

การศึกษาศาสตร์ทำความเย็นผสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ



นายณราวุฒิ ยืนยง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Blended Refrigerants for Adsorption Refrigeration Systems



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR

THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

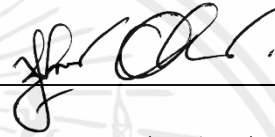
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาศาสตร์ทำความเข้าใจผลสำหรับระบบทำความเข้าใจแบบดูซ้ำ

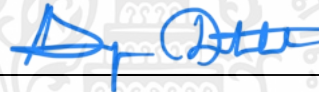
โดย ฌราวดี ยืนยง
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2566
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)



กรรมการ

(ผศ.ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์)



กรรมการ

(รศ.ดร.อมตะ อนันต์พิณิจวัฒนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|------------------|--|
| ปริญญาบัตรเรื่อง | การศึกษาศาสตร์ทำความเย็นผสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ |
| โดย | ณราวดี ยืนยง |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| ปีการศึกษา | 2566 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ |

บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เป็นหนึ่งในระบบทำความเย็นที่มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำมาใช้แทนที่ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ เนื่องจากระบบทำความเย็นชนิดนี้ใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งเหลือทิ้งในการขับเคลื่อนระบบ และสารทำความเย็นที่ใช้สำหรับระบบนี้เป็นสารกลุ่มแอลลกอฮอล์และน้ำ ซึ่งมีค่าค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (ODP) และค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำ โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเพื่อพัฒนาสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบสำหรับใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) โดยใช้โปรแกรม NIST REFPROP^(R) และ Aspen Plus^(R) สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นบริสุทธิ์และสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ ซึ่งคู่สารทำความเย็นผสมที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับคือ คู่สารผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล เนื่องจากแสดงพฤติกรรมอะซิโตน-โพรพาน และมีความไวต่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเมทานอล ช่วยให้ระบบสามารถทำความเย็นได้นานขึ้น รวมถึงระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้ในสภาวะสูญญากาศต่ำ จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนผสม 0.5 โดยมวลของเมทานอล ให้ค่า COP สูงสุดเท่ากับ 0.227

คำสำคัญ: ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ, สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ, ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น

| | |
|---------------------|--|
| Report Title | Study on Blended Refrigerants for Adsorption Refrigeration Systems |
| By | NARAWUT YUENYONG |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Program | Chemical Engineering |
| Year | 2023 |
| Advisor | Assistant Professor. Dr. Surat Areerat |

Abstract

The adsorption refrigeration system is one of the continuously studied and developed refrigeration systems to replace the vapor compression refrigeration system. This is because this type of refrigeration system utilizes waste heat from other sources to drive the system, and the refrigerants used for this system are alcohol and water, which have low Ozone Depletion Potential (ODP) and Global Warming Potential (GWP) values. This research aims to develop a binary refrigerant mixture for adsorption refrigeration systems with the objective of studying the effect of the mass ratio of the refrigerant mixture on the Coefficient of Performance (COP) using NIST REFPROP^(R) and Aspen Plus^(R) for the thermodynamic properties analysis of pure refrigerants and binary refrigerant mixtures. The suitable binary refrigerant mixture for the adsorption refrigeration system is the acetone-methanol mixture as it exhibits an azeotropic behavior and an increasing trend of latent heat of vaporization with the increasing methanol mass fraction, allowing the system to provide longer cooling duration. Additionally, the system can operate under a low vacuum condition. Experimental results showed that at a 0.5 mass fraction of methanol, the maximum COP of 0.227 was achieved.

Keywords: Adsorption refrigeration system, Binary refrigerant mixture, Coefficient of Performance

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์อย่างดียิ่ง จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ความสำเร็จที่เกิดขึ้นได้จากความอนุเคราะห์จากคณะกรรมการผู้ตรวจปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา และ ผศ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์ ที่ให้คำวิจารณ์และชี้แนะถึงปัญหาที่อาจพบในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการตรวจสอบ แก้ไข และต่อยอดงานวิจัยในอนาคต นอกจากนี้ในด้านการปฏิบัติงานสำหรับการทำวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่จำเป็นสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณ นายณัฐอมร คำลือ นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการปฏิบัติงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัวที่รักยิ่งของข้าพเจ้า เพื่อนพ้องคนสำคัญ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง กับงานวิจัยในครั้งนี้ ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาจนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ณราวุฒิ ยืนยง

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | I |
| Abstract..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ..... | 3 |
| 2.1.1. หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ [4,5]..... | 3 |
| 2.1.2. แท่นดูดซับ (Adsorber)..... | 5 |
| 2.1.3. เครื่องควบแน่น (Condenser) [9]..... | 7 |
| 2.1.4. วาล์วลดแรงดัน (Expansion valve) [9]..... | 7 |
| 2.1.5. เครื่องทำระเหย (Evaporator) [9]..... | 7 |
| 2.1.6. ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น (COP) [5,8]..... | 8 |
| 2.2 คู่ตัวดูดซับและสารทำความเย็น [5,10]..... | 8 |
| 2.2.1 ถ่านกัมมันต์/เมทานอล..... | 8 |
| 2.2.2 ซิลิกาเจล/น้ำ..... | 9 |
| 2.2.3 ซีโอไลต์/น้ำ..... | 9 |
| 2.2.4 คุณสมบัติของสารทำความเย็น [11]..... | 10 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ IV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|----|
| 2.3 สารทำความเย็นสององค์ประกอบ..... | 11 |
| 2.3.1 ลักษณะของสารทำความเย็นแบบผสม [17]..... | 11 |
| 2.3.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็นด้วยวิธีผสมกับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ..... | 12 |
| 2.4 บทความที่เกี่ยวข้อง | 12 |
| 2.4.1 การศึกษาสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซับจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้คู่งานถ่านกัมมันต์และเมทานอล | 12 |
| 2.4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นที่ส่งผลกระทบต่อระบบทำความเย็นแบบดูดซับ..... | 13 |
| 2.4.3 การเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ทำงานคู่กับเมทานอลสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ..... | 14 |
| 2.4.4 การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับอุตสาหกรรม | 15 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... | 17 |
| 3.1 ขั้นตอนดำเนินการในส่วนที่ 1 | 17 |
| 3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของสารทำความเย็นที่สนใจ..... | 18 |
| 3.1.2 ศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น | 18 |
| 3.1.3 ศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ | 19 |
| 3.2 ขั้นตอนดำเนินการในส่วนที่ 2 | 19 |
| 3.2.1 ออกแบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ | 20 |
| 3.2.2 ศึกษาการทำงานของสารทำความเย็นที่เลือกศึกษาจากขั้นตอนดำเนินการในส่วนที่ 1..... | 21 |
| 3.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นที่ส่งผลต่อค่า COP..... | 22 |
| 3.2.4 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล | 22 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน | 23 |
| 4.1 การศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็นใหม่สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ V ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|----|
| 4.1.1 พฤติกรรมของสารทำความเย็นบริสุทธิ์..... | 23 |
| 4.1.2 พฤติกรรมของสารทำความเย็นสององค์ประกอบ | 24 |
| 4.1.3 การพิจารณาเลือกสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ | 27 |
| 4.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการผสมสารทำความเย็นต่อค่า COP | 28 |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ | 32 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 32 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 32 |
| บรรณานุกรม..... | 34 |
| ภาคผนวก..... | 37 |
| ภาคผนวก ก. วิธีการใช้งานโปรแกรม NIST REFPROP ^(R) | 38 |
| ภาคผนวก ข. วิธีการใช้งานโปรแกรม Aspen Plus ^(R) | 43 |
| ภาคผนวก ค. ตัวอย่างของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ.. | 47 |
| ภาคผนวก ง. ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซและน้ำที่บันทึกได้ผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ | 50 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 สารทำความเย็นที่ศึกษาสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ..... | 18 |
| ตารางที่ 3.2 สภาวะเริ่มต้นสำหรับการทดลอง..... | 22 |
| ตารางที่ ง.1 สารทำความเย็นอะซิโตนบริสุทธิ์ | 51 |
| ตารางที่ ง.2 สารทำความเย็นเมทานอลบริสุทธิ์ | 53 |
| ตารางที่ ง.3 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของ เมทานอล | 56 |
| ตารางที่ ง.4 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.1 โดยมวลของ เมทานอล | 58 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อViiงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับอย่างง่าย | 3 |
| รูปที่ 2.2 แผนภาพ Clapeyron ของวัฏจักรทำความเย็นการดูดซับในอุดมคติ | 5 |
| รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการดูดซับและการคายซับ | 5 |
| รูปที่ 2.4 กราฟ P-h diagram ของสารทำความเย็นผสม R134a/โพรเพน ที่อัตราส่วนโดยมวลของ โพรเพนที่แตกต่างกัน | 12 |
| รูปที่ 2.5 กราฟแสดงประสิทธิภาพของอุณหภูมิขณะดูดซับ (T_A) ต่อค่า COP | 13 |
| รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า COP | 14 |
| รูปที่ 2.7 ผลการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับของเมทานอล | 15 |
| รูปที่ 2.8 อัตราส่วนของสารไฮโดรคาร์บอนในสารทำความเย็นสององค์ประกอบที่ส่งผลต่อค่า COP | 16 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1 | 17 |
| รูปที่ 3.2 โปรแกรมศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็น NIST REFPROP ^(R) | 18 |
| รูปที่ 3.3 โปรแกรม ASPEN Plus ^(R) | 19 |
| รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2 | 20 |
| รูปที่ 3.5 แบบร่างของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ | 21 |
| รูปที่ 3.6 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สำหรับการทดลอง | 21 |
| รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็นบริสุทธิ์ | 23 |
| รูปที่ 4.2 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล | 24 |
| รูปที่ 4.3 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับเอทานอล | 25 |
| รูปที่ 4.4 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับน้ำ | 25 |
| รูปที่ 4.5 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างน้ำกับเมทานอล | 26 |
| รูปที่ 4.6 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างน้ำกับเอทานอล | 26 |
| รูปที่ 4.7 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างเมทานอลกับเอทานอล | 27 |
| รูปที่ 4.8 อัตราส่วนผสมที่ส่งผลต่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ | 28 |
| รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิถ่านกัมมันต์ในแท่นดูดซับ | 29 |
| รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิในเครื่องระเหย โดยที่ | 30 |
| รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล ที่ส่งผลต่อค่า COP | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ VIII งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|----|
| รูปที่ ก.1 หน้าต่าง NIST REFPROP ^(R) ขณะเปิดโปรแกรม | 39 |
| รูปที่ ก.2 หน้าต่างขณะเลือกประเภทของสารทำความเย็น | 39 |
| รูปที่ ก.3 หน้าต่างขณะเลือกประเภทของสารทำความเย็น | 40 |
| รูปที่ ก.4 หน้าต่างขณะเลือกสร้างตารางความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็น | 40 |
| รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Saturation Table ของโปรแกรม NIST REFPROP ^(R) | 41 |
| รูปที่ ก.6 หน้าต่างกำหนดช่วงอุณหภูมิของโปรแกรม NIST REFPROP ^(R) | 41 |
| รูปที่ ก.7 ตารางแสดงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นอะซิโตน | 42 |
| รูปที่ ข.1 หน้าต่าง Aspen Plus ^(R) ขณะเปิดโปรแกรม | 44 |
| รูปที่ ข.2 หน้าต่างขณะเลือก Template | 44 |
| รูปที่ ข.3 หน้าต่างสำหรับเลือกสารที่ต้องการศึกษา | 45 |
| รูปที่ ข.4 หน้าต่างขณะเลือก Method | 45 |
| รูปที่ ข.5 หน้าต่าง Binary สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมสารผสม | 46 |
| รูปที่ ข.6 กราฟแสดงสมมูลวัฏภาคไอและของเหลวของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและ เมทานอล | 46 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี มีการคาดการณ์ว่าความต้องการใช้พลังงานสำหรับระบบทำความเย็นทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นถึง 72% ภายในปี 2563 อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [1] องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency: IEA) ประเมินว่าในปี 2566 ความต้องการใช้อุปกรณ์ทำความเย็นจะคิดเป็น 10% ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั่วโลก และในประเทศที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนอาจมีความต้องการสูงถึง 50% ในช่วงฤดูร้อน [2] ซึ่งระบบทำความเย็นแบบอัดไอเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน

ระบบทำความเย็นแบบอัดไอในปัจจุบันต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากในการขับเคลื่อนระบบ นอกจากนี้สารทำความเย็นที่ใช้ในระบบ ได้แก่ สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFCs) และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) ส่งผลโดยตรงต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก สารทำความเย็นหลายชนิดถูกจัดเป็นสารที่ก่ออันตรายต่อชั้นบรรยากาศโอโซนและก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก ปัญหาดังกล่าวเกิดจากการใช้งานสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential: ODP) และค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) สูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเลือกใช้สารทำความเย็นที่เหมาะสมทั้งในแง่ประสิทธิภาพการใช้งานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางปัจจุบันในการเลือกใช้สารทำความเย็นจึงต้องพิจารณาถึงการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [3] โดยมีการเปรียบเทียบค่าต่างๆ ได้แก่ 1. ค่า ODP บอกระดับการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน โดยใช้สารทริคลอโรฟลูออโรมีเทนเป็นมาตรฐาน 2. ค่า GWP บอกระดับการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมาตรฐาน 3. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ค่าความร้อนแฝงการระเหย 4. ความสามารถในการติดไฟของสารทำความเย็น

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับเป็นระบบที่ใช้แทนดูดซับเป็นองค์ประกอบหลักในการดูดซับและคายซับสารทำความเย็น โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องอัดไอเช่นระบบทำความเย็นแบบอัดไอ แต่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือความร้อนเหลือทิ้งในการขับเคลื่อนกระบวนการ ทำให้โครงสร้างของระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่า ประหยัดพลังงาน และมีต้นทุนการดำเนินงานต่ำกว่า นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังสามารถใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำ ซึ่งมีค่า ODP และ GWP ต่ำ อีกทั้งยังมีค่าความร้อนแฝงการระเหยสูงกว่าสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ งานวิจัยเรื่องนี้จึงมุ่งศึกษาสารทำความเย็นผสมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีที่ยั่งยืน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของสัดส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาและออกแบบระบบการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ
2. ศึกษาการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ที่มีการใช้สารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเป็นสารทำความเย็น และถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับ
3. ศึกษาสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ
4. ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

เกิดความเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ และสามารถออกแบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับสำหรับการทดลองได้ รวมถึงเกิดความเข้าใจถึงวิธีการปรับปรุงสารทำความเย็นด้วยเทคนิคการผสมสารทำความเย็นสององค์ประกอบ โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (ODP) ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ความปลอดภัย และความเหมาะสมต่อการใช้งานในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

บทที่ 2

ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

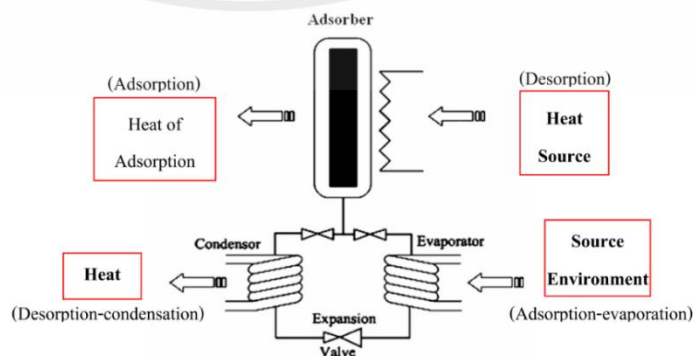
2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

2.1.1. หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ [4,5]

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับแสดงดังรูปที่ 2.1 อุปกรณ์หลักประกอบด้วย

- แท่นดูดซับ (Adsorber)
- เครื่องควบแน่น (Condenser)
- วาล์วลดแรงดัน (Expansion valve)
- เครื่องทำระเหย (Evaporator)

การทำงานของระบบเริ่มต้นจาก สารทำความเย็นไหลเข้าสู่เครื่องทำระเหย โดยดูดซับความร้อนจากแหล่งที่ต้องการลดอุณหภูมิ สารทำความเย็นกลายเป็นไออิ่มตัวและระเหยออกไป ไออิ่มตัวของสารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่แท่นดูดซับ และถูกดูดซับไว้ กระบวนการในช่วงนี้เรียกว่า “กระบวนการดูดซับ (Adsorption)” จะมีความร้อนที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการดูดซับ (Heat of adsorption) ซึ่งการหล่อเย็นแท่นดูดซับจะใช้เวลาเย็นจากสิ่งแวดล้อม (Cooling system) จนกระทั่งแท่นดูดซับอยู่ในสถานะอิ่มตัว หลังจากนั้นจะให้ความร้อนแก่แท่นดูดซับ เพื่อให้สารทำความเย็นที่ยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับ แยกออกจากกัน กระบวนการในช่วงนี้เรียกว่า “กระบวนการคายซับ (Desorption)” ในช่วงกระบวนการนี้ความดันภายในแท่นดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จนมีค่าความดันเท่ากับความดันของเครื่องควบแน่น ไอของสารทำความเย็นไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่น และถูกควบแน่นเป็นของเหลว ไหลเข้าสู่วาล์วลดแรงดันส่งผลให้อุณหภูมิลดลง และไหลเข้าสู่เครื่องระเหยอีกครั้งจนครบวัฏจักร



รูปที่ 2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

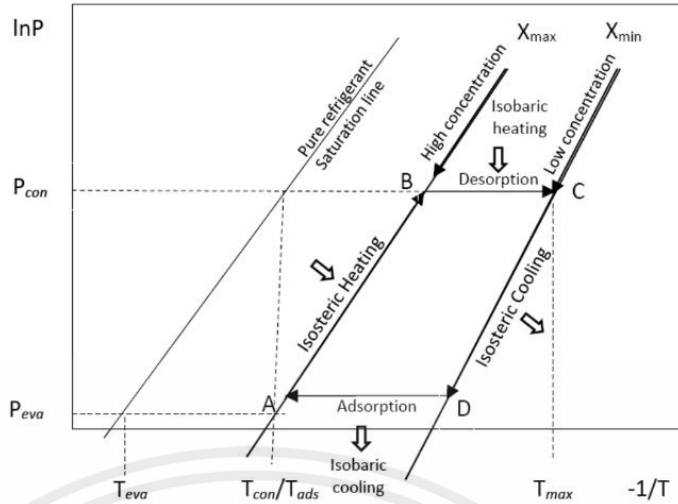
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีสามตัวแปรหลัก คือ ความดัน (P), อุณหภูมิ (T) และความสามารถในการดูดซับ (X) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ของความดันในรูปแบบ ($\ln P$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($-1/T$) และค่า ความสามารถในการดูดซับ (X) ดังแผนภาพ Clapeyron diagram ในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบไปด้วยสี่กระบวนการดังนี้

1. กระบวนการที่ A ไป B: กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน จนกระทั่งความดันเพิ่มขึ้นเท่ากับความดันเครื่องควบแน่น (P_{con}) โดยปริมาณสารทำความเย็นที่ถูกดูดซับมีค่าคงที่ (X_{max}) เรียกกระบวนการนี้ว่า “การเพิ่มอุณหภูมิแบบไอโซสเตอร์ริก (isosteric heating)”

2. กระบวนการที่ B ไป C: กระบวนการคายซับสารทำความเย็น โดยการเพิ่มอุณหภูมิต่อเนื่องต่อจากกระบวนการ isosteric heating ขณะที่ความดันคงที่ ซึ่งสารทำความเย็นจะแยกออกจากตัวดูดซับทำให้ปริมาณสารทำความเย็นที่ถูกดูดซับลดลงจาก X_{max} เป็น X_{min} เรียกกระบวนการนี้ว่า “การเพิ่มอุณหภูมิแบบความดันคงที่ (isobaric heating)”

3. กระบวนการที่ C ไป D: กระบวนการลดอุณหภูมิและความดัน จนกระทั่งความดันลดลงเท่ากับความดันเครื่องทำระเหย (P_{eva}) โดยปริมาณสารทำความเย็นที่ถูกดูดซับมีค่าคงที่ (X_{min}) เรียกกระบวนการนี้ว่า “การลดอุณหภูมิแบบไอโซสเตอร์ริก (isosteric cooling)”

4. กระบวนการที่ D ไป A: กระบวนการดูดซับสารทำความเย็น โดยมีความดันคงที่ ในกระบวนการนี้ระบบจะปลดปล่อยความร้อน (Heat of adsorption) ซึ่งจะระบายออกจากแท่นดูดซับอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิในแท่นดูดซับลดลง และส่งผลให้ปริมาณสารทำความเย็นที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นจาก X_{min} เป็น X_{max} เรียกกระบวนการนี้ว่า “การลดอุณหภูมิแบบความดันคงที่ (isobaric cooling)”

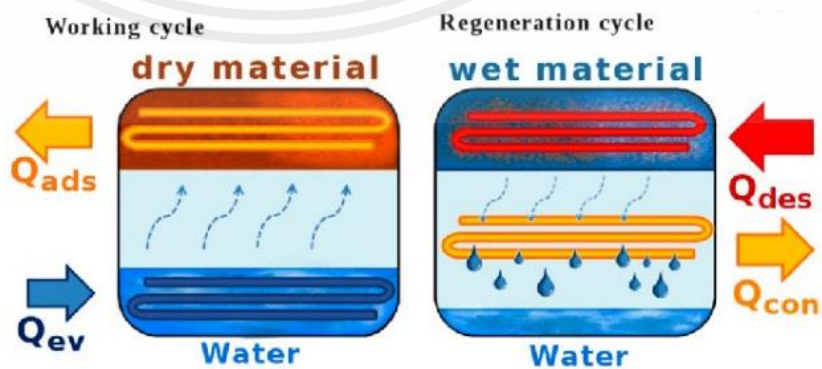


รูปที่ 2.2 แผนภาพ Clapeyron ของวัฏจักรทำความเย็นการดูดซับในอุดมคติ

2.1.2. แท่นดูดซับ (Adsorber)

2.1.2.1 หลักการดูดซับ [6]

การดูดซับ คือปรากฏการณ์บนพื้นผิวที่อนุภาคซึ่งเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” ยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งเรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbent)” กระบวนการดูดซับสำหรับระบบทำความเย็นเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของอนุภาคทั้งสอง โดยปกติตัวดูดซับจะอยู่ในสถานะของแข็ง และอนุภาคที่ยึดเกาะถูกเรียกว่าตัวถูกดูดซับหรือสารทำความเย็น ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวหรือไอ กระบวนการดูดซับสำหรับระบบทำความเย็นแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน 1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการดูดซับไอของสารทำความเย็นโดยตัวดูดซับซึ่งจะมีการปลดปล่อยความร้อนออกมา และ 2. กระบวนการคายซับ (Desorption) คือกระบวนการกำจัดสารทำความเย็นที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้ความร้อน



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการดูดซับและการคายซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 5 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ทฤษฎีการดูดซับ

สมการหลักที่อธิบายแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์สำหรับวัฏจักรการดูดซับ คือสมการสมดุลของการดูดซับ Dubinin ได้เสนอทฤษฎีการดูดซับของตัวถูกดูดซับในรูพรุนของตัวดูดซับโดยวิเคราะห์เชิงปริมาตร ซึ่งประยุกต์มาจากทฤษฎีของ Polanyi ที่เสนอการดูดซับออกมาในรูปของค่าพลังงานศักย์ของ Polanyi (ϵ) ดังสมการที่ 2-1 [7]

$$\epsilon = RT \ln \frac{P_s}{P} \quad (2-1)$$

โดย P คือ ความดันของระบบ (กิโลปาสกาล)

P_s คือ ความดันอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิของระบบ (กิโลปาสกาล)

T คือ อุณหภูมิของระบบ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ก๊าซในอุดมคติ (จุดต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

จากนั้น Dubinin ได้เสนอทฤษฎีการเติมเต็มช่องว่างในรูพรุนขนาดเล็ก เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดูดซับในรูพรุนดังสมการที่ 2-3 [8]

$$X_{eq} = X_0 \exp \left[\frac{-K \left(RT \ln \frac{P_s}{P} \right)^2}{\beta^2} \right] \quad (2-2)$$

หรือ $D = \frac{-KR^2}{\beta^2}$

$$X_{eq} = X_0 \exp \left[-D \left(T \ln \frac{P_s}{P} \right)^2 \right] \quad (2-3)$$

โดย X_{eq} คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (กิโลกรัมตัวถูกดูดซับต่อกิโลกรัมตัวดูดซับ)

X_0 คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับสูงสุด (กิโลกรัมตัวถูกดูดซับต่อกิโลกรัมตัวดูดซับ)

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผันระแวนเดอวาลส์ของคู่สารทำงาน (จุดต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ (เคลวิน⁻²)

D คือ ค่าการกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ (เคลวิน⁻²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 6 ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมา Dubinin และ Astakhov ปรับปรุงสมการให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางและสอดคล้องกับการทดลองมากยิ่งขึ้น ได้สมการดังนี้ 2-3 [4]

$$X_{eq} = X_0 \exp \left[-k \left(\frac{T_s}{T} - 1 \right)^n \right] \quad (2-4)$$

โดย k, n คือ ค่าคงที่ของคู่สารทำงาน

T_s คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ (เคลวิน)

2.1.3. เครื่องควบแน่น (Condenser) [9]

เครื่องควบแน่น หรือคอยล์ร้อน มีหน้าที่ระบายความร้อนให้กับไอของสารทำความเย็นที่ถูกคายซับจากแท่นดูดซับ ผ่านตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้สารทำความเย็นเกิดการควบแน่นเป็นสถานะของเหลว มีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_{c,in} - h_{c,out}) \quad (2-5)$$

โดย \dot{Q}_c คือ อัตราการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น (กิโลวัตต์)

\dot{m} คือ ปริมาณของสารทำความเย็น (กิโลกรัมต่อวินาที)

$h_{c,in}$ คือ พลังงานเอนทาลปีขาเข้าเครื่องควบแน่น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$h_{c,out}$ คือ พลังงานเอนทาลปีขาออกเครื่องควบแน่น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

2.1.4. วาล์วลดแรงดัน (Expansion valve) [9]

อุปกรณ์ที่รับสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลว อุณหภูมิและความดันสูง เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านอุปกรณ์ทำให้ความดันของสารทำความเย็นลดลงจากการจำกัดการไหล ซึ่งความดันที่ลดลงนี้ส่งผลให้อุณหภูมิลดลงอย่างมาก เป็นผลมาจากคุณสมบัติที่เรียกว่า “สัมประสิทธิ์จุล-ทอมสัน” โดยค่าเอนทาลปีขาเข้าและขาออกของวาล์วลดแรงดันมีค่าเท่ากัน

2.1.5. เครื่องทำระเหย (Evaporator) [9]

เครื่องทำระเหย หรือคอยล์เย็น เปรียบเสมือนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทำหน้าที่รับปริมาณความร้อนจากแหล่งที่ต้องการลดอุณหภูมิ เช่น น้ำหรืออากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิลดลง ซึ่งความร้อนที่ได้รับทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไออิ่มตัว มีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_{e,out} - h_{e,in}) \quad (2-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย \dot{Q}_L คือ อัตราการดูดซับความร้อนของสารทำความเย็น
(กิโลวัตต์)

$h_{e,in}$ คือ พลังงานเอนทาลปีขาเข้าเครื่องทำระเหย
(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$h_{e,out}$ คือ พลังงานเอนทาลปีขาออกเครื่องทำระเหย
(กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

2.1.6. ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น (COP) [5,8]

ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น (COP) คือค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็น สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับใช้แทนตัวดูดซับเสมือนเป็นเครื่องอัดไอ ซึ่งจะหมุนเวียนสารทำความเย็นผ่านกระบวนการเพิ่มและลดอุณหภูมิสลับกันเป็นระยะ ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น (COP) ของระบบคำนวณได้จากพลังงานที่สารทำความเย็นได้รับจากแหล่งที่ต้องการลดอุณหภูมิต่อพลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับกระบวนการให้ความร้อนเพื่อคายซับสารทำความเย็น มีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{heat}} = \dot{m}H_{\text{des}} \quad (2-7)$$

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{\text{heat}}} \quad (2-8)$$

โดย COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

\dot{Q}_{heat} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ให้แก่แทนดูดซับ
(กิโลวัตต์)

H_{des} คือ พลังงานความร้อนสำหรับการคายซับ (กิโลจูล/กิโลกรัม)

2.2 คู่ตัวดูดซับและสารทำความเย็น [5,10]

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่มีแหล่งพลังงานความร้อนต่ำ นิยมใช้ตัวดูดซับทางกายภาพ (physical adsorbent) ตัวดูดซับอาศัยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลในการดูดซับสารทำความเย็น โดยทั่วไปคู่ตัวดูดซับทางกายภาพและสารทำความเย็นที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ได้แก่ 1. ถ่านกัมมันต์/เมทานอล 2. ซิลิกาเจล/น้ำ และ 3. ซีโอไลต์/น้ำ

2.2.1 ถ่านกัมมันต์/เมทานอล

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับอยู่ในช่วง 800 ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันทั่วไปผลิตจากวัตถุดิบ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ 8 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้ เปลือกถั่ว และโพลีเมอร์สังเคราะห์ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีข้อดีเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ คือ ความร้อนของการดูดซับค่อนข้างต่ำอยู่ที่ประมาณ 1800 ถึง 2000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นผลดีต่อค่า COP ของระบบ เนื่องจากความร้อนของการดูดซับที่ต่ำ ส่งผลให้ความร้อนที่ใช้สำหรับการคายซับของตัวดูดซับต่ำและขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม แต่ค่าการนำความร้อนของถ่านกัมมันต์ต่ำ เท่ากับ 0.0893 วัตต์/ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งใกล้เคียงกับวัสดุฉนวน

คู่ถ่านกัมมันต์/เมทานอล มีความสามารถในการดูดซับปริมาณมาก ประมาณ 0.45 กิโลกรัมเมทานอลต่อกิโลกรัมถ่านกัมมันต์ ความร้อนที่ใช้สำหรับกระบวนการคายซับต่ำ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 150 องศาเซลเซียส กัมมันต์สามารถกระตุ้นการสลายตัวของเมทานอลให้เป็นไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งไม่ต้องการสำหรับการทำงานของระบบทำความเย็น และความดันของระบบต้องดำเนินการที่สภาวะสุญญากาศ

2.2.2 ซิลิกาเจล/น้ำ

ซิลิกาเจลสังเคราะห์จากซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งได้มาจากโซเดียมซิลิเกต มีโครงสร้างเป็นเม็ดละเอียด และมีรูพรุนสูง ซิลิกาเจลชนิดทั่วไปที่ใช้ในระบบดูดซับ เรียกว่าซิลิกาเจล ความหนาแน่นสูง ซิลิกาเจลประเภทนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 3.5 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.3 ถึง 0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะตั้งแต่ 400 ถึง 700 ตารางเมตรต่อกรัม ซิลิกาเจลมีข้อได้เปรียบที่สำคัญเหนือตัวดูดซับอื่นๆ คืออุณหภูมิที่ใช้สำหรับในกระบวนการการคายซับค่อนข้างต่ำ อยู่ที่ประมาณ 85 องศาเซลเซียส ทำให้ระบบซิลิกาเจลเหมาะสมสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ

คู่ซิลิกาเจล/น้ำ มีความสามารถในการดูดซับอยู่ระหว่าง 0.35 ถึง 0.4 กิโลกรัมของน้ำต่อกิโลกรัมของซิลิกาเจล แต่ข้อจำกัดของระบบนี้ คือ ไม่สามารถดำเนินการอุณหภูมิที่เครื่องทำระเหยต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำได้ และประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ต่ำ เนื่องจากกระบวนการดูดซับสารทำความเย็นลงบนซิลิกาเจลอาจไม่สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม

2.2.3 ซีโอไลต์/น้ำ

ซีโอไลต์เป็นโครงสร้างผลึกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ประกอบด้วยอะลูมินาและซิลิเกต คู่การทำงานของซีโอไลต์กับน้ำใช้อุณหภูมิสำหรับกระบวนการคายซับได้หลากหลายช่วง ตั้งแต่ 70 ถึง 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากซีโอไลต์มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง ระบบซีโอไลต์/น้ำสามารถรับความร้อนได้โดยตรงโดยจากก๊าซร้อนเหลือทิ้ง ดังนั้นระบบนี้จึงมีการ

ออกแบบที่ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ความร้อนในการทำความร้อน แต่ความร้อนของการดูดซับของระบบซีโอไลต์/น้ำคอนข้างสูง ประมาณ 3,300 ถึง 4,200 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้ COP ของระบบลดลง ระบบซีโอไลต์/น้ำ มุ่งเน้นไปที่การใช้งานในระบบปรับอากาศภายในรถยนต์

2.2.4 คุณสมบัติของสารทำความเย็น [11]

สารทำความเย็น ทำหน้าที่เป็นสารทำงานในการถ่ายเทความร้อนในระบบทำความเย็น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในระบบทำความเย็น การเลือกสารทำความเย็นสำหรับระบบดูดซับขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะและคู่สารดูดซับ โดยทั่วไปสารทำความเย็นที่เหมาะสมควรคุณสมบัติดังนี้ คือ 1. ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูง 2. ค่าความดันไออิ่มตัวต่ำที่สภาวะการทำงานปกติ (มีค่าใกล้เคียงความดันบรรยากาศ) 3. สารมีความเสถียรทางความร้อน 4. สารเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม 5. ช่วงขีดจำกัดการติดไฟแคบ และ 6. สารไม่เป็นพิษและไม่กัดกร่อน แต่ไม่มีสารทำความเย็นตัวที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ทั้งหมด ซึ่งนำไปสู่การเลือกสารทำความเย็น โดยทั่วไปสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ได้แก่ น้ำ, เมทานอลและเอทานอล ดังตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของสารทำความเย็นสำหรับระบบดูดซับ

2.2.4.1 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP)

เป็นการบอกถึงปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดูดซับได้ โดยมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเท่ากับ “หนึ่ง” ที่พิจารณาในช่วงระยะเวลา “หนึ่งร้อยปี” [12,13] การวัดค่าของสารทำความเย็นที่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อนนั้นมาจากแนวคิดค่าตรรกะที่ผลกระทบต่อทำให้โลกร้อนขึ้นเทียบเท่าโดยรวมมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม [14]

2.2.4.2 ค่าศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP)

ค่าศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน ใช้เพื่อบอกถึงระดับการทำลายโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ เปรียบเทียบจากประสิทธิภาพการทำลายโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ โดยกลไกการแตกตัวของอะตอมอิสระของคลอรีนที่พร้อมทำปฏิกิริยากับโอโซนในชั้นบรรยากาศที่มีผลมาจากการใช้สารทำความเย็น ไตรคลอโร

ฟลูออโรมีเทนเป็นสารอ้างอิงที่กำหนดค่าศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซนเป็น “หนึ่ง” [15,16]

2.3 สารทำความเย็นสององค์ประกอบ

การผสมเย็นสารทำความเย็นสององค์ประกอบ ควรพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐาน ความปลอดภัย และความเหมาะสมต่ออุปกรณ์ของระบบทำความเย็น รวมถึงต้องมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของระบบทำความเย็น [15] สารทำความเย็นแต่ละชนิดมีการใช้งานเฉพาะขึ้นอยู่กับชนิดของระบบทำความเย็น สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับสารทำความเย็นที่เหมาะสม คือ มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูง ค่าความดันไออิ่มใกล้เคียงความดันบรรยากาศ และเหมาะสมต่อตัวดูดซับ โดยการผสมสารทำความเย็นยังคงมีการศึกษาและทดลองอย่างต่อเนื่อง การผสมสารทำความเย็นแบ่งเป็นสองประเภท คือ 1. สารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิก และ 2. สารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิก ดังนี้

2.3.1 ลักษณะของสารทำความเย็นแบบผสม [17]

2.3.1.1 สารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิก

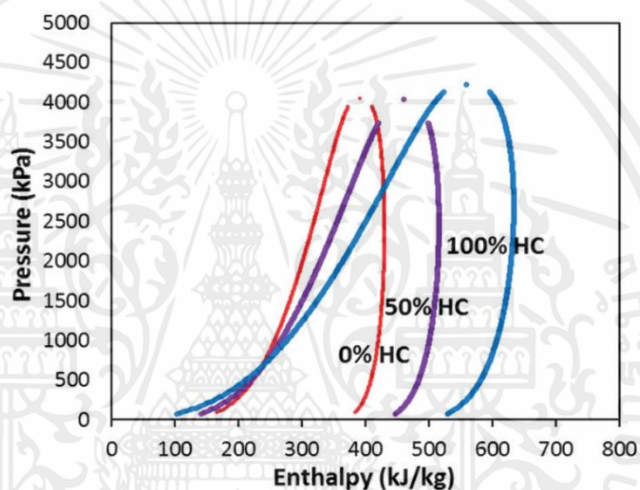
สารทำความเย็นผสมสองชนิดขึ้นไปที่มีองค์ประกอบในวิภาคไอและวิภาคของเหลวเหมือนกัน ทำให้อุณหภูมิ ณ เครื่องทำระเหยและความแน่นมีค่าคงที่ ที่ความดันค่าหนึ่ง ด้วยเหตุนี้สารผสมอะซีโอโทรปิกจึงมีพฤติกรรมเหมือนสารทำความเย็นบริสุทธิ์

2.3.1.2 สารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิก

สารทำความเย็นผสมสองชนิดขึ้นไปที่มีองค์ประกอบในวิภาคไอและวิภาคของเหลวต่างกัน เมื่อของสารผสมแบบซีโอโทรปิกผ่านการระเหย สารที่มีระเหยง่ายจะกลายเป็นไอก่อน ในขณะที่สารที่มีการระเหยยากจะควบแน่นเป็นของเหลวก่อนในเครื่องควบแน่น

2.3.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็นด้วยวิธีผสมกับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ [18]

คุณสมบัติของสารทำความเย็นผสมระหว่างสารทำความเย็นกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) กับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ (Hydrocarbon: HC) ได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากอัตราส่วนของการผสม สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสม สามารถคำนวณได้จาก REFPROP ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดยสถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติ (National Institute of Standards and Technology: NIST) โดยการผสมสารทำความเย็นกับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ ช่วยเพิ่มความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม



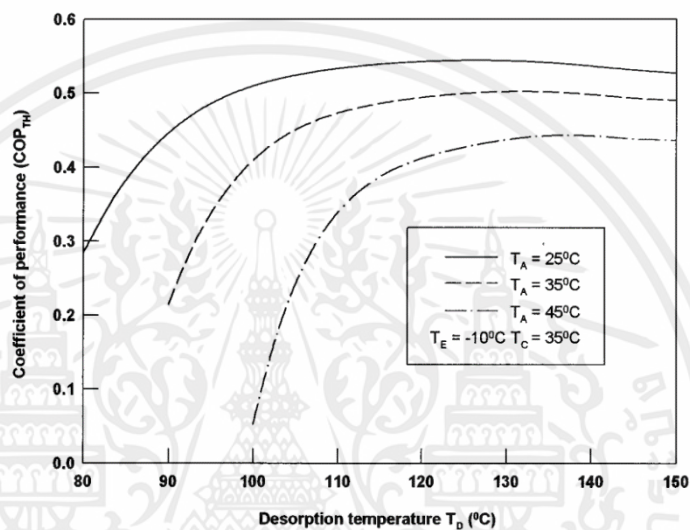
รูปที่ 2.4 กราฟ P-h diagram ของสารทำความเย็นผสม R134a/โพรเพน ที่อัตราส่วนโดยมวลของโพรเพนที่แตกต่างกัน

2.4 บทความที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การศึกษาสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซับจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้คู่ทำงานถ่านกัมมันต์และเมทานอล

K. Sumathy และ Z. F. LI [19] ได้ศึกษาการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการทำน้ำแข็ง ซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับและเมทานอลเป็นสารทำความเย็นซึ่งให้เหตุผลในการเลือกสารทำความเย็น ได้แก่ 1. เมทานอลสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส 2. โมเลกุลของเมทานอลมีขนาดเล็ก (ประมาณ 20 อังสตรอม) ซึ่งสามารถถูกดูดซับได้ง่ายในรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) และ 3. เมทานอลมีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่สูง ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อค่า COP ของระบบ

สำหรับการออกแบบระบบทำความเย็น ถ่านกัมมันต์ถูกบรรจุแทนดูดซับแบบแผ่นเรียบ (Flat plate) ซึ่งมีพื้นที่ 0.92 ตารางเมตร และมีช่องการไหลของอากาศ ใช้สำหรับการลดอุณหภูมิของตัวดูดซับขณะดูดซับ อุณหภูมิขณะดูดซับของถ่านกัมมันต์อาจสูงขึ้นถึงประมาณ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อค่า COP ของระบบ ดังรูปที่ 2.5 จากการทดลองสามารถผลิตน้ำแข็งได้ประมาณ 4 ถึง 5 กิโลกรัมต่อวัน โดยมีพลังงานจากแสงอาทิตย์ประมาณ 17 ถึง 19 เมกะจูลต่อตารางเมตร แทนดูดซับมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 70–78°C และค่า COP ของระบบอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.2



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงประสิทธิภาพของอุณหภูมิขณะดูดซับ (T_A) ต่อค่า COP

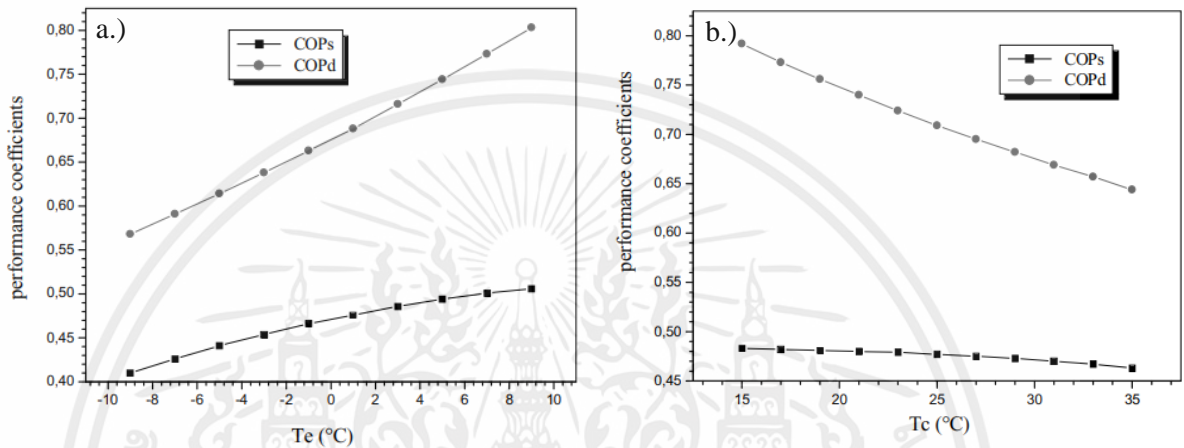
2.4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นที่ส่งผลกระทบต่อระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

W. Chekirou และคณะ [20] ได้ทำการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์และตัวแปรอย่างละเอียดของวัฏจักรทำความเย็นแบบดูดซับอย่างง่าย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ AC-35/เมทานอลเป็นคู่สารทำงาน พวกเขาใช้สมการ Dubinin-Astakhov อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ และวิเคราะห์ผลกระทบของการลดลงของอุณหภูมิที่เครื่องทำระเหยและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น

ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่เครื่องทำระเหยลดลง ส่งผลให้ความดันอิ่มตัวของเมทานอลลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิและความดันอิ่มตัว ส่งผลให้ค่า COP ของระบบลดลงด้วย โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เครื่องทำระเหยควรถูกจำกัดตามเป้าหมายการใช้งาน เช่น สำหรับการ

ทำน้ำแข็งควรจำกัดไว้ระหว่าง -5 ถึง -10 องศาเซลเซียส และสำหรับเครื่องปรับอากาศควร จำกัดประมาณ 5 องศาเซลเซียส

ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิของเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันอิ่มตัวของ เมทานอลสูงขึ้น ทำให้ปริมาณเมทานอลที่ถูกคายซับลดลง และต้องใช้อุณหภูมิสำหรับการ คายซับสูงขึ้น เพื่อให้ความดันในแท่นดูดซับเท่ากับความดันที่เครื่องควบแน่น ซึ่งการเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิเครื่องควบแน่นนี้ส่งผลให้ค่า COP ของระบบลดลงเช่นกัน



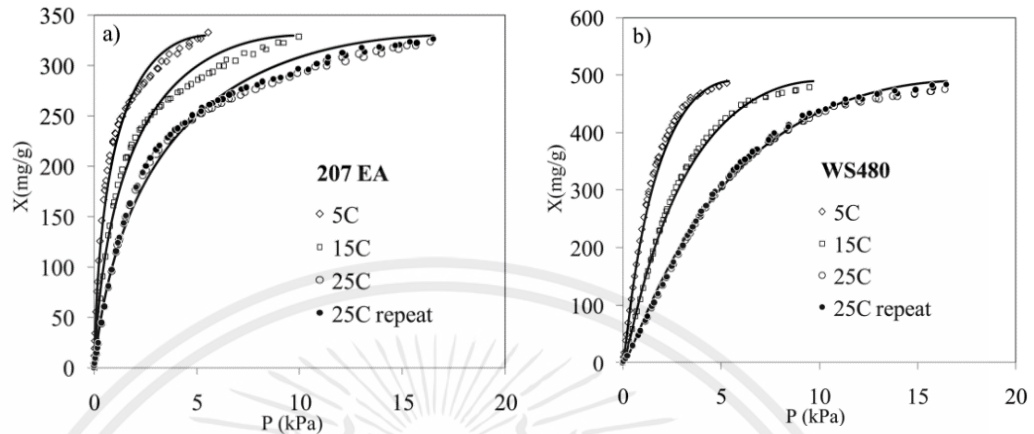
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า COP โดยที่ a.) อุณหภูมิที่เครื่องทำ ระบาย b.) อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น

2.4.3 การเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ทำงานคู่กับเมทานอลสำหรับระบบทำความเย็น แบบดูดซับ

Jun W. Wu และคณะ [21] ได้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและการให้ความ ร้อนแบบไอโซสเทอริกสำหรับการดูดซับเมทานอล โดยชนิดของถ่านกัมมันต์ที่นำมา เปรียบเทียบคุณสมบัติ ได้แก่ ถ่านกัมต์ชนิด 207EA มีรูพรongแบบเม็ดขนาดเล็ก และ ถ่านกัมต์ชนิด WS-480 มีรูพรongเป็นเม็ดอัดแท่ง ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดสามารถหาซื้อ ได้โดยง่าย จากผลการทดลองไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทานอลบนถ่านกัมมันต์ทั้งสอง ชนิด ด้วยสมการ Dubinin-Astakhov (D-A) ที่อุณหภูมิ 5, 15, 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ ถ่านกัมต์ชนิด 207EA และ ถ่านกัมต์ ชนิด WS-480 อยู่ที่ประมาณ 330 และ 490 มิลลิกรัมเมทานอลต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ

สำหรับการประเมินพลังงานความร้อนที่ต้องการสำหรับกระบวนการไอโซสเทอริก ใช้สมการของ Clausius-Clapeyron ในการวิเคราะห์ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดใช้ พลังงานความร้อนใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมต์ชนิด 207EA มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมี

ขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า ดังนั้นในการพิจารณาชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ทำงานคู่กับเมทานอล สำหรับระบบทำความเย็น ถ่านกัมต์ชนิด WS-480 มีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับเมทานอลสูง



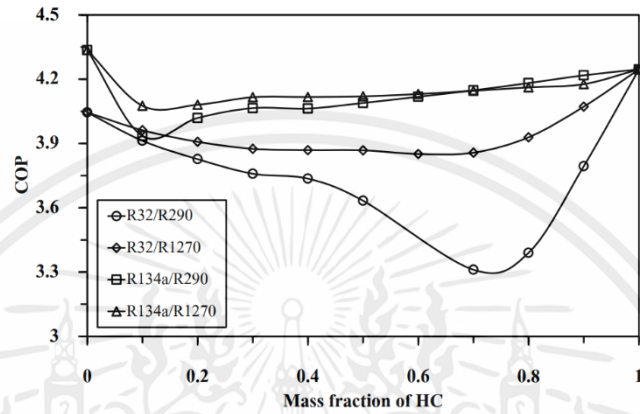
รูปที่ 2.7 ผลการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับของเมทานอล โดยที่ a.) ถ่านกัมต์ชนิด 207EA b.) ถ่านกัมต์ชนิด WS-480

2.4.4 การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับอุตสาหกรรม

นายรัชชานนท์ เรียบร้อย และนายณัฐอมร คำลือ [22] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการผสมของสารทำความเย็นระหว่าง R32/R290, R32/1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการทำความเย็น (COP) และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) โดยศึกษาคุณลักษณะของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบแบบอะซีโอโทรปิก เนื่องจากมีองค์ประกอบในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวเหมือนกันที่ความดันค่าหนึ่ง ส่งผลให้สารทำความเย็นผสมแบบอะซีโอโทรปิกมีลักษณะเหมือนสารทำความเย็นองค์ประกอบเดียว

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบทั้ง 4 ชนิด สามารถศึกษาจากโปรแกรมแบบจำลองระบบทำความเย็นแบบอัดไอ Cycle_D-HX ได้ผลดังนี้ คือ อัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็น และพฤติกรรมความแตกต่างของระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวต่างส่งผลต่อค่า COP ในระบบ ซึ่งช่วงความแตกต่างระหว่างวัฏภาคไอกับของเหลวต่างกันมาก ส่งผลให้ค่า COP ลดลง เนื่องจากช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าพฤติกรรมของสารทำความเย็น R32/R290 ค่อนข้างมีแนวโน้มการลดลงของค่า COP ที่ชัดเจนกว่าสารทำความเย็นตัวอื่นๆ เนื่องจากการทำความเย็น R32/R290 มีช่วงความแตกต่างระหว่างภาคที่กว้าง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า COP ที่สูง ขณะที่สารทำความเย็น R32/R1270 มีแนวโน้ม

เปลี่ยนแปลงค่า COP เพียงเล็กน้อย และในสารทำความเย็น R134a/R290 กับ R134a/R1270 มีพฤติกรรมของการผสมที่ใกล้เคียงกัน โดยมีการเกิดช่วงความแตกต่างระหว่างสถานะที่แคบและเกิดจุดอะซีโอโทรปตลอดช่วงอัตราส่วนสารไฮโดรคาร์บอนที่สูง ซึ่งมีประโยชน์มากในการนำไปใช้ในระบบทำความเย็น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนของการทำความเย็นเปลี่ยนไปก็สามารถเติมสารไฮโดรคาร์บอนเพื่อรักษาสภาวะความเป็นอะซีโอโทรปิกอยู่ได้



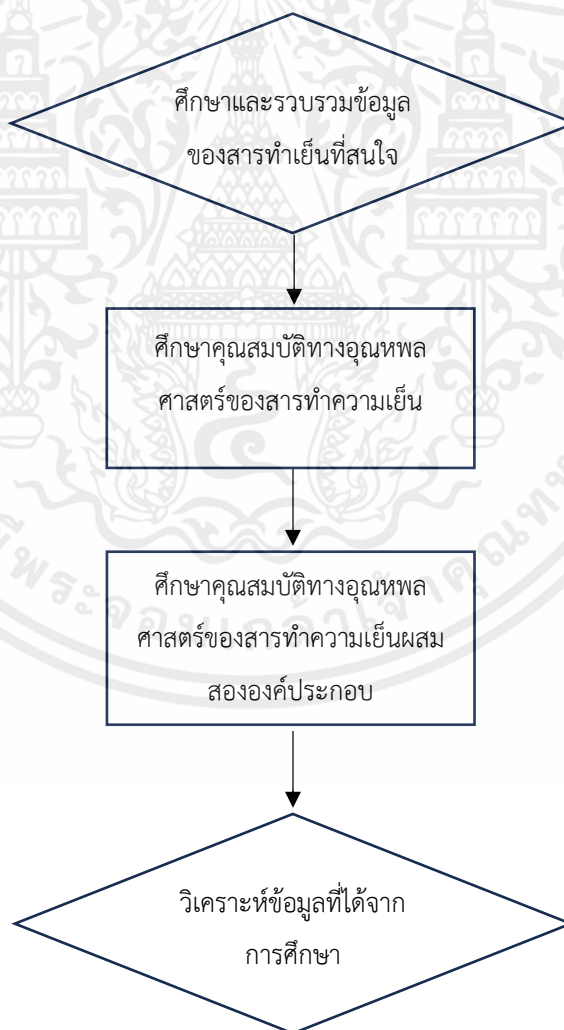
รูปที่ 2.8 อัตราส่วนของสารไฮโดรคาร์บอนในสารทำความเย็นสององค์ประกอบที่ส่งผลต่อค่า COP

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยได้นี้มุ่งเน้นถึงการปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็นด้วยเทคนิคการผสมสารทำความเย็นสององค์ประกอบสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นที่เหมาะสมกับระบบมากขึ้น ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับด้วยวิธีการผสมสารทำความเย็นเข้าด้วยกันทำให้เกิดคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ดีและเหมาะสมกับการใช้งานในระบบ 2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นแบบผสมต่อค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

3.1 ขั้นตอนดำเนินการในส่วนที่ 1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของสารทำความเย็นที่สนใจ

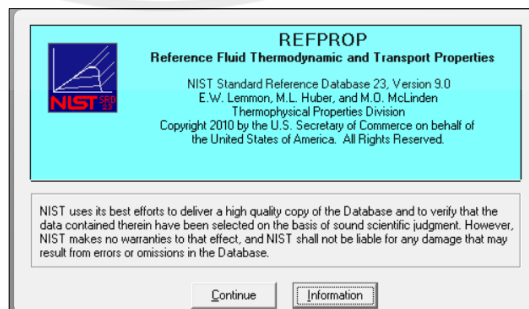
การศึกษาและรวบรวมข้อมูลสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่มีความเป็นไปได้สำหรับเทคนิคผสมสารทำความเย็นสององค์ประกอบ โดยกำหนดขอบเขตที่ต้องการศึกษาให้อยู่ในกลุ่มสารทำความเย็นที่มีค่าความร้อนแฝงสูง รวมทั้งมีค่า ODP และ GWP ต่ำ สามารถดำเนินงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3.1 สารทำความเย็นที่ศึกษาสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

| สารทำความเย็น | จุดเดือดที่สถานะปกติ (°C) | ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (kJ/kg) | ค่า GWP | ค่า ODP | ตัวดูดซับ | ขีดจำกัดการติดไฟ (ร้อยละโดยปริมาตรในอากาศ) | |
|---------------|---------------------------|----------------------------------|---------|---------|--------------|--|------------|
| | | | | | | ขีดจำกัดล่าง | ขีดจำกัดบน |
| น้ำ | 100 | 2258 | - | - | ซิลิกาเจล | - | - |
| เมทานอล | 65 | 1102 | 5.7 | 0 | ถ่านกัมมันต์ | 7.5 | 36.0 |
| เอทานอล | 79 | 842 | 1.5 | 0 | ถ่านกัมมันต์ | 4.3 | 19.0 |
| อะซิโตน | 56 | 518 | 0.33 | 0 | ถ่านกัมมันต์ | 2.6 | 12.8 |

3.1.2 ศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น

การศึกษาอุณหภูมิต่ำสุดของสารทำความเย็นที่สัมพันธ์กับความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็น เพื่อทราบถึงอุณหภูมิต่ำสุดของสารทำความเย็นที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ที่ความดันต่างๆ ข้อมูลดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญในการคัดเลือกสารทำความเย็นที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่กำลังศึกษา โดยการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะดำเนินการผ่านโปรแกรม NIST REFPROP^(R) เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา หรือ NIST ซึ่งมีความเชี่ยวชาญในการจำลองคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์และกายภาพของสารทำความเย็น ช่วยให้สามารถคาดคะเนพฤติกรรมของสารทำความเย็นได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.2 โปรแกรมศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็น NIST REFPROP^(R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ 18 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

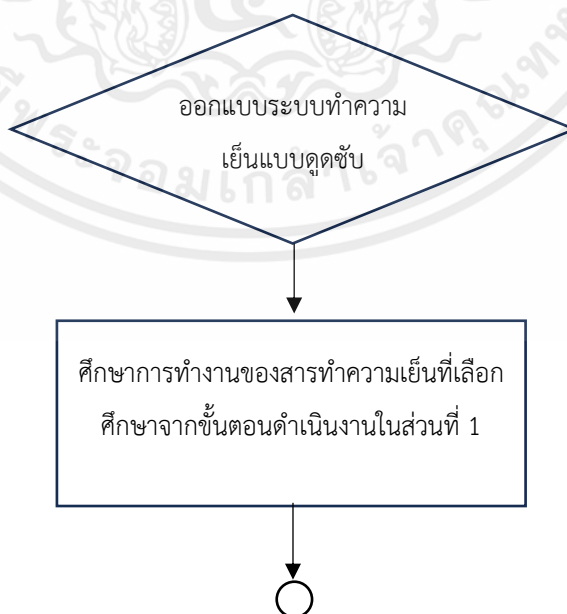
3.1.3 ศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ

การศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสม โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ คือ UNIQUAC ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม ASPEN Plus^(R) ซึ่งแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1. การศึกษาสมดุลวัฏภาคไอกับของเหลวของสารทำความเย็นผสมแต่ละคู่สาร เพื่อดูแนวโน้มพฤติกรรมการเกิดอะซีโอโทรปิกของสารทำความเย็นผสม 2. การศึกษาอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นที่ส่งผลต่อค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ

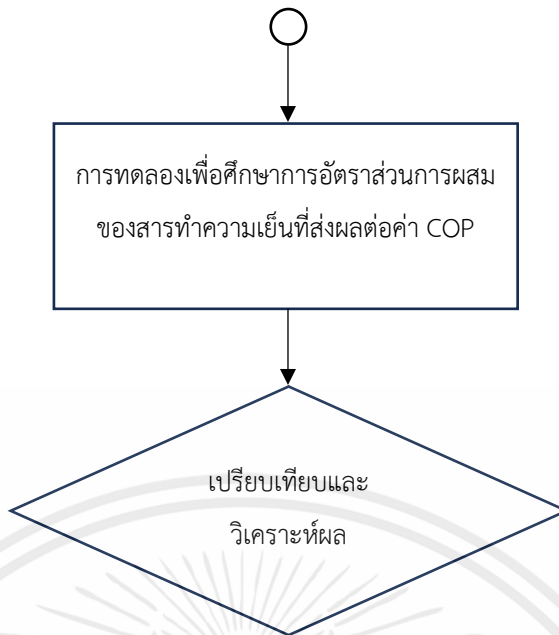


รูปที่ 3.3 โปรแกรม ASPEN Plus^(R)

3.2 ขั้นตอนดำเนินการในส่วนที่ 2



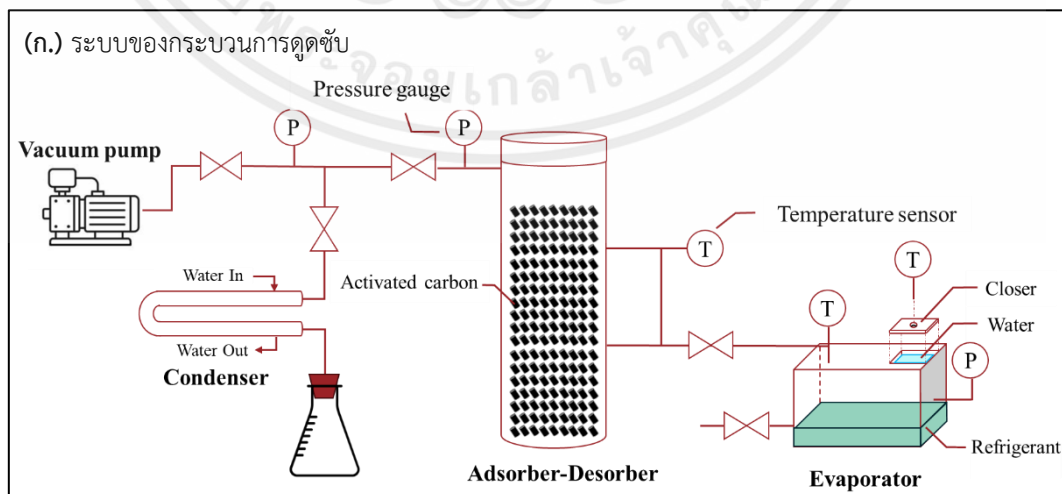
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 19 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



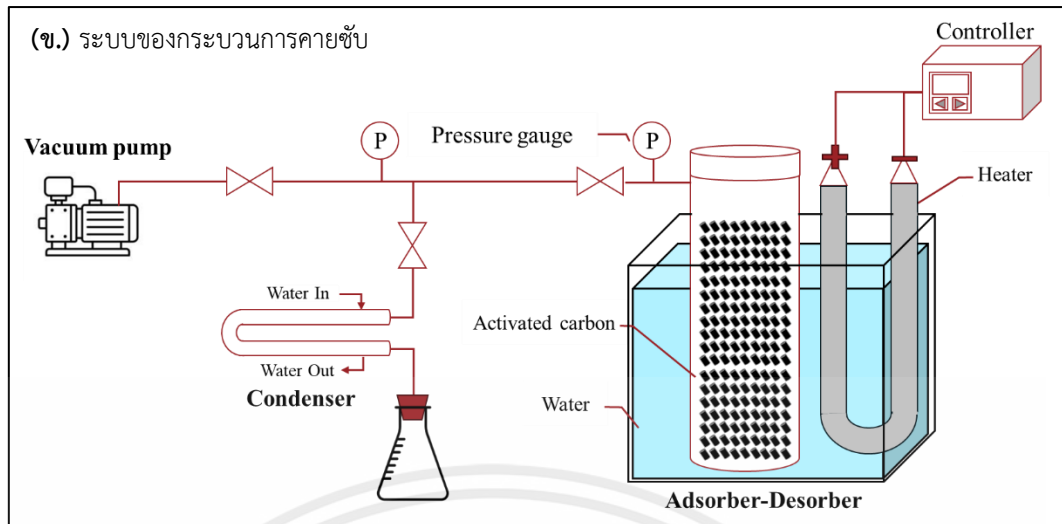
รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2

3.2.1 ออกแบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

การออกแบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ระบบที่ออกแบบเป็นระบบทำความเย็นแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำความเย็นได้ในช่วงที่กำหนดจนกว่าสารดูดซับอิ่มตัว อุปกรณ์หลักของระบบได้แก่ 1. เครื่องทำระเหย 2. แท่นบรรจุสารดูดซับ 3. เครื่องควบแน่น 4. ถังเก็บสารทำความเย็น และ 5. ป้อนสุญญากาศ ซึ่งเครื่องมีวัดอุณหภูมิถูกติดตั้งเพื่อบันทึกผลของอุณหภูมิบริเวณสารทำความเย็น, น้ำที่ต้องการลดอุณหภูมิ และสารดูดซับ โดยใช้อุปกรณ์ Arduino Nano รวมถึงมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนใช้สำหรับกระบวนการคายซับสารทำความเย็นออกจากตัวดูดซับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 20 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบร่างของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ



(ก.) ระบบของกระบวนการดูดซับ

(ข.) ระบบของกระบวนการคายซับ

รูปที่ 3.6 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.2.2 ศึกษาการทำงานของสารทำความเย็นที่เลือกศึกษาจากขั้นตอนดำเนินงานในส่วนที่ 1

การศึกษาศาสตร์ทำความเย็นที่คัดเลือกที่จะนำมาทดสอบ ซึ่งได้พิจารณาจากขั้นตอนการดำเนินงานที่ได้กล่าวไว้ในส่วนที่ 1 เพื่อให้มั่นใจว่าสารทำความเย็นที่คัดเลือกสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ได้ออกแบบไว้สำหรับงานวิจัยนี้

3.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นที่ส่งผลต่อค่า COP

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นที่มีต่อสมรรถนะของระบบทำความเย็น โดยประเมินจากค่า COP ซึ่งจะทำการทดลองที่อัตราส่วนการผสมที่เกิดพฤติกรรมสภาวะจุดอะซีโอโทรปิก และอัตราส่วนการผสมสารทำความเย็นในอัตราส่วนโดยมวลเท่ากัน สภาวะเริ่มต้นสำหรับการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะเริ่มต้นสำหรับการทดลอง

| ความดัน (บาร์) | ปริมาณสารดูดซับ (กรัม) | ปริมาณสารทำความเย็น (กรัม) | ปริมาณน้ำที่ต้องการลดอุณหภูมิ (มิลลิลิตร) | ระยะเวลาการทดลอง (ชั่วโมง) |
|----------------|------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| 0.06 – 0.07 | 850 | 250 | 325 | 6 |

3.2.4 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ โดยใช้สารทำความเย็นผสม ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดต่อระบบทำความเย็นที่ออกแบบ

บทที่ 4

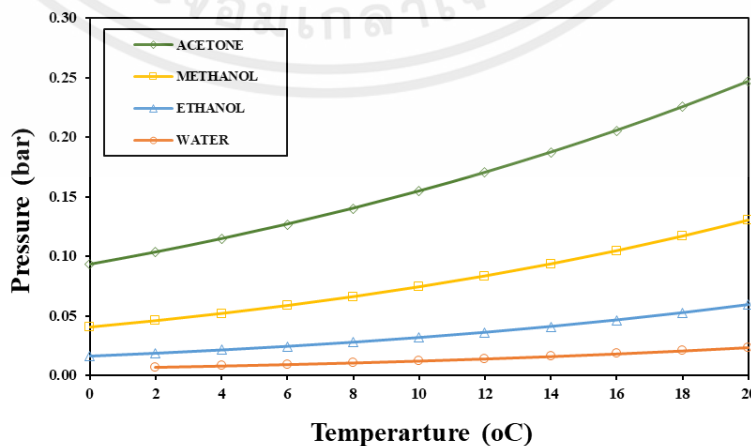
ผลการดำเนินงาน

จากงานวิจัยนี้ผลของการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1. การศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็นใหม่สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ด้วยวิธีการผสมสารทำความเย็นองค์ประกอบประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นบริสุทธิ์และสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ เพื่อพิจารณาเลือกสารทำความเย็นที่เหมาะสมที่จะนำมาผสม สำหรับใช้กับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ออกแบบไว้ และ 2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการผสมสารทำความเย็นต่อค่า COP โดยใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ได้ออกแบบไว้เป็นระบบทดสอบ

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็นใหม่สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

4.1.1 พฤติกรรมของสารทำความเย็นบริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็นบริสุทธิ์ 4 ชนิด ได้แก่ อะซิโตน เมทานอล เอทานอล และน้ำ จากผลการศึกษาดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า ที่ทุกช่วงอุณหภูมิเดียวกัน สารอะซิโตนมีความดันไออิ่มตัวสูงสุด ถัดมาคือเมทานอล, เอทานอล และน้ำตามลำดับ ซึ่งความดันไออิ่มตัวที่สูงของสารทำความเย็น จะส่งผลให้สารทำความเย็นมีความสามารถในการระเหยได้ง่ายขึ้น คุณสมบัตินี้เป็นประโยชน์สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เนื่องจากทำให้ระบบสามารถดำเนินการได้โดยใช้พลังงานจากปั๊มสุญญากาศในปริมาณที่ไม่สูงมาก ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนในการใช้งานของระบบ

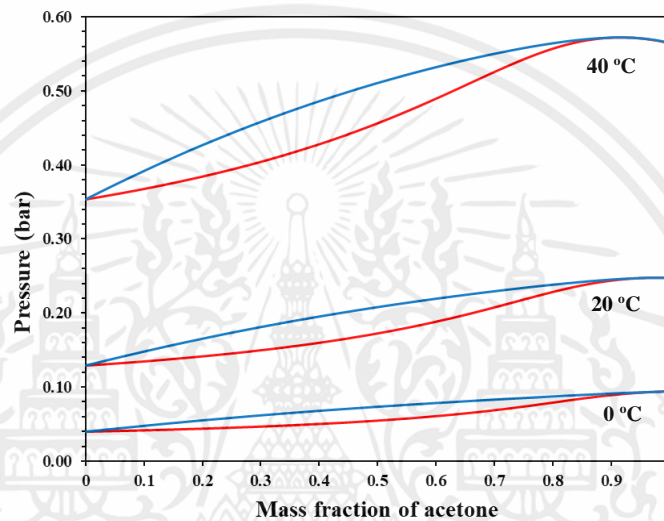


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็นบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

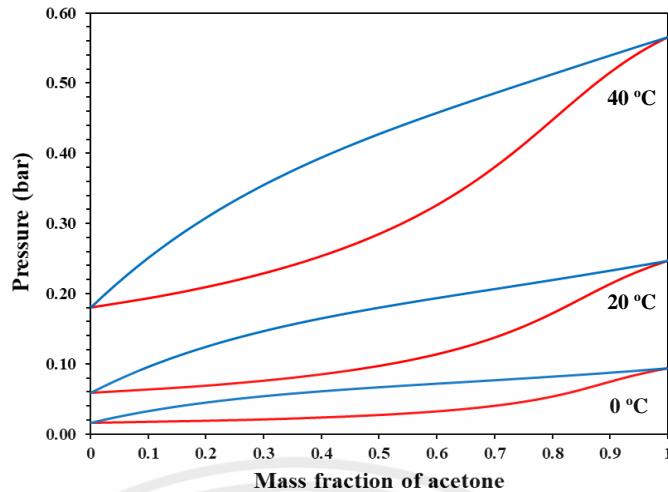
4.1.2 พฤติกรรมของสารทำความเย็นสององค์ประกอบ

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอลแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์อะซิโตรีปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 จากการศึกษาพบว่าปรากฏการณ์อะซิโตรีปิกเกิดขึ้นที่อัตราส่วนโดยมวลของอะซิโตนเท่ากับ 0.9 เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลลดลง พบว่าช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้คือ 40 มิลลิบาร์



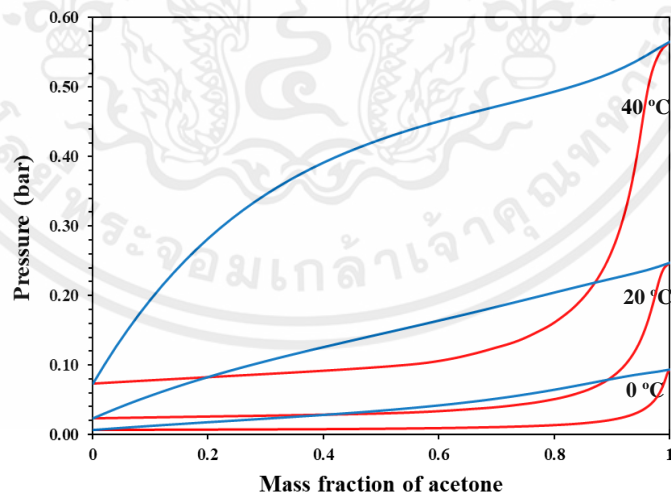
รูปที่ 4.2 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเอทานอล พบว่าแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์อะซิโตรีปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 จากการศึกษาพบว่าช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอกับของเหลวมีความกว้างมากตลอดช่วงอัตราส่วนโดยมวลของการผสม และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้คือ 16 มิลลิบาร์



รูปที่ 4.3 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับเอทานอล

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและน้ำ จากการศึกษพบว่าแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์ซีโอโทรปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.4 ช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอกับของเหลวของสารผสมดังกล่าวมีความกว้างมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสารทำความเย็นที่ใช้เมทานอลหรือเอทานอลผสมกับอะซิโตน โดยช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคมีค่ามากที่สุดช่วงอัตราส่วนโดยมวลของการผสม นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้คือ 6 มิลลิบาร์

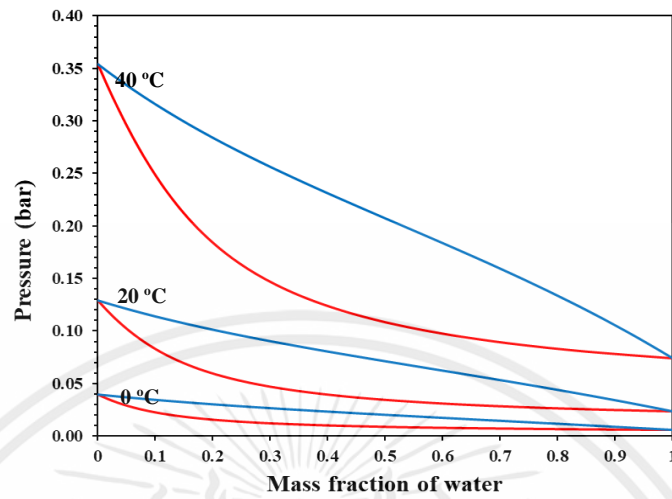


รูปที่ 4.4 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างอะซิโตนกับน้ำ

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างน้ำและเมทานอล พบว่าแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์ซีโอโทรปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 จากการศึกษพบว่าช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอกับของเหลวมี

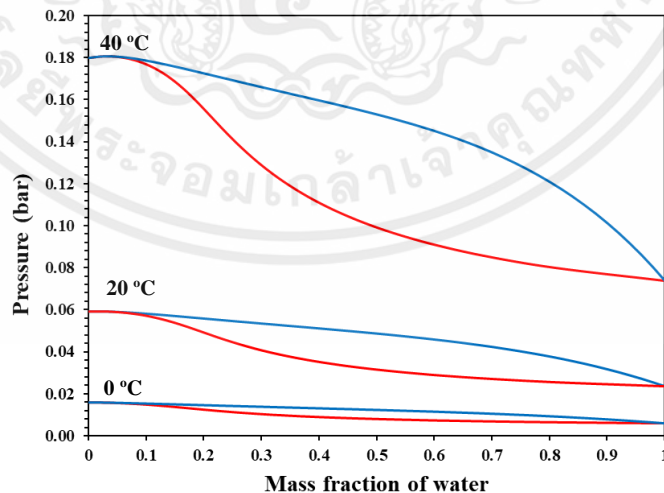
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่อ 25 อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างมากตลอดช่วงอัตราส่วนโดยมวลของการผสม และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้คือ 6 มิลลิบาร์



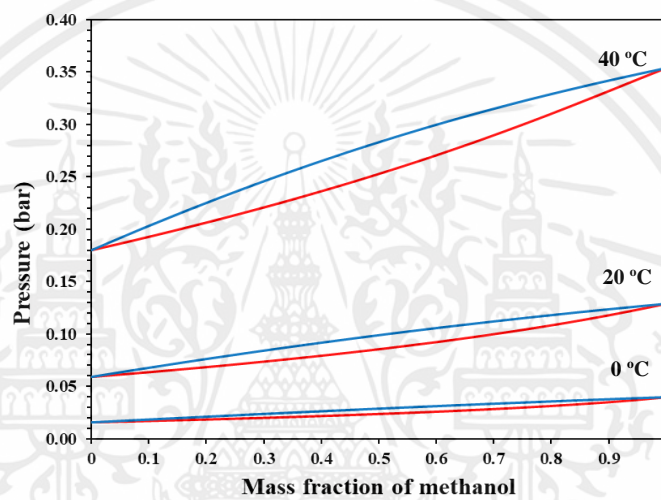
รูปที่ 4.5 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างน้ำกับเมทานอล

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างน้ำและเอทานอลแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์อะซีโอโทรปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.6 จากการศึกษาพบว่าปรากฏการณ์อะซีโอโทรปิกเกิดขึ้นที่อัตราส่วนโดยมวลของน้ำเท่ากับ 0.05 เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของน้ำเพิ่ม พบว่าช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวมีการเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้คือ 6 มิลลิบาร์



รูปที่ 4.6 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างน้ำกับเอทานอล

สำหรับระบบสารทำความเย็นผสมระหว่างเมทานอลและเอทานอล จากการศึกษาพบว่าแสดงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดปรากฏการณ์ซีโอโทรปิก ณ อุณหภูมิ 0, 20 และ 40 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.7 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวของสารผสมดังกล่าวมีความกว้างเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงอัตราส่วนมวลของการผสม ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมจะแสดงปรากฏการณ์ที่ใกล้เคียงกับอะซีโอโทรปิก นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าความดันต่ำสุดที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถดำเนินการได้มีค่าเท่ากับ 16 มิลลิบาร์



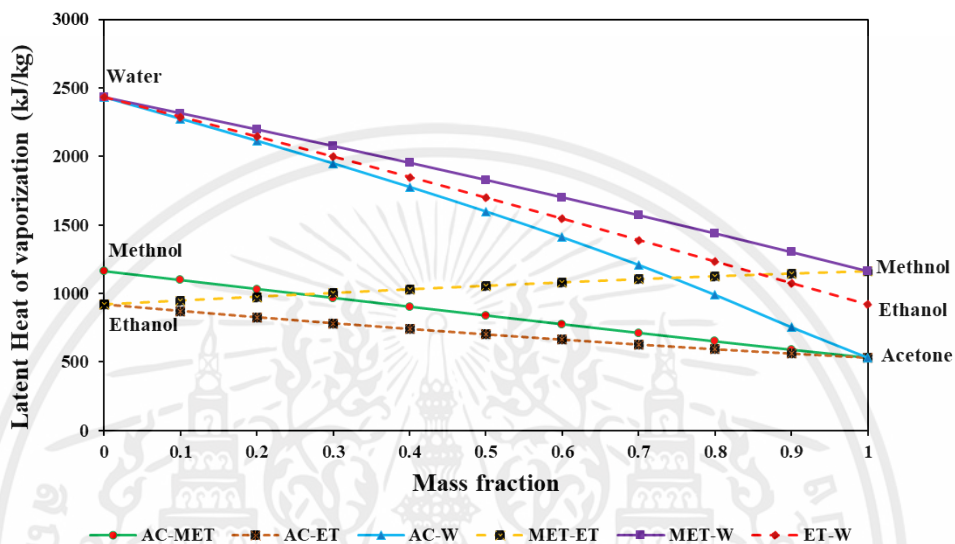
รูปที่ 4.7 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่างเมทานอลกับเอทานอล

4.1.3 การพิจารณาเลือกสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิที่สารทำความเย็นทั้ง 4 ชนิดสามารถดำเนินการได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความดันไออิ่มตัวของสารเหล่านั้น จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสารทำความเย็นอะซีโตนสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยระบบดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ภายใต้ระดับความดันสุญญากาศที่ไม่สูงมาก ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่เอื้อต่อการออกแบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ และในการคัดเลือกสารทำความเย็นชนิดที่สองเพื่อนำมาผสมกับอะซีโตน จากการศึกษาพฤติกรรมของระบบสารทำความเย็นสององค์ประกอบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเมทานอลเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการนำมาผสมกับอะซีโตนในการใช้งานเป็นสารทำความเย็น เนื่องจากสารผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอลแสดงพฤติกรรมการเกิดปรากฏการณ์อะซีโอโทรปิก ในขณะที่ช่วงที่เกิดปรากฏการณ์ซีโอโทรปิกนั้น พบว่ามีช่วงความกว้างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวที่แคบ ซึ่งส่งผลให้ช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิในขณะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะของสารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ 27 ว่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อย นอกจากการพิจารณาพฤติกรรมของสารผสมแล้ว ผลการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของอะซิโตนที่ถูกผสมกับเมทานอลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนมวลของเมทานอลที่เพิ่มขึ้น ตามที่แสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งคุณสมบัตินี้ส่งผลให้ปริมาณการใช้สารทำความเย็นในระบบลดลง เนื่องจากสารผสมดังกล่าวสามารถดูดซับปริมาณความร้อนจากแหล่งที่ต้องการลดอุณหภูมิได้ในปริมาณที่มากขึ้น

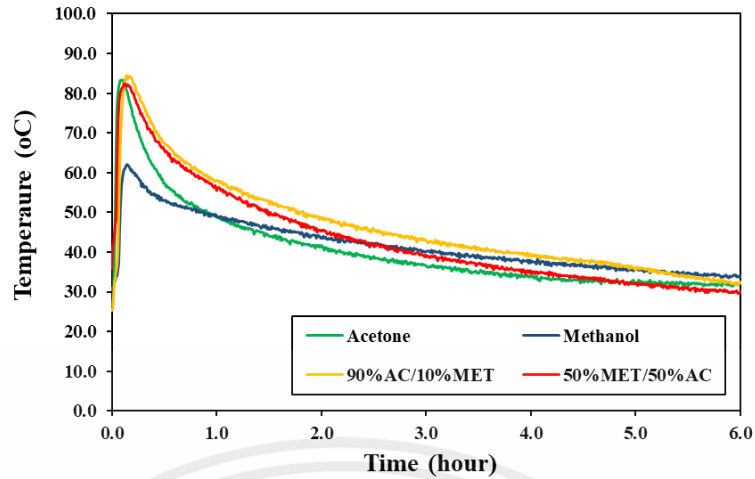


รูปที่ 4.8 อัตราส่วนผสมที่ส่งผลต่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

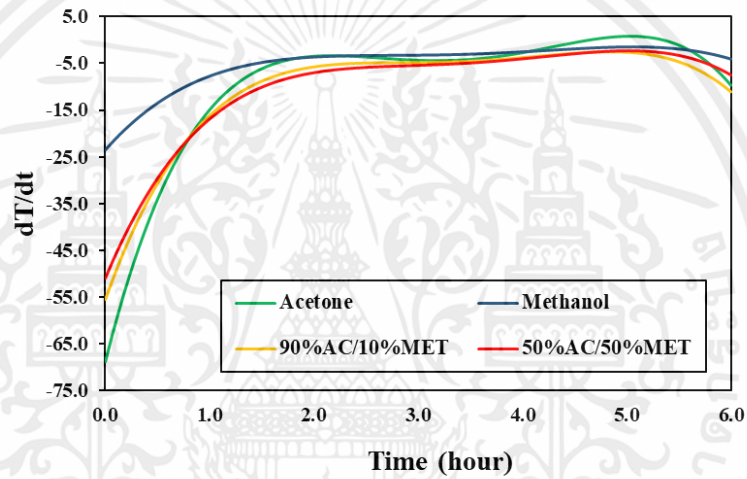
4.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการผสมสารทำความเย็นต่อค่า COP

การศึกษาสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล สามารถแบ่งกรณีศึกษาของอัตราส่วนการผสมได้ 3 แบบ คือ 1. สารทำความเย็นอะซิโตนและเมทานอลบริสุทธิ์ ใช้เป็นกรณีอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง 2. สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.9 โดยมวลของอะซิโตน เพื่อศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมอะซิโตนโอโทรปิก และ 3. สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของอะซิโตน เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ

จากการทดลอง พบว่าเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ในแท่นดูดซับ สารทำความเย็นอะซิโตนมีการสร้างความร้อนของถ่านกัมมันต์สูงสุดที่ 83 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็นเมทานอลซึ่งสร้างความร้อนต่ำกว่าที่ 62 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมเมทานอลกับอะซิโตนยังคงสร้างความร้อนสูงในระดับเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ พบว่าการผสมเมทานอลกับอะซิโตนทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิถ่านกัมมันต์ช้าลง แสดงถึงถ่านกัมมันต์ใช้เวลาในการอิ่มตัวนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



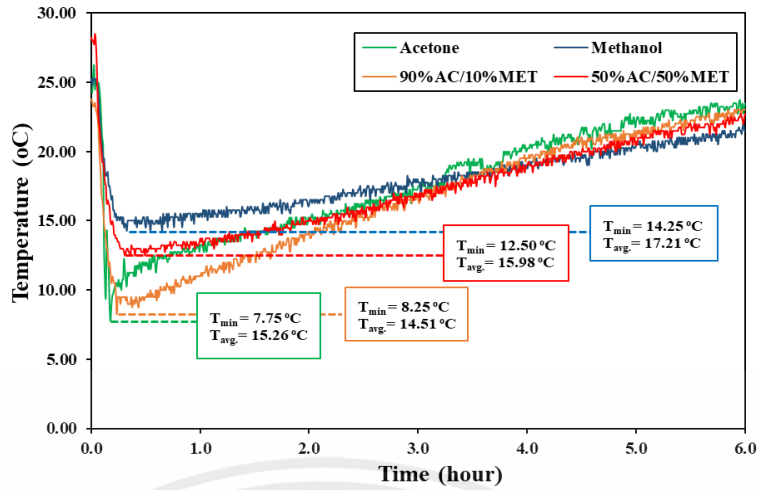
ก.) แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิถ่านกัมมันต์กับเวลาในกระบวนการดูดซับ



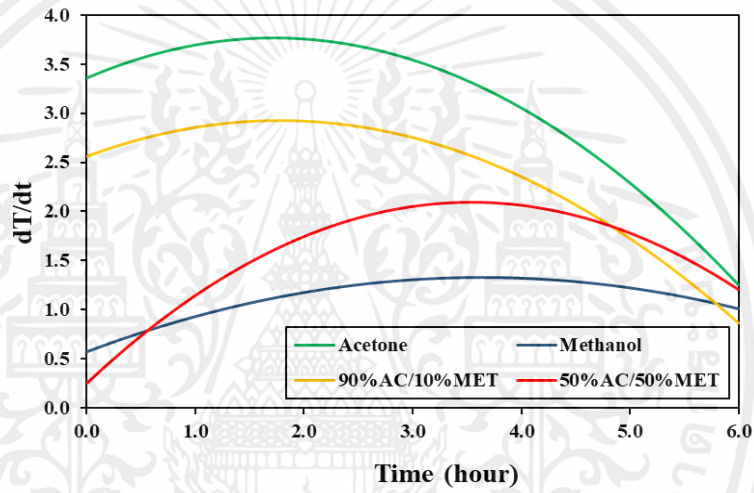
ข.) แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิถ่านกัมมันต์ในแท่นดูดซับ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิของน้ำในเครื่องระเหย พบว่าสารทำความเย็นอะซิโตนสามารถลดอุณหภูมิน้ำได้ต่ำสุดที่ 7 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมเมทานอลกับอะซิโตน อุณหภูมิต่ำสุดของน้ำที่สามารถทำได้เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนโดยมวลของเมทานอล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ พบว่าการผสมเมทานอลกับอะซิโตนช่วยชะลออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำ แสดงถึงสารทำความเย็นสามารถรักษาอุณหภูมิต่ำได้นานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10



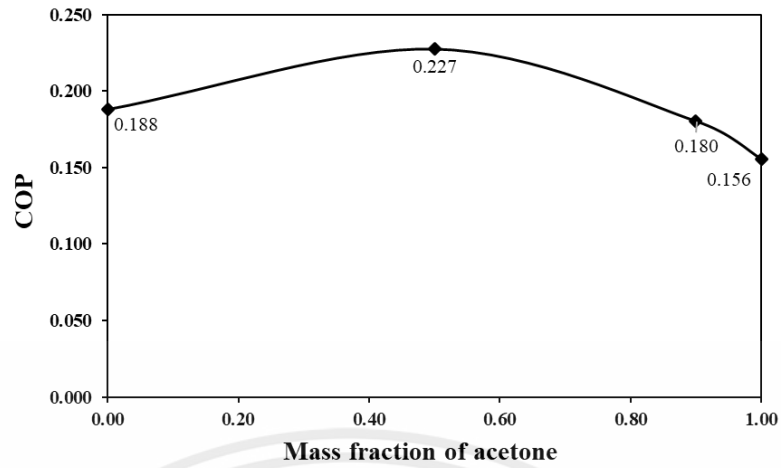
ก.) แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำกับเวลาในกระบวนการดูดซับ



ข.) แสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้ำ

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่ออุณหภูมิน้ำในเครื่องระเหย

การพิจารณาประสิทธิภาพของสารทำความเย็น ทำได้โดยพิจารณาจากค่า COP ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สารทำความเย็นสามารถลดอุณหภูมิน้ำกับพลังงานความร้อนที่ต้องการสำหรับกระบวนการคายซับ จากการคำนวณค่า COP ที่อัตราส่วนการผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอลต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของอะซิโตน ให้ค่า COP ของระบบทำความเย็นสูงสุดที่ 0.227 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ โดยใช้สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล
ที่ส่งผลต่อค่า COP



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเพื่อพัฒนาสารทำความเย็นผสมชนิดใหม่สำหรับใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) โดยศึกษาและคัดเลือกสารทำความเย็นบริสุทธิ์ที่มีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่เหมาะสม ได้แก่ อะซิโตน เมทานอล เอทานอล และน้ำ ผ่าน NIST REFPROP^(R) และศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบ โดยพิจารณาการเกิดปรากฏการณ์อะซิโตรีปิกและซีโตรีปิก รวมถึงผลของอัตราส่วนการผสมต่อความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ผ่าน Aspen Plus^(R) ซึ่งจากพบว่าคู่สารทำความเย็นผสมที่เหมาะสมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ออกแบบ คือ คู่สารผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล เนื่องจากแสดงพฤติกรรมอะซิโตรีปิก และมีแนวโน้มความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเมทานอล รวมถึงระบบให้สามารถทำงานได้ในสภาวะสูญญากาศต่ำ

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนการผสมของคู่สารทำความเย็นระหว่างอะซิโตนและเมทานอล เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลเพิ่มขึ้น ค่า COP ของระบบเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของเมทานอลให้ค่า COP สูงสุดเท่ากับ 0.227 เนื่องผลของค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของเมทานอลช่วยให้ระบบทำความเย็นสามารถทำความเย็นได้นานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารการใช้อะซิโตนบริสุทธิ์ รวมถึงค่าความดันไออิ่มตัวที่สูงของอะซิโตนช่วยให้ระบบสามารถทำความเย็นได้ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารทำความเย็นเมทานอลบริสุทธิ์

โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาสารทำความเย็นผสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เนื่องจากเป็นระบบทำความเย็นที่ใช้สารทำความเย็นที่มีค่า OPD และ GWP ต่ำ โดยปรับปรุงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น เพื่อให้ได้ ค่า COP ที่สูงและสามารถใช้งานจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้สารทำความเย็นผสมระหว่างน้ำและเอทานอลเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสารที่มีความปลอดภัยสูงกว่าคู่สารผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล นอกจากนี้ น้ำยังมีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นได้ อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำจะทำให้ต้องออกแบบระบบให้สามารถทำงานได้ในสภาวะสูญญากาศสูง

เพียงพอ เนื่องจากน้ำมีความดันดันไออิมิตัวต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีความซับซ้อนและต้นทุนสูงขึ้น

2. การออกแบบระบบทำความเย็นในการทดลองครั้งนี้ ยังพบว่าระบบมีการสูญเสียความร้อนจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลให้การรักษาอุณหภูมิที่สามารถทดลองได้ของระบบทำความเย็นไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในการพัฒนาระบบต่อไปจำเป็นต้องปรับปรุงฉนวนกันความร้อนและลดการรั่วไหลของระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. สำหรับงานวิจัยในอนาคต อาจนำผลการศึกษาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมของสารทำความเย็นอะซิโตนและเมทานอลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ ไปทดสอบกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับขนาดจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานในสถานะปฏิบัติการจริง ซึ่งอาจพบประเด็นท้าทายหรือข้อจำกัดเพิ่มเติมที่ไม่ปรากฏในสถานะการทดลองเบื้องต้น



บรรณานุกรม

- [1] Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507–521.
- [2] International Energy Agency (IEA), Keeping cool in a hotter world is using more energy, making efficiency more important than ever, (21 July 2023), Available online <https://www.iea.org> (Accessed on 20 September 2023).
- [3] Ashok Kumar, K., & Kapilan, N. (2020). Studies on the feasibility of adsorption cooling technologies. *Journal of Physics. Conference Series*, 1473(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012050>
- [4] Henshaw, P., Aman, J., & Ting, D. S. K. (2018). Solar sorption cooling for residential air-conditioning applications. *International Journal of Renewable Energy Technology*, 9(1/2), 136. <https://doi.org/10.1504/ijret.2018.10011074>
- [5] Elsheniti, M. B., Elsamni, O. A., Al-dadah, R. K., Mahmoud, S., Elsayed, E., & Saleh, K. (2018). Adsorption Refrigeration Technologies. In *Sustainable Air Conditioning Systems*. InTech.K
- [6] Ashok Kumar, K., & Kapilan, N. (2020). Studies on the feasibility of adsorption cooling technologies. *Journal of Physics. Conference Series*, 1473(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012050>
- [7] Wood, G. O. (2001). Affinity coefficients of the Polanyi/Dubinin adsorption isotherm equations. *Carbon*, 39(3), 343–356. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(00\)00128-7](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(00)00128-7)
- [8] Palomba, V., & Frazzica, A. (2021). Modeling of sorption systems for thermal energy storage. In *Advances in Thermal Energy Storage Systems* (pp. 453–475). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00015-2>

- [9] Y. A. Çengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach: McGraw-Hill Education, 2019.
- [10] Wang, D. C., Li, Y. H., Li, D., Xia, Y. Z., & Zhang, J. P. (2010). A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.001>
- [11] Wang, L. W., Wang, R. Z., & Oliveira, R. G. (2009). A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 518–534.
- [12] United Nations Environment Programme (UNEP), OZONACTION FACT SHEET Refrigerant Blends: Calculating Global Warming Potentials, (n.d.), Available online: www.unep.org/ozonaction. (Accessed on 9 October 2023).
- [13] United Nations Environment Programme (UNEP), OzonAction Kigali Fact Sheet 16 GWPs of Refrigerant Mixtures: Kigali Context, (n.d.), Available online: www.unep.org/ozonaction. (Accessed on 9 October 2023).
- [14] United Nations Environment Programme (UNEP), OzonAction Kigali Fact Sheet 3 OzonAction GWP, CO₂(e) and the Basket of HFCs, (n.d.), Available online www.unep.org/ozonaction. (Accessed on 9 October 2023).
- [15] M.E.A. Razzaq, J.U. Ahamed, M. Abu, M. Hossain, A REVIEW ON HYDROCARBON (HCs) AS AN ALTERNATIVE REFRIGERANT: BASED ON THERMODYNAMIC AND ENVIRONMENTAL APPROACH EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE USING PERFORATED TRIANGULAR WAVY TAPE INSERT View project Heat Transfer View project, 907. <https://www.researchgate.net/publication/332785950>
- [16] United Nations Environment Programme (UNEP), OZONACTION FACT SHEET Refrigerant Blends: Calculating Ozone Depleting Potentials (ODP), (n.d.), Available online www.unep.org/ozonaction. (Accessed on 9 October 2023).

- [17] SWEP, Azeotropic/Zeotropic refrigerants, (n.d.), Available online <https://www.swep.net> (Accessed on 28 October 2023).
- [18] Zhang, L., Zhao, J.-X., Yue, L.-F., Zhou, H.-X., & Ren, C.-L. (2019). Cycle performance evaluation of various R134a/hydrocarbon blend refrigerants applied in vapor-compression heat pumps. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1), 168781401881956.
- [19] Li, Z. F., & Sumathy, K. (1999). A solar-powered ice-maker with the solid adsorption pair of activated carbon and methanol. *International Journal of Energy Research*, 23(6), 517–527.
- [20] Chekirou, W., Boussehain, R., Feidt, M., Karaali, A., & Boukheit, N. (2011). Numerical results on operating parameters influence for a heat recovery adsorption machine. *Energy Procedia*, 6, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.024>
- [21] Wu, J. W., Madani, S. H., Biggs, M. J., Phillip, P., Lei, C., & Hu, E. J. (2015). Characterizations of activated carbon–methanol adsorption pair including the heat of adsorptions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 60(6), 1727–1731. <https://doi.org/10.1021/je501113y>
- [22] รัชชานนท์ เรียบร้อย, และณัฐอมร คำลือ. (2565). การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับอุตสาหกรรม. “ปริญญานิพนธ์” ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



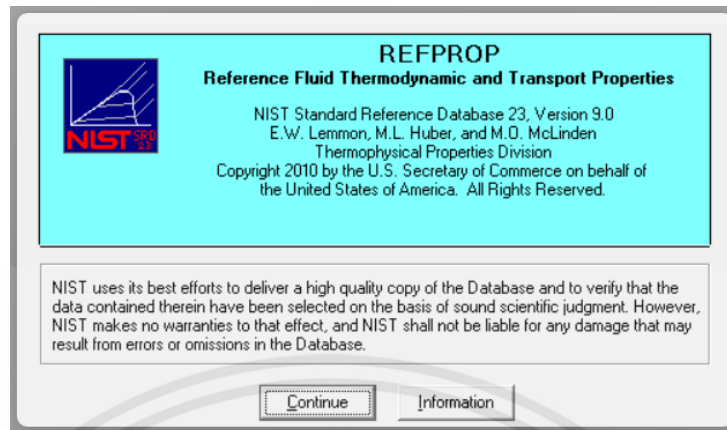
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



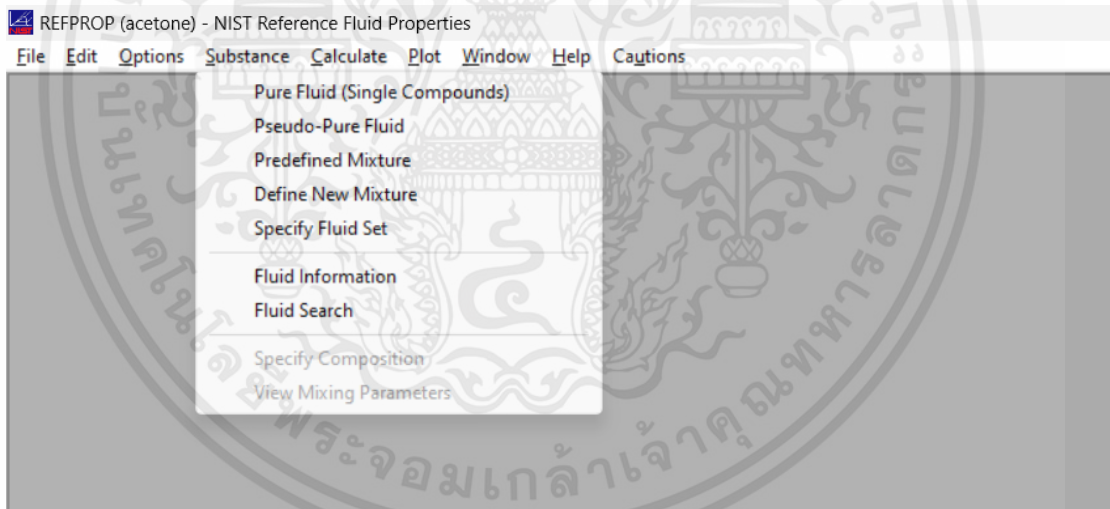
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปิดโปรแกรม NIST REFPROP^(R)



รูปที่ ก.1 หน้าต่าง NIST REFPROP^(R) ขณะเปิดโปรแกรม

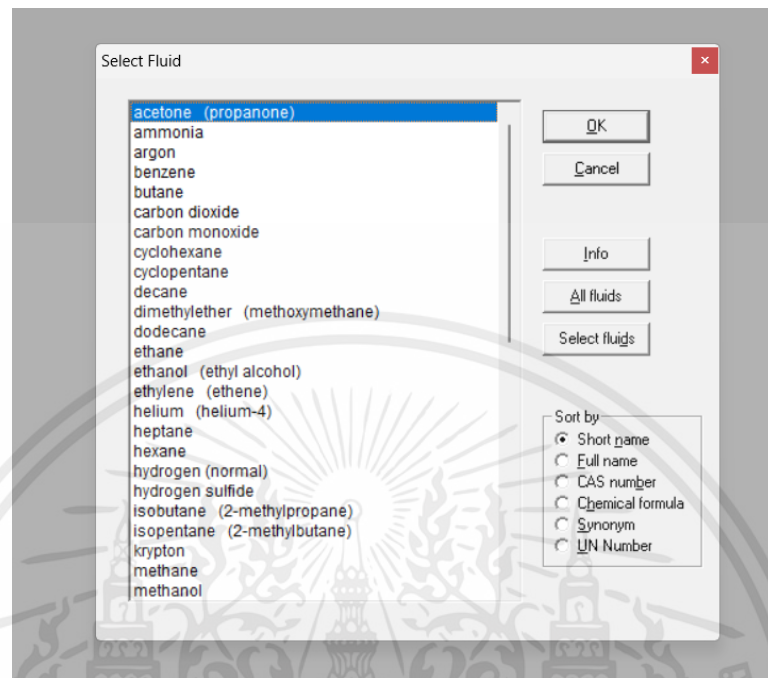
2. คลิกแถบ Substance เลือกประเภทของสารทำความเย็นบริสุทธิ์



รูปที่ ก.2 หน้าต่างขณะเลือกประเภทของสารทำความเย็น

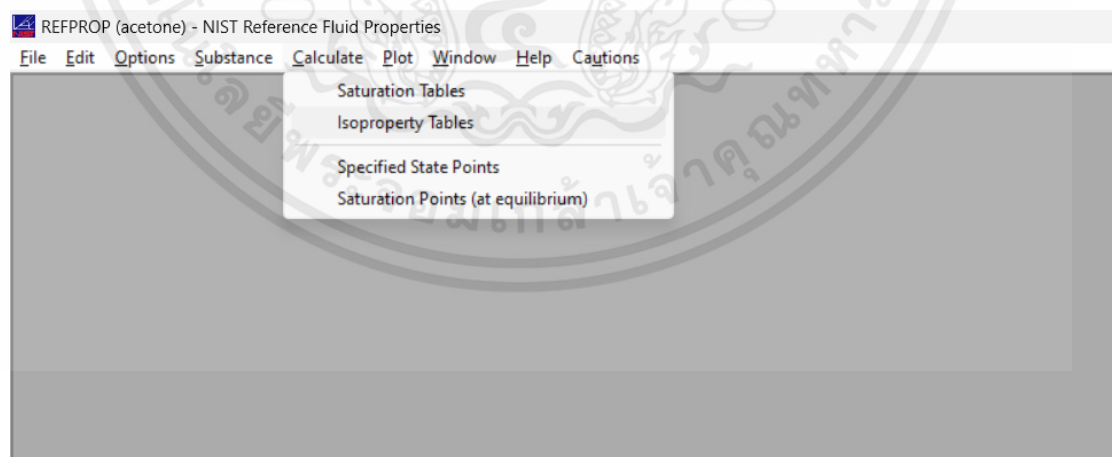
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 39 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค้นหาและเลือกสารทำความเย็นที่ต้องการศึกษา (ในที่นี่แสดงเพียงการศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นอะซิโตน)



รูปที่ ก.3 หน้าต่างขณะเลือกประเภทของสารทำความเย็น

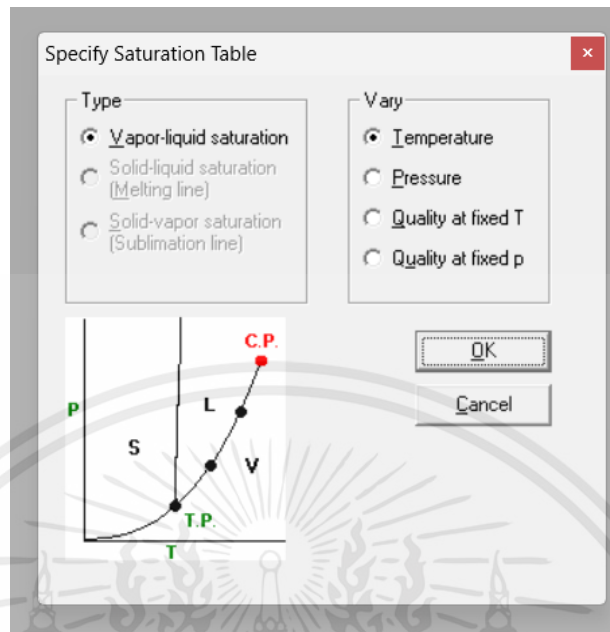
4. คลิกแถบ Calculate เลือก Saturation Tables



รูปที่ ก.4 หน้าต่างขณะเลือกสร้างตารางความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็น

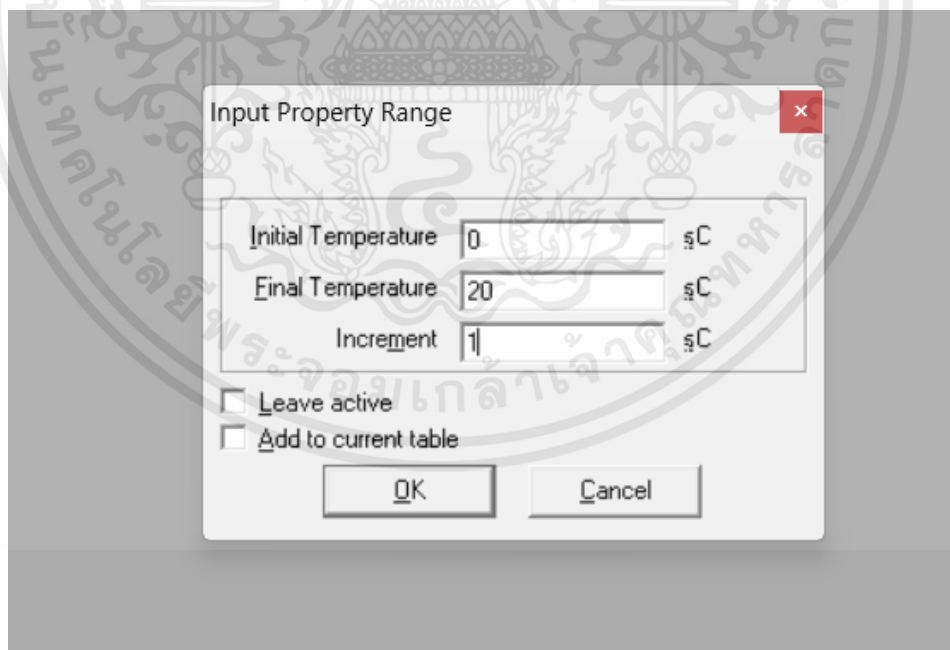
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ40อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือกกำหนดอุณหภูมิ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ต่อความดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็นอะซีโตน



รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Saturation Table ของโปรแกรม NIST REFPROP^(R)

6. เลือกกำหนดช่วงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา



รูปที่ ก.6 หน้าต่างกำหนดช่วงอุณหภูมิของโปรแกรม NIST REFPROP^(R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ41อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คลิก OK ได้ตารางแสดงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นอะซีโตน ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

| | Temperature (°C) | Pressure (bar) | Liquid Density (kg/m ³) | Vapor Density (kg/m ³) | Liquid Enthalpy (kJ/kg) | Vapor Enthalpy (kJ/kg) | Liquid Entropy (kJ/kg-K) | Vapor Entropy (kJ/kg-K) |
|----|---------------------|-------------------|---|--|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0.0000 | 0.092991 | 812.10 | 0.24078 | -120.82 | 438.05 | -0.40149 | 1.6445 |
| 2 | 1.0000 | 0.098030 | 811.02 | 0.25300 | -118.73 | 439.18 | -0.39386 | 1.6412 |
| 3 | 2.0000 | 0.10329 | 809.93 | 0.26573 | -116.63 | 440.30 | -0.38625 | 1.6379 |
| 4 | 3.0000 | 0.10879 | 808.85 | 0.27898 | -114.54 | 441.42 | -0.37865 | 1.6346 |
| 5 | 4.0000 | 0.11453 | 807.76 | 0.29278 | -112.44 | 442.55 | -0.37108 | 1.6314 |
| 6 | 5.0000 | 0.12053 | 806.67 | 0.30712 | -110.35 | 443.67 | -0.36353 | 1.6283 |
| 7 | 6.0000 | 0.12678 | 805.58 | 0.32204 | -108.25 | 444.80 | -0.35600 | 1.6252 |
| 8 | 7.0000 | 0.13329 | 804.49 | 0.33754 | -106.15 | 445.93 | -0.34848 | 1.6221 |
| 9 | 8.0000 | 0.14009 | 803.40 | 0.35366 | -104.04 | 447.05 | -0.34099 | 1.6192 |
| 10 | 9.0000 | 0.14717 | 802.31 | 0.37039 | -101.94 | 448.18 | -0.33352 | 1.6162 |
| 11 | 10.000 | 0.15454 | 801.21 | 0.38777 | -99.827 | 449.31 | -0.32606 | 1.6133 |
| 12 | 11.000 | 0.16222 | 800.12 | 0.40581 | -97.717 | 450.43 | -0.31862 | 1.6105 |
| 13 | 12.000 | 0.17021 | 799.02 | 0.42452 | -95.604 | 451.56 | -0.31121 | 1.6077 |
| 14 | 13.000 | 0.17852 | 797.92 | 0.44394 | -93.489 | 452.69 | -0.30381 | 1.6049 |
| 15 | 14.000 | 0.18717 | 796.82 | 0.46407 | -91.372 | 453.82 | -0.29642 | 1.6022 |
| 16 | 15.000 | 0.19616 | 795.72 | 0.48494 | -89.253 | 454.95 | -0.28906 | 1.5996 |
| 17 | 16.000 | 0.20550 | 794.62 | 0.50656 | -87.132 | 456.08 | -0.28172 | 1.5969 |
| 18 | 17.000 | 0.21521 | 793.52 | 0.52897 | -85.008 | 457.21 | -0.27439 | 1.5944 |
| 19 | 18.000 | 0.22529 | 792.41 | 0.55217 | -82.882 | 458.34 | -0.26708 | 1.5918 |
| 20 | 19.000 | 0.23575 | 791.30 | 0.57618 | -80.753 | 459.47 | -0.25978 | 1.5894 |
| 21 | 20.000 | 0.24662 | 790.19 | 0.60104 | -78.623 | 460.60 | -0.25251 | 1.5869 |

รูปที่ ก.7 ตารางแสดงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นอะซีโตน

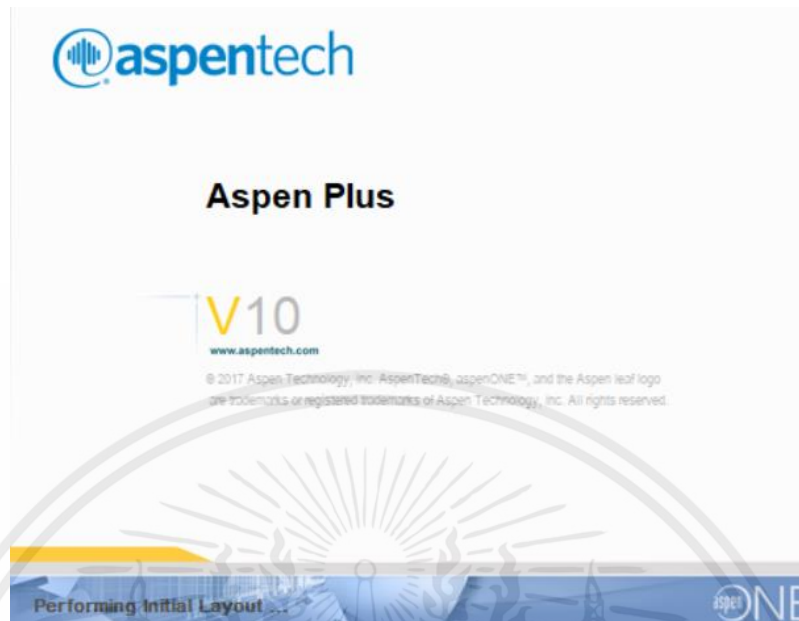
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ42อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
วิธีการใช้งานโปรแกรม Aspen Plus^(R)

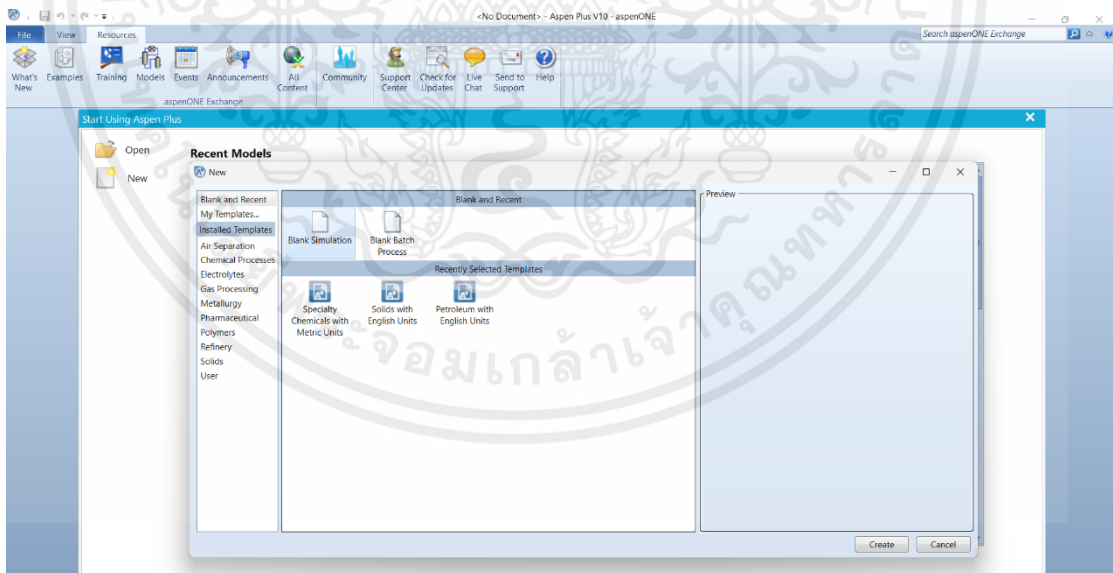
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปิดโปรแกรม Aspen Plus^(R)



รูปที่ ข.1 หน้าต่าง Aspen Plus^(R) ขณะเปิดโปรแกรม

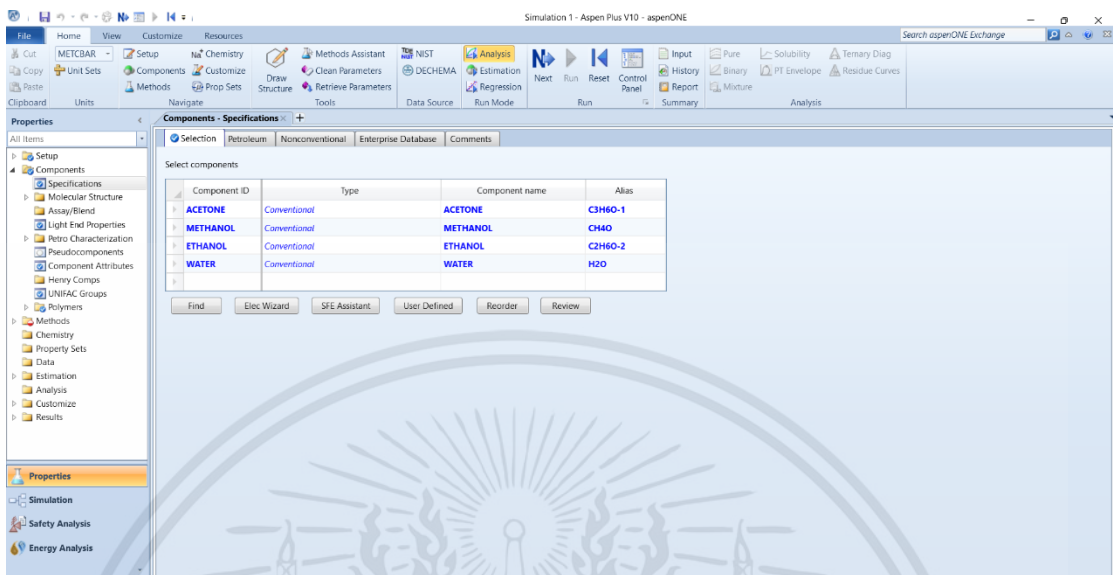
2. คลิก New เลือก Blank Simulation จากนั้นคลิก Create



รูปที่ ข.2 หน้าต่างขณะเลือก Template

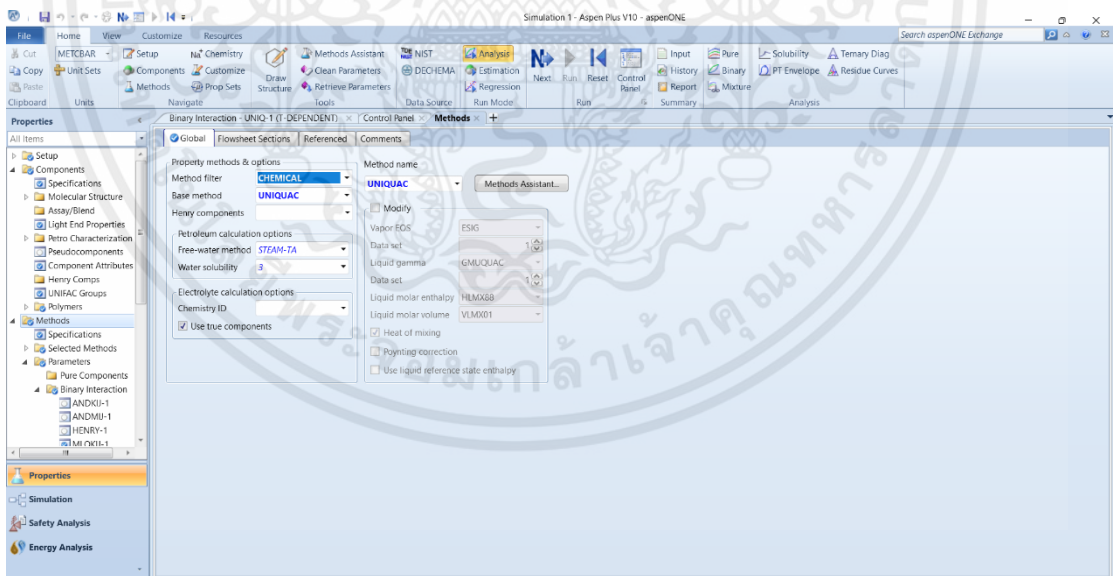
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ44่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค้นหาและเลือกสารทำความเย็นที่ต้องการศึกษา (ในที่นี่แสดงเพียงการศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนกับเมทานอล)



รูปที่ ข.3 หน้าต่างสำหรับเลือกสารที่ต้องการศึกษา

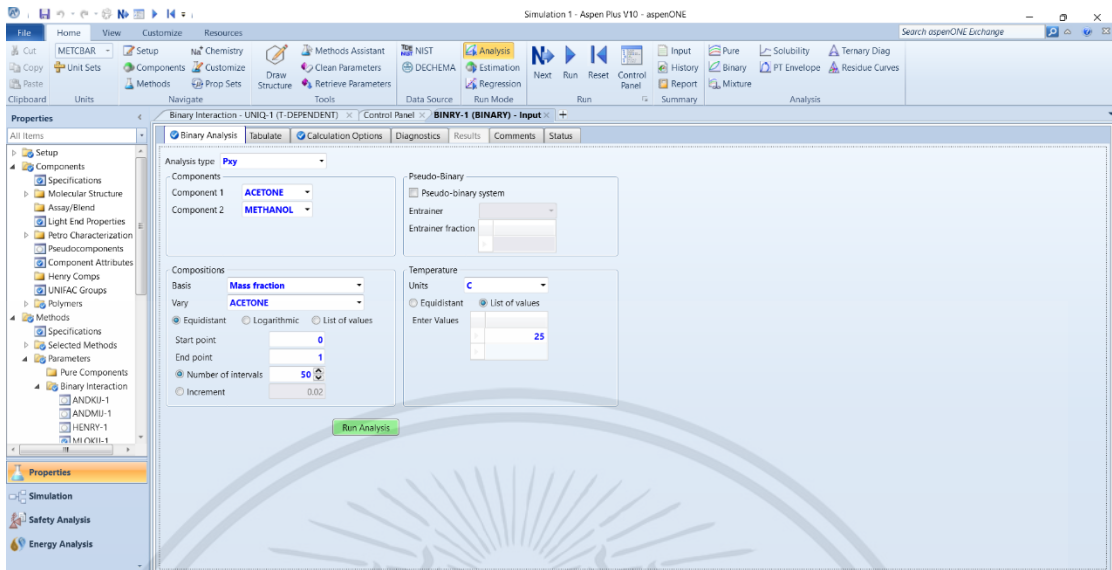
4. เลือก Thermodynamic model เป็น UNIQUAC ซึ่งใช้สำหรับศึกษาสารผสมที่มีความเป็นขั้ว



รูปที่ ข.4 หน้าต่างขณะเลือก Method

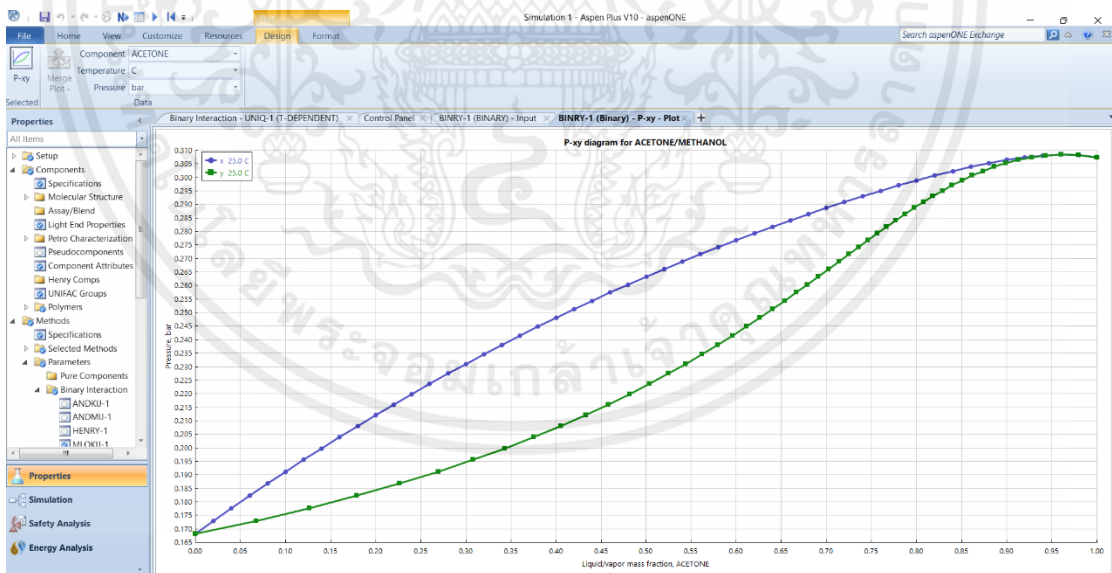
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ45อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิก Binary ในแถบเมนู Home เลือกการวิเคราะห์เป็น P-xy diagram




รูปที่ ข.5 หน้าต่าง Binary สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมสารผสม

6. คลิก Run Analysis ได้กราฟแสดงสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล



รูปที่ ข.6 กราฟแสดงสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ46งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.
ตัวอย่างของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำ
ความเย็นแบบดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{Q_{\text{heat}}} \quad (\text{จาก 2-8})$$

โดย COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

Q_L คือ พลังความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับได้ (กิโลจูล)

Q_{heat} คือ พลังงานความร้อนสำหรับการคาย (กิโลจูล)

ยกตัวอย่างการคำนวณค่า COP ของสารทำความเย็นผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล

สำหรับอัตราส่วนการผสมที่ 0.5 โดยมวลเมทานอล และ 0.5 โดยมวลอะซิโตน สามารถลดอุณหภูมิน้ำจาก 28.25 องศาเซลเซียส เหลืออุณหภูมิต่ำสุดที่ 12.50 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าเฉลี่ยตลอดการทำความเย็นเท่ากับ 15.98 องศาเซลเซียส โดยใช้สารทำความเย็นไปทั้งหมด 152 กรัม และปริมาตรน้ำที่ลดอุณหภูมิได้ เท่า 325 มิลลิลิตร

กำหนด

ค่าพลังงานความร้อนสำหรับการคายซับของอะซิโตน เท่ากับ 22.20 กิโลจูล/โมล

ค่าพลังงานความร้อนสำหรับการคายซับของเมทานอล เท่ากับ 18.62 กิโลจูล/โมล

วิธีทำ

สมมติฐาน: การผสมสารทำความเย็นเข้ากันได้ดีและไม่เกิดปฏิกิริยา

คำนวณหาพลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับได้

$$Q_L = m_{\text{water}} c_p (T_1 - T_2)$$

$$= 0.325 \text{ [kg]} \times 4.18 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{C]} \times (28.25 - 15.98) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$= 16.67 \text{ kJ}$$

พลังงานความร้อนสำหรับการคาย

$$Q_{\text{heat}} = \sum_i (m_{\text{ref},i} H_{\text{des},i})$$

$$= (m_{\text{ref}} H_{\text{des}})_{\text{acetone}} + (m_{\text{ref}} H_{\text{des}})_{\text{methanol}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 48 อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left(\frac{0.5 \times 152 \text{ [กรัม]}}{58 \text{ [กรัม/โมล]}} \times 22.20 \text{ [กิโลจูล/โมล]} \right) + \left(\frac{0.5 \times 152 \text{ [กรัม]}}{32 \text{ [กรัม/โมล]}} \times 18.62 \text{ [กิโลจูล/โมล]} \right)$$

$$= 73.31 \text{ kJ}$$

จากสมการที่ 2-8 จะได้ว่า

$$\text{COP} = \frac{16.67}{73.31}$$

ตอบ ค่า COP ของระบบทำความเย็นนี้มีค่า เท่ากับ 0.227





ภาคผนวก ง.
ข้อมูลอนุภูมิถ่านกัมมันต์และน้ำที่บันทึกได้ผ่านอุปกรณ์
ตรวจวัดอนุภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอุณหภูมิถ่านกัมมันต์และน้ำที่ต้องการลดอุณหภูมิที่ได้รับการบันทึกและเก็บรวบรวมจากระบบตรวจวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลที่ควบคุมด้วย Arduino ซึ่งทำการทดสอบที่อัตราส่วนการผสมสารทำความเย็นที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ง.1 สารทำความเย็นอะซิโตนบริสุทธิ์

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 0.0 | 30.00 | 24.25 |
| 5.0 | 83.25 | 22.25 |
| 10.0 | 78.00 | 7.75 |
| 15.0 | 70.50 | 10.25 |
| 20.0 | 65.00 | 11.00 |
| 25.0 | 61.00 | 11.75 |
| 30.0 | 57.25 | 12.00 |
| 35.0 | 55.25 | 11.25 |
| 40.0 | 53.25 | 12.50 |
| 45.0 | 52.25 | 12.75 |
| 50.0 | 51.00 | 13.00 |
| 55.0 | 50.00 | 12.75 |
| 60.0 | 48.75 | 13.25 |
| 65.0 | 48.00 | 13.25 |
| 70.0 | 46.75 | 13.50 |
| 75.0 | 46.25 | 13.50 |
| 80.0 | 45.75 | 13.50 |
| 85.0 | 45.00 | 14.00 |
| 90.0 | 44.00 | 14.25 |
| 95.0 | 43.75 | 14.50 |
| 100.0 | 43.00 | 14.50 |
| 105.0 | 42.50 | 14.25 |
| 110.0 | 42.00 | 15.00 |
| 115.0 | 41.75 | 15.25 |
| 120.0 | 41.75 | 15.25 |
| 125.0 | 40.75 | 15.00 |
| 130.0 | 40.25 | 15.25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 51 ำงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 สารทำความเย็นอะซีโตนบริสุทธิ์ (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 135.0 | 39.50 | 15.75 |
| 140.0 | 39.75 | 15.50 |
| 145.0 | 39.00 | 15.75 |
| 150.0 | 39.00 | 16.00 |
| 155.0 | 38.25 | 16.50 |
| 160.0 | 38.00 | 16.50 |
| 165.0 | 37.25 | 17.00 |
| 170.0 | 37.25 | 16.75 |
| 175.0 | 37.00 | 17.25 |
| 180.0 | 36.50 | 17.50 |
| 185.0 | 36.50 | 17.50 |
| 190.0 | 36.25 | 17.50 |
| 195.0 | 35.50 | 18.50 |
| 200.0 | 35.75 | 18.75 |
| 205.0 | 35.25 | 19.25 |
| 210.0 | 34.75 | 19.50 |
| 215.0 | 35.00 | 19.00 |
| 220.0 | 34.75 | 18.50 |
| 225.0 | 34.75 | 19.25 |
| 230.0 | 34.25 | 19.75 |
| 235.0 | 34.00 | 20.00 |
| 240.0 | 34.00 | 20.25 |
| 245.0 | 32.75 | 20.25 |
| 250.0 | 33.50 | 20.25 |
| 255.0 | 33.25 | 20.50 |
| 260.0 | 33.00 | 20.75 |
| 265.0 | 33.00 | 21.00 |
| 270.0 | 32.50 | 21.75 |
| 275.0 | 32.50 | 20.25 |
| 280.0 | 32.00 | 21.50 |
| 285.0 | 32.25 | 22.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 52 ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 สารทำความเย็นอะซิโตนบริสุทธิ์ (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 290.0 | 32.50 | 21.50 |
| 300.0 | 32.00 | 22.50 |
| 305.0 | 32.50 | 22.00 |
| 310.0 | 32.50 | 22.25 |
| 315.0 | 32.00 | 22.75 |
| 320.0 | 32.25 | 22.75 |
| 325.0 | 32.50 | 22.50 |
| 330.0 | 32.25 | 22.75 |
| 335.0 | 32.00 | 22.50 |
| 340.0 | 31.75 | 23.00 |
| 345.0 | 32.00 | 22.50 |
| 350.0 | 32.25 | 23.00 |
| 355.0 | 31.75 | 23.00 |
| 360.0 | 32.25 | 23.25 |

ตารางที่ ง.2 สารทำความเย็นเมทานอลบริสุทธิ์

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 0.0 | 26.75 | 25.25 |
| 5.0 | 51.50 | 21.50 |
| 10.0 | 61.50 | 17.50 |
| 15.0 | 58.75 | 15.25 |
| 20.0 | 56.25 | 15.00 |
| 25.0 | 54.50 | 14.50 |
| 30.0 | 53.00 | 14.50 |
| 35.0 | 52.25 | 14.75 |
| 40.0 | 51.25 | 14.75 |
| 45.0 | 51.00 | 15.25 |
| 50.0 | 50.00 | 14.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 53 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 สารทำความเย็นเมทานอลบริสุทธิ์ (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 55.0 | 49.50 | 15.00 |
| 60.0 | 49.00 | 15.50 |
| 65.0 | 48.75 | 15.75 |
| 70.0 | 48.25 | 15.75 |
| 75.0 | 47.75 | 15.25 |
| 80.0 | 46.75 | 15.75 |
| 85.0 | 46.25 | 15.75 |
| 90.0 | 45.75 | 16.00 |
| 95.0 | 46.00 | 15.50 |
| 100.0 | 45.50 | 16.25 |
| 105.0 | 45.00 | 15.50 |
| 110.0 | 43.75 | 16.00 |
| 115.0 | 44.25 | 16.50 |
| 120.0 | 43.50 | 16.25 |
| 125.0 | 43.25 | 16.50 |
| 130.0 | 43.25 | 16.75 |
| 135.0 | 43.00 | 16.50 |
| 140.0 | 42.50 | 16.75 |
| 145.0 | 42.00 | 16.75 |
| 150.0 | 42.00 | 17.25 |
| 155.0 | 41.75 | 17.50 |
| 160.0 | 41.50 | 17.50 |
| 165.0 | 41.00 | 17.75 |
| 170.0 | 40.75 | 17.25 |
| 175.0 | 40.50 | 18.00 |
| 180.0 | 40.25 | 17.75 |
| 185.0 | 40.25 | 17.75 |
| 190.0 | 39.75 | 17.75 |
| 195.0 | 39.75 | 18.00 |
| 200.0 | 39.00 | 18.50 |
| 205.0 | 38.75 | 18.25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 54 ำงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 สารทำความเย็นเมทานอลบริสุทธิ์ (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 210.0 | 39.00 | 18.50 |
| 215.0 | 38.75 | 18.50 |
| 220.0 | 38.50 | 18.50 |
| 225.0 | 37.75 | 19.00 |
| 230.0 | 38.25 | 18.75 |
| 235.0 | 37.75 | 19.00 |
| 240.0 | 37.75 | 18.75 |
| 245.0 | 37.00 | 19.50 |
| 250.0 | 37.50 | 19.25 |
| 255.0 | 37.00 | 19.75 |
| 260.0 | 36.75 | 19.00 |
| 265.0 | 37.00 | 19.50 |
| 270.0 | 36.50 | 19.50 |
| 275.0 | 36.50 | 20.00 |
| 280.0 | 36.00 | 19.50 |
| 285.0 | 35.75 | 19.75 |
| 290.0 | 36.00 | 20.25 |
| 300.0 | 35.75 | 20.50 |
| 305.0 | 35.25 | 20.25 |
| 310.0 | 35.25 | 20.75 |
| 315.0 | 35.25 | 20.25 |
| 320.0 | 34.75 | 20.50 |
| 325.0 | 34.25 | 21.00 |
| 330.0 | 34.75 | 21.00 |
| 335.0 | 34.75 | 21.00 |
| 340.0 | 34.25 | 21.00 |
| 345.0 | 34.50 | 20.50 |
| 350.0 | 33.75 | 21.00 |
| 355.0 | 34.00 | 21.50 |
| 360.0 | 33.75 | 21.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 55 อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของเมทานอล

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 0 | 35.75 | 28.25 |
| 5 | 80.25 | 20.75 |
| 10 | 81.75 | 16.00 |
| 15 | 77.00 | 13.50 |
| 20 | 72.25 | 13.00 |
| 25 | 68.00 | 13.00 |
| 30 | 65.75 | 13.00 |
| 35 | 63.25 | 13.00 |
| 40 | 61.50 | 13.25 |
| 45 | 60.50 | 13.25 |
| 50 | 58.50 | 13.00 |
| 55 | 57.50 | 13.50 |
| 60 | 55.50 | 13.75 |
| 65 | 55.25 | 13.75 |
| 70 | 54.00 | 13.75 |
| 75 | 52.50 | 14.00 |
| 80 | 52.00 | 14.00 |
| 85 | 51.00 | 14.25 |
| 90 | 49.25 | 14.25 |
| 95 | 49.25 | 14.25 |
| 100 | 48.50 | 14.75 |
| 105 | 48.00 | 14.00 |
| 110 | 46.25 | 14.50 |
| 115 | 46.25 | 14.75 |
| 120 | 45.50 | 15.00 |
| 125 | 45.00 | 14.75 |
| 130 | 44.50 | 15.25 |
| 135 | 43.75 | 15.50 |
| 140 | 43.00 | 15.50 |
| 145 | 42.75 | 15.25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่อ 56 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของเมทานอล (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 150 | 41.25 | 15.75 |
| 155 | 41.25 | 16.00 |
| 160 | 41.00 | 16.00 |
| 165 | 40.50 | 16.50 |
| 170 | 39.75 | 16.75 |
| 175 | 39.75 | 16.75 |
| 180 | 38.75 | 16.75 |
| 185 | 39.00 | 17.25 |
| 190 | 38.25 | 17.50 |
| 200 | 37.75 | 17.50 |
| 205 | 37.25 | 18.00 |
| 210 | 37.00 | 17.75 |
| 215 | 36.50 | 18.25 |
| 220 | 36.00 | 18.00 |
| 225 | 35.50 | 18.50 |
| 230 | 35.50 | 18.25 |
| 235 | 35.50 | 18.75 |
| 240 | 34.50 | 19.00 |
| 245 | 34.75 | 19.25 |
| 250 | 34.00 | 19.25 |
| 255 | 34.25 | 19.50 |
| 260 | 34.00 | 19.75 |
| 265 | 33.75 | 19.50 |
| 270 | 33.75 | 20.00 |
| 275 | 33.50 | 20.00 |
| 280 | 32.75 | 20.25 |
| 285 | 32.75 | 20.25 |
| 290 | 32.25 | 20.25 |
| 295 | 32.00 | 20.50 |
| 300 | 32.25 | 20.75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 57 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.5 โดยมวลของเมทานอล (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 305 | 31.75 | 21.25 |
| 310 | 31.25 | 21.50 |
| 315 | 31.50 | 21.50 |
| 320 | 31.25 | 21.50 |
| 325 | 30.75 | 21.25 |
| 330 | 30.50 | 22.00 |
| 335 | 30.75 | 21.75 |
| 340 | 30.50 | 21.75 |
| 345 | 30.25 | 22.00 |
| 350 | 30.00 | 22.25 |
| 355 | 29.75 | 22.25 |
| 360 | 30.00 | 22.75 |

ตารางที่ ง.4 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.1 โดยมวลของเมทานอล

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 0.0 | 25.25 | 23.75 |
| 5.0 | 68.00 | 18.75 |
| 10.0 | 84.25 | 12.00 |
| 15.0 | 80.00 | 9.50 |
| 20.0 | 75.25 | 9.00 |
| 25.0 | 70.25 | 9.25 |
| 30.0 | 67.50 | 9.50 |
| 35.0 | 65.50 | 9.50 |
| 40.0 | 63.50 | 10.25 |
| 45.0 | 62.00 | 10.25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่อ 58 ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.1 โดยมวลของเมทานอล (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 50.0 | 60.50 | 10.75 |
| 55.0 | 58.75 | 10.50 |
| 60.0 | 58.00 | 11.00 |
| 65.0 | 57.25 | 11.50 |
| 70.0 | 56.00 | 11.50 |
| 75.0 | 54.25 | 12.00 |
| 80.0 | 54.25 | 12.25 |
| 85.0 | 53.50 | 12.50 |
| 90.0 | 52.25 | 12.50 |
| 95.0 | 51.50 | 13.00 |
| 100.0 | 51.25 | 12.75 |
| 105.0 | 50.50 | 13.00 |
| 110.0 | 49.00 | 13.50 |
| 115.0 | 49.25 | 14.00 |
| 120.0 | 48.25 | 14.00 |
| 125.0 | 48.25 | 14.25 |
| 130.0 | 47.75 | 14.75 |
| 135.0 | 46.75 | 15.00 |
| 140.0 | 45.50 | 15.00 |
| 145.0 | 45.75 | 15.25 |
| 150.0 | 45.50 | 15.00 |
| 155.0 | 45.00 | 15.75 |
| 160.0 | 44.50 | 16.00 |
| 165.0 | 43.75 | 16.00 |
| 170.0 | 43.50 | 16.25 |
| 175.0 | 43.25 | 16.50 |
| 180.0 | 42.75 | 16.50 |
| 185.0 | 43.00 | 16.75 |
| 190.0 | 42.50 | 17.50 |
| 195.0 | 41.75 | 16.75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 59 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.1 โดยมวลของเมทานอล (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 200.0 | 41.25 | 17.75 |
| 205.0 | 41.25 | 18.00 |
| 210.0 | 41.00 | 18.25 |
| 215.0 | 40.50 | 18.50 |
| 220.0 | 40.25 | 18.50 |
| 225.0 | 39.75 | 18.50 |
| 230.0 | 39.75 | 19.00 |
| 235.0 | 39.50 | 18.75 |
| 240.0 | 39.50 | 19.50 |
| 245.0 | 38.25 | 19.75 |
| 250.0 | 38.50 | 19.50 |
| 255.0 | 38.50 | 19.50 |
| 260.0 | 38.00 | 20.25 |
| 265.0 | 37.50 | 20.25 |
| 270.0 | 37.75 | 21.00 |
| 275.0 | 37.50 | 21.00 |
| 280.0 | 37.00 | 21.25 |
| 285.0 | 37.25 | 21.25 |
| 290.0 | 37.00 | 21.00 |
| 300.0 | 35.75 | 21.00 |
| 305.0 | 35.75 | 21.50 |
| 310.0 | 35.00 | 21.75 |
| 315.0 | 34.75 | 21.75 |
| 320.0 | 34.50 | 21.75 |
| 325.0 | 33.75 | 21.75 |
| 330.0 | 33.75 | 22.25 |
| 335.0 | 33.25 | 22.25 |
| 340.0 | 33.25 | 22.75 |
| 345.0 | 32.75 | 22.25 |
| 350.0 | 32.50 | 22.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 60 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 สารทำความเย็นผสมระหว่างอะซีโตนและเมทานอล ที่อัตราส่วน 0.1 โดยมวลของเมทานอล (ต่อ)

| ระยะเวลาการทดลอง (นาที) | อุณหภูมิถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส) |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| 355.0 | 32.00 | 22.75 |
| 360.0 | 32.25 | 23.00 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ 61 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้