

การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับอุตสาหกรรม



นายรัชชานนท์ เรียบร้อย  
นายณัฐอมร คำลือ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Coefficient of Performance Model  
for Industrial Refrigeration System



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 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับอุตสาหกรรม

นักศึกษา นายรัชชานนท์ เรียบร้อย รหัสนักศึกษา 62010770

นายณัฐอมร คำลือ รหัสนักศึกษา 62010297

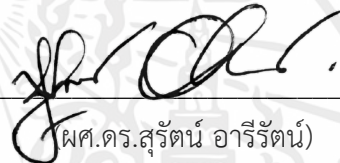
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

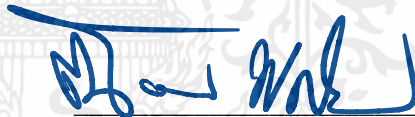
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
 (ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

ประธานกรรมการ

  
 (รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)

กรรมการ

  
 (ผศ.ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาแบบจำลองประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับ อุตสาหกรรม
โดย	รัชชานนท์ เรียบร้อย ณัฐอมร คำลือ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนการผสมของสารทำความเย็นระหว่าง R32/R290, R32/1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) อีกทั้งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสารทำความเย็นให้ได้ค่า COP ที่สูงและค่า GWP ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เพื่อสามารถทดแทนสารทำความเย็นเดิมในอุตสาหกรรม โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ในการทำนายคุณลักษณะของสารทำความเย็นผสม จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในโปรแกรมจำลองระบบทำความเย็นของ NIST (Cycle\_D-HX) ซึ่งพบว่าชนิดของสารทำความเย็นผสม อัตราส่วนการผสม และพฤติกรรมของสารทำความเย็นแบบอะซีโอทรอปิก ที่ส่งผลต่อค่า COP โดยเมื่อความแตกต่างระหว่างวัฏภาคกว้าง ส่งผลให้ค่า COP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งอัตราส่วนการผสมยังส่งผลต่อค่า GWP ซึ่งอัตราส่วนการผสมของสารไฮโดรคาร์บอนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานข้อตกลงมอนทรีออล (Montreal Protocol) ที่ 150 ของคู่สาร R32/R290, R32/1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 ได้แก่ 0.8, 0.8, 0.9 และ 0.9 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สารทำความเย็นแบบผสมสององค์ประกอบ, อะซีโอทรอปิก, ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น

**Report Title** Study on Coefficient of Performance Model for Industrial Refrigeration System

**By** RATCHANON REAPROI  
NATAMORN KAMLUE

**Degree** Bachelor of Engineering

**Program** Chemical Engineering

**Year** 2022

**Advisor** Assistant Professor. Dr. Surat Areerat

## Abstract

The aim of this research was to study the composition of mixed refrigerants, specifically R32/R290, R32/1270, R134a/R290, and R134a/R1270, and their impact on the coefficient of performance (COP) and global warming potential (GWP) of refrigerants. The objective was to improve the efficiency of refrigerants for industrial applications by achieving high COP and appropriate GWP. To achieve this goal, we used Aspen Plus to predict the properties of blending refrigerants. We then used the obtained data in the NIST refrigeration system simulation program (Cycle\_D-HX), which showed that the type of mixed refrigerant, composition, and behavior of the refrigerant in an azeotropic mixture affected the COP significantly. The wide phase difference reduced the COP significantly. Moreover, the composition affected the GWP. The composition of hydrocarbon in blending refrigerants that met the Montreal Protocol Standard were 0.8, 0.8, 0.9 and 0.9 for R32/R290, R32/1270, R134a/R290, and R134a/R1270, respectively.

**Keywords:** Binary refrigerant mixtures, Azeotropic, Coefficient of performance (COP)

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ในการให้คำปรึกษา ความรู้ และให้การสนับสนุนในการทำวิจัย นอกจากนี้ความสำเร็จที่เกิดขึ้นได้จากความอนุเคราะห์จากคณะกรรมการผู้ตรวจปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง และ ผศ.ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์ ที่ให้คำวิจารณ์เพื่อชี้แนะให้เห็นถึงปัญหาที่อาจพบในงานวิจัยจนนำไปสู่แนวทางการแก้ไขและพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้ในอนาคต นอกจากนี้ในด้านของการปฏิบัติงานในการทำวิจัย คณะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท พีเอสอี พอร์ สปีด จำกัด ในการเข้าถึงโปรแกรมสำหรับศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดไอในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์ทั้งหลายเหล่านี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่รักยิ่ง และเพื่อนพ้องคนสำคัญที่คอยให้การสนับสนุนคณะผู้วิจัยเสมอมา

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	11
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	11
1.2 วัตถุประสงค์ .....	12
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	12
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 คุณสมบัติของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว.....	13
2.1.1 กลุ่มของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว .....	13
2.1.1.1 สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons).....	13
2.1.1.2 สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์และไฮโดรคลอโรฟลูออโรโอเลฟินส์ (Hydrofluoro-olefins).....	13
2.1.1.3 สารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ (Natural refrigerant) .....	14
2.1.2 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น .....	14
2.1.3 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) .....	14
2.1.4 ค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP).....	15
2.1.5 สมบัติการติดไฟของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว .....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ .....	15
2.2.1 ลักษณะของสารทำความเย็นแบบผสม .....	16
2.2.1.1 สารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic refrigerant).....	16
2.2.1.2 สารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิก (Zeotropic refrigerant) .....	16
2.2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนโดยเทคนิคการผสม ให้เป็นสารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ .....	16
2.3 พฤติกรรมของสารผสมในสมดุลวัฏภาคไอและของเหลว [15] .....	17
2.3.1 ค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว (Equilibrium Ratio: K-Value) [15,16].....	17
2.3.2 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์และสมการสถานะ [16,17] .....	18
2.3.3 สมการสถานะแบบไวเรียล (Virial Equation of state) [18].....	18
2.3.4 สมการสถานะแบบเพง-โรบินสัน (Peng-Robinson Equation of state) [16] 19	
2.3.5 แบบจำลองทางของค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตียูนิแฟค (UNIFAC) [18].....	20
2.4 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [19].....	21
2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) [19] .....	22
2.4.2 เครื่องอัดไอ [19].....	22
2.4.3 เครื่องควบแน่น [19] .....	23
2.4.4 วาล์วลดแรงดัน [19] .....	23
2.4.5 เครื่องระเหย [19] .....	24
2.5 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	24
2.5.1 สมดุลไอและของเหลวสำหรับระบบเพนตะฟลูออโรอีเทนกับโพรเพน และได ฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 253.15 ถึง 323.15 เคลวิน .....	24
2.5.2 การลดการติดไฟของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนที่ใช้สารฮาโลคาร์บอน ...	25
2.5.3 การตรวจสอบเชิงทดลองของสารทำความเย็นผสมไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน เพื่อทดแทนสารทำความเย็น R410A ในเครื่องปรับอากาศในครัวเรือน .....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1 .....	29
3.1.1	ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของสารทำความเย็น .....	30
3.1.2	เตรียมข้อมูลเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์คุณลักษณะของสารทำความเย็นแบบสอง องค์ประกอบ.....	30
3.1.3	ศึกษาคุณลักษณะของสารทำความเย็นผสม.....	30
3.1.4	การศึกษาคุณสมบัติทางด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม .....	30
3.1.5	การศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดไอ .....	31
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2 .....	32
3.2.1	ศึกษาแบบจำลองระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A.....	32
3.2.2	ศึกษาการทำงานจริงของระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A.....	32
3.2.3	เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล .....	32
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน .....	33
4.1	ลักษณะของสารทำความเย็นผสม.....	33
4.2	สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R32/R290.....	36
4.3	สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R32/R1270.....	36
4.4	สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R134a/R290.....	37
4.5	สารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a/R1270 .....	38
4.6	การเปรียบเทียบสารทำความเย็นแบบผสมสององค์ประกอบ .....	39
4.7	การศึกษาและเปรียบเทียบระบบทำความเย็นแบบอัดไอจากแบบจำลองและการทดลอง ในระบบจริงของสารทำความเย็น R410A .....	40
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	42
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	42
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	43
	บรรณานุกรม.....	45
	ภาคผนวก.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก	วิธีการใช้งาน Aspen plus.....	50
ภาคผนวก ข	วิธีการใช้งาน ProREFD.....	54
ภาคผนวก ค	วิธีการใช้งาน Cycle_D-HX ของ NIST.....	60
ภาคผนวก ง	วิธีการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกของ อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นและค่า COP ....	65
ภาคผนวก จ	วิธีการคำนวณค่า GWP ของสารทำความเย็นผสม.....	68
ภาคผนวก ฉ	ข้อมูลที่ได้จากการจำลองใน Cycle_D-HX ของ NIST.....	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมมติฐานและแบบจำลองสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวที่ใช้ในการพิจารณาค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว (K-Value) [15] .....	18
ตารางที่ 2.2 แสดงการคำนวณสำหรับสารผสมสององค์ประกอบสำหรับองค์ประกอบและความดันที่จุดอะซีโอโทรป [20].....	25
ตารางที่ 2.3 สมบัติพื้นฐานของสารทำความเย็น [21].....	25
ตารางที่ 3.1 สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบที่ศึกษา.....	30
ตารางที่ 3.2 สภาวะอ้างอิงที่ใช้ศึกษาในระบบทำความเย็น [27].....	31
ตารางที่ จ.1 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290 ต่างๆ .....	69
ตารางที่ จ.2 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R1270 ต่างๆ.....	70
ตารางที่ จ.3 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R290 ต่างๆ .....	71
ตารางที่ จ.4 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R1270 ต่างๆ.....	72
ตารางที่ ฉ.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R134a/R290 .....	74
ตารางที่ ฉ.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R134a/R1270.....	75
ตารางที่ ฉ.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R32/R290 .....	76
ตารางที่ ฉ.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R32/R1270 .....	77

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระหว่างเอนทาลปีกับความดันของวงจรทำความเย็นแบบอัดไอในอุดมคติ [17].....	21
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1.....	29
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นในแบบจำลองเบื้องต้น [25] .....	31
รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2.....	32
รูปที่ 4.1 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R32 กับ R290 .....	33
รูปที่ 4.2 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R32 กับ R1270 .....	34
รูปที่ 4.3 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a กับ R290 .....	35
รูปที่ 4.4 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a กับ R1270.....	35
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R32/R290 (○).....	36
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R32/R1270 (◇).....	37
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R134a/R290 (□).....	38
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R134a/R1270 (△).....	38
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่ส่งผลต่อค่า COP .....	39
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่ส่งผลต่อค่า GWP .....	40
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของ COP ในแต่ละช่วงเวลา.....	41
รูปที่ ก.1 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเปิดโปรแกรม.....	51
รูปที่ ก.2 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเลือก Template.....	51
รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Aspen Plus ในหน้า Properties & Methods .....	52
รูปที่ ก.4 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเลือก Methods.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Binary ของโปรแกรม Aspen Plus .....	53
รูปที่ ก.6 กราฟแสดงพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290 .....	53
รูปที่ ข.1 หน้าต่างขณะเปิดโปรแกรม ProREFD .....	55
รูปที่ ข.2 หน้าแรกของโปรแกรม ProREFD .....	55
รูปที่ ข.3 หน้าต่างขณะรอเข้าสู่ Refrigeration cycle simulation.....	56
รูปที่ ข.4 หน้าต่างในส่วนของ Refrigerant Specification .....	56
รูปที่ ข.5 หน้าต่างขณะค้นหาและเลือกสารทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD .....	57
รูปที่ ข.6 หน้าต่างขณะกำลังกรอกอัตราส่วนของสารทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD.....	57
รูปที่ ข.7 หน้าต่างแสดงสารทำความเย็นที่เกี่ยวข้องก่อนเข้าสู่กระบวนการจำลอง ในระบบทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD .....	58
รูปที่ ข.8 หน้าต่างในการกรอกค่าที่ศึกษาในระบบทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD.....	58
รูปที่ ข.9 หน้าต่างผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรม ProREFD.....	59
รูปที่ ค.1 หน้าต่างขณะเปิดเปิดโปรแกรม CYCLE_D-HX.....	61
รูปที่ ค.2 หน้าต่างขณะที่สร้างไฟล์ใหม่สำหรับการจำลองระบบทำความเย็น.....	61
รูปที่ ค.3 หน้าต่างขณะเลือกที่คำสั่ง Define New Blend เพื่อศึกษาสารทำความเย็น .....	62
รูปที่ ค.4 หน้าต่างขณะที่เลือกสารทำความเย็น.....	62
รูปที่ ค.5 หน้าต่างขณะที่กรอกอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นที่ต้องการ.....	63
รูปที่ ค.6 หน้าต่างขณะที่เลือก Cycle Type .....	63
รูปที่ ง.1 กราฟ P-h diagram ของสารทำความเย็น R410A.....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันสารทำความเย็นได้มีการศึกษาและพัฒนามากขึ้นจากสารทำความเย็นที่เป็นสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFCs) และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมและครัวเรือน [1] แต่เนื่องจากการใช้สารทำความเย็นดังกล่าวทำลายชั้นโอโซนและมีส่วนที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทำความเย็นที่ใช้เพื่อลดการทำลายของชั้นโอโซนและรวมถึงลดการเกิดภาวะโลกร้อน

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในปัจจุบันส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้งานสารทำความเย็น ซึ่งสารทำความเย็นหลายชนิดถูกจัดเป็นสารที่ก่ออันตรายต่อชั้นของโอโซนที่เกิดจากสารฮาโลคาร์บอนลอยตัวสูงชั้นสตราโตสเฟียร์ [1,2] และดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วเกิดการแตกตัวให้อะตอมอิสระของกลุ่มธาตุฮาโลเจน แล้วจึงไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นฮาโลเจนมอนอกไซด์และก๊าซออกซิเจนที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับอะตอมออกซิเจนอิสระเกิดเป็นอะตอมคลอรีนอิสระขึ้นอีกครั้งที่สร้างความเสียหายในชั้นของโอโซนอย่างต่อเนื่อง และสารทำความเย็นยังก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย ปัญหาที่เกิดขึ้นล้วนเกิดจากการใช้งานสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) ที่มีค่าสูง ที่ส่งผลโดยตรงจากการเลือกสารทำความเย็นที่มีความเหมาะสมทั้งด้านการใช้งานและรวมถึงต้องคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม

แนวทางในการเลือกใช้สารทำความเย็นในปัจจุบันจึงมีการพิจารณาการลดผลกระทบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มีการเปรียบเทียบสารทำความเย็นแต่ละชนิดผ่านค่าที่ถูกกำหนดขึ้น [3] ได้แก่

1. ค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (ODP) ที่บอกระดับในการทำลายชั้นโอโซนของชั้นสตราโตสเฟียร์ของชั้นบรรยากาศที่เกิดจากการใช้สารทำความเย็นไตรคลอโรฟลูออโรมีเทนเป็นมาตรฐาน
2. ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ที่บอกระดับในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเมื่อเทียบใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมาตรฐาน
3. คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ เช่น ค่าความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอ
4. การติดไฟของสารทำความเย็นแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันดังนั้นจึงมีการศึกษาสารทำความเย็นอย่างมากมายเพื่อให้ได้มาซึ่งสารทำความเย็นที่สามารถตอบสนองความต้องการที่มีในปัจจุบัน เช่น การใช้งานสารทำความเย็นในอุตสาหกรรม การใช้งานในครัวเรือน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสารทำความเย็นกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนมีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ดี ไม่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซนและการติดไฟ แต่ในทางตรงกันข้ามส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อนอย่างมีนัยสำคัญ [1,3] ในการวิจัยนี้จึงมีความพยายามในการลดผลกระทบกล่าวข้างต้นโดยการนำสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำและมีค่าความร้อนแฝงที่สูงมาผสมเพื่อให้ได้สารทำความเย็นผสมที่ตอบสนองต่อการใช้งานและสิ่งแวดล้อมอย่างเหมาะสม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดจากการปรับปรุงของสารทำความเย็นผสมที่สภาวะไอโซเทอร์มอล
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP)
3. เพื่อศึกษาแบบจำลองของระบบทำความเย็นแบบอัดไอโดยใช้โปรแกรมจำลองสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น
4. เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของสารทำความเย็นผสมแต่ละชนิด
5. เพื่อหาอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมที่มีค่า GWP ไม่เกินตามข้อกำหนด

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมที่สภาวะไอโซเทอร์มอล
2. ศึกษาแบบจำลองระบบทำความเย็นแบบอัดไอผ่านโปรแกรมจำลอง
3. ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสม

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเข้าใจถึงวิธีการปรับปรุงสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวโดยใช้เทคนิคการผสม
2. สามารถใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อศึกษาการเบี่ยงเบนจากความเบนอุดมคติในวัฏภาคไอและของเหลวได้
3. สามารถคำนวณประสิทธิภาพสมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ
4. ได้ศึกษาและเรียนรู้หลักการการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอผ่านแบบจำลอง
5. ได้ศึกษาและเรียนรู้ถึงวิธีการลดค่าไฟในระบบทำความเย็นจากการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณสมบัติของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว

สารทำความเย็น ทำหน้าที่เป็นสารทำงานที่ใช้ถ่ายเทความร้อนในระบบทำความเย็น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในระบบทำความเย็นมีคุณสมบัติโดยทั่วไป คือ จุดเดือดต่ำ ความสามารถในการระเหยเป็นไอที่สูงและสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภท [1,4] คือ

1. สารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน
2. สารไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์และไฮโดรคลอโรฟลูออโรโอเลฟินส์
- และ 3. สารทำความเย็นธรรมชาติ

#### 2.1.1 กลุ่มของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว

##### 2.1.1.1 สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons)

กลุ่มของสารเคมีทางอุตสาหกรรมที่ใช้สำหรับการทำความเย็นเป็นหลัก [4,5] ซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อทดแทนสารทำลายชั้นโอโซนในสตราโตสเฟียร์ที่เกิดจากสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอนและไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอนที่เกิดขึ้นหลังจากลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วเกิดการแตกตัวให้อะตอมอิสระของคลอรีนที่พร้อมทำปฏิกิริยากับโอโซนในชั้นบรรยากาศ แล้วเกิดเป็นคลอรีนมอนอกไซด์ที่ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับอะตอมออกซิเจนอิสระแล้วเกิดเป็นอะตอมคลอรีนอิสระขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบดังนั้นจึงมีความสามารถในการทำลายชั้นโอโซนที่ต่ำ แต่สารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนบางชนิดมีค่าศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อนสูงจึงมีการศึกษาสารอื่นทดแทน [4]

##### 2.1.1.2 สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์และไฮโดรคลอโรฟลูออโรโอเลฟินส์ (Hydrofluoro-olefins)

สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอลคีน [6,7] ซึ่งมีพันธะคู่น้อยหนึ่งพันธะ และประกอบกับการมีสารกลุ่มฮาโลเจนอย่างฟลูออรีนที่ทำให้ค่อนข้างเสถียรในระบบทำความเย็นทำให้ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ต่ำมาก [6] มีความสามารถในการสลายตัวอย่างรวดเร็วในบรรยากาศเนื่องจากพันธะคู่นี้นิวเคลียสของคาร์บอนที่ทำให้โมเลกุลมีความเสถียรน้อยลงและนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในบรรยากาศเกิดเป็นกรดไตรฟลูออโรอะซิติก อยู่ในบรรยากาศเป็นเวลาหลายวัน และก่อตัวเป็นไตรฟลูออโรอะซิเตต ซึ่งเป็นเกลือของกรดไตรฟลูออโรอะซิติก ในที่ละลายอยู่น้ำและตกลงสู่พื้นดิน และเนื่องจากมีความสามารถในการทำความเย็นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำที่มีสาเหตุจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ ดังนั้นการผสมกับสารทำความเย็นในกลุ่มนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติร่วมกับสารทำความเย็นอื่น

### 2.1.1.3 สารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ (Natural refrigerant)

สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบทำความเย็นและปรับอากาศ เป็นสารที่เกิดขึ้นในวัฏจักรทางชีววิทยาและเคมีจากธรรมชาติที่ไม่มีการแทรกแซงของมนุษย์ ซึ่งค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซนเป็นศูนย์ และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ต่ำหรืออาจไม่มี และสามารถเข้ากันได้กับวัสดุอีลาสโตเมอร์ที่พบในระบบทำความเย็นและสามารถละลายได้ในน้ำมัน (Mineral oil) เนื่องจากสารทำความเย็นตามธรรมชาติไม่มีอะตอมของคลอรีนหรือฟลูออรีนจึงไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและไม่เกิดกรดแก่ที่อาจนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์ก่อนเวลา แต่สารทำความเย็นจากธรรมชาติมีปัญหาอื่น ๆ ตามมา ได้แก่ การกัดกร่อน ความเป็นพิษ ความไวไฟ เป็นต้น [8]

### 2.1.2 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น

สารทำความเย็นควรมีประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สูง เพื่อประหยัดพลังงาน แต่ในทางปฏิบัติไม่มีสารทำความเย็นใดที่สามารถตอบสนองความต้องการทั้งหมดได้ โดยสารทำความเย็นเลือกจากการใช้งานเฉพาะด้าน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำความเย็นและอุณหภูมิเป็นหลัก [3,7] ปัจจัยหลักในการเลือกสารทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอความร้อนแฝงที่สูง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ อุณหภูมิวิกฤตของสารทำความเย็นควรสูงเพื่อให้ความแตกต่างของอุณหภูมิในการควบแน่นยังคงสูงมาจากจุดวิกฤต เพื่อให้ระเหยง่ายอุณหภูมิการเดือดของสารทำความเย็นควรมีอุณหภูมิที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับสภาวะแวดล้อม และจำเป็นต้องใช้แรงดันในระบบทำความเย็นที่มากกว่าความดันบรรยากาศเพื่อลดความเป็นไปได้ที่อากาศและความชื้นเข้าสู่ระบบของสารทำความเย็น

### 2.1.3 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP)

เป็นการบอกถึงปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดูดซับได้โดยมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เท่ากับ “หนึ่ง” ที่พิจารณาในช่วงระยะเวลา “หนึ่งร้อยปี” [9,10] การวัดค่าของสารทำความเย็นที่ส่งผลต่อภาวะโลกร้อนนั้นมาจากแนวคิดค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้โลกร้อนขึ้นเทียบเท่าโดยรวมมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 ค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP)

ค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซน ใช้เพื่อบอกถึงการทำลายโอโซนในสตราโตสเฟียร์ที่เปรียบเทียบกับจากการทำลายโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ โดยการเกิดการแตกตัวให้อะตอมอิสระของคลอรีนที่พร้อมทำปฏิกิริยากับโอโซนในชั้นบรรยากาศที่มีผลมาจากการใช้สารทำความเย็น ไตรคลอโรฟลูออโรมีเทนเป็นสารอ้างอิงที่กำหนดค่าศักยภาพการทำลายชั้นโอโซนเป็น “หนึ่ง” [12,13]

#### 2.1.5 สมบัติการติดไฟของสารทำความเย็นเชิงเดี่ยว

อัตราส่วนของสารที่เป็นไอหรือก๊าซกับอากาศต้องอยู่ภายในช่วงระหว่างความสามารถในการติดไฟที่ขีดจำกัดการติดไฟขั้นต่ำ (Lower Flammable Limit, LFL) และขีดจำกัดในการติดไฟขั้นสูง (Upper Flammable Limit, UFL) อุณหภูมิจุดติดไฟต้องสูงพอในการเริ่มการเผาไหม้ และออกซิเจนในอากาศต้องอยู่ภายในส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ครอบงำประกอบตามสามเหลี่ยมไฟ คือ เชื้อเพลิง ออกซิเจน และความร้อน เพื่อลดการติดไฟสารหน่วงการติดไฟจึงมีเติมสารที่ทำให้สารที่มีความไวไฟต่ำลง [1]

## 2.2 สารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ

การแทนที่ของสารทำความเย็นแบบผสมใหม่ควรใช้กระบวนการวิเคราะห์ลำดับขั้นในการพัฒนาสารทำความเย็นใหม่โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐาน ความปลอดภัย การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงความเหมาะสมของอุปกรณ์และระบบ และนอกจากนี้ไม่เพียงแต่ต้องพิจารณาสารทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังต้องมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ดีของระบบทำความเย็นด้วย สารทำความเย็นแต่ละชนิดอาจมีการใช้งานเฉพาะ [12] การใช้สารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำในปัจจุบันและทางเลือกของสารผสมสำหรับสารทำความเย็นที่มีอยู่ ความเป็นไปได้ในการรวมหรือการผสมสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการและมีผลกระทบต่อบรรยากาศเพียงเล็กน้อยซึ่งมีความพยายามอย่างมากในการพัฒนาและทดสอบส่วนผสมของสารทำความเย็นต่างๆ การผสมสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการที่ต้องการลดผลกระทบต่อบรรยากาศ ยังคงมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง และจำเป็นต้องพิจารณาจากหลายการทดลอง เช่น การใช้ไฮโดรฟลูออโรเลฟินส์ที่หายากเป็นสารตั้งต้นสำหรับส่วนผสมของสารทำความเย็น [4] และสารทำความเย็นแบบผสมแบ่งเป็นสองประเภท [9] คือ 1. สารทำความเย็นแบบอะซีโอทรอปิก 2. สารทำความเย็นแบบซีโอทรอปิก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.2.1 ลักษณะของสารทำความเย็นแบบผสม

### 2.2.1.1 สารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic refrigerant)

สารทำความเย็นที่ผสมกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปซึ่งมีองค์ประกอบในวัฏภาคไอ สมดุลและวัฏภาคของเหลวเหมือนกันที่ความดันที่ค่าหนึ่ง อุณหภูมิของสารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิกคงที่ในขณะที่เกิดการระเหยและการควบแน่นที่ความดันคงที่ ส่วนผสมของสารทำความเย็นชนิดนี้มีลักษณะเหมือนสารทำความเย็นที่มีส่วนประกอบเดียว [9] ในการกำหนดชื่อสารทำความเย็นนี้ถูกกำหนดรหัส ASHRAE ในรหัสสารทำความเย็น R500

### 2.2.1.2 สารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิก (Zeotropic refrigerant)

สารทำความเย็นที่ผสมกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปซึ่งมีองค์ประกอบวัฏภาคไอ สมดุลและวัฏภาคของเหลวที่แตกต่างกัน อุณหภูมิของสารทำความเย็นซีโอโทรปิกมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการระเหยและการควบแน่นที่ความดันคงที่ เมื่อสารทำความเย็นชนิดนี้เกิดการเดือดหรือการควบแน่นในช่วงความดันคงที่ ช่วงอุณหภูมินี้เรียกว่า “ช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะ (Temperature glide)” [9] สารทำความเย็นแบบผสมแบบซีโอโทรปิกได้รับการกำหนดรหัสจาก ASHRAE ในรหัสสารทำความเย็น R400

## 2.2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนโดยเทคนิคการผสมให้เป็นสารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ

การนำสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวสองชนิดมาผสมกันโดย เพื่อการปรับปรุงสมบัติการทำความเย็นของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนแบบสององค์ประกอบทางสมบัติอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็น ความปลอดภัยจากการรั่วรั้งการติดไฟและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยการพิจารณากลุ่มของสารทำความเย็นที่นำมาผสมกันดังนี้

### 1. สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนกับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติ

สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนกับสารกลุ่มทำความเย็นธรรมชาติที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายที่ดีขึ้นกับน้ำมัน (Mineral oil) และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [4,7]

## 2. สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนกับสารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์

การผสมด้วยสารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์ เพื่อลดศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) เพราะว่ากลุ่มนี้สามารถสลายตัวอย่างรวดเร็วในบรรยากาศเนื่องจากพันธะคู่ของคาร์บอนในโมเลกุล ส่งผลให้ช่วยลดการสร้างผลกระทบที่ทำให้โลกร้อน การผสมผสานสารทำความเย็นสองกลุ่มนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำความเย็น [4,6]

## 3. สารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนกับสารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนอื่น [10,14]

การผสมด้วยสารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนอื่น เพื่อการลดค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) และรวมถึงช่วยลดการก่อผลกระทบในจากการทำลายโอโซน

### 2.3 พฤติกรรมของสารผสมในสมดุลวัฏภาคไอและของเหลว [15]

สมดุลวัฏภาคไอและของเหลว คือสภาวะที่สารในวัฏภาคไอและของเหลวอยู่ร่วมกันในสภาวะสมดุล โดยที่ไม่มีแรงขับเคลื่อนในระหว่างสภาวะมากระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในวัฏภาคไอและของเหลว ซึ่งเป็นสภาวะที่อุณหภูมิทั้งระบบมีค่าเท่ากัน ความดันของระบบมีค่าเท่ากัน และมีศักย์ทางเคมีเท่ากันทั้งในวัฏภาคไอและของเหลวที่เท่ากัน แสดงได้ว่าที่สภาวะสมดุลนั้นศักย์ทางเคมีของสารเดียวกันในวัฏภาคไอและของเหลวมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการพิจารณา ระบบของอุณหพลศาสตร์ในส่วนถัดไป

#### 2.3.1 ค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว (Equilibrium Ratio: K-Value) [15,16]

ค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่แสดงระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของสารที่อยู่ในวัฏภาคไอ ( $y$ ) กับวัฏภาคของเหลว ( $x$ ) ตามลำดับ โดยเมื่อสารเคมีเข้าสู่สภาวะสมดุลในวัฏภาคไอและของเหลวในปริมาณสารที่ไม่เท่ากัน ค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอและของเหลวสามารถบ่งบอกแนวโน้มในการแยกตัวของสารในวัฏภาคไอหรือของเหลวตามธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันในระบบที่สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$K_i(T, P) \equiv \frac{y_i}{x_i} \quad (2-1)$$

เมื่อค่าของ  $K_i$  เทียบเท่ากับค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว ซึ่งก็สามารถอธิบายโดยเทียบจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากอัตราส่วนโมลของสารที่สนใจได้ดังนี้

$K_i=1$  แสดงให้เห็นว่าสาร  $i$  มีอัตราส่วนโมลในวัฏภาคไอและของเหลวเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_i > 1$  แสดงให้เห็นว่าสาร  $i$  มีอัตราส่วนโมลในวัฏภาคไอมากกว่าในวัฏภาคของเหลว

$K_i < 1$  แสดงให้เห็นว่าสาร  $i$  มีอัตราส่วนโมลในวัฏภาคไอน้อยกว่าในวัฏภาคของเหลว

**ตารางที่ 2.1** สมมติฐานและแบบจำลองสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวที่ใช้ในการพิจารณาค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว (K-Value) [15]

สมมติฐาน	แบบจำลองสมดุลวัฏภาคไอและของเหลว	ค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอ-ของเหลว (K-Value)
แก๊สอุดมคติและสารละลายอุดมคติ (Ideal Gas & Ideal Solution)	$y_i P = x_i P_i^{sat}$ (2-2)	$K_i(T, P) = \frac{P_i^{sat}}{P}$ (2-3)
แก๊สอุดมคติและสารละลายจริง (Ideal Gas & Real Solution)	$y_i P = Y_i x_i P_i^{sat}$ (2-4)	$K_i(T, P) = Y_i \frac{P_i^{sat}}{P}$ (2-5)
แก๊สจริงและสารละลายจริง (Real Gas & Real Solution)	$\hat{\phi}_i y_i P = Y_i x_i P_i^{sat}$ (2-6)	$K_i(T, P) = \frac{Y_i P_i^{sat}}{\hat{\phi}_i P}$ (2-7)

### 2.3.2 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์และสมการสถานะ [16,17]

แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เป็นสิ่งที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ หากพิจารณาพฤติกรรมของสารแล้วสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. แก๊สอุดมคติ (Ideal gas) 2. แก๊สจริง (Real gas) โดยพฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ก็มีหลักในการพิจารณาที่แตกต่างกันทั้งในด้านของปริมาตรของโมเลกุลของอนุภาคแก๊สแต่ละชนิด ขนาดของอนุภาค แรงกระทำระหว่างอนุภาค (แรงดึงดูดกันหรือแรงในการผลัก) การเคลื่อนที่ของอนุภาค เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของสารจึงมีการศึกษาอย่างมากมายที่พยายามอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้น

### 2.3.3 สมการสถานะแบบไวเรียล (Virial Equation of state) [18]

พฤติกรรมของแก๊สของสารผสมที่โดยส่วนใหญ่แล้วมีความเบี่ยงเบนไปจากแก๊สอุดมคติสามารถศึกษาได้จากความสัมพันธ์ของความดัน ปริมาตร อุณหภูมิ และอัตราส่วนขององค์ประกอบของสาร หรือแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งสัมพันธ์พีวากาซีตีเป็นคุณสมบัติของสารในระบบที่ขึ้นกับปัจจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยสามารถอธิบายถึงความเบี่ยงเบนไปจากความเป็นจากแก๊สผสมอุดมคติ ซึ่งสมการสถานะแบบไวเรียลก็มีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\ln \hat{\phi}_1 = \frac{P}{RT} (B_{11} + y_2^2 \delta_{12}) \quad (2-8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \hat{\phi}_2 = \frac{P}{RT} (B_{22} + y_1^2 \delta_{12}) \quad (2-9)$$

จากที่  $B_{ij}$  เป็นการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารที่ประพติดต่อกัน โดยสนใจเพียงสองโมเลกุลของสารผสมเท่านั้น หรือในอีกทางหนึ่งสามารถพิจารณาพฤติกรรมเหล่านั้นได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้ คือ  $B_{ij} = B^0 + \omega_{ij} B^1$  (2-10) ซึ่งค่าของ  $B_1$  และ  $B_0$  ก็สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$B_1 = 0.139 - \frac{0.172}{T_r^{4.2}} \quad (2-11)$$

$$B_0 = 0.083 - \frac{0.422}{T_r^{1.6}} \quad (2-12)$$

โดย  $B_1$  และ  $B_0$  เป็นฟังก์ชันของ  $T_r$  ที่เป็นการพิจารณาระหว่างอัตราส่วนของอุณหภูมิในระบบกับอุณหภูมิวิกฤตของสารผสม ดังที่แสดงจากสมการที่ 2-10 และ 2-11 ซึ่งจากกฎการรวมที่ถูกพิสูจน์โดย Prausnitz และคณะ [18] สำหรับการคำนวณค่า  $\omega_{ij}$ ,  $T_{cij}$  และ  $P_{cij}$

#### 2.3.4 สมการสถานะแบบเพง-โรบินสัน (Peng-Robinson Equation of state) [16]

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b)+b(v-b)} \quad (2-13)$$

$$a(T) = a_c \alpha(T) \quad (2-14)$$

$$a_c = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2-15)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (2-16)$$

$$\alpha(T) = [1 + (0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2) (1 - (\frac{T}{T_c})^{1/2})^2] \quad (2-17)$$

เมื่อ

$$a = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 x_i x_j a_{ij} \quad (2-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \sum_{i=1}^2 x_i b_i \quad (2-19)$$

$$a_{12} = (1 - k_{12}) \sqrt{a_{11} a_{22}} \quad (2-20)$$

โดย  $k_{12}$  คือ พารามิเตอร์ปฏิสัมพันธ์ของสารผสมสององค์ประกอบซึ่งมาจากการใช้วิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดที่มีพื้นฐานมาจากข้อมูลการทำลอง

### 2.3.5 แบบจำลองทางของค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตียูนิแฟค (UNIFAC) [18]

นอกเหนือจากการมีค่าสัมประสิทธิ์ที่อธิบายความเบี่ยงเบนในภูมิภาคไอแล้ว การอธิบายพฤติกรรมของสารละลายของของผสมที่เบี่ยงเบนไปจากสารละลายอุดมคติก็มีการค้นคว้าอย่างยาวนานแล้วเช่นกัน โดยสามารถใช้ค่าของสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีในการอธิบายพฤติกรรมของสารละลายในระบบได้ โดยแสดงให้เห็นถึงความเบี่ยงเบนของสารในภูมิภาคของเหลวในระบบซึ่งแบบจำลองทางของค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตียูนิแฟค (UNIFAC) มีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\ln Y_i = \ln Y_i^C + \ln Y_i^R \quad (2-21)$$

$$\ln Y_i^C = 1 - J_i + \ln J_i - 5q_i \left( 1 - \frac{J_i}{L_i} + \ln \frac{J_i}{L_i} \right) \quad (2-22)$$

$$\ln Y_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_k \left( \Theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] \quad (2-23)$$

เมื่อ

$$r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (2-24)$$

$$q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \quad (2-25)$$

โดย  $\ln Y_i^C$  คือ แอกทิวิตีของสารที่อธิบายถึงขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่แตกต่างกันโดยพิจารณาสารบริสุทธิ์เท่านั้น

$\ln Y_i^R$  คือ แอกทิวิตีที่อธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลระหว่างสารบริสุทธิ์และสารผสมในระบบ

$a_{mk}$  คือ พารามิเตอร์จำลองพฤติกรรมระหว่างฟังก์ชันกลุ่มย่อยที่อยู่ในสาร (เคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_k$  คือ ปริมาตรสัมพัทธ์ของสารที่สนใจ

$Q_k$  คือ พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของสารที่สนใจ

## 2.4 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [19]

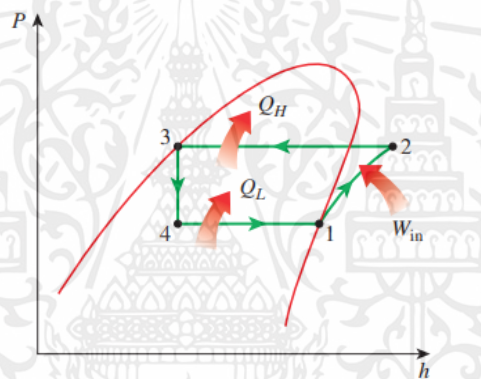
วัฏจักรการทำความเย็นด้วยการอัดไอเป็นวงจรที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับตู้เย็น ระบบเครื่องปรับอากาศ และปั๊มความร้อน ประกอบด้วยสี่กระบวนการดังนี้

กระบวนการจาก 1 ไป 2 คือการบีบอัดไอแบบไอเซนโทรปิกในคอมเพรสเซอร์

กระบวนการจาก 2 ไป 3 คือการควบแน่นที่ความดันคงที่ในเครื่องควบแน่น

กระบวนการจาก 3 ไป 4 คือการลดความดันที่เอนทาลปีคงที่ในอุปกรณ์ลดความดัน

กระบวนการจาก 4 ไป 1 คือการดูดซับความร้อนที่ความดันคงที่ในเครื่องระเหย



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระหว่างเอนทาลปีกับความดันของวงจรทำความเย็นแบบอัดไอในอุดมคติ [17]

ในกระบวนการทำความเย็นแบบอัดไอในอุดมคติ สารทำความเย็นเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ ณ จุดที่ 1 ในสถานะไออิ่มตัวและถูกบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกไปที่คอนเดนเซอร์ โดยอุณหภูมิของสารทำความเย็นมีการเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการบีบอัดแบบไอเซนโทรปิกเพื่อให้สูงกว่าอุณหภูมิของตัวกลางโดยรอบ จากนั้นสารทำความเย็นที่สภาวะไอร้อนยวดยิ่งเข้าสู่คอนเดนเซอร์ ณ จุดที่ 2 และเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศ ส่งผลให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว ณ จุดที่ 3

อุณหภูมิของสารทำความเย็นในสถานะนี้ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมโดยรอบ โดยสารทำความเย็นเหลวอิ่มตัว ณ จุดที่ 3 ถูกลดความดันผ่านวาล์วหรือหลอดคาปิลลารี ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นลดลงในระหว่างกระบวนการและเตรียมเข้าสู่เครื่องระเหยต่อไป ณ จุดที่ 4 โดยที่สภาวะนี้มีมีไอของสารทำความเย็นเล็กน้อย จากนั้นสารทำความเย็นระเหยจนหมดโดยการดูดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับความร้อนจากแหล่งที่ต้องการลดอุณหภูมิ สารทำความเย็นระเหยกลายเป็นไออิ่มตัวและกลับเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ ณ จุดที่ 1 อีกครั้งจนครบวงจร

#### 2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) [19]

ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) คือค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเทียบกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป โดยระบบทำความเย็นมีการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งขัดต่อกฎทางอุณหพลศาสตร์ ที่กล่าวว่า ความร้อนตามธรรมชาติไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W_{\text{net, in}}} \quad (2-26)$$

โดย COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ  
 $Q_L$  คือ ความสามารถในการรับความร้อนของสารทำความเย็น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)  
 $W_{\text{net, in}}$  คือ พลังงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องบีบอัดไอในคอมเพรสเซอร์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

#### 2.4.2 เครื่องอัดไอ [19]

เครื่องอัดไอหรือคอมเพรสเซอร์ เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญอันหนึ่งของระบบทำความเย็นทำหน้าที่ในการบีบอัดสารทำความเย็นในสถานะแก๊สที่ความดันหนึ่งไปยังความดันที่สูงขึ้น โดยแก๊สความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจากเครื่องระเหยผ่านเข้าไปยังคอมเพรสเซอร์ แล้วบีบอัดแก๊สนั้นให้มีความดันสูงขึ้นและมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย และยังเป็นอุปกรณ์ใช้ที่แบ่งความดันในระบบระหว่างความดันสูงและความดันต่ำซึ่งทำให้เกิดการไหลเป็นวัฏจักร ซึ่งกระบวนการบีบอัดไอแบบไอเซนโทรปิกมีสมการดังนี้

$$W_{\text{comp, in}} = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k-1} = \frac{kRT_1}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2-27)$$

โดย  $W_{\text{comp, in}}$  คือ พลังงานที่ป้อนเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)  
 $k$  คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ต่อด้วยความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)  
 $T_1, T_2$  คือ อุณหภูมิของสารที่เข้าสู่คอมเพรสเซอร์และออกจากคอมเพรสเซอร์ (เคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_1, P_2$  คือ ความดันของสารที่เข้าสู่คอมเพรสเซอร์และออกจากคอมเพรสเซอร์ (บาร์)

กระบวนการบีบอัดไอแบบไอเซนโทรปิก คือกระบวนการที่คอมเพรสเซอร์ใช้งานทำการบีบอัดไอให้มีความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยที่กระบวนการไม่มีการสูญเสียความร้อน เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ และเป็นกระบวนการที่เอนโทรปีมีค่าคงที่ที่จุดขาเข้าและขาออกของคอมเพรสเซอร์

### 2.4.3 เครื่องควบแน่น [19]

เครื่องควบแน่นหรือคอยล์ร้อน ทำหน้าที่ให้สารทำความเย็นในสถานะแก๊สที่มีความดันและอุณหภูมิสูง เกิดการควบแน่นเป็นสารทำความเย็นที่สถานะของเหลว ด้วยการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2-28)$$

โดย  $\dot{Q}_H$  คือ อัตราการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น (กิโลจูลต่อวินาที)  
 $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของสาร (กิโลกรัมต่อวินาที)  
 $h_2$  คือ พลังงานเอนทาลปีที่สภาวะไออิ่มตัว (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)  
 $h_3$  คือ พลังงานเอนทาลปีที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

### 2.4.4 วาล์วลดแรงดัน [19]

เป็นอุปกรณ์จำกัดการไหลชนิดหนึ่งที่ทำให้ความดันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่ต้องใช้งานใดๆ ความดันที่ลดลงในของเหลว ส่งผลให้อุณหภูมิมีการลดลงอย่างมาก และด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ในงานในการทำความเย็นและในเครื่องปรับอากาศ อุณหภูมิที่ลดลง (หรือบางครั้งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น) ในระหว่างกระบวนการมีการควบคุมโดยคุณสมบัติที่เรียกว่า “สัมประสิทธิ์จูล-ทอมสัน” ซึ่งค่าเอนทาลปีขาเข้าและขาออกมีปริมาณที่เท่ากัน ดังสมการต่อไปนี้

$$h_4 \cong h_3 \text{ ( throttling)} \quad (2-29)$$

โดย  $h_3$  คือ พลังงานเอนทาลปีของสารที่เข้าสู่อุปกรณ์ลดความดัน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)  
 $h_4$  คือ พลังงานเอนทาลปีของสารที่ออกจากอุปกรณ์ลดความดัน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.5 เครื่องระเหย [19]

เครื่องระเหยหรือคอยล์เย็น เป็นอุปกรณ์หลักของระบบทำความเย็น ทำหน้าที่รับปริมาณความร้อนจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็น จากการทำสารทำความเย็นมีการดูดความร้อนในขณะที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส ซึ่งความสามารถในการดูดความร้อนของสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันตามค่าของความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ โดยความร้อนที่ถูกถ่ายเทไปยังสารทำความเย็นส่งผลให้ทำให้อุณหภูมิมีการลดลง ดังที่แสดงจากสมการ

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2-30)$$

โดย	$\dot{Q}_L$	คือ อัตราการรับความร้อนสารทำความเย็น (กิโลจูลต่อวินาที)
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลของสารโดยมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)
	$h_1$	คือ พลังงานเอนทาลปีของสารที่สภาวะไออิ่มตัว (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	$h_4$	คือ พลังงานเอนทาลปีของสารที่ออกจากอุปกรณ์ลดความดัน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

### 2.5 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.5.1 สมดุลไอและของเหลวสำหรับระบบเพนตะฟลูออโรอีเทนกับโพรเพน และไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 253.15 ถึง 323.15 เคลวิน

Ju Hyok Kim และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาคสมสารทำความเย็นที่สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 253.15 ถึง 323.15 เคลวิน เนื่องจากสารผสมที่มีไฮโดรคาร์บอน และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนมีค่าศักยภาพในการทำลายโอโซนต่ำและภาวะโลกร้อนต่ำลงไปด้วย จึงถือเป็นสารทำความเย็นทางเลือกที่น่าสนใจในการศึกษา นักวิจัยบางคนได้ศึกษาสมดุลไอและของเหลว (VLE) สำหรับระบบผสมสารทำความเย็นชนิดไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จากการทำนายโดยใช้สมการสภาวะแบบเพง-โรบินสัน (Peng-Robinson Equation of state) ที่ได้จากการวัดสมดุลไอ-ของเหลวจากสภาวะความร้อนในเครื่องหมุนเวียนไอ ทั้งสองระบบแสดงถึงจุดอะซีโอโทรปิก

ข้อมูลการทดลองในการศึกษานี้ ร้อยละของการเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยขององค์ประกอบของความดันและไอระเหยสำหรับสารผสมระหว่างเพนตะฟลูออโรอีเทนกับโพรเพน (R125/R290) คือ 0.44 และ 0.63 และสำหรับสารผสมระหว่างไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน (R32/R290) คือ 1.06 และ 0.62 และค่าพารามิเตอร์ปฏิสัมพันธ์ของสารผสมสององค์ประกอบที่สามารถใช้ในการทำนายข้อมูลของวิภาคของไอและของเหลวด้วยค่าเบี่ยงเบนร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ 0.63 สำหรับสารผสมระหว่างเพนตะฟลูออโรอีเทนกับโพรเพน (R125/R290) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารผสมระหว่างไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน (R32/R290) คือ 0.62 ในการศึกษาของ วิชาภาควิชาของไอและของเหลวพบจุดอะซีโอโทรปิก สำหรับสารผสมระหว่างเพนตะฟลูออโรอีเทนกับโพรเพน ที่เศษส่วนของโมล 0.59–0.67 ของเพนตะฟลูออโรอีเทน และสำหรับสารผสมระหว่างไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน ที่ 0.66–0.73 ของ R32 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงที่สัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 2.2** แสดงการคำนวณสำหรับสารผสมสององค์ประกอบสำหรับองค์ประกอบและความดันที่จุดอะซีโอโทรป [20]

T (K)	R125 + R290		R32 + R290	
	$x_{azeo}$	P(kPa)	$x_{azeo}$	P(kPa)
253.15	0.594	434.9	0.657	562.5
263.15	0.603	609.2	0.666	787.0
273.15	0.614	825.3	0.676	1067.4
283.15	0.625	1095.9	0.685	1421.5
293.15	0.638	1423.6	0.698	1833.4
303.15	0.651	1820.0	0.709	2344.9
313.15	0.663	2299.5	0.718	2970.1
323.15	0.674	2871.6	0.725	3720.5

### 2.5.2 การลดการติดไฟของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนที่ใช้สารฮาโลคาร์บอน

Z. Lv และคณะ [21] ได้ศึกษาสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนจัดเป็นสารทำความเย็นชนิด A2L โดยการเสนอให้มีการนำสารทำความเย็นนี้ผสมกับสารทำความเย็นอื่น เช่น 1,1,1,2-เตตระฟลูออโรอีเทน สารทำความเย็นทรานส์ 1,3,3,3-เตตระฟลูออโรโพรพิลีน และไตรฟลูออโรไอโอดีนที่เป็นการวิเคราะห์ลักษณะการหน่วงไฟและกลไกการยับยั้งทางเคมีของสารฮาโลไฮโดรคาร์บอน

**ตารางที่ 2.3** สมบัติพื้นฐานของสารทำความเย็น [21]

Refrigerants	R-32	R-134a	R-1234ze(E)	R-131i
Formular	$\text{CH}_2\text{F}_2$	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	$\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$	$\text{CF}_3\text{I}$
Mw [g/mol]	52.0	102.0	114.0	195.9
$T_{cr}$ [°C]	78.1	101.1	109.4	123.3
$P_{cr}$ [MPa]	5.78	4.06	3.63	3.95
NBP [°C]	-51.7	-26.1	-18.9	-21.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ODP	0	0	0	0
GWP <sub>100yr</sub>	705	1360	~1	<1
Safety Group	A2L	A1	A2L	A1

อัตราส่วนปริมาตรของสารทำความเย็น 1,1,1,2-เตตระฟลูออโรอีเทนกับสารทำความเย็นผสมไดฟลูออโรมีเทนช่วงจำกัดการติดไฟของสารผสมสององค์ประกอบก็แคบลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราส่วนปริมาตรที่ไวไฟวิกฤต คือ 0.4 และความเข้มข้นในการยับยั้งการติดไฟที่ต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 28.6 เมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็นสององค์ประกอบสูงกว่า 0.4 หรือความเข้มข้นของสารเฉื่อยสูงกว่าร้อยละ 28.6 สารผสมนี้ไม่ติดไฟ

การผสมทรานส์ 1,3,3,3-เตตระฟลูออโรโพรพินไม่ติดไฟเมื่อความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 6 ถึง 24 ช่วงขีดจำกัดความสามารถในการติดไฟค่อยๆ ลดลงซึ่งยืนยันได้ว่าสารทำความเย็นที่นำมาผสมชนิดนี้มีความสามารถยับยั้งการติดไฟของไดฟลูออโรมีเทนในสถานะที่มีความชื้นต่ำ แต่ไม่สามารถยับยั้งการติดไฟของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ และค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของสารทำความเย็นแบบผสมที่ลดลงเนื่องจากสารทำความเย็นขนาดนี้มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ต่ำ [21]

สุดท้ายสำหรับสารทำความเย็นผสมไตรฟลูออโรไอโอดีนมีเทนสามารถอนุมานได้ว่าอัตราส่วนปริมาตรที่ไวไฟวิกฤต คือ 0.16 และความเข้มข้นในการยับยั้งการติดไฟที่ต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 13.8 เมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็นสององค์ประกอบสูงกว่า 0.16 หรือความเข้มข้นของสารผสมนี้สูงกว่าร้อยละ 13.8 สารผสมนี้ไม่ติดไฟ ซึ่งมีผลต่อการระงับการติดไฟของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนได้ดีกว่าสารทำความเย็นที่ใช้เปรียบเทียบในการทดลองนี้ทั้งหมด

### 2.5.3 การตรวจสอบเชิงทดลองของสารทำความเย็นผสมไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนเพื่อทดแทนสารทำความเย็น R410A ในเครื่องปรับอากาศในครัวเรือน

Qiqi Tian และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาสารทำความเย็นผสมระหว่างสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนที่อัตราส่วนร้อยละโดยมวลที่ 68 และ 32 ตามลำดับ ซึ่งได้รับการตรวจสอบว่าเป็นสารทดแทนสารทำความเย็น R410A ได้ โดยค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนของสารทำความเย็นผสมนี้เป็นเพียงร้อยละ 22 ของสารทำความเย็น R410A ในการตรวจสอบทางทฤษฎีและการทดลองดำเนินการเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศที่ทำงานร่วมกับทั้งสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน และสารทำความเย็น R410A ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารทำความเย็นลดลงร้อยละ 30.0 ถึง 35.0 และอีกทั้งความสามารถในการทำความเย็นและความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.0 ถึง 23.7 อีกทั้งยังช่วยลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณประจุไฟฟ้าและความสามารถในการติดไฟในสารทำความเย็นโพรเพนได้รับการคำนวณ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการติดไฟที่ขีดจำกัดการติดไฟขั้นต่ำ (Lower Flammable Limit, LFL) และขีดจำกัดในการติดไฟสูง (Upper Flammable Limit, UFL) ของสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน อยู่ที่ร้อยละ 5.0 และ 17.6 ตามลำดับ และในการเปรียบเทียบ การใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไมโครแชนเนลที่คอนเดนเซอร์เพื่อแทนที่หลอดที่มีครีบบ เมื่อเทียบในระบบทำความเย็นที่ใช้สารผสมไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพน ที่ใช้ท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบละเอียดพบว่าปริมาณประจุของสารทำความเย็นแบบผสมดังกล่าวและรวมไปถึง การใช้พลังงานมีค่าลดลง 34.1% และ 0.4% ตามลำดับ ความเย็นและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของระบบทำความเย็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.4 และ 6.8 ตามลำดับ

แต่ในแง่ของการใช้ทดแทนสารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนที่อัตราส่วนร้อยละโดยมวลที่ 68 และ 32 ตามลำดับ สามารถทำหน้าที่แทนสารทำความเย็น R410A ในเครื่องปรับอากาศในครัวเรือนได้แต่ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ลดลงตามการคำนวณทางทฤษฎี

จากการศึกษาบทความข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงสารทำความเย็น ไดฟลูออโรมีเทนที่ไม่ส่งผลต่อการทำลายชั้นโอโซน มีความไวไฟต่ำที่มีความอันตรายจากการระเบิดของอาจรุนแรงกว่าสารทำความเย็นที่ติดไฟได้ชนิดอื่น และผลกระทบที่เป็นตัวการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เมื่อสารทำความเย็นชนิดนี้ใช้ในระบบทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน จึงมีการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยการลดค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเติมสารทำความเย็นที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งการติดไฟ โดยการปรับปรุงสารทำความเย็นดังกล่าวได้ดังนี้

(1) สารทำความเย็นไดฟลูออโรมีเทน เมื่อผสมกับสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำ ช่วยลดการก่อผลกระทบในการเกิดภาวะโลกร้อน แต่ต้องพิจารณาถึงการทำลายชั้นโอโซนในสารทำความเย็นร่วมด้วย

(2) สารทำความเย็นแบบผสมไดฟลูออโรมีเทนที่ผสมกับสารทำความเย็นสารกลุ่มไฮโดรฟลูออโรโอเลฟินส์ที่มีองค์ประกอบของฮาตุฮาโลเจนในสารทำความเย็นช่วยในการยับยั้งการติดไฟได้

(3) สารทำความเย็นแบบผสมไดฟลูออโรมีเทนกับโพรเพนมีความสามารถในการทดแทนสารทำความเย็น R-410A ได้ ซึ่งต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นร่วมด้วยเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ที่แตกต่างจากเดิมอาจส่งผลในทางการใช้งานสารทำความเย็นผสมชนิดนี้



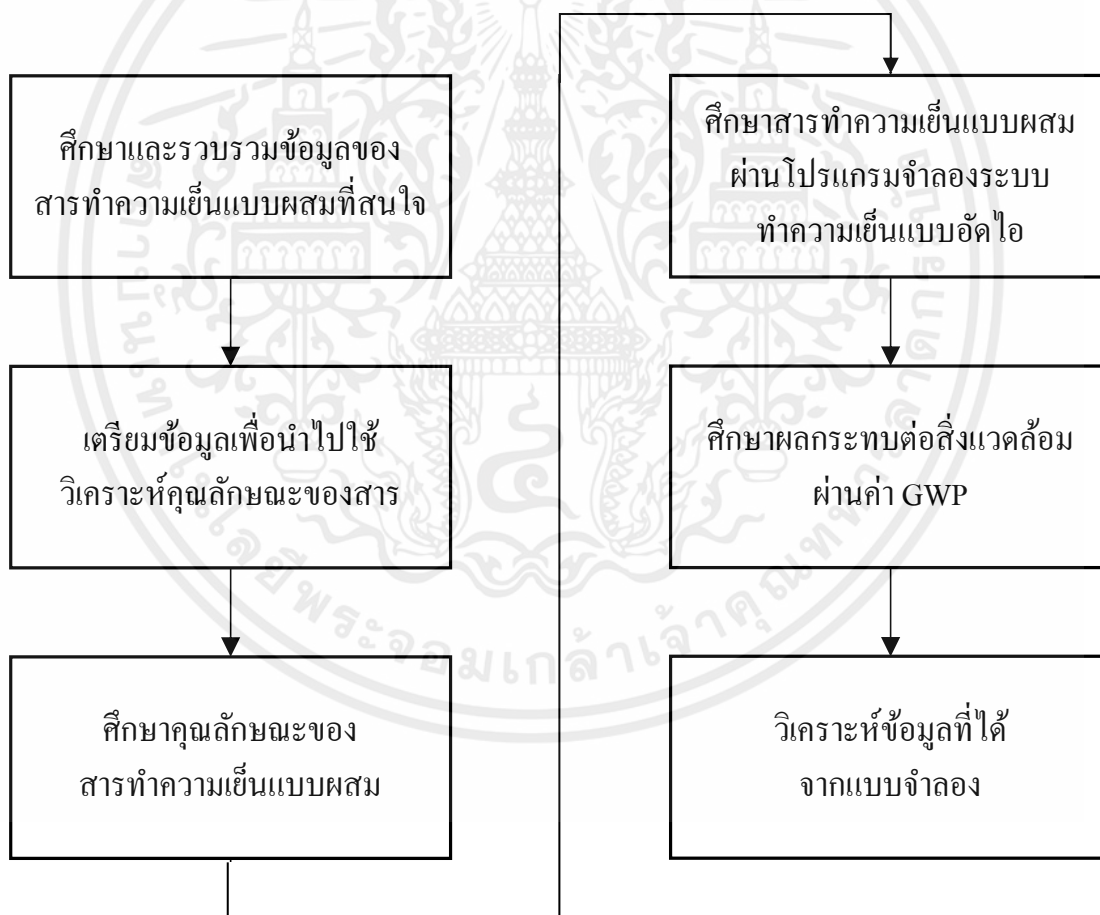
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การศึกษาคูณสมบัติของสารทำความเย็นใหม่ที่มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยวิธีการในการผสมสารทำความเย็นเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถรวมข้อดีของสารทำความเย็นแต่ละชนิด ได้ทำให้เกิดสารทำความเย็นชนิดใหม่ด้วยคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และ 2. การศึกษาการเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอัดไอเมื่อใช้สารทำความเย็นด้วยเทคนิคการผสม

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของสารทำความเย็น

การศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารทำความเย็นที่เกิดจากการพัฒนาด้วยเทคนิคการผสมแบบสององค์ประกอบ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตที่ต้องการศึกษาให้อยู่ในกลุ่มของสารทำความเย็นที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมแล้วจึงเลือกมาผสมกัน

#### ตารางที่ 3.1 สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบที่ศึกษา

สารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ
R32/R290
R32/R1270
R134a/R290
R134a/R1270

### 3.1.2 เตรียมข้อมูลเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์คุณลักษณะของสารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบ

ในการเตรียมข้อมูลเป็นการรวบรวมข้อมูลดิบจากการทดลองของสารทำความเย็นข้างต้นที่ได้กล่าวมานี้ โดยใช้ข้อมูลจากเว็บไซต์ของสถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติ (National Institute of Standards and Technology: NIST) ที่มีการรวบรวมข้อมูลสมดุล วัฏภาคไอและของเหลวแบบสารทำความเย็นผสมแบบสององค์ประกอบที่สนใจ

### 3.1.3 ศึกษาคุณลักษณะของสารทำความเย็นผสม

เริ่มต้นการศึกษาค่าคงที่สมดุลวัฏภาคไอและของเหลว (K-Value) เพื่อทราบถึงแนวโน้มในการแยกตัวของสารใดๆ ที่อยู่ในแต่ละวัฏภาคโดยการใช้ข้อมูลดิบที่มีที่มาจากการทดลอง จากนั้นจึงศึกษาความเบี่ยงเบนจากอุดมคติในวัฏภาคไอและของเหลว ด้วยการทำนายค่าสัมประสิทธิ์พีวากาซีตีในวัฏภาคไอจากการใช้สมการสถานะแบบไวเรียลและเพง-โรบินสัน การทำนายค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีในวัฏภาคของเหลวจากการใช้แบบจำลองสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีของยูนิแฟค ของสารทำความเย็นของสารผสมแบบสององค์ประกอบเพื่อให้เข้าใจถึงคุณลักษณะของสารผสมก่อนนำไปใช้กับการแบบจำลองระบบทำความเย็นในการศึกษาต่อไป

### 3.1.4 การศึกษาคุณสมบัติทางด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม

เริ่มต้นจากการศึกษาอัตราส่วนของสารที่เป็นไอหรือก๊าซกับอากาศต้องอยู่ภายในช่วงระหว่างความสามารถในการติดไฟที่ขีดจำกัดการติดไฟขั้นต่ำ (LFL) และขีดจำกัดในการติดไฟสูง (UFL) จากการบทความของ Chad V. และคณะ [24] ค่าศักยภาพในการทำให้อุณหภูมิ

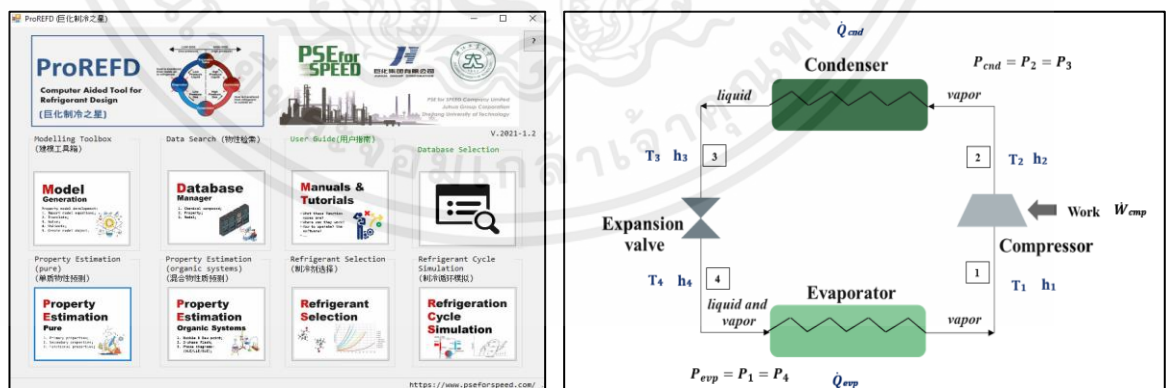
ภาวะโลกร้อน (GWP) ของสารผสมดังกล่าวจากข้อมูลที่ได้ทำการค้นคว้าจาก United Nations Environment Programme (UNEP) [10]

### 3.1.5 การศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นนี้ใช้แบบจำลองระบบทำความเย็น 2 แบบ คือ ProREFD และ Cycle\_D-HX ของ NIST เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น ซึ่งแบ่งกรณีในการศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1. การศึกษาจากคุณสมบัติของสารทำความเย็นในสภาวะการทำงานนั้นๆ เช่น การเปลี่ยนชนิดของสารทำความเย็น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำความเย็น ผลที่เกิดจากอะซิโตรปิกของสารทำความเย็น และ 2. การศึกษาจากอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น เช่น คอมเพรสเซอร์ เครื่องควบแน่น วาล์วลดแรงดัน และเครื่องระเหย โดยการแสดงผลกระทบบอกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP)

ตารางที่ 3.2 สภาวะอ้างอิงที่ใช้ศึกษาในระบบทำความเย็น [27]

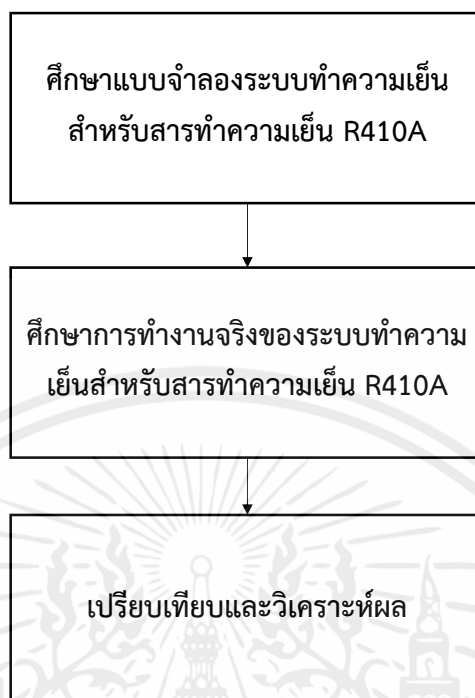
สถานะ	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)
ก่อนเข้าเครื่องระเหย	30
หลังเข้าเครื่องเครื่องระเหย	25
ก่อนเข้าเครื่องควบแน่น	35
หลังเข้าเครื่องควบแน่น	40



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นในแบบจำลองเบื้องต้น [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2

#### 3.2.1 ศึกษาแบบจำลองระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A ผ่านแบบจำลองระบบทำความเย็น 2 แบบ คือ ProREFD และ Cycle\_D-HX ของ NIST

#### 3.2.2 ศึกษาการทำงานจริงของระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A

ศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นนี้ผ่านระบบปรับอากาศ โดยเก็บข้อมูลปริมาณกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยระบบ Arduino เพื่อหางานที่ใช้ของเครื่องคอมพิวเตอร์ และเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความดัน ขาเข้าคอมพิวเตอร์และขาออกคอนเดนเซอร์เพื่อหาพลังงานในการดึงความร้อนออกสารทำความเย็น R410A เพื่อใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการทำความเย็นในระบบจริง

#### 3.2.3 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

นำค่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นสำหรับสารทำความเย็น R410A จากแบบจำลองและจากการทดลองมาเปรียบเทียบเพื่อดูค่าความเบี่ยงเบนของค่า COP ที่วัดได้จากแบบจำลองและจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

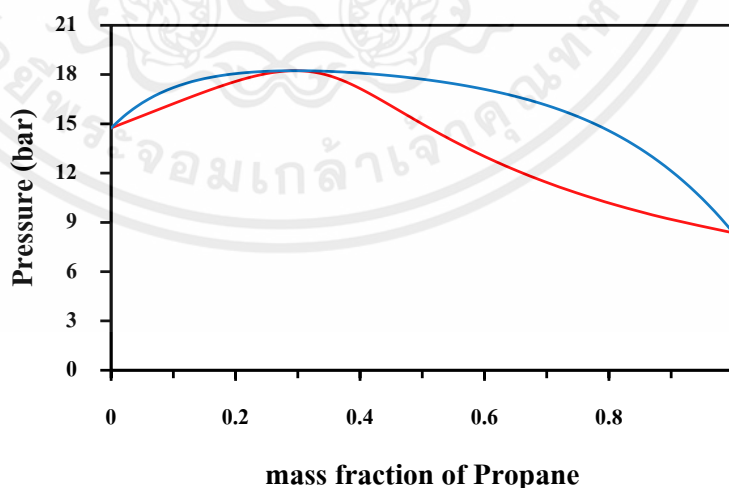
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

จากงานวิจัยนี้ผลของการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1. การศึกษาคุณสมบัติของสารทำความเย็นใหม่ด้วยวิธีการในการผสมสารทำความเย็นเข้าด้วยกัน ซึ่งศึกษาด้วยคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมและผลของความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากค่า GWP ที่ยอมรับได้ และ 2. ผลของการศึกษาการเพื่อประเมินประสิทธิภาพในระบบทำความเย็นแบบอัดไอเมื่อใช้สารทำความเย็นด้วยเทคนิคการผสมดังกล่าวผ่านการใช้โปรแกรม ProREFD กับ Cycle\_D-HX ของ NIST ที่รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมและอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อไปทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพของสารทำความเย็นที่ขึ้นอยู่กับค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

#### 4.1 ลักษณะของสารทำความเย็นผสม

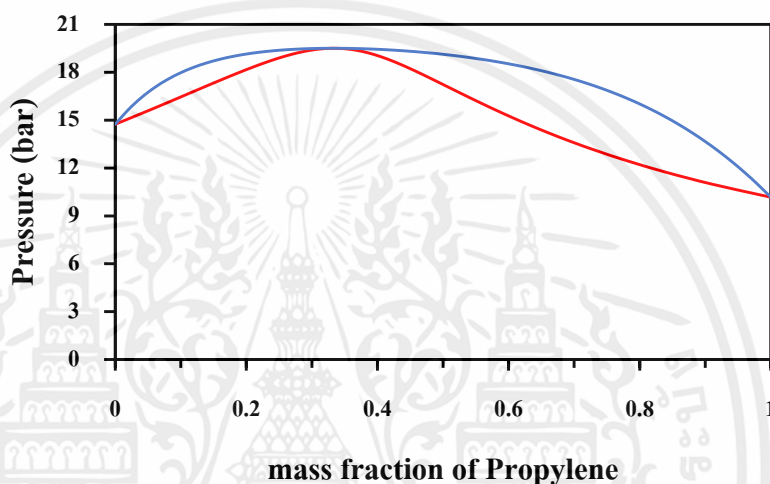
สารทำความเย็น R32/R290 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดอะซีโอโทรปิกขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า R32/R290 เกิดอะซีโอโทรปิกที่อัตราส่วน 0.3 โดยมวลของ R290 และเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของ R290 เพิ่มขึ้น ความกว้างระหว่างการวิฤภาคไอและของเหลวมีการเพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งทำให้ช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะเพิ่มมากขึ้นไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สารทำความเย็นมีพฤติกรรมคล้ายกับสารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิกที่มีช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะที่กว้าง



รูปที่ 4.1 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R32 กับ R290

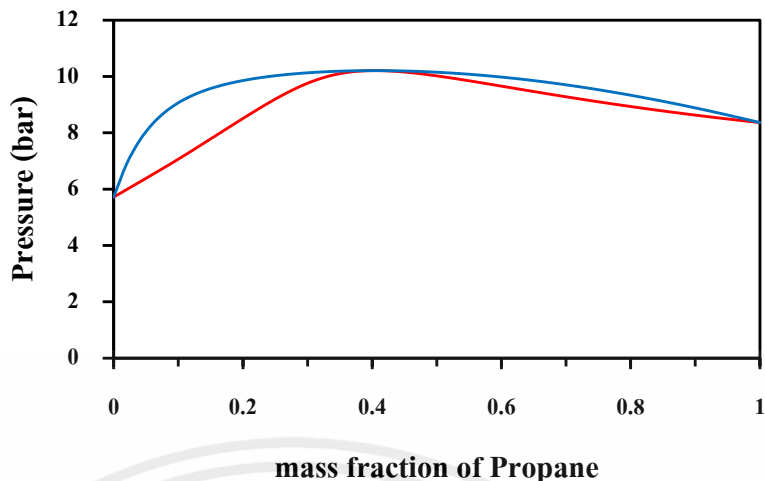
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทำความเย็น R32/R1270 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดอะซีโอโทรปิกขึ้น เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า R32/R1270 มีลักษณะคล้ายคลึงกับคู่ R32/R1270 โดยมี จุดอะซีโอโทรปิกที่อัตราส่วน 0.35 โดยมวลของ R1270 และเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของ R1270 เพิ่มขึ้น ความกว้างระหว่างการวิฤภาคไอและของเหลวมีการเพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งทำให้ช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะเพิ่มมากขึ้นไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สารทำความเย็นมี พฤติกรรมคล้ายกับสารทำความเย็นแบบซีโอโทรปิกที่มีช่วงความต่างของอุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะ ที่กว้าง



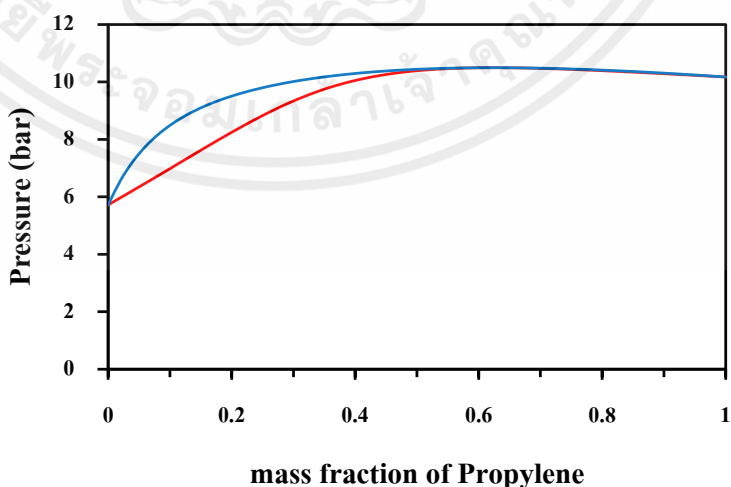
รูปที่ 4.2 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R32 กับ R1270

สารทำความเย็น R134a/R290 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของสารผสมที่เกิดอะซีโอโทรปิก เช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.3 แต่พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นที่ช่วงอัตราส่วนโดยมวลของ R290 ที่มีค่าสูง ซึ่งเมื่อเทียบกับสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R32/R290 แล้วพบว่า R134a/R290 เกิดอะซีโอโทรปิกที่อัตราส่วน 0.4 โดยมวลของ R290 และเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของ R290 เพิ่มขึ้น ความกว้างระหว่างการวิฤภาคไอและของเหลวมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อลดอัตราส่วนโดยมวลของ R290 ความกว้างระหว่างการวิฤภาคไอและของเหลวมีค่าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a กับ R290

สารทำความเย็น R134a/R1270 แสดงให้เห็นถึงความเป็นเกิดอะซีโอโทรปิกขึ้นเช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.4 โดยมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับสารทำความเย็นแบบผสมสององค์ประกอบระหว่าง R134a กับ R290 ซึ่งมีช่วงของความต่างระหว่างวิภูภาคที่ค่อนข้างแคบในช่วงที่อัตราส่วนของไฮโดรคาร์บอนสูง ส่งผลให้สารผสมทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการกลายเป็นไอ และความแน่นกลับมาเป็นของเหลวที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันโดย R134a/R1270 เกิดอะซีโอโทรปิกที่อัตราส่วน 0.6 โดยมวลของ R1270 ซึ่งเมื่ออัตราส่วนของ R1270 เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่าช่วงความต่างระหว่างวิภูภาคอยู่ชิดกันอย่างมาก จึงทำให้คุณสมบัติของสารทำความเย็นผสมแบบสององค์ประกอบนี้มีพฤติกรรมที่เข้าใกล้ความเป็นสารทำความเย็นเชิงเดี่ยวอย่างมาก ส่งผลให้กระบวนการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบทำความเย็นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น



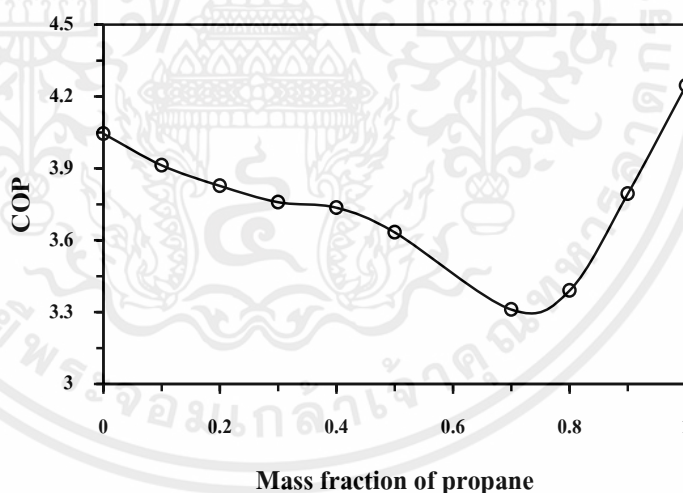
รูปที่ 4.4 P-xy ของสารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a กับ R1270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสารทำความเย็นผสมแบบสององค์ประกอบเหล่านี้ไปจำลองในโปรแกรมระบบทำความเย็นแบบอัดไอ โดยสามารถวิเคราะห์ออกมาดังต่อไปนี้

#### 4.2 สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R32/R290

เมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็นแบบสององค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปพบว่า COP ของระบบทำความเย็นมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็น R290 เพิ่มขึ้นจนถึง ณ อัตราส่วน 0.7-0.75 โดยมวล และค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่ที่อัตราส่วน 0.8 โดยมวลของ R290 เป็นต้นไป เนื่องจากสารทำความเย็นบริสุทธิ์ทั้ง 2 ชนิดนี้ ต่างมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอสูงทั้งคู่ แต่ผลจากการที่พลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มความดันในส่วนของคอมเพรสเซอร์ มีการใช้พลังงานที่สูงมากเมื่อเทียบค่าความร้อนแฝงของในการกลายเป็นไอของ R32/R290 จากการที่สารทำความเย็น R290 ที่มีค่ามวลโมเลกุลที่ต่ำ เมื่อพิจารณาการอัดตัวของไอของสารทำความเย็นแบบผสมนี้ สารที่มีโมเลกุลที่น้อยส่งผลโดยตรงต่อการบีบอัด ซึ่งทำให้พลังงานที่ต้องใช้มากขึ้นตามไปด้วยถึงแม้ว่าความสามารถในการกลายเป็นไอของสารทำความเย็นผสมมีค่าสูงก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารทำความเย็น R290 แต่การเติมสารทำความเย็นมากเกินไป ส่งผลให้พลังงานที่ต้องใช้ในคอมเพรสเซอร์เพิ่มตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และยังพบว่าพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างภูมิภาคส่งผลต่อค่า COP อย่างมีนัยสำคัญ



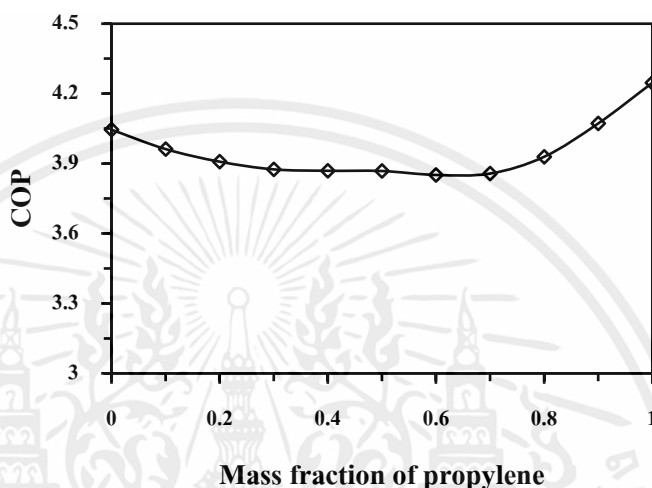
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R32/R290

(○)

#### 4.3 สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R32/R1270

ถึงแม้สารทำความเย็นคู่ R32/R1270 กับ R32/R290 มีกราฟ P-xy ที่คล้ายกัน แต่การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นต่อ COP ของ R32/R1270 เมื่อเทียบกับ R32/R290 ก็มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าถึงแม้ค่า COP ของระบบทำความเย็นมีค่าลดลงเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

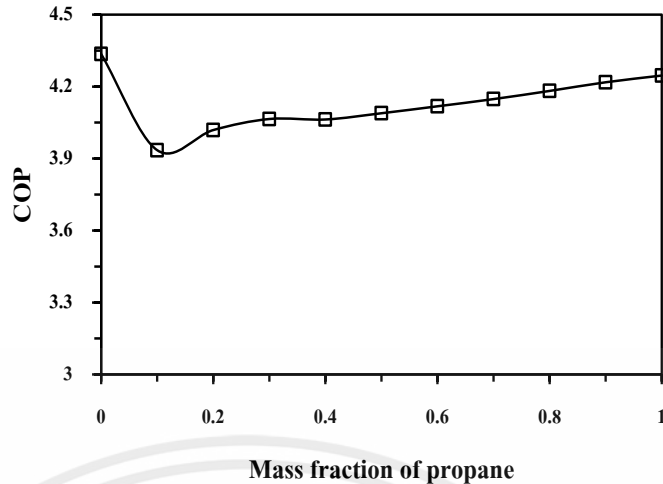
อัตราส่วนของสารทำความเย็น R1270 เพิ่มขึ้นจนถึง ณ อัตราส่วน 0.7-0.75 โดยมวล และค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ที่อัตราส่วน 0.8 โดยมวลของ R1270 เป็นต้นไป แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า COP เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของ R1270 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ คู่สารทำความเย็น R32/R290



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R32/R1270 (◇)

#### 4.4 สารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบระหว่าง R134a/R290

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 พบว่าช่วงที่เกิดความแตกต่างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลว ช่วงความแตกต่างระหว่างวัฏภาคที่แคบส่งผลต่อการค่า COP น้อยกว่าช่วงความแตกต่างระหว่างวัฏภาคที่กว้าง ในช่วงต้นค่า COP มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของ R290 เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของ R290 เพิ่มขึ้นมากกว่า 0.1 ค่า COP ของระบบทำความเย็นนี้ก็มีความโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความกว้างระหว่างวัฏภาคไอกับของเหลวของสารทำความเย็นผสมที่มีช่วงที่แคบลงเมื่ออัตราส่วนของ R290 เพิ่มขึ้น

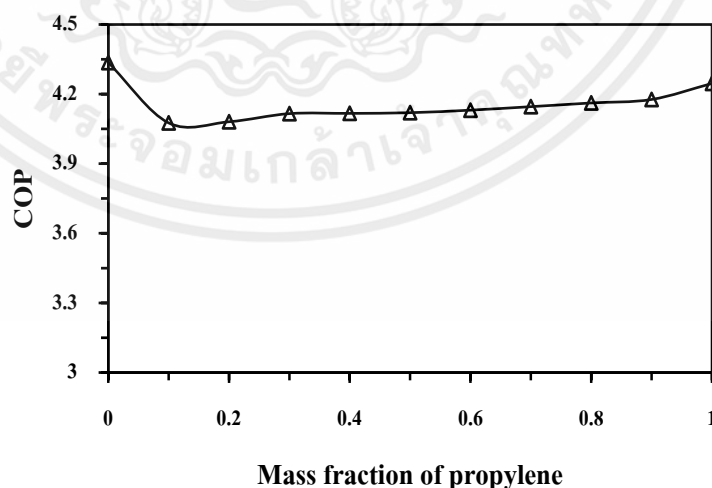


รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R134a/R290

(□)

#### 4.5 สารทำความเย็นสององค์ประกอบระหว่าง R134a/R1270

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 สังเกตได้ว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกับคู่ R134a/R290 โดยพบว่าในช่วงแรกตั้งแต่อัตราส่วนการผสมของ R1270 อยู่ที่ 0.1 พบว่าค่า COP อยู่ในจุดที่ต่ำที่สุดในกรณีของการศึกษาของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบนี้ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ R1270 มากขึ้น ค่า COP มีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยที่ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่สูงของ R1270 นั้นส่งผลดีในส่วนของ การรับความร้อนในระบบทำความเย็น ถึงแม้ว่ามวลโมเลกุลของ R1270 มีค่าต่ำ แต่ความสามารถในการรับความร้อนที่มากสามารถชดเชยพลังงานที่ต้องใช้ในคอมเพรสเซอร์ได้



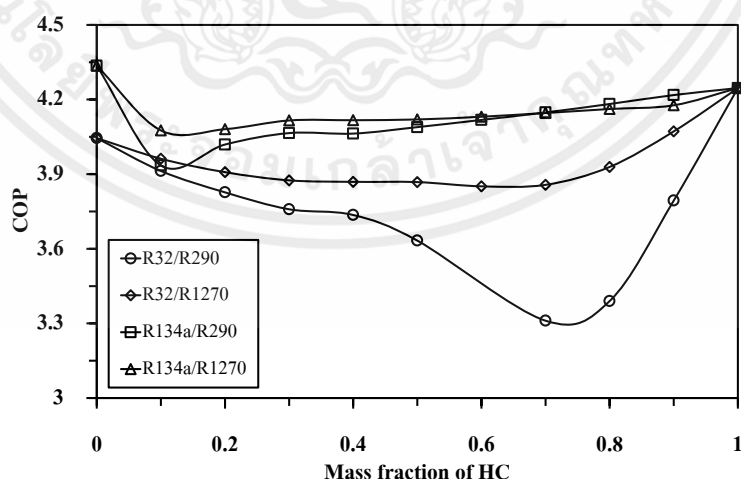
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของ R134a/R1270

(△)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การเปรียบเทียบสารทำความเย็นแบบผสมสององค์ประกอบ

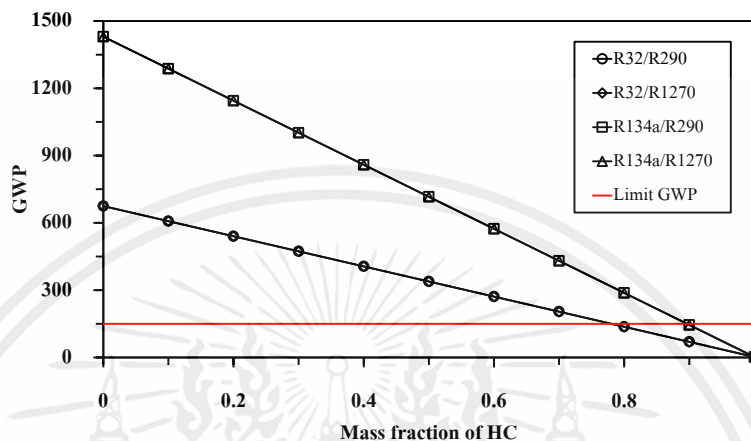
เมื่อเปรียบเทียบสารทำความเย็นแบบผสมสององค์ประกอบทั้ง 4 ชนิดได้แก่ R32/R290, R32/R1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 เห็นได้ว่าชนิดของสารทำความเย็นผสม อัตราส่วนของสารทำความเย็นผสม และพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวต่างส่งผลต่อค่า COP ในระบบทั้งสิ้น ซึ่งหากช่วงความแตกต่างระหว่างไอกับของเหลวต่างกันมาก ส่งผลให้ค่า COP ลดลงมากขึ้น โดยพบว่าพฤติกรรมของสารทั้ง 4 ชนิดนี้แสดงออกมา 2 แบบ คือ 1) ช่วงความแตกต่างของสถานะที่มากในช่วงของอัตราส่วนของสารที่ต่ำ 2) ช่วงความแตกต่างระหว่างสถานะในช่วงที่อัตราส่วนสูง ซึ่งเป็นจุดสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้สารทำความเย็นแบบผสมเหล่านี้ แนวโน้มในการเลือกสารทำความเย็นจากทั้ง 4 ชนิดนี้ สารทำความเย็น R32/R290 ค่อนข้างมีแนวโน้มการลดลงของค่า COP ที่ชัดเจนกว่าสารทำความเย็นตัวอื่นๆ เนื่องจากสารทำความเย็น R32/R290 มีช่วงความแตกต่างระหว่างวัฏภาคที่กว้าง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า COP ที่สูง ในขณะที่สารทำความเย็น R32/R1270 มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงค่า COP เพียงเล็กน้อยและในสารทำความเย็น R134a/R290 กับ R134a/R1270 มีพฤติกรรมของสารผสมที่ใกล้เคียงกัน โดยมีการเกิดช่วงความแตกต่างระหว่างสถานะที่แคบและเกิดจุดอะซีโอโทรปตลอดช่วงอัตราส่วนสารไฮโดรคาร์บอนที่สูง ซึ่งมีประโยชน์มากในการนำไปใช้ในระบบทำความเย็น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็นเปลี่ยนไปก็สามารถเติมสารไฮโดรคาร์บอนเพื่อรักษาสภาพความเป็นอะซีโอโทรปิกอยู่ได้ โดยสามารถดูกราฟรวมการเปลี่ยนแปลงค่า COP ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารทำความเย็นผสมต่างๆดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่ส่งผลต่อค่า COP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

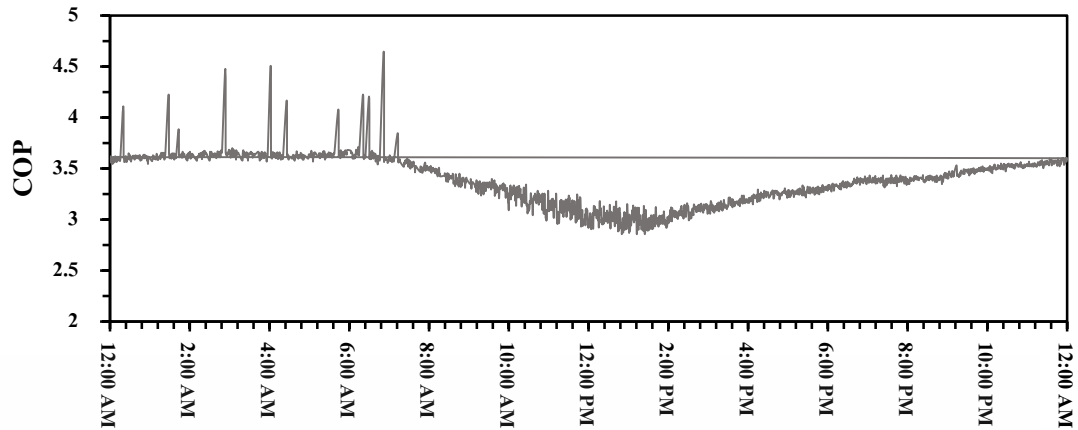
นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของสารทำความเย็นแบบผสมสองกับค่า GWP ดังรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของไฮโดรคาร์บอนที่ทำให้ค่า GWP ผ่านเกณฑ์ข้อบังคับตาม ข้อตกลงมอนทรีออลของสารทำความเย็นผสม R32/R290, R32/R1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 ได้แก่ 0.8, 0.8, 0.9 และ 0.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่ส่งผลต่อค่า GWP

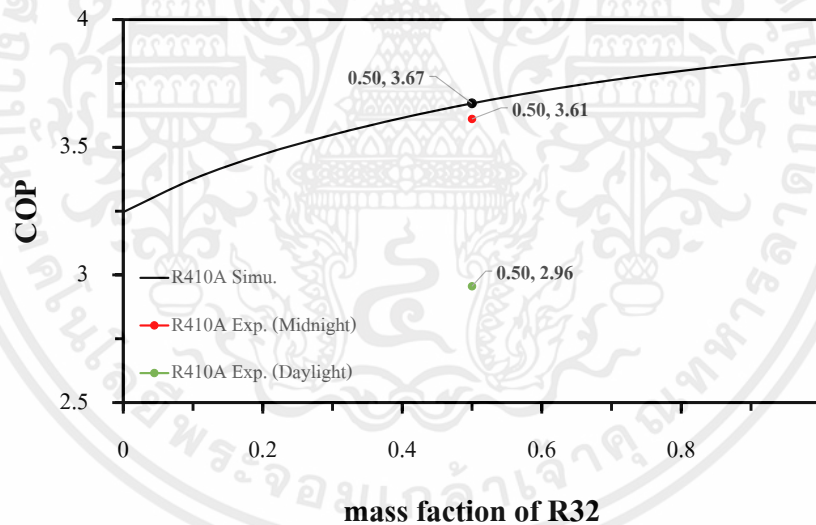
#### 4.7 การศึกษาและเปรียบเทียบระบบทำความเย็นแบบอัดไอจากแบบจำลองและการทดลองในระบบจริงของสารทำความเย็น R410A

จากการศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดไอจากการทดลองจริงของสารทำความเย็น R410A พบว่าช่วงเวลาในการทำความของระบบทำความเย็นส่งผลต่อค่า COP อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากรูปที่ 4.11 พบว่าในช่วงเวลา 12:00 AM ไปจนถึง 6:00 AM ค่า COP มีค่าคงที่ในช่วง 3.6 โดยช่วงที่ค่า COP มากกว่า 3.61 ขึ้นไป เนื่องจากระบบทำความเย็นเป็นแบบอินเวอร์เตอร์ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ตั้งไว้ มอเตอร์ที่คอมเพรสเซอร์มีการทำงานที่ช้าลง และในช่วงเวลา 7:00 AM ไปจนถึง 1:00 PM COP มีค่าลดลงโดยมีค่าต่ำสุด 2.96 และในช่วง 2:00 PM ไปจนถึง 12:00 AM ค่า COP ลู่เข้าหาค่า COP ที่ 3.61



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของ COP ในแต่ละช่วงเวลา

และจากการเปรียบเทียบระบบทำความเย็นของสารทำความเย็น R410A (R32/R125; 50/50) จากแบบจำลองและการทดลองจริงดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่า COP จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 3.67 และจากการทดลองพบว่าในช่วงกลางคืน COP มีค่าอยู่ที่ 3.61 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 0.11% ในช่วงกลางวัน COP มีค่าอยู่ที่ 2.96 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 18.24%



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่า COP ของระบบทำความเย็นของสารทำความเย็น R410A

จากแบบจำลองและการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นผสม ศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) และหาอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมที่มีค่า GWP ตามข้อกำหนด

โดยมีการศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมในวัฏภาคไอและของเหลวผ่าน Aspen Plus และทำการทดลองในแบบจำลองของระบบทำความเย็นแบบอัดไอผ่าน ProREFD และ Cycle\_D-HX 2.0 (NIST) เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมที่ส่งผลต่อค่า COP

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างวัฏภาคไอและของเหลว โดยสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R290, R32/R1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 มีจุดอะซีโอโทรปิกที่อัตราส่วนโดยมวลที่ 0.3, 0.35, 0.4 และ 0.6 ตามลำดับ และยังพบว่าความแตกต่างระหว่างวัฏภาคส่งผลต่อค่า COP อย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาค่า COP และอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมส่งผลต่อค่า COP อย่างมีนัยสำคัญ โดยสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R290 มีค่า COP ของระบบลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็น R290 เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วน 0.7-0.75 โดยมวล และเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน 0.8 โดยมวลของ R290 เป็นต้นไป สารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R1270 มีค่า COP ของระบบลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็น R1270 เพิ่มขึ้นจนถึง อัตราส่วน 0.7-0.75 โดยมวล และค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่ที่อัตราส่วน 0.8 โดยมวลของ R1270 เป็นต้นไปเช่นเดียวกันกับคู่ R32/R290 แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า COP เทียบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยมวลของ R1270 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคู่ R32/R290 สารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290 ในช่วงต้นค่า COP มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของ R290 เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของ R290 เพิ่มขึ้นมากกว่า 0.1 ค่า COP ของระบบทำความเย็นนี้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R1270 สังเกตได้ว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกับคู่ R134a/R290 โดยพบว่าในช่วงแรกตั้งแต่อัตราส่วนการผสมของ R1270 อยู่ที่ 0.1 เห็นได้ว่า ค่า COP อยู่ในจุดที่ต่ำที่สุดในกรณีของการศึกษาของสารทำความเย็นผสมสององค์ประกอบนี้ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ R1270 มากขึ้น ค่า COP มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบและพิจารณาในการเลือกใช้สารทำความเย็นแบบผสมเหล่านี้ แนวโน้มในการเลือกสารทำความเย็นจากทั้ง 4 ชนิดนี้ สารทำความเย็น R32/R290 ค่อนข้างมีแนวโน้มการลดลงของค่า COP ที่ชัดเจนกว่าสารทำความเย็นตัวอื่นๆ เนื่องจากสารทำความเย็น R32/R290 มีช่วงความแตกต่างระหว่างวัฏภาคที่กว้าง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่า COP ที่สูง ในขณะที่สารทำความเย็น R32/R1270 มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงค่า COP เพียงเล็กน้อยและในสารทำความเย็น R134a/R290 กับ R134a/R1270 มีพฤติกรรมของสารผสมที่ใกล้เคียงกัน โดยมีการเกิดช่วงความแตกต่างระหว่างสถานะที่แคบและเกิดจุดอะซีโอโทรปตลอดช่วงอัตราส่วนสารไฮโดรคาร์บอนที่สูง ซึ่งมีประโยชน์มากในการนำไปใช้ในระบบทำความเย็น

จากการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมกับค่า GWP พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ค่า GWP มีแนวโน้มที่ลดลง โดยอัตราส่วนโดยมวลของสารไฮโดรคาร์บอนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามข้อตกลงมอนทรีออล (Montreal Protocol) ที่ 150 ของคู่สาร R32/R290, R32/1270, R134a/R290 และ R134a/R1270 มีค่าอยู่ที่ 0.8, 0.8, 0.9 และ 0.9 ตามลำดับ

จากการศึกษาและเปรียบเทียบระบบทำความเย็นแบบอัดไอจากแบบจำลองและจากการทดลองของสารทำความเย็น R410A พบว่าช่วงเวลาในการทำงานของระบบทำความเย็นส่งผลต่อค่า COP อย่างมีนัยสำคัญ โดยในช่วงกลางคืนค่า COP มีค่าประมาณ 3.61 และในช่วงกลางวันค่า COP ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.96 และจากการเปรียบเทียบระบบทำความเย็นจริงกับแบบจำลอง พบว่าในช่วงกลางคืนค่า COP มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 0.11% และในช่วงกลางวันค่า COP มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 18.24%

โดยงานวิจัยนี้มีไว้เพื่อมุ่งเน้นการพัฒนาสารทำความเย็นผสมที่มีค่า GWP ต่ำและมีค่า COP สูงในการประยุกต์ใช้ในระบบทำความเย็น อีกทั้งยังศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นแบบอะซีโอโทรปิก และเพื่อให้เกิดความเข้าใจในผลกระทบของสารผสมต่อค่า COP และ GWP ในการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ความศึกษาการติดไฟของสารทำความเย็นผสม เนื่องจากอัตราส่วนของสารทำความเย็นผสมที่ศึกษามีอัตราส่วนของสารไฮโดรคาร์บอนสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยในการใช้งาน

2) ในอนาคต งานวิจัยอาจนำความรู้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการผสมในแบบจำลองระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่ส่งผลต่อค่า COP ในระบบทำความเย็นจริง

3) งานวิจัยนี้อาจศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์สำหรับสารทำความเย็นผสมที่นอกเหนือจากการใช้แบบจำลองอุณหพลศาสตร์ของ REFPROP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Z. Yang, B. Feng, H. Ma, L. Zhang, C. Duan, B. Liu, Y. Zhang, S. Chen, Z. Yang, Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants, *International Journal of Refrigeration*. 126 (2021) 12–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.022>.
- [2] J.M. Calm, The next generation of refrigerants - Historical review, considerations, and outlook, *International Journal of Refrigeration*. 31 (2008) 1123–1133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.013>.
- [3] S. Bobbo, G. di Nicola, C. Zilio, J.S. Brown, L. Fedele, Low GWP halocarbon refrigerants: A review of thermophysical properties, *International Journal of Refrigeration*. 90 (2018) 181–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.03.027>.
- [4] J.J. Garcia Pabón, Phase-out of high GWP refrigerants in refrigeration systems: Status of process in Colombia, *Respuestas*. 24 (2019) 65–74.  
<https://doi.org/10.22463/0122820x.1832>.
- [5] J.H. Koh, Z. Zakaria, A.D. Veerasamy, Hydrocarbons as Refrigerants-A Review, n.d.
- [6] B. Gil, A. Szczepanowska, S. Rosiek, New hfc/hfo blends as refrigerants for the vapor-compression refrigeration system (Vcrs), *Energies (Basel)*. 14 (2021).  
<https://doi.org/10.3390/en14040946>.
- [7] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants-A review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 3 (2009) 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.003>.
- [8] B.O. Bolaji, Z. Huan, Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 18 (2013) 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.008>.

- [9] United Nations Environment Programme (UNEP), OZONACTION FACT SHEET Refrigerant Blends: Calculating Global Warming Potentials, (n.d.), Available online : [www.unep.org/ozonaction](http://www.unep.org/ozonaction). (Accessed on 15 April 2020).
- [10] United Nations Environment Programme (UNEP), OzonAction Kigali Fact Sheet 16 GWPs of Refrigerant Mixtures: Kigali Context, (n.d.), Available online :[www.unep.org/ozonaction](http://www.unep.org/ozonaction). (Accessed on 15 April 2020).
- [11] United Nations Environment Programme (UNEP), OzonAction Kigali Fact Sheet 3 OzonAction GWP, CO<sub>2</sub>(e) and the Basket of HFCs, (n.d.), Available online [www.unep.org/ozonaction](http://www.unep.org/ozonaction). (Accessed on 15 April 2020).
- [12] 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>.
- [13] United Nations Environment Programme (UNEP), OZONACTION FACT SHEET Refrigerant Blends: Calculating Ozone Depleting Potentials (ODP), (n.d.), Available online [www.unep.org/ozonaction](http://www.unep.org/ozonaction). (Accessed on 15 April 2020).
- [14] D. Wu, B. Hu, R.Z. Wang, Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 138 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110571>.
- [15] Li, S., Zhang, Y. D., Li, Y., & Liao, R. Q. (2015). Equilibrium calculation and technological parameters optimization of natural gas liquefaction process with mixed refrigerant. *International Journal of Heat and Technology*, 33(2), 123–128. <https://doi.org/10.18280/ijht.330220>

- [16] Thongsukdee, M. T. (2000). *A REFORMULATED MIXING RULE APPLIED TO THE PENG-ROBINSON EQUATION OF STATE FOR TWO-COMPONENT OLEFINIC MIXTURES*.
- [17] Mohamed Mansour, E. (2020). Equation of State. In *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89919>
- [18] Smith, J. M. (Joseph M., van Ness, H. C. (Hendrick C.), Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (Mark T. (n.d.). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*.
- [19] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*: McGraw-Hill Education, 2019.
- [20] Kim, J. H., Kim, M. S., & Kim, Y. (2003). Vapor-liquid equilibria for pentafluoroethane + propane and difluoromethane + propane systems over a temperature range from 253.15 to 323.15 K. *Fluid Phase Equilibria*, 211(2), 273–287. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(03\)00237-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(03)00237-1)
- [21] Z. Lv, Z. Yang, H. Ma, Y. Chen, Y. Zhang, Flame retardant effect of the halohydrocarbons on the mildly flammable refrigerant difluoromethane, *Journal of Fluorine Chemistry*. 248 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2021.109832>.
- [22] Tian, Q., Cai, D., Ren, L., Tang, W., Xie, Y., He, G., & Liu, F. (2015). An experimental investigation of refrigerant mixture R32/R290 as drop-in replacement for HFC410A in household air conditioners. *International Journal of Refrigeration*, 57, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.05.005>
- [23] Publications of The National Institute of Standards and Technology (NIST). Available online <https://www.nist.gov/publications>. (Accessed on 20 September 2022).
- [24] Mashuga, C. v, & Crow1, D. A. (n.d.). Derivation of Le Chatelier’s Mixing Rde for Flammable Limits. *Process Safety Progress*. 19, 112-117

- [25] *ProREFD Manual PSE for SPEED Company Limited.* (n.d.). Available online <https://www.pseforspeed.com/> (Accessed on 29 August 2022).
- [26] Aktaş, M., Koşan, M., Erten, S., & Aktekeli, B. (n.d.). *Performance Analyses of the Industrial Cooling System with Microchannel Condenser An Experimental Study* Performance Analyses of the Industrial Cooling System with Microchannel Condenser: An Experimental Study. <http://dersipark.gov.tr/gujisa>
- [27] Utage, A. S., Mali, K. v., & Phadake, H. C. (2021). Performance simulation of HFC-161 as an alternative refrigerant to HCFC-22 for room air conditioner. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5594–5597. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.474>
- [28] Widodo., Fatkur Rachanu., & Ade Iran Tauvana. (2020) Analysis of Savings on Electricity Consumption in Room Air Conditioning. *Journal of Physics* <https://doi:10.1088/1742-6596/1477/5/052035>



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
วิธีการใช้งาน Aspen plus

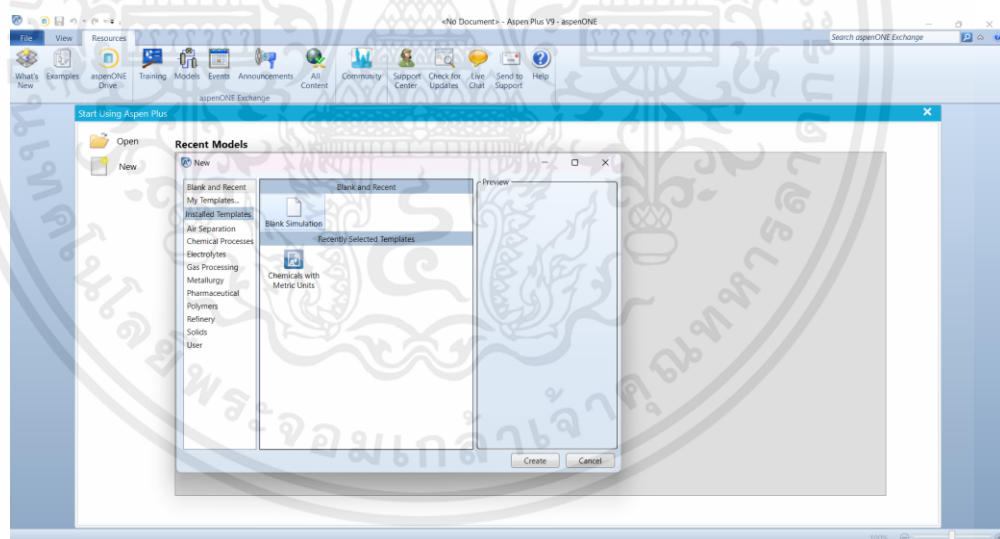
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. เปิดโปรแกรม Aspen Plus



รูปที่ ก.1 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเปิดโปรแกรม

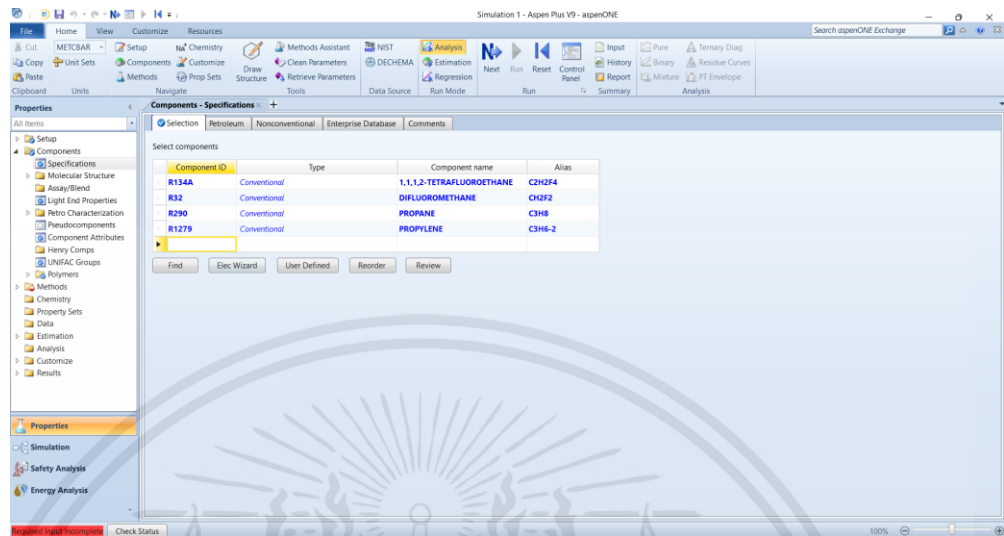
## 2. เลือก Blank Simulation แล้วคลิก Create



รูปที่ ก.2 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเลือก Template

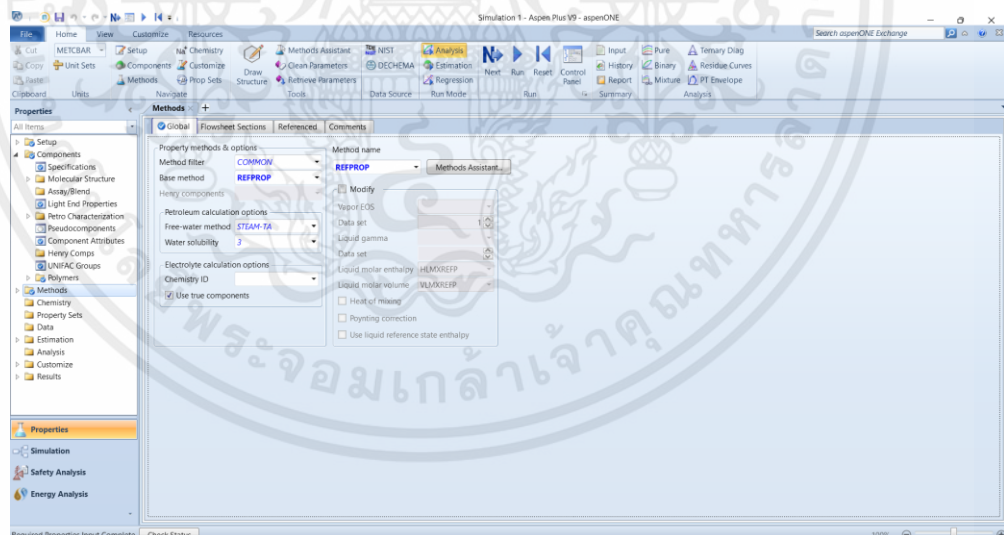
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค้นหาสารที่ใช้ในการทดสอบ (ในที่นี้แสดงเพียงการการศึกษาพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290 เท่านั้น)



รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Aspen Plus ในหน้า Properties & Methods

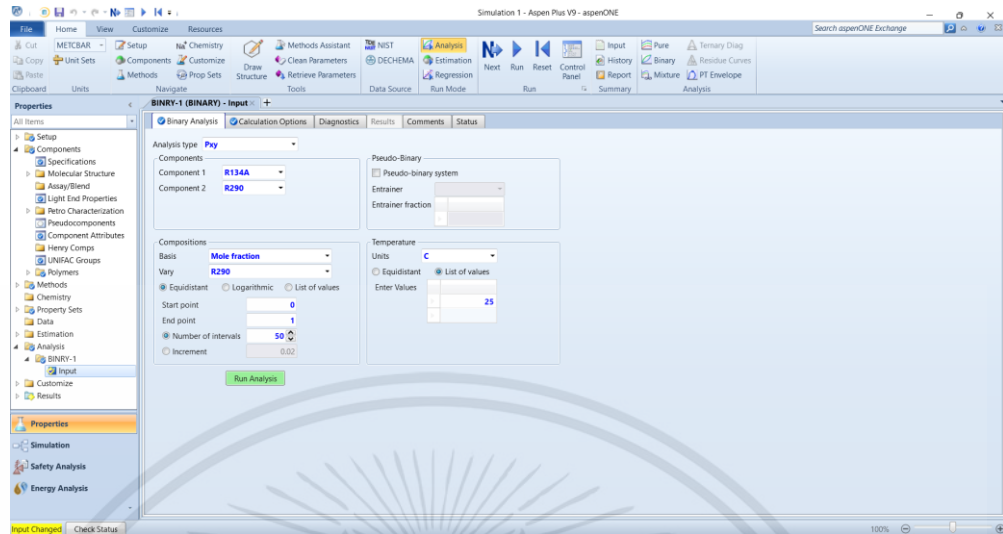
4. เลือก Thermodynamic Model เป็น REFPROP ซึ่งใช้สำหรับการศึกษาสารทำความเย็น



รูปที่ ก.4 หน้าต่าง Aspen Plus ขณะเลือก Methods

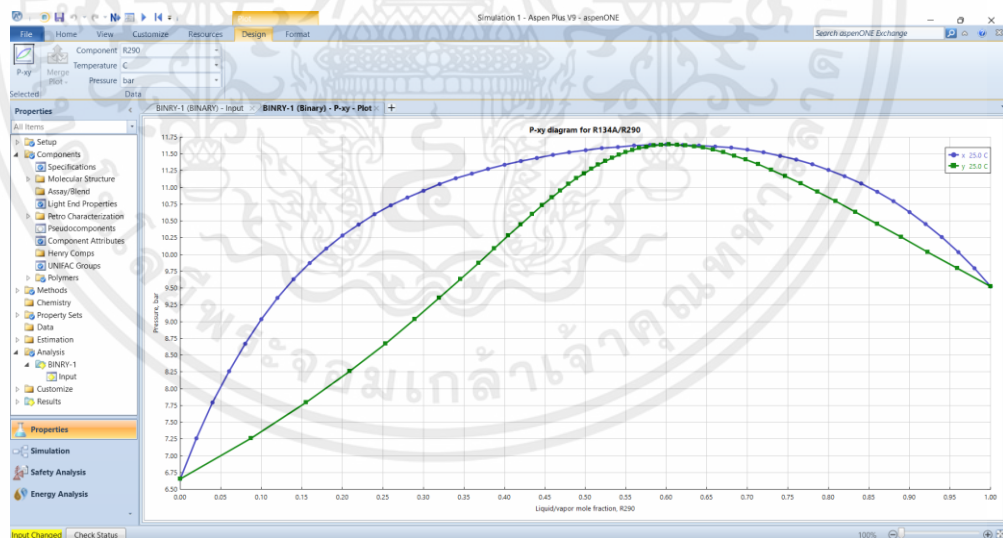
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. เลือกที่ Binary ในแถบของเมนู Home แล้วคลิกที่ P-xy diagram



รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Binary ของโปรแกรม Aspen Plus

## 6. เมื่อคลิกที่ Run Analysis แล้ว ได้กราฟแสดงพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290 ดังรูปต่อไปนี้



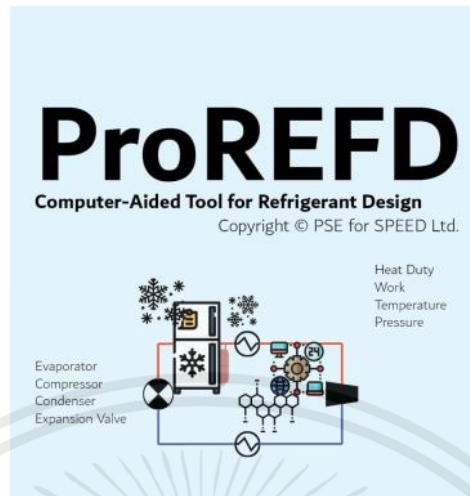
รูปที่ ก.6 กราฟแสดงพฤติกรรมของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



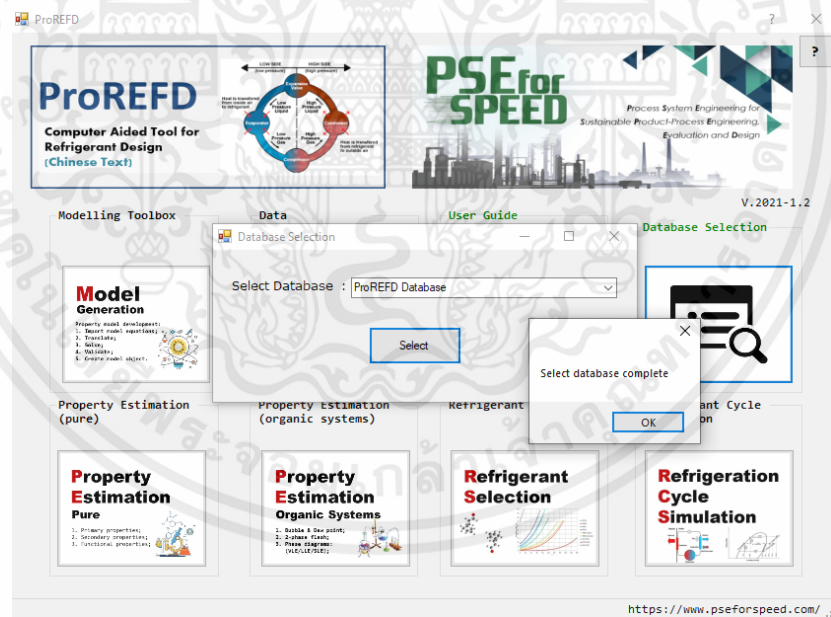
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. เปิดโปรแกรม ProREFD



รูปที่ ข.1 หน้าต่างขณะเปิดโปรแกรม ProREFD

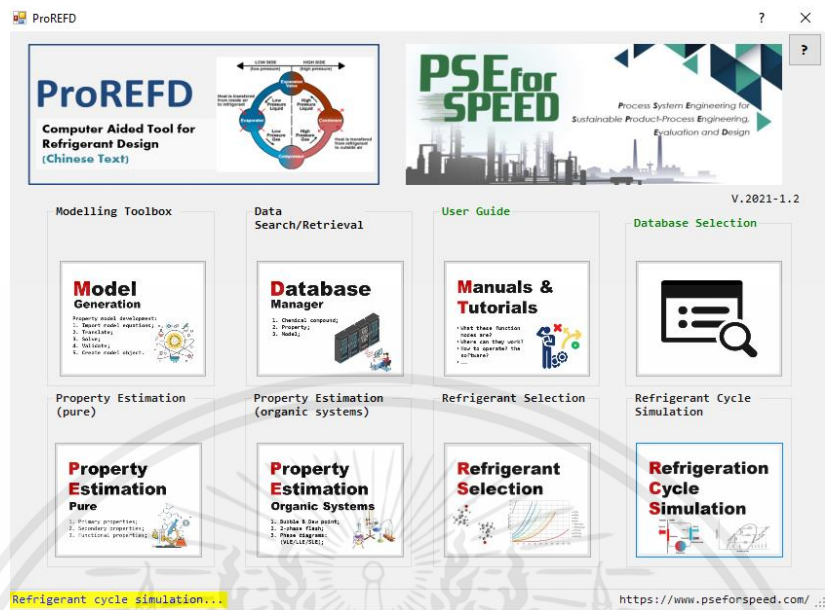
## 2. เลือก Database เป็น ProREFD



รูปที่ ข.2 หน้าแรกของโปรแกรม ProREFD

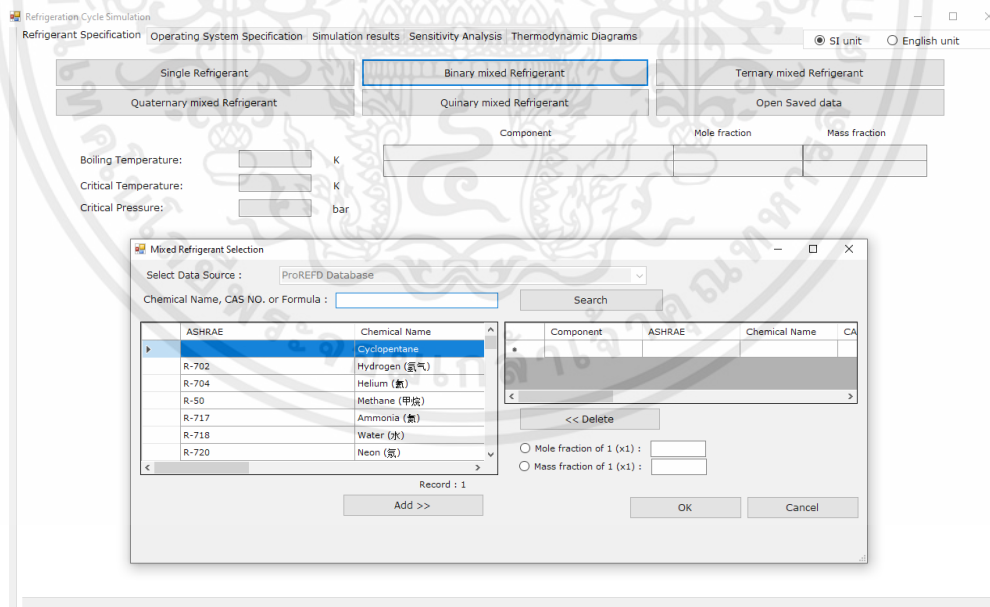
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. คลิกที่ Refrigeration cycle simulation



รูปที่ ข.3 หน้าต่างขณะรอเข้าสู่ Refrigeration cycle simulation

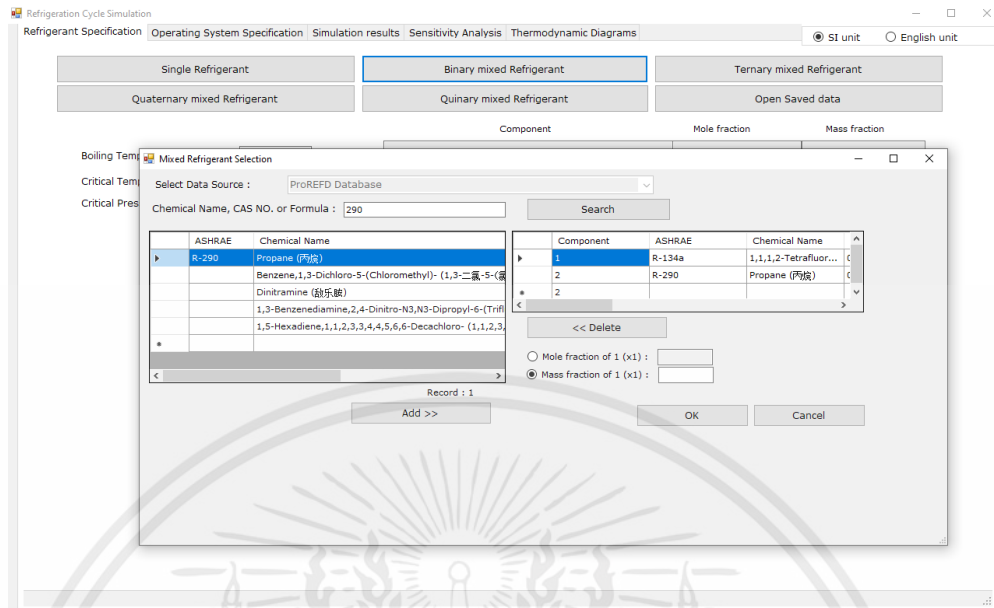
### 4. เลือกชนิดของสารทำความเย็นผสม 2 ชนิด โดยคลิกที่ Binary Mixed Refrigerant



รูปที่ ข.4 หน้าต่างในส่วนของ Refrigerant Specification

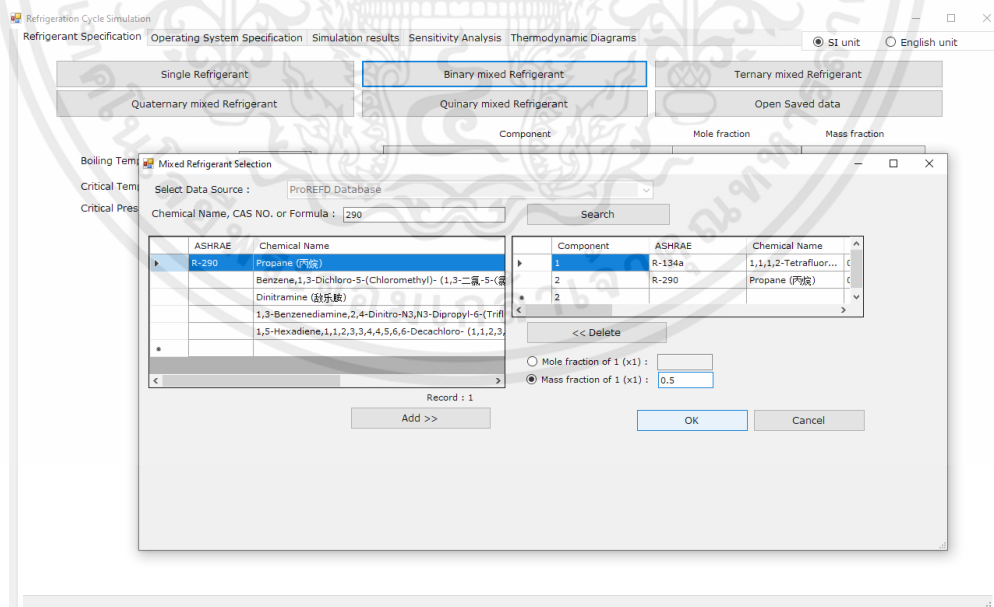
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. จากนั้นจึงค้นหาสารทำความเย็นที่ทำการศึกษา แล้วกด Search



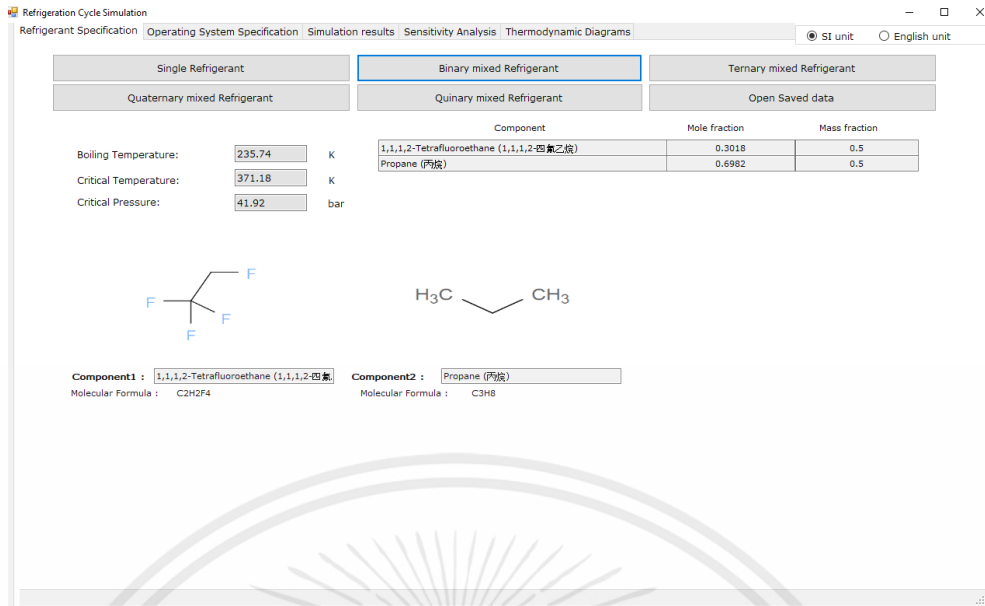
รูปที่ ข.5 หน้าต่างขณะค้นหาและเลือกสารทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD

## 6. เลือกที่เมนู Mass fraction แล้วกรอกค่าที่ต้องการศึกษา จากนั้นเลือกแท็บ Operating system specification เพื่อทำการกรอกค่าต่างๆที่ต้องการศึกษา



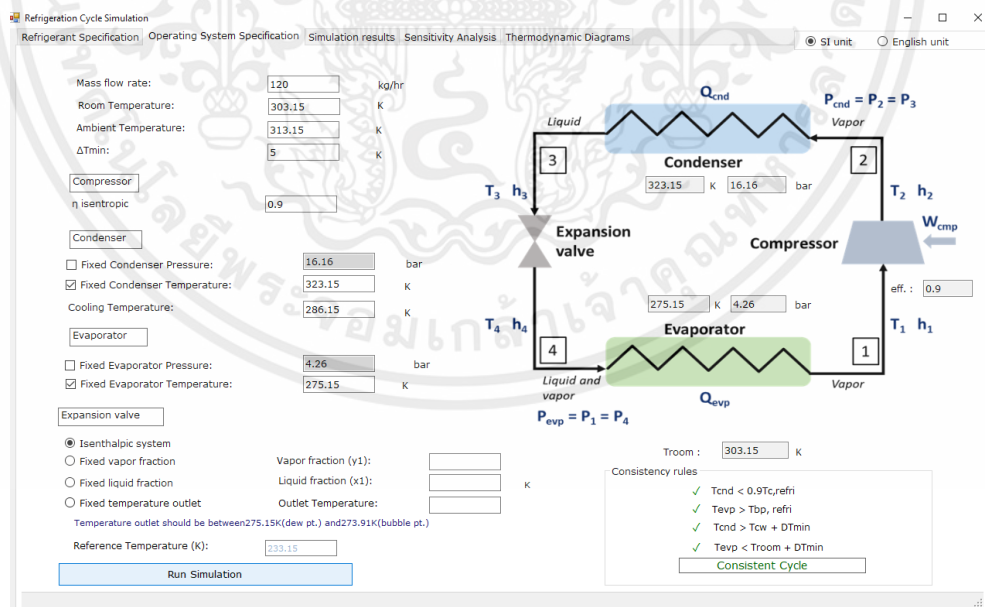
รูปที่ ข.6 หน้าต่างขณะกำลังกรอกอัตราส่วนของสารทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 หน้าต่างแสดงสารทำความเย็นที่เกี่ยวข้องก่อนเข้าสู่กระบวนการจำลอง  
 ในระบบทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD

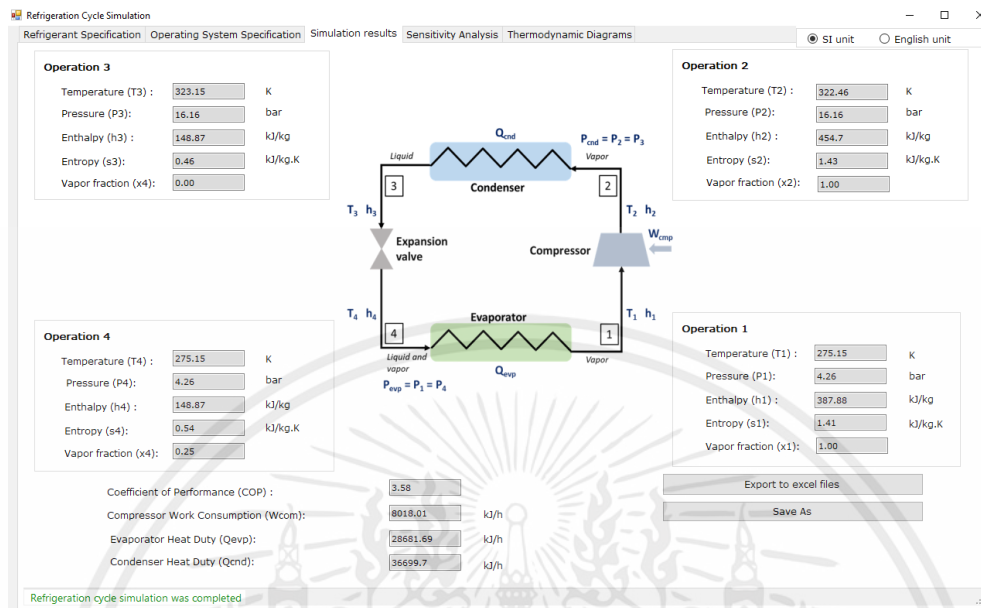
7. ทำการกรอกค่าที่จำเป็นต่อการศึกษาในระบบทำความเย็นแล้ว โดยที่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของ  
 the consistency rules แล้วจึงสามารถคลิก Run Simulation เพื่อดูผลลัพธ์ได้



รูปที่ ข.8 หน้าต่างในการกรอกค่าที่ศึกษาในระบบทำความเย็นในโปรแกรม ProREFD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หลังจากที่ใช้โปรแกรมทำการจำลองระบบทำความเย็นผสมที่สนใจแล้วจะแสดงหน้าต่างของ Simulation Results



รูปที่ ข.9 หน้าต่างผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรม ProREFD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

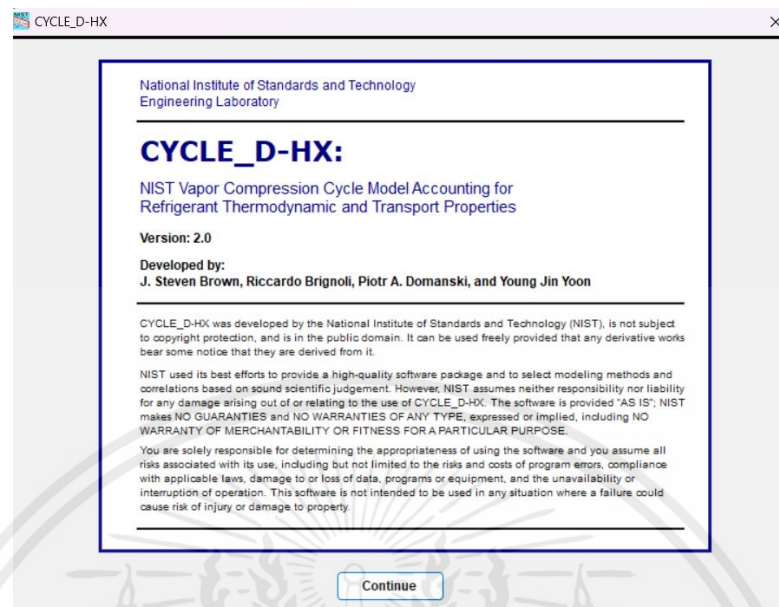


ภาคผนวก ค

วิธีการใช้งาน Cycle\_D-HX ของ NIST

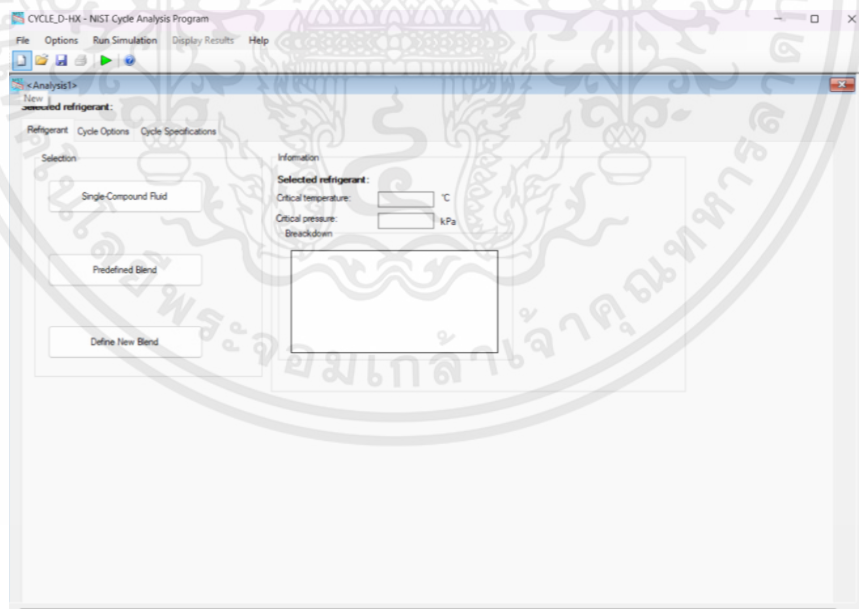
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. เปิดโปรแกรม CYCLE\_D-HX แล้วคลิก Continue



รูปที่ ค.1 หน้าต่างขณะเปิดโปรแกรม CYCLE\_D-HX

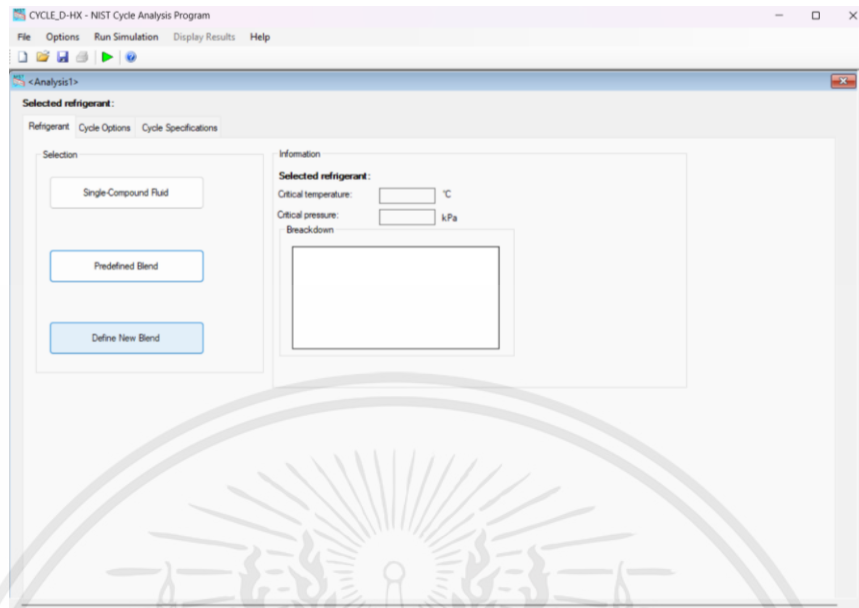
## 2. กดคลิกที่ New เพื่อสร้างไฟล์ใหม่สำหรับการจำลองระบบทำความเย็น



รูปที่ ค.2 หน้าต่างขณะที่สร้างไฟล์ใหม่สำหรับการจำลองระบบทำความเย็น

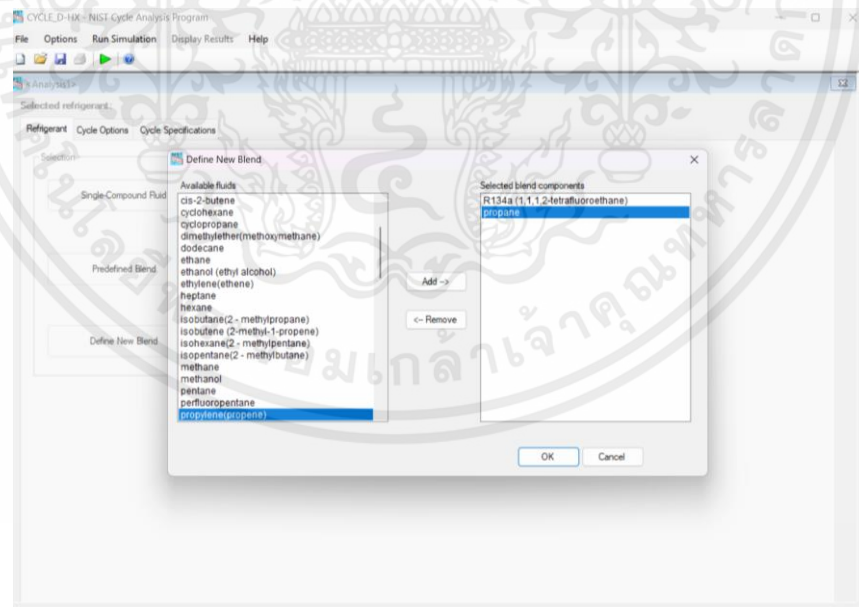
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกที่คำสั่ง Define New Blend เพื่อสร้างสารทำความเย็นผสมที่ต้องการศึกษา



รูปที่ ค.3 หน้าต่างขณะเลือกที่คำสั่ง Define New Blend เพื่อศึกษาสารทำความเย็น

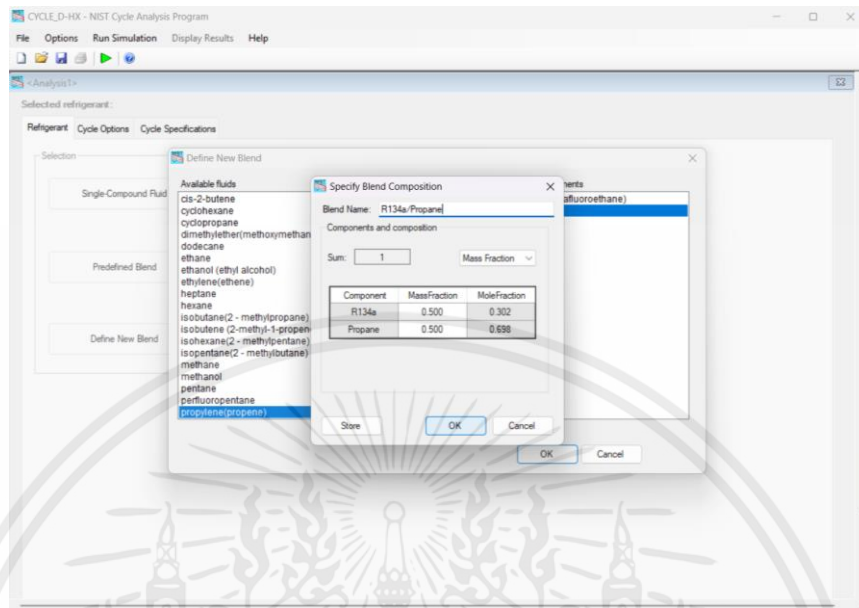
4. เลือกสารทำความเย็นที่ต้องการนำมาผสมเข้าด้วยกัน



รูปที่ ค.4 หน้าต่างขณะที่เลือกสารทำความเย็น

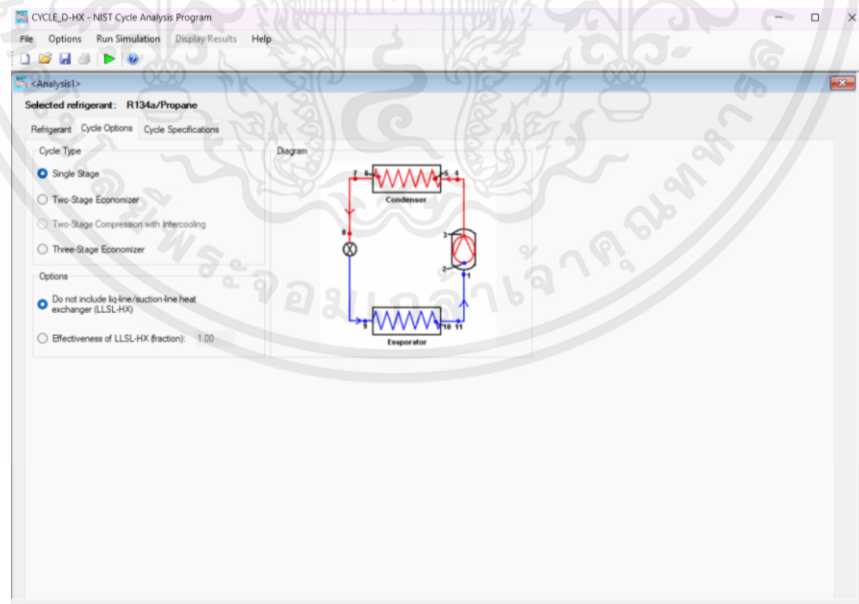
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรอกอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นที่ต้องการเพื่อนำไปจำลองในระบบทำความเย็น แล้วคลิก OK



รูปที่ ค.5 หน้าต่างขณะที่กรอกอัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นที่ต้องการ

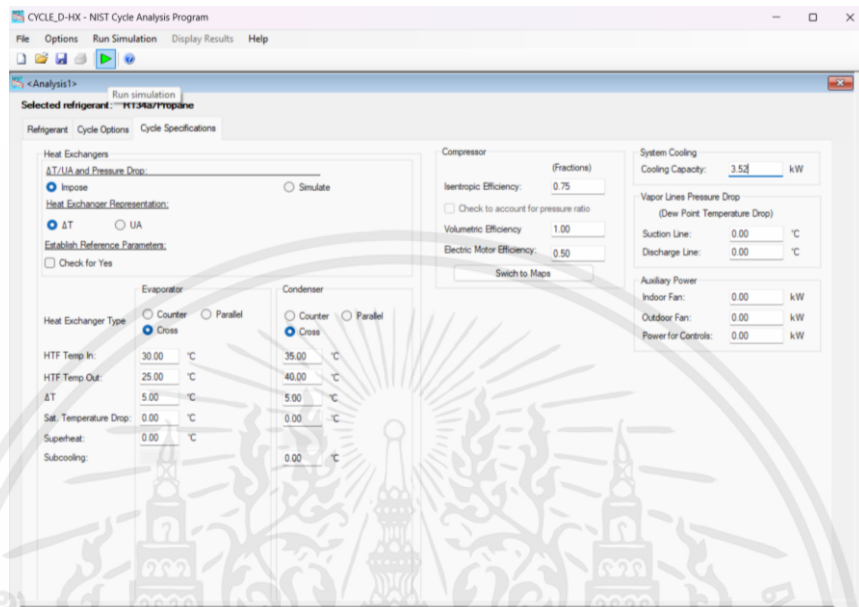
6. เลือก Cycle Type แบบ Single Stage ดังรูปที่แสดงต่อไปนี้



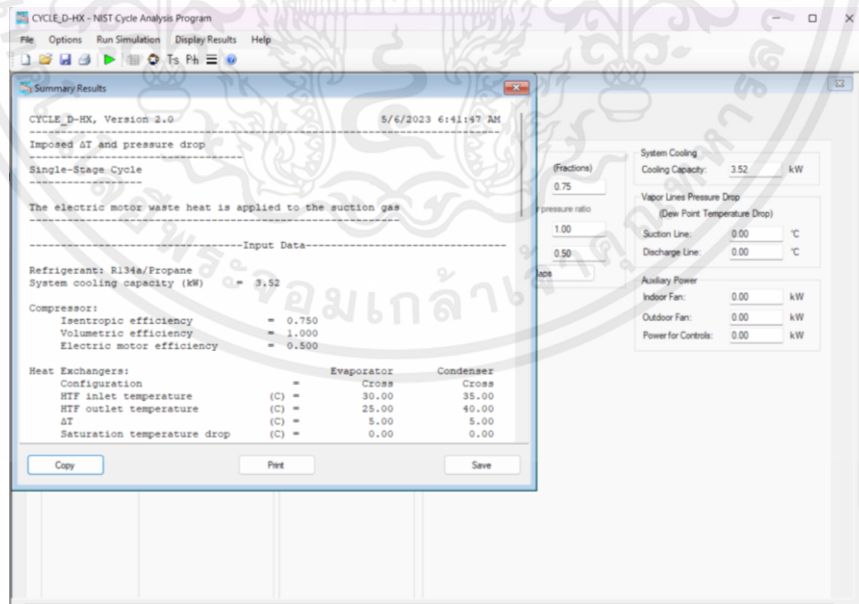
รูปที่ ค.6 หน้าต่างขณะที่เลือก Cycle Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตั้งค่าระบบทำความเย็นดังรูปที่แสดงต่อไปนี้แล้วกด Run simulation จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ออกมาดังรูป



รูปที่ ค.7 หน้าต่างในขณะที่ตั้งค่าระบบทำความเย็น



รูปที่ ค.8 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP)

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W_{\text{net, in}}} \quad (\text{จาก 2-26})$$

โดย	COP	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ
	$Q_L$	คือ ความสามารถในการรับความร้อนของสารทำความเย็น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	$W_{\text{net, in}}$	คือ พลังงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องบีบอัดไอในคอมเพรสเซอร์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

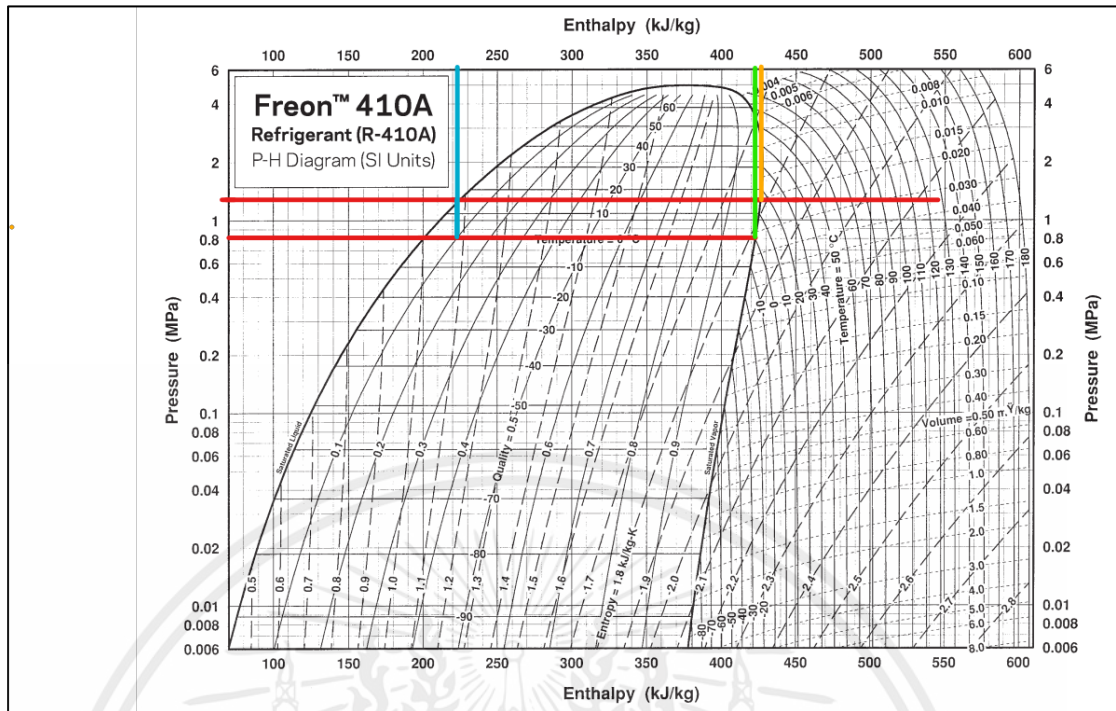
### โจทย์ตัวอย่างพื้นฐานการคำนวณ

ระบบปรับอากาศใช้สารทำความเย็น R410A ในระบบโดยมีคอมเพรสเซอร์ใช้พลังงาน  $x$  กิโลวัตต์ ในช่วงความดันต่ำและสูงที่ 8 กับ 13 บาร์ตามลำดับ จงหาค่า COP ของระบบทำความเย็น

### วิธีทำ

#### สมมติฐาน

1. ระบบทำความเย็นทำงานแบบสภาวะคงตัว
2. คอมเพรสเซอร์เป็นแบบไอเซนโทรปิก
3. ท่อลดแรงดันมีพฤติกรรมแบบไอเซนทาลปิก



รูปที่ ง.1 กราฟ P-h diagram ของสารทำความเย็น R410A

$$Q_L = 420 \text{ kJ/kg} - 220 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_L = 200 \text{ kJ/kg}$$

$$I = 7.47 \text{ A}; V = 220 \text{ V}; \dot{M} = 0.0297 \text{ kg/s}$$

$$P = IV = 1,643.40 \text{ J/s} = 1.6434 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{net, in}} = P/\dot{M} = 55.249 \text{ kJ/kg}$$

จากสมการ

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W_{\text{net, in}}}$$

จะได้ว่า

$$\text{COP} = \frac{200}{55.249}$$

ตอบ ค่า COP ของระบบทำความเย็นนี้มีค่าเท่ากับ 3.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการผสมสารทำความเย็นสองชนิดเข้าด้วยกันได้แก่ 1. สารทำความเย็น R134a กับ 2. สารทำความเย็น R290 โดยที่เมื่อผสมในอัตราส่วนร้อยละโดยมวลที่ 0.5 สามารถคำนวณค่า GWP ได้ดังนี้ โดยที่ค่า GWP ของสารทำความเย็น R134a กับ R290 คือ 1430 และ 3 ตามลำดับ

### วิธีทำ

$$\text{GWP Blended} = (\%wt1) (\text{GWP of Refrigerant1}) + (\%wt2) (\text{GWP of Refrigerant2})$$

$$\text{GWP Blended} = (0.5) (1,430) + (0.5) (3)$$

$$\text{GWP Blended} = 717$$

ตอบ ณ ที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยมวล สารทำความเย็นมีค่า GWP คือ 717

เมื่ออัตราส่วนของสารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไป ค่า GWP ของสารผสมมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ดังตารางที่แสดงด้านล่างนี้

**ตารางที่ จ.1** แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R290

Composition (mass fraction)		GWP
R290	R134A	
0	1	1430
0.1	0.9	1287.3
0.2	0.8	1144.6
0.3	0.7	1001.9
0.4	0.6	859.2
0.5	0.5	716.5
0.6	0.4	573.8
0.7	0.3	431.1
0.8	0.2	288.4
0.9	0.1	145.7
1	0	3

ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R134a/R1270 ต่างๆ

Composition (mass fraction)		GWP
R1270	R134A	
0	1	1430
0.1	0.9	1287.2
0.2	0.8	1144.4
0.3	0.7	1001.6
0.4	0.6	858.8
0.5	0.5	716
0.6	0.4	573.2
0.7	0.3	430.4
0.8	0.2	287.6
0.9	0.1	144.8
1	0	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R290 ต่างๆ

Composition (mass fraction)		GWP
R290	R32	
0	1	675
0.1	0.9	607.8
0.2	0.8	540.6
0.3	0.7	473.4
0.4	0.6	406.2
0.5	0.5	339
0.6	0.4	271.8
0.7	0.3	204.6
0.8	0.2	137.4
0.9	0.1	70.2
1	0	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4 แสดงค่า GWP ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารทำความเย็นผสมระหว่าง R32/R1270 ต่างๆ

Composition (mass fraction)		GWP
R1270	R32	
0	1	675
0.1	0.9	607.7
0.2	0.8	540.4
0.3	0.7	473.1
0.4	0.6	405.8
0.5	0.5	338.5
0.6	0.4	271.2
0.7	0.3	203.9
0.8	0.2	136.6
0.9	0.1	69.3
1	0	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ  
ข้อมูลที่ได้จากการจำลองใน Cycle\_D-HX ของ NIST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R134a/R290

Composition (Mass fraction)		COP	Latent Heat (kJ/kg)	Compressor Work (kJ/kg)	Refrigerant mass flow rate (kg/s)
R290	R134A				
0	1	4.336	150.97952	34.82	0.023319
0.1	0.9	3.935	155.94405	39.63	0.022568
0.2	0.8	4.019	156.3391	38.9	0.022517
0.3	0.7	4.065	160.161	39.4	0.021949
0.4	0.6	4.063	171.17419	42.13	0.020561
0.5	0.5	4.089	187.60332	45.88	0.018762
0.6	0.4	4.118	206.47652	50.14	0.017046
0.7	0.3	4.148	226.23192	54.54	0.015557
0.8	0.2	4.182	246.1107	58.85	0.014303
0.9	0.1	4.218	265.5231	62.95	0.013256
1	0	4.246	284.14232	66.92	0.012389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R134a/R1270

Composition (Mass fraction)		COP	Latent Heat (kJ/kg)	Compressor Work (kJ/kg)	Refrigerant mass flow rate (kg/s)
R1270	R134A				
0	1	4.336	150.97952	34.82	0.023319
0.1	0.9	4.076	159.81996	39.21	0.022022
0.2	0.8	4.081	165.40293	40.53	0.021282
0.3	0.7	4.116	173.0778	42.05	0.02034
0.4	0.6	4.117	183.82405	44.65	0.019146
0.5	0.5	4.12	197.5952	47.96	0.017813
0.6	0.4	4.131	213.44877	51.67	0.016491
0.7	0.3	4.146	230.55906	55.61	0.015268
0.8	0.2	4.162	248.38816	59.68	0.014172
0.9	0.1	4.177	266.61791	63.83	0.013201
1	0	4.246	284.14232	66.92	0.012389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R32/R290

Composition (Mass fraction)		COP	Latent Heat (kJ/kg)	Compressor Work (kJ/kg)	Refrigerant mass flow rate (kg/s)
R290	R32				
0	1	4.045	237.48195	58.71	0.014823
0.1	0.9	3.913	218.03236	55.72	0.016145
0.2	0.8	3.827	199.96075	52.25	0.017603
0.3	0.7	3.759	189.26565	50.35	0.018599
0.4	0.6	3.736	192.55344	51.54	0.01828
0.5	0.5	3.633	207.15366	57.02	0.016992
0.6	0.4	-	-	-	-
0.7	0.3	3.311	244.74912	73.92	0.014382
0.8	0.2	3.39	263.7081	77.79	0.013347
0.9	0.1	3.794	280.83188	74.02	0.012534
1	0	4.246	284.14232	66.92	0.012389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองระบบทำความเย็นของ R32/R1270

Composition (Mass fraction)		COP	Latent Heat (kJ/kg)	Compressor Work (kJ/kg)	Refrigerant mass flow rate (kg/s)
R1270	R32				
0	1	4.045	237.48195	58.71	0.014823
0.1	0.9	3.962	224.0511	56.55	0.015712
0.2	0.8	3.908	213.33772	54.59	0.016499
0.3	0.7	3.875	208.74625	53.87	0.016863
0.4	0.6	3.869	211.94382	54.78	0.016607
0.5	0.5	3.868	221.52036	57.27	0.01589
0.6	0.4	3.851	234.60292	60.92	0.015006
0.7	0.3	3.857	249.00792	64.56	1.4135
0.8	0.2	3.929	263.55732	67.08	0.013357
0.9	0.1	4.072	276.52952	67.91	0.012728
1	0	4.246	284.14232	66.92	0.012389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้