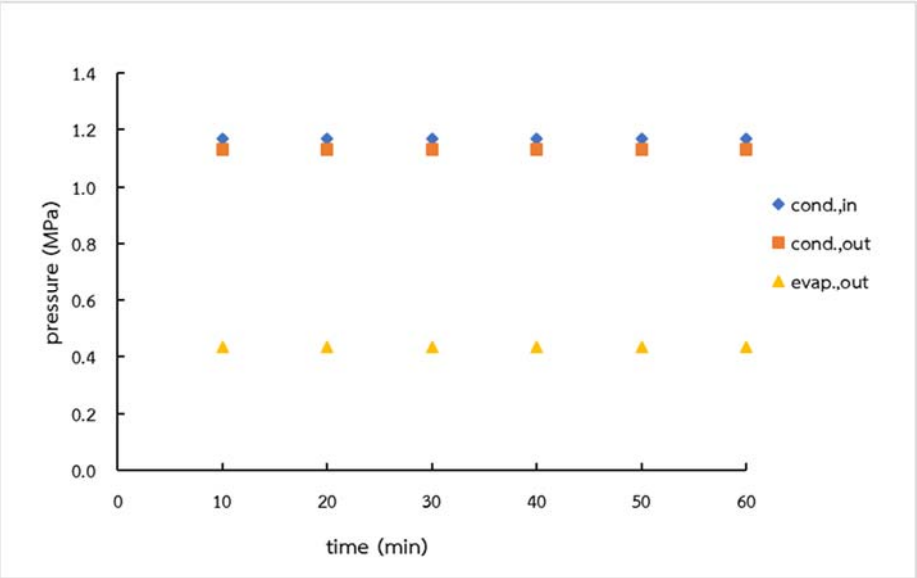


ภาพที่ 4.3 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.1 kg/s



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 4.4 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.3 kg/s



ภาพที่ 4.5 ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบปั๊มความร้อนอัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s

ในส่วนกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ ที่พิจารณาจากค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องอัดไอ(ทางออกเครื่องทำระเหย) และทางเข้าเครื่องควบแน่น(ทางออกเครื่องอัดไอ) พบว่าทุกเงื่อนไขการทดสอบกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอมีค่าเท่ากับ 0.72 kW สุดท้ายเมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_{hp}) ที่คำนวณจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องควบแน่นต่อกำลังงานของเครื่องอัดไอ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 kg/s ค่า COP_{hp} เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 4.73, 4.98 และ 5.17 ตามลำดับ บ่งบอกว่าปั๊มความร้อนสามารถทำความร้อนได้ด้วยอัตรา 4.73-5.17 kW ต่อการใช้พลังงาน 1 kW ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบทำความเย็น (COP_r) เท่ากับ 3.73, 3.98 และ 4.17 ตามลำดับ นั่นหมายความว่าระบบทำความเย็นสามารถกำจัดพลังงานความร้อนออกจากบริเวณทำความเย็นด้วยอัตรา 3.73-4.17 kW ต่อการใช้พลังงาน 1 kW จากการศึกษาของผู้วิจัย เช่น Zhang et al. (2016) พบว่า COP_{hp} 5.94 Mustafa et al. (2015) พบว่า COP_{hp} 2.8-3.7 และ Mustafa et al. (2017) ศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อค่า COP_{hp} พบว่า ที่อัตราการไหลอากาศ 1000, 800 และ 600 m^3/h ค่า COP_{hp} เท่ากับ 4.06, 4.18 และ 3.94 ตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน ที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 3.72 kW และที่เครื่องทำระเหยเท่ากับ 3.00 kW

2. อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยมีผลค่า COP_{hp} ซึ่งคำนวณจากค่าอุณหภูมิและความดันสารทำงาน อัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s มีค่า COP_{hp} เท่ากับ 5.17 และ COP_r เท่ากับ 4.17

อภิปรายผล

1. อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อผลต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของสารทำงานขาเข้า-ออกเครื่องทำระเหยเพิ่มขึ้น แสดงถึงว่าสามารถในการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องทำระเหยได้ดีขึ้น ส่งผลให้การถ่ายโอนพลังงานที่เครื่องควบแน่นได้มากขึ้น และค่า COP_{hp} เพิ่มขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์ค่า COP_{hp} คำนวณจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อกำลังที่ให้กับเครื่องอัดไอเท่านั้น ไม่ได้นำค่ากำลังที่ให้กับพัดลมมาพิจารณาด้วย

2. ในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเป็นการวิเคราะห์จากค่าสมบัติของสารทำงานที่มีอุณหภูมิและความดันเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบปั๊มความร้อน ไม่ได้วิเคราะห์จากสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านตำแหน่งต่างๆ ในระบบปั๊มความร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อนสามรถนำไปใช้ในการเรียนการสอนเพื่อให้นักศึกษามีความเข้าใจเพิ่มขึ้นในเรื่อง ระบบทำความเย็นและระบบปั๊มความร้อน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฝึกปฏิบัติการทางด้านระบบทำความเย็น หรือระบบเครื่องปรับอากาศได้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ศึกษาคุณภาพของชุดสาธิตการทำงานระบบปั๊มความร้อน
2. พัฒนาชุดสาธิตให้สามารถใช้กับสารทำงานชนิดอื่นได้เพื่อศึกษาค่า COP ของระบบความร้อนที่ใช้สารทำงานแตกต่างกัน

บรรณานุกรม

Cengel, A., Y., & Boles, A., M. (2010). *Thermodynamics: An Engineering Approach (7th ed)*. McGraw-Hill.

Hua, L. J., Jiang, Y., Ge, T. S., & Wang, R.Z. (2018). Experimental investigation on a novel heat pump system based on desiccant coated heat exchangers. *Energy,* 142, 96-107.

Mahmut, S. B., & Saffa B. R. (2016). Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 399-413.

Mustafa, A., Seyfi, Ş., Özdemir, B.M. & Emrah, G. (2015). Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network. *Applied Thermal Engineering*, 87, 714-723.

Mustafa, A., Ataollah, K., Burak., A., & Ali, A. (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International journal of hydrogen energy*, 42, 18034-18044.

Serway, A. R., & Jewett, W. J. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics (9th ed)*. Boston, MA: Brooks/Cole.

Wan, D. C., Zhang, G., Han, Y. P., Zhang, J. P., & Tian, X. L. (2011). Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake. *Energy Conversion and Management,* 52, 2919-2924.

Yahya, M., Ahmad, F., Hadyan, H. & Kamaruzzaman, S. (2016). Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava. *Solar Energy*, 136, 606-613.

Zhang, S., Zhang, L., Wei, H., Jing, J., Zhou, X., & Zhang, X. (2016). Field testing and performance analyses of ground source heat pump. *Energy Build*, 133, 615-27.

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
MAHASARAKHAM RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
อุณหภูมิ ความดัน สารทำงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบปั๊มความร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.1 kg/s

เวลา (min)	อุณหภูมิของสารทำงาน (°C)			ความดันของสารทำงาน (MPa)		
	cond., in	cond., out	evap., out	cond., in	cond., out	evap., out
10	80.7	32.1	3.9	1.1	1.05	0.413
20	80.0	32.6	3.5	1.1	1.05	0.413
30	80.6	32.6	3.1	1.1	1.05	0.413
40	80.7	32.5	3.4	1.1	1.05	0.413
50	80.5	32.1	3.2	1.1	1.05	0.413
60	80.3	32.5	3.1	1.1	1.05	0.413

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 kg/s

เวลา (min)	อุณหภูมิของสารทำงาน (°C)			ความดันของสารทำงาน (MPa)		
	cond., in	cond., out	evap., out	cond., in	cond., out	evap., out
10	81.7	29.3	7.9	1.17	1.13	0.434
20	82.1	29.6	8.5	1.17	1.13	0.434
30	82.6	29.4	8.1	1.17	1.13	0.434
40	82.9	29.0	8.1	1.17	1.13	0.434
50	82.9	29.1	8.2	1.17	1.13	0.434
60	83.1	28.5	8.4	1.17	1.13	0.434

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความดันสารทำงาน R-22 ที่อัตราการไหลอากาศ 0.5 kg/s

เวลา (min)	อุณหภูมิของสารทำงาน (°C)			ความดันของสารทำงาน (MPa)		
	cond., in	cond., out	evap., out	cond., in	cond., out	evap., out
10	85.1	25.3	15.5	1.17	1.13	0.434
20	84.5	25.1	15.2	1.17	1.13	0.434
30	85.6	25.1	15.3	1.17	1.13	0.434
40	85.4	25.3	15.4	1.17	1.13	0.434
50	85.9	24.8	15.1	1.17	1.13	0.434
60	85.1	25.0	15.6	1.17	1.13	0.434

ภาคผนวก ข
การคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

การคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

จากข้อมูลการทดสอบที่อัตราการไหลอากาศ 0.1 kg/s ดังตารางภาคผนวก ก.

$T_{Cond., in}$ คือ อุณหภูมิสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องควบแน่น
$T_{Cond., out}$ คือ อุณหภูมิสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องควบแน่น
$T_{evap., out}$ คือ อุณหภูมิสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องทำระเหย
$P_{Cond., in}$ คือ ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องควบแน่น
$P_{Cond., out}$ คือ ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องควบแน่น
$P_{evap., out}$ คือ ความดันสารทำงานที่ตำแหน่งทางออกเครื่องทำระเหย

จากตารางสมบัติสารทำงาน R-22 จะได้ค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็นที่สภาวะต่างๆ ดังนี้
สภาวะที่ 1 $P_{evap., out}$ = 0.413 MPa ; $T_{evap., out}$ = 3.67 °C จะได้ h_1= 409.6 kJ/kg
สภาวะที่ 2 $P_{Cond., in}$ = 1.1 MPa ; $T_{Cond., in}$ = 80.47 °C จะได้ h_2= 457 kJ/kg
สภาวะที่ 3 $P_{Cond., out}$ = 1.05 MPa ; $T_{Cond., out}$ = 32.4°C จะได้ h_3= 232.8 kJ/kg
สภาวะที่ 4 $h_4 \approx h_3$=232.8 (กระบวนการทรอตลิ่ง)

1. อัตราการไหลของสารทำงาน
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องอัดไอที่วัดได้เท่ากับ 0.75 kW และจากสมการ $W_c = m_r(h_2 - h_1)$

จะได้ $m_r = \frac{W_c}{h_2 - h_1} = \frac{0.75\,kW}{(457-409.6)\,kJ/kg} = 0.015$ kg/s

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2. อัตราการ่ายโอนความร้อนที่เครื่องทำระเหย
จากสมการ $Q_e = m_r(h_1 - h_4)$
จะได้ $Q_e = m_r(h_1 - h_4) = (0.015\ kg/s)(409.6-232.8)\,kJ/kg = 2.69$ kW

3. อัตราการ่ายโอนความร้อนที่เครื่องทำควบแน่น
จากสมการ $Q_c = m_r(h_2 - h_3)$
จะได้ $Q_c = m_r(h_2 - h_3) = (0.015 kg/s)(457-232.8)\,kJ/kg = 3.41$ kW

4. สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น
จากสมการ $COP_r = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$

จะได้ $COP_r = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} = \frac{2.69\,kW}{0.75\,kW} = 3.73$

5. สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

จากสมการ $COP_{hp} = \frac{Q_e + W_c}{W_c} = COP_r + 1$

จะได้ $COP_{hp} = 3.73 + 1 = 4.73$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นายอภิสิทธิ์ เกียรติเจริญ
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ครุศาสตรบัณฑิต สาขาคอมพิวเตอร์ศึกษา สถาบันราชภัฏมหาสารคาม ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ชื่อ – นามสกุล	นายกลยุทธ ดีจริง
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY