

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระเหยความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงานคือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์

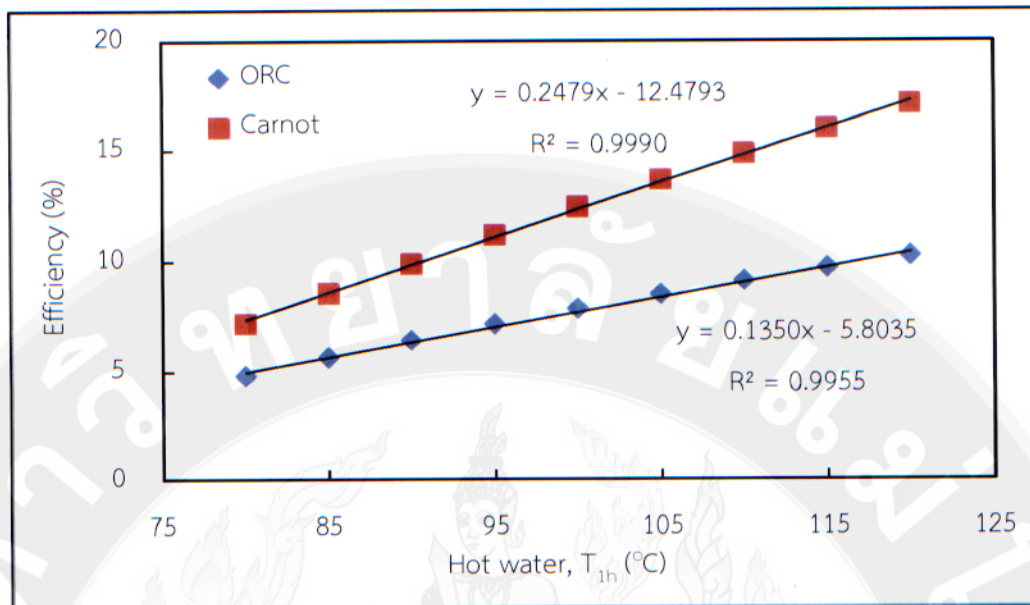
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการทำงานของระบบ โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ กับอุณหภูมิความร้อนที่เข้าหม้อต้ม (T_{1h}) ในช่วง $80-120^{\circ}\text{C}$ โดยอุณหภูมิระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32°C ผลที่ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิความร้อนเข้าที่หม้อต้มเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า ประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้น และเมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์มีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ 35%

ซึ่งจากภาพที่ 26 ยังพบอีกว่า อุณหภูมิความร้อนที่เข้าหม้อต้ม (T_{1h}) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ในรูปแบบสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

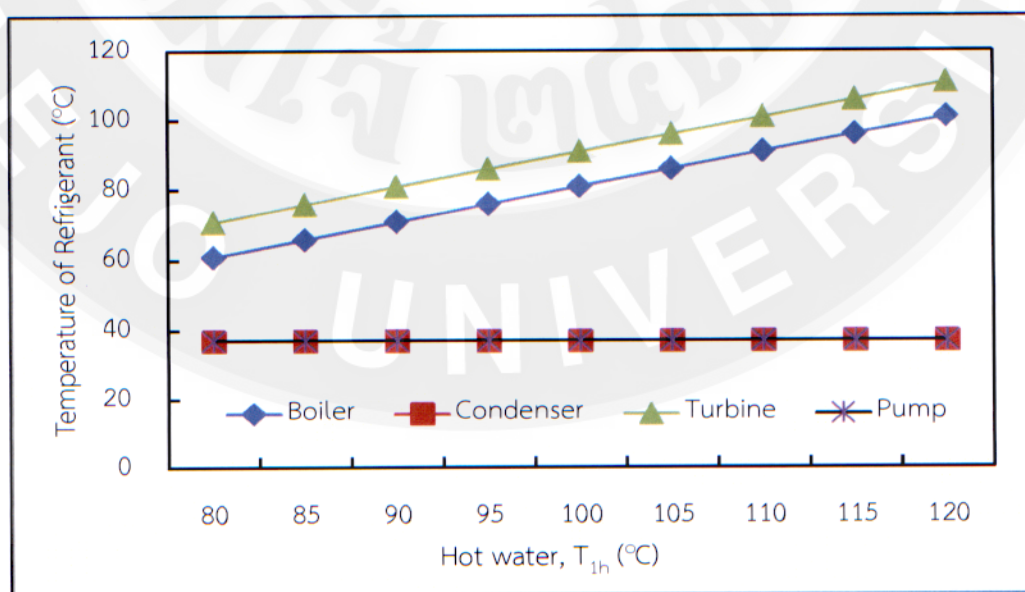
$$\eta_{\text{ORC}} = 0.1350(T_{1h}) - 5.8035$$

สมการที่ 4.1



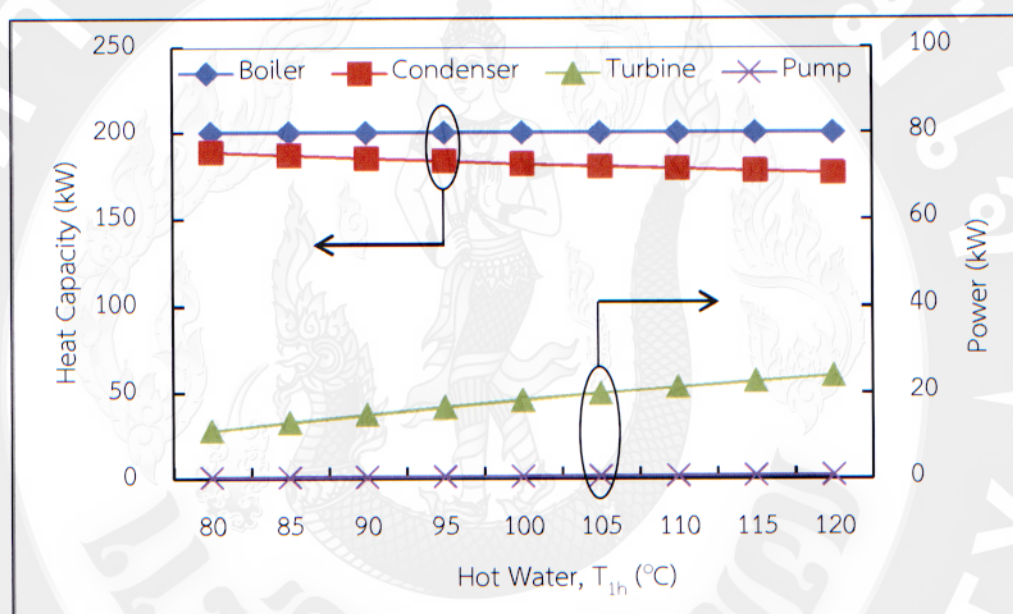
ภาพที่ 26 แบบจำลองอย่างง่ายของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ภาพที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม (T_{1h}) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม (T_B) และอุณหภูมิสารทำงานที่กังหัน (T_{Tur}) เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม (T_B) และอุณหภูมิสารทำงานที่กังหัน (T_{Tur}) ก่อเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสารทำงานที่ปั๊มสารทำงาน (T_P) และเครื่องควบแน่น (T_C) มีค่าคงที่



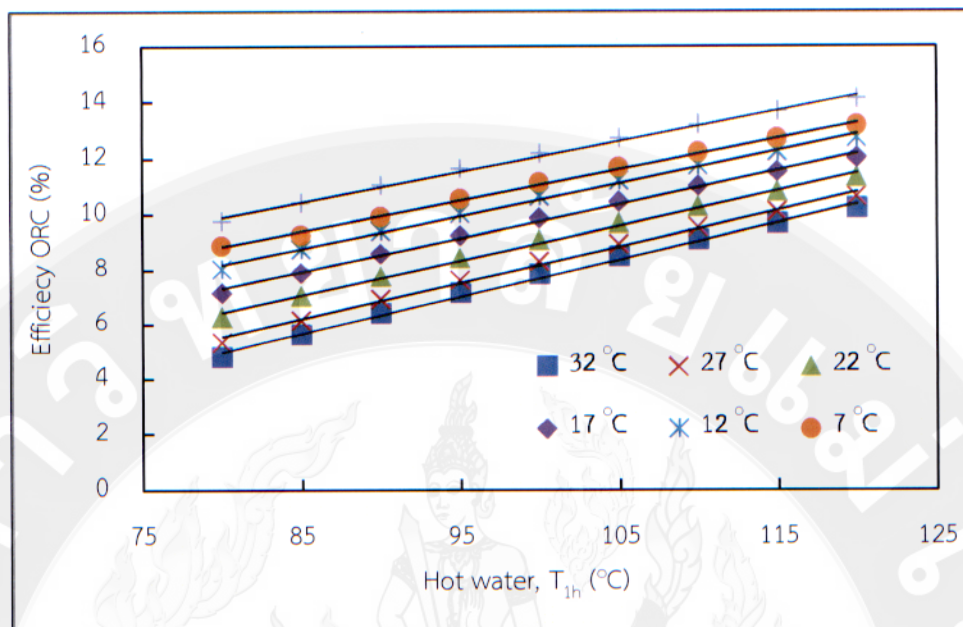
ภาพที่ 27 อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม และกำลังงานที่ปั๊มสารอินทรีย์ในระบบค่อนข้างน้อยโดยมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) มีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานที่กังหัน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นมีค่าลดลง ในขณะที่กำลังงานที่ผลิตจากกังหันเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 28 อัตราความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ภาพที่ 29 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นในช่วง 2-32 °C ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มอยู่ในช่วง 80-120 °C ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่น เมื่ออุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า ประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น และยังสอดคล้องกับหลักความคิดของงานวิจัยนี้ ที่มีวัตถุประสงค์ต้องการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อผลิตน้ำเย็นช่วยหอระบายความร้อน โดยลดอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์



ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
น้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก และรายละเอียดการคำนวณในภาพที่ 16 ถือว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ตามทฤษฎี แต่ในการสร้างแบบจำลองนี้ถือว่า ยังมีความยุ่งยาก ซับซ้อน ซึ่งต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเอาผลดังกล่าวนี้ไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป เพื่อทำการศึกษาศักยภาพสมรรถนะหาความสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่ (สะดวก ใช้งานง่าย) ที่ยังคงความสามารถของการอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ตามทฤษฎี

สมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ข้างต้นพบว่า สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ แต่การสร้างแบบจำลองข้างต้นยังพบว่า มีขั้นตอนที่มีความยุ่งยาก ซึ่งต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงทำการศึกษาศักยภาพสมรรถนะหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบรูปแบบต่าง ๆ โดยทำการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น คือ การหาความสัมพันธ์อุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบซึ่งเป็นตัว

แปรอิสระในแกน x ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยเป็นตัวแปรตามในแกน y เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งอิงตามหลักทฤษฎีของคาร์โนต์ โดยนำผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขั้นตอนที่ผ่านมา เพื่อทำการวิเคราะห์สมการสมรรถนะ อันประกอบไปด้วย 6 รูปแบบ ดังตารางที่ 7 โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 7 รูปแบบการวิเคราะห์สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

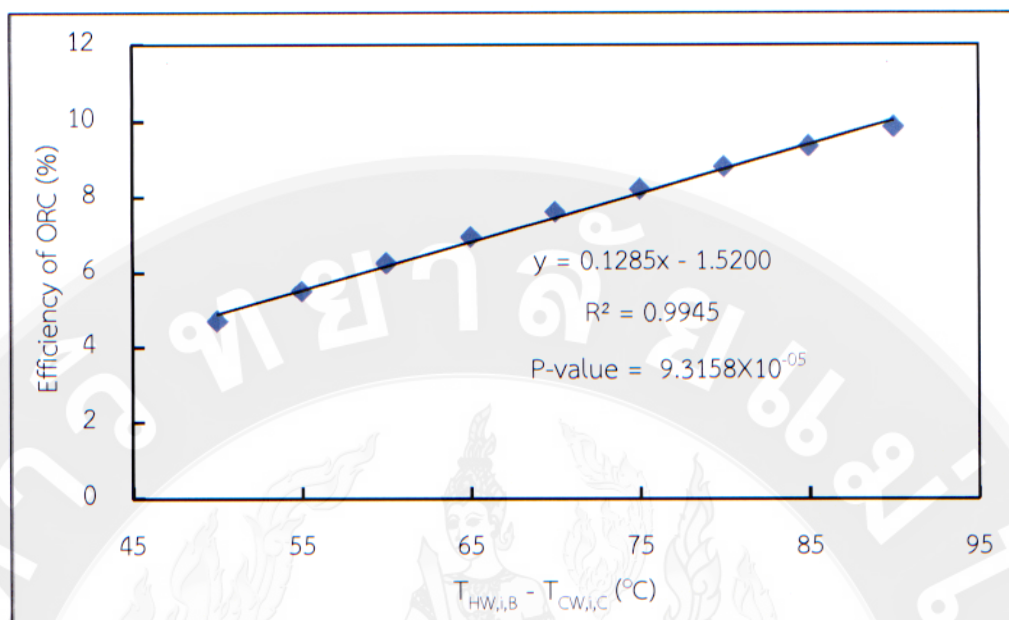
รูปแบบ	แกน y	แกน x
1	η_{ORC}	$(T_{\text{HW},i,B} - T_{\text{CW},i,C})$
2	η_{ORC}	$(T_{\text{HW},i,B} / T_{\text{CW},i,C})$
3	η_{ORC}	$(T_{\text{Ref},B} - T_{\text{Ref},C})$
4	η_{ORC}	$(T_{\text{Ref},B} / T_{\text{Ref},C})$
5	η_{ORC}	$[(T_{\text{Ref},\text{Tur}} - T_{\text{Ref},B}) - (T_{\text{Ref},C} - T_{\text{Ref},\text{Pump}})]$
6	η_{ORC}	$[(T_{\text{Ref},\text{Tur}} - T_{\text{Ref},B}) / (T_{\text{Ref},C} - T_{\text{Ref},\text{Pump}})]$

ภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{\text{HW},i,B} - T_{\text{CW},i,C}$) โดยน้ำร้อนอยู่ในช่วง 90-120 °C และน้ำระบายความร้อนเท่ากับ 32 °C ผลที่ได้พบว่า เมื่อผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มและอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 30 ยังพบอีกว่า ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9945 และ มีค่าความน่าจะเป็น (Probability value, P-value) ที่ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรแกน x มีผลต่อค่าในแนวแกน y เท่ากับ 9.3158×10^{-05} ซึ่งแสดงว่าผลที่ได้มีแนวโน้มที่ข้อมูลในแนวแกน y ผันแปรตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในแกน x โดยตัวแปรในแกน x สามารถอธิบายได้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น และมีความน่าเชื่อถือ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 ต่อไปนี้

$$\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{HW},i,B} - T_{\text{CW},i,C}) - 1.5200$$

สมการที่ 4.2

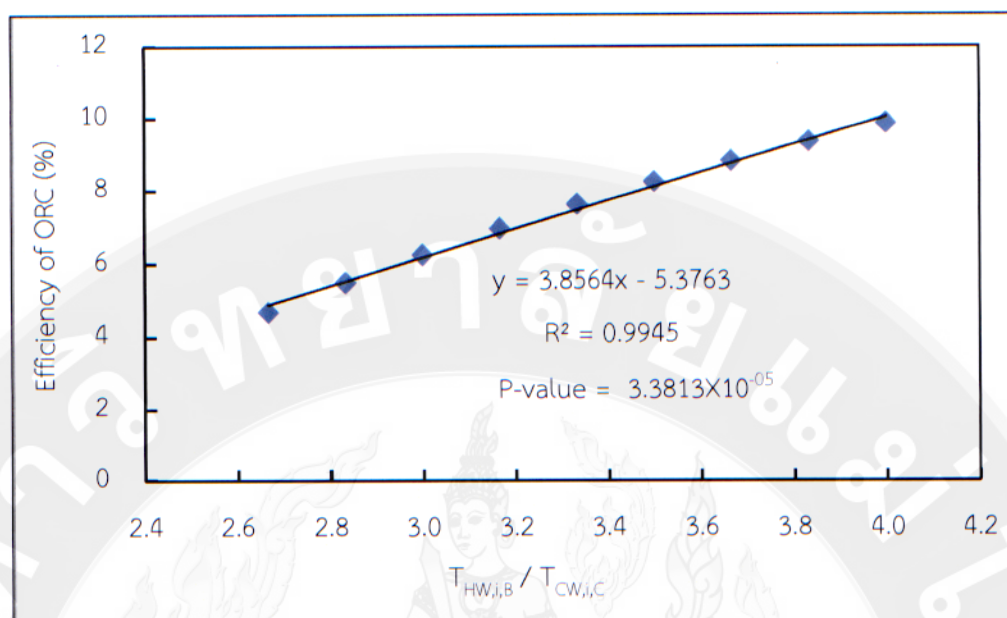


ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,B} / T_{CW,i,C}$) เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์คล้ายกับภาพที่ 30 แต่อยู่ในรูปแบบสัดส่วนของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ผลที่ได้พบว่า เมื่อสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องตามหลักการโน้ตที่กล่าวไว้ในทฤษฎี และยังพบว่า มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ 4.3 โดยค่า $R^2 = 0.9945$ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลที่ได้จากภาพที่ 30 แต่ค่า $P\text{-value} = 3.3813 \times 10^{-05}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า แสดงว่า รูปแบบที่เป็นสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น สามารถอธิบายประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้มากกว่าผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ที่ได้จากภาพที่ 30

$$\eta_{ORC} = 3.8564(T_{HW,i,B} / T_{CW,i,C}) - 5.3763$$

สมการที่ 4.3



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิความร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

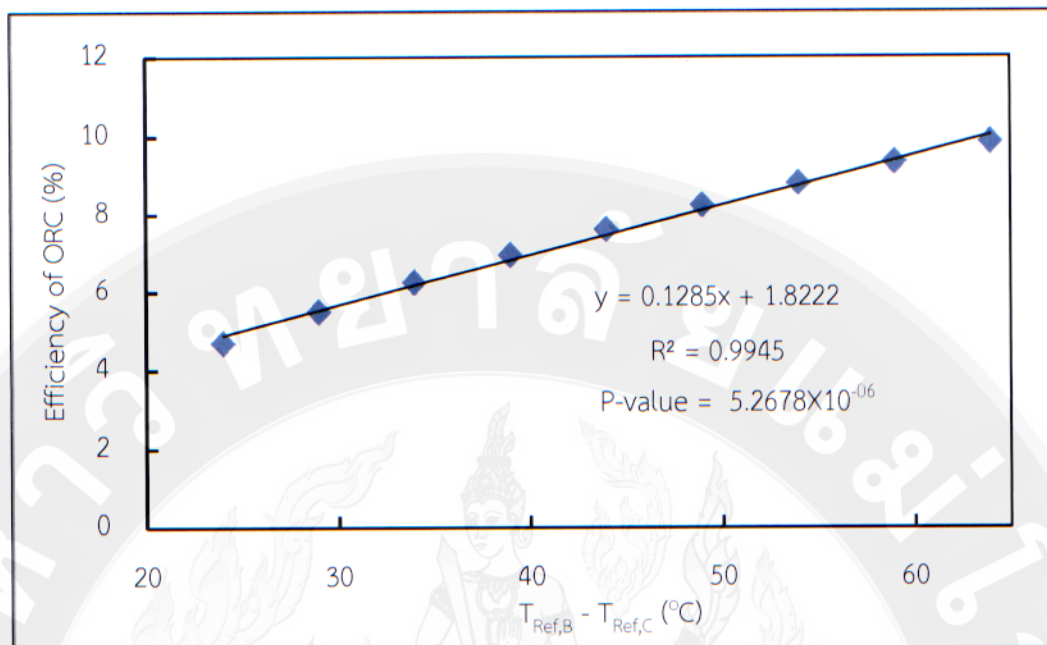
ภาพที่ 32 และ 33 เป็นการวิเคราะห์คล้ายกับภาพที่ 30 และ 31 แต่เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่าง ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$) และ สัดส่วน ($T_{Ref,B} / T_{Ref,C}$) อุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ และยังพบว่า มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ มีค่า $R^2 = 0.9945$ และ $P\text{-value} = 5.2678 \times 10^{-06}$ และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ มีค่า $R^2 = 0.9945$ และ $P\text{-value} = 5.3418 \times 10^{-06}$ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) + 1.8222$$

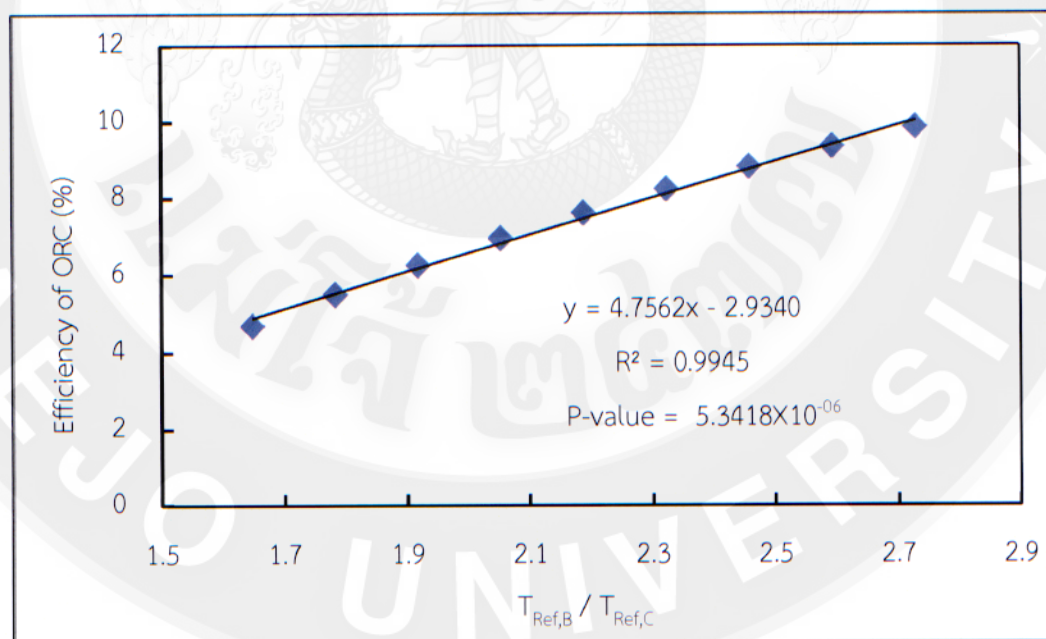
สมการที่ 4.4

$$\eta_{ORC} = 4.7562(T_{Ref,B} / T_{Ref,C}) - 2.9340$$

สมการที่ 4.5



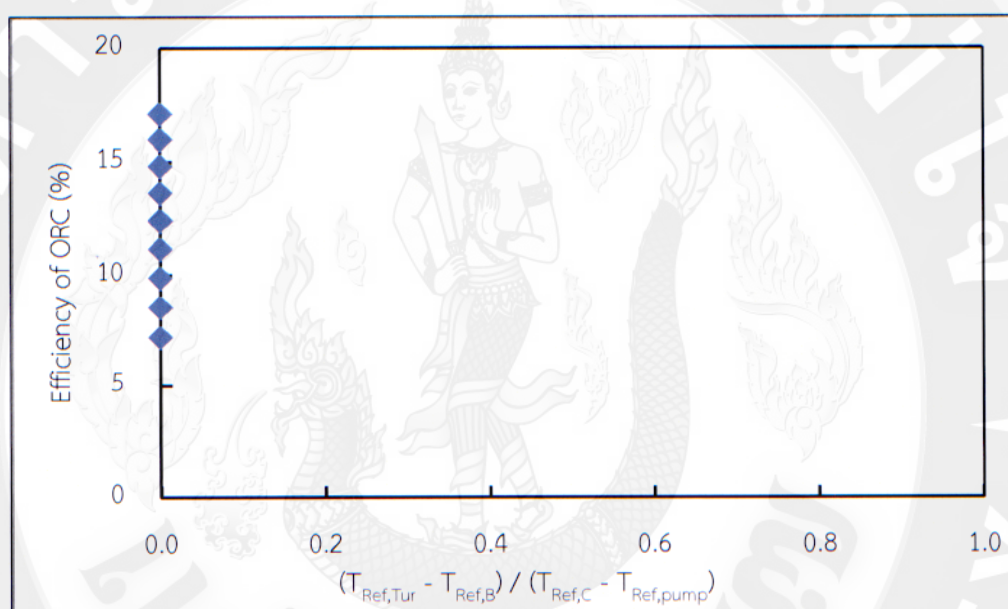
ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงาน
ด้านความดันสูงและต่ำ



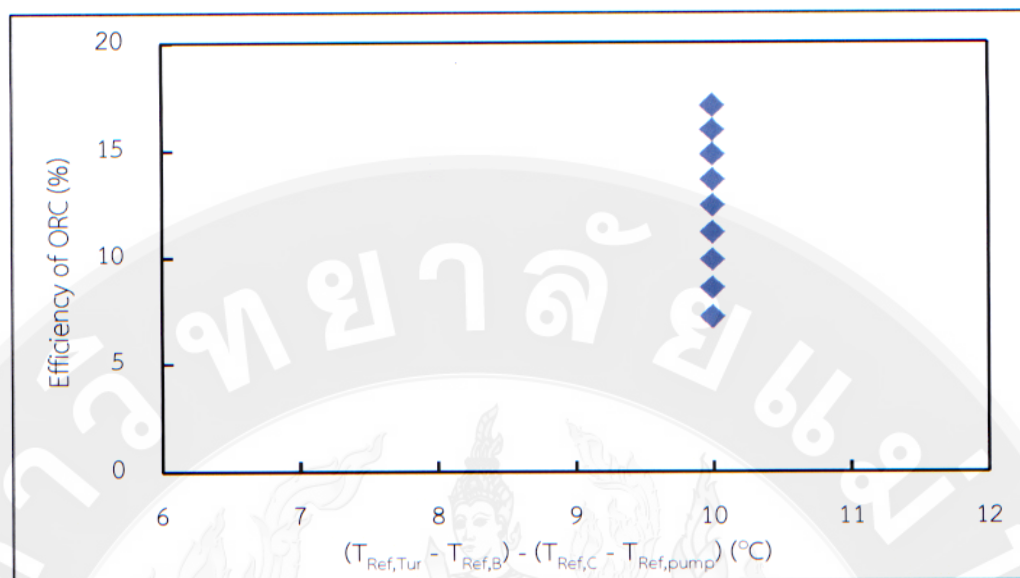
ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงาน
ด้านความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 34 เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ $[(T_{Ref,Tur} -$

$T_{Ref,B} / (T_{Ref,C} - T_{Ref,Pump})$] และภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่างของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ $[(T_{Ref,Tur} - T_{Ref,B}) - (T_{Ref,C} - T_{Ref,Pump})]$ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบดังกล่าว โดยมีค่า $R^2 = 0$ และ $P\text{-value} = 0$ เพราะว่าอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันต่ำมีค่าเท่ากัน ซึ่งเมื่อนำมาหาผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานแล้วมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ดังนั้นรูปแบบดังกล่าวไม่สามารถนำมาอธิบายประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้

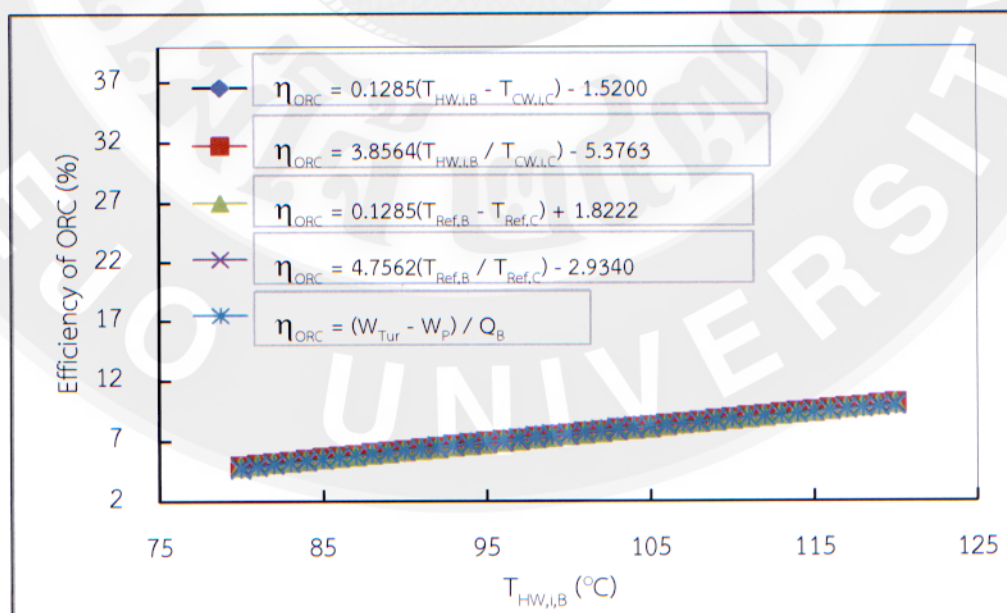


ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ



ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงาน
ที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ได้จากสมการ
พื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากความสัมพันธ์สมรรถนะของผลที่ได้ข้างต้น ผลการ
เปรียบเทียบพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและสามารถทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของวัฏ
จักรแรงดันอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

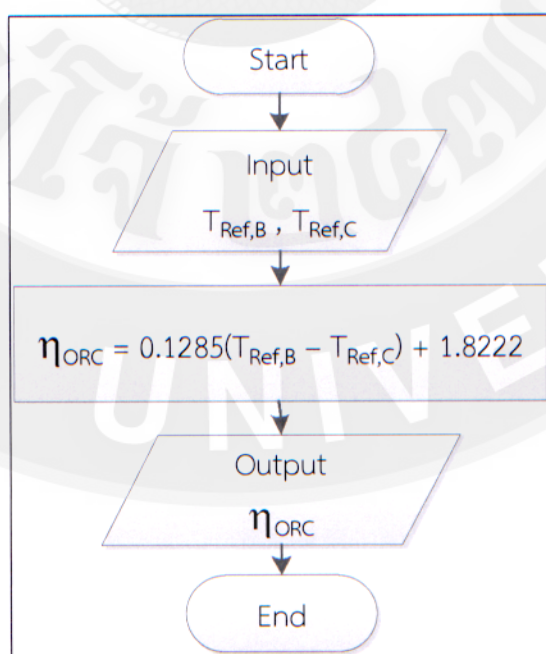


ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ได้จากสมการ
พื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ

ตารางที่ 8 สรุปสมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์

รูปแบบ	สมการสมรรถนะ	R^2	P-value
1	$\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{HW},i,B} - T_{\text{CW},i,C}) - 1.5200$	0.9945	9.3158×10^{-05}
2	$\eta_{\text{ORC}} = 3.8564(T_{\text{HW},i,B} / T_{\text{CW},i,C}) - 5.3763$	0.9945	3.3813×10^{-05}
3	$\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{Ref},B} - T_{\text{Ref},C}) + 1.8222$	0.9945	5.2678×10^{-06}
4	$\eta_{\text{ORC}} = 4.7562(T_{\text{Ref},B} / T_{\text{Ref},C}) - 2.9340$	0.9945	5.3418×10^{-06}
5	-	-	-
6	-	-	-

จากตารางที่ 8 สรุปสมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ข้างต้นในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ ($\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{Ref},B} - T_{\text{Ref},C}) + 1.8222$) โดยค่า $R^2 = 0.9945$ เมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ในรูปแบบอื่น ๆ ถือว่ามีค่าเท่ากัน แต่มีค่า P-value $= 5.2678 \times 10^{-06}$ ต่ำสุด ถือว่าเหมาะสม เพราะทำให้การทำนายประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ดังแสดงแผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์แบบใหม่ในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์แบบใหม่

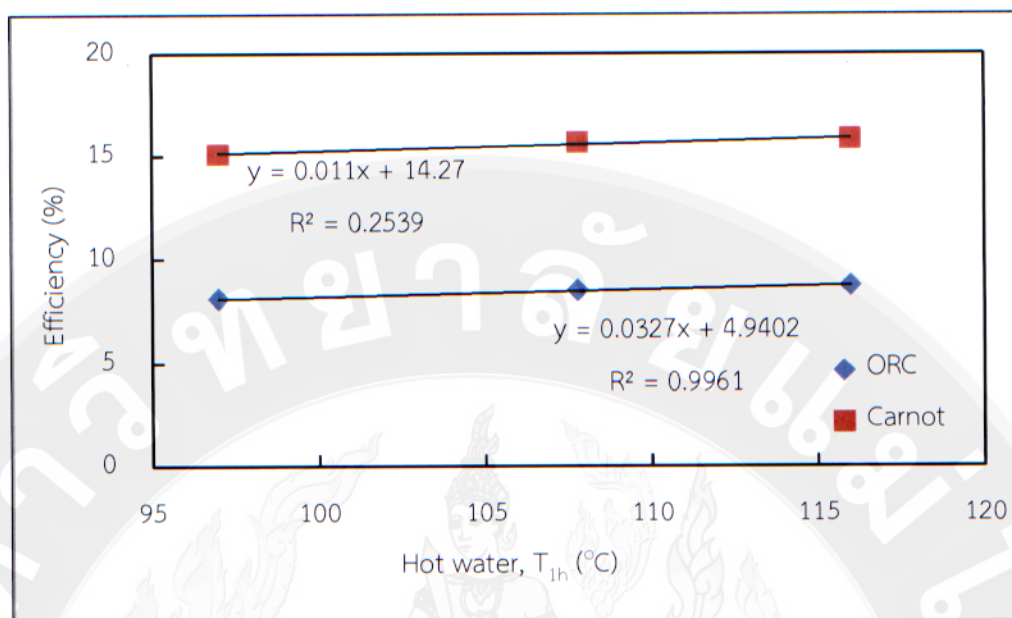
สมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบรูปแบบต่าง ๆ ถือว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้ตามทฤษฎี ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยจะใช้ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะที่ได้นี้ไปทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่อไป แต่เพื่อให้การทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วยสมการสมรรถนะมีความเชื่อถือได้ และถูกต้องตามการทำงานจริงของระบบงานวิจัยนี้ นำผลการทดสอบของ Chaiyat (Nattaporn, 2015) มาวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป และนำผลการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วยสมการสมรรถนะที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับหัวข้อต่อไป เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของความสัมพันธ์สมการสมรรถนะ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาด 20 kW_e ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิไถ่ระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 28 °C ผลการทดสอบพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบจะลดลงประมาณ 6% เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนต่ำกว่า 100 °C ขณะที่ประสิทธิภาพโดยรวมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ อยู่ที่ประมาณ 8% ดังแสดงในภาพที่ 38 เมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ 46% และจากภาพที่ 38 ยังพบอีกว่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (η_{ORC}) กับอุณหภูมิไถ่ร้อนเข้าหม้อต้ม (T_{1h}) มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

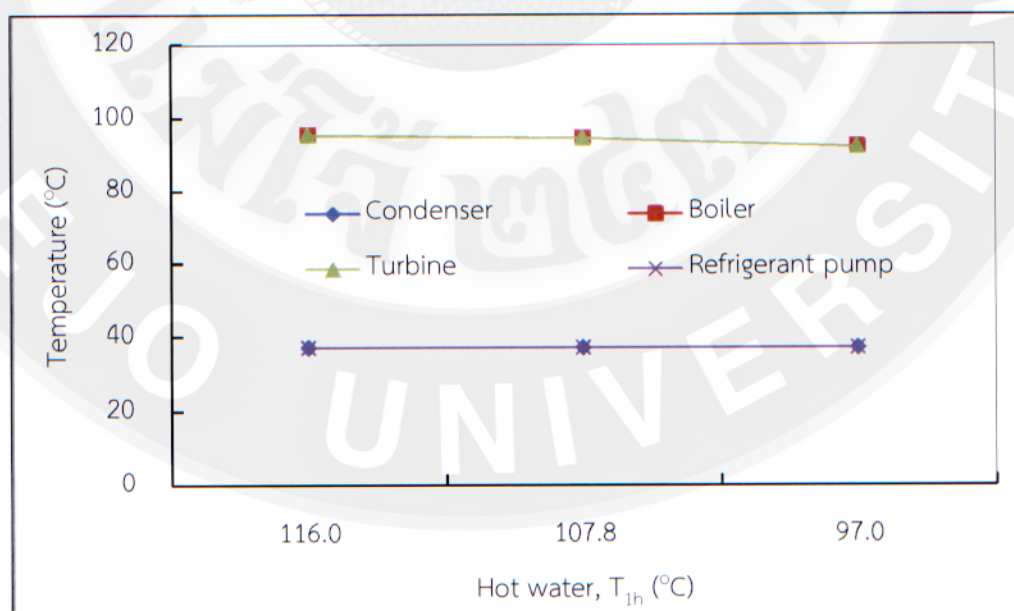
$$\eta_{ORC} = 0.0327(T_{1h}) + 4.9402$$

สมการที่ 4.6



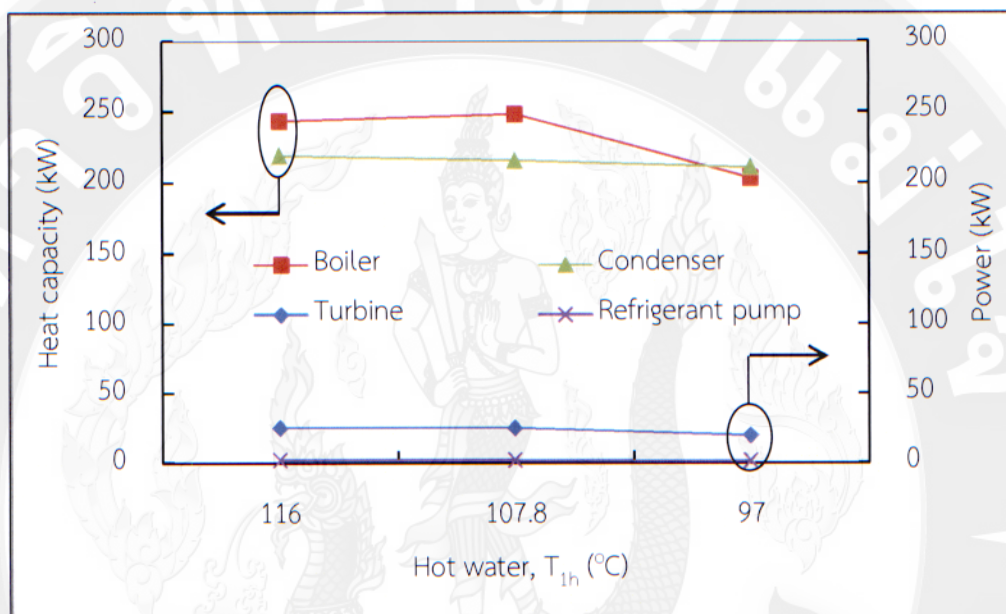
ภาพที่ 38 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม (T_{1h}) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม (T_p) และอุณหภูมิสารทำงานที่กังหัน (T_{Tur}) ในขณะที่อุณหภูมิสารทำงานที่ปั๊มสารทำงาน (T_p) และเครื่องควบแน่น (T_c) มีค่าคงที่



ภาพที่ 39 อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ภาพที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม (Q_B) ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Q_C) กำลังงานที่กังหัน (W_{Tur}) และปั๊มสารทำงาน (W_P) มีค่าค่อนข้างคงที่



ภาพที่ 40 อัตราความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

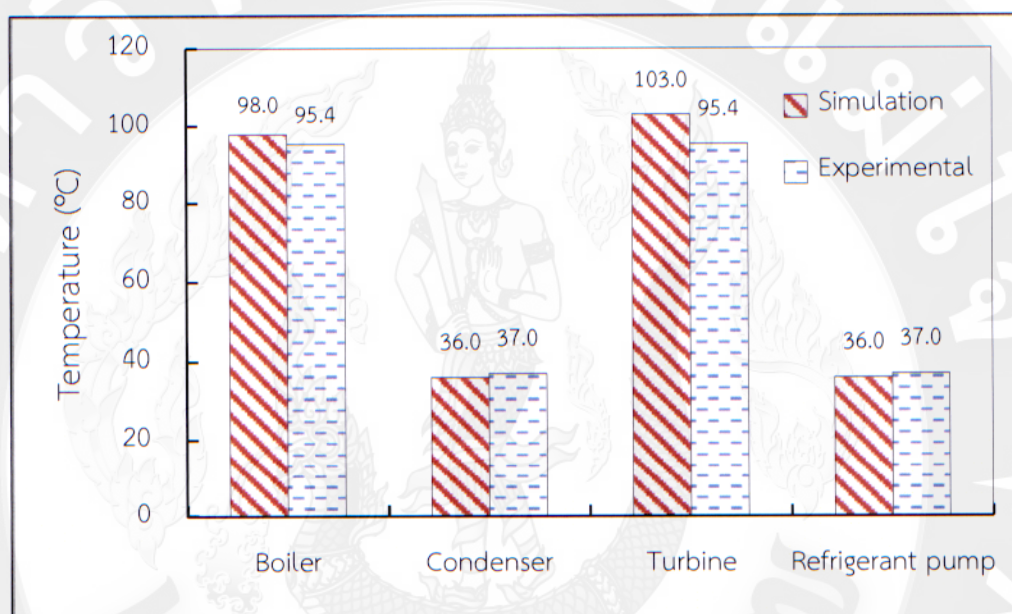
ผลทดสอบของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาด 20 kW_e ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยใช้ น้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 28 °C ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์อยู่ที่ประมาณ 8% เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลทดสอบของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ กับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อต่อไป

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบได้มีเงื่อนไข คือ ปริมาณการทำความร้อนที่ป้อน

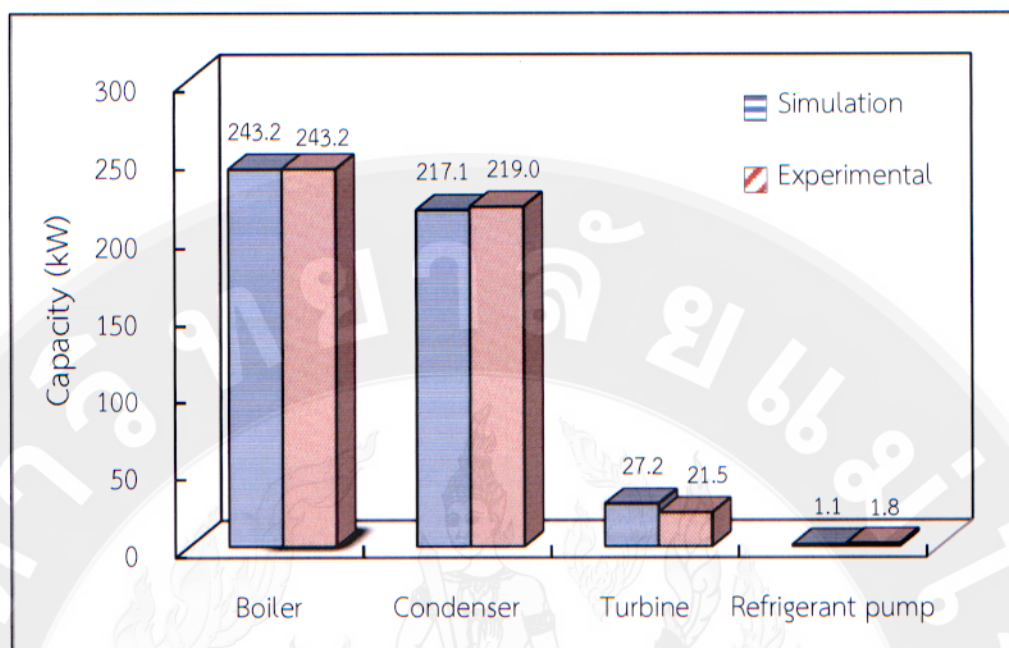
ให้แก่หม้อต้มของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีค่าเท่ากัน โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ภาพที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานโดยเฉลี่ยของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม เครื่องควบแน่น ปั๊มสารทำงาน ค่อนข้างเท่ากัน แต่ที่กังหันอุณหภูมิสารทำงานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สูงกว่าการทดสอบ

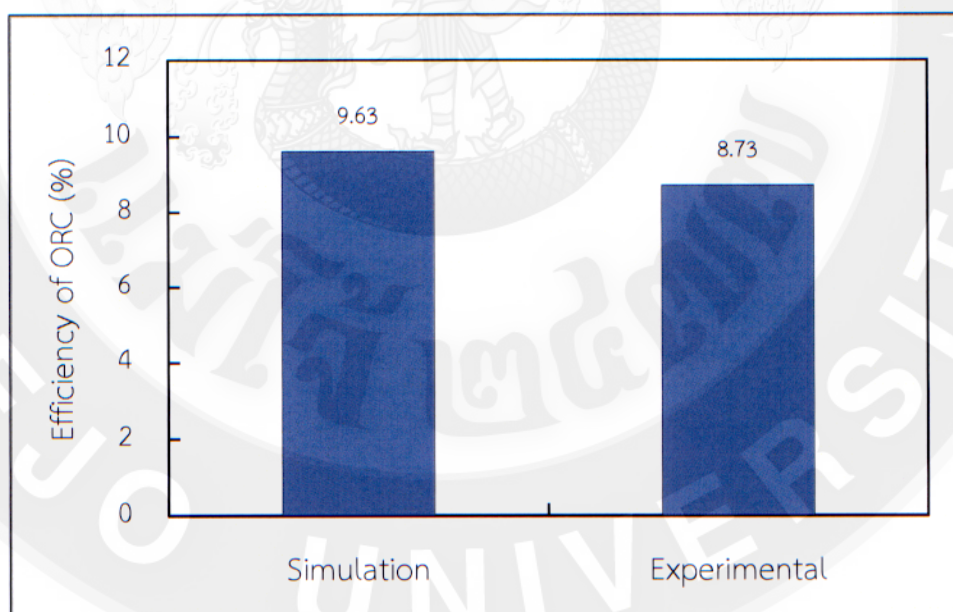


ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 42 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานของปั๊มสารทำงานของการทดสอบมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ในขณะที่กังหันงานที่สามารถผลิตได้ของการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 43



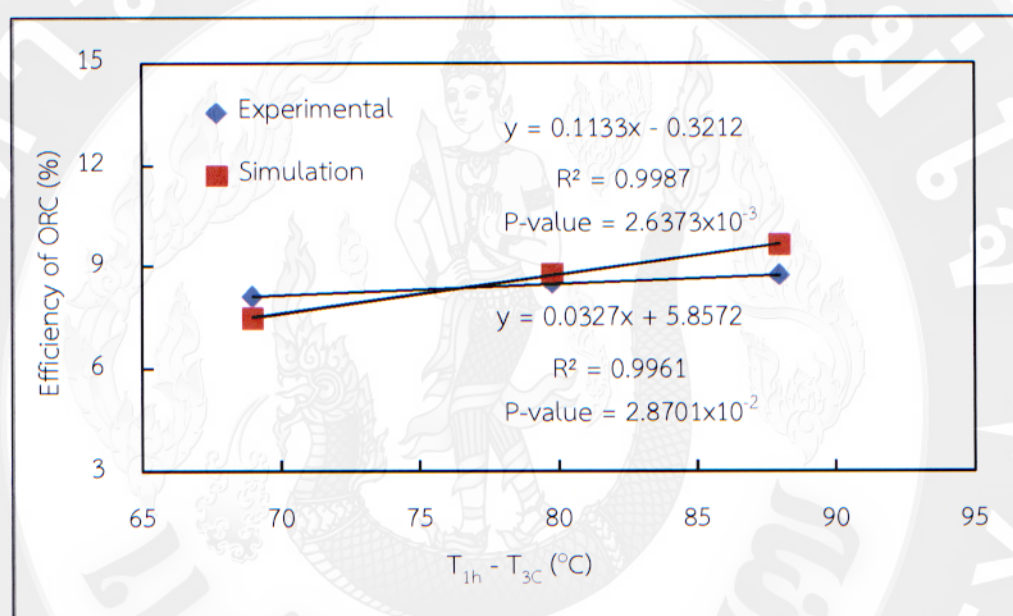
ภาพที่ 42 การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 44 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแหล่ง

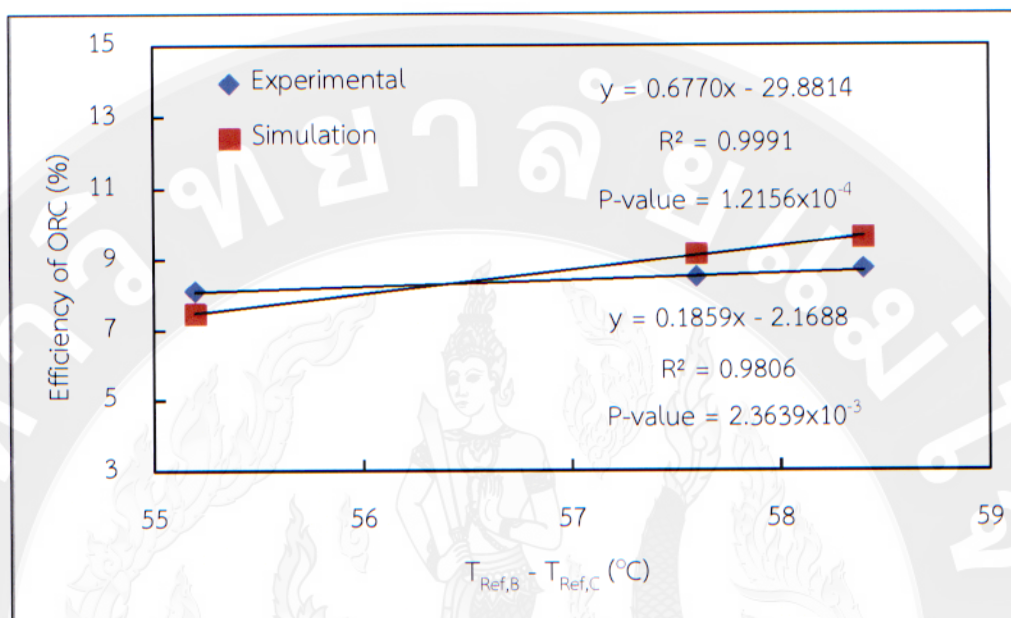
ความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ($T_{1h} - T_{3C}$) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อน เมื่อผลต่างของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนมาก ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ยิ่งเพิ่มขึ้น และยังพบว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้อง



ภาพที่ 44 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์จากผลการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิการทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูง และต่ำของระบบ ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิการทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูง และต่ำของระบบ เมื่อผลต่างของอุณหภูมิการทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำของระบบมาก ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ยิ่งเพิ่มขึ้น และยังพบว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า

ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้องตามพฤติกรรมการทำงานจริงของระบบ



ภาพที่ 45 สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากผลทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

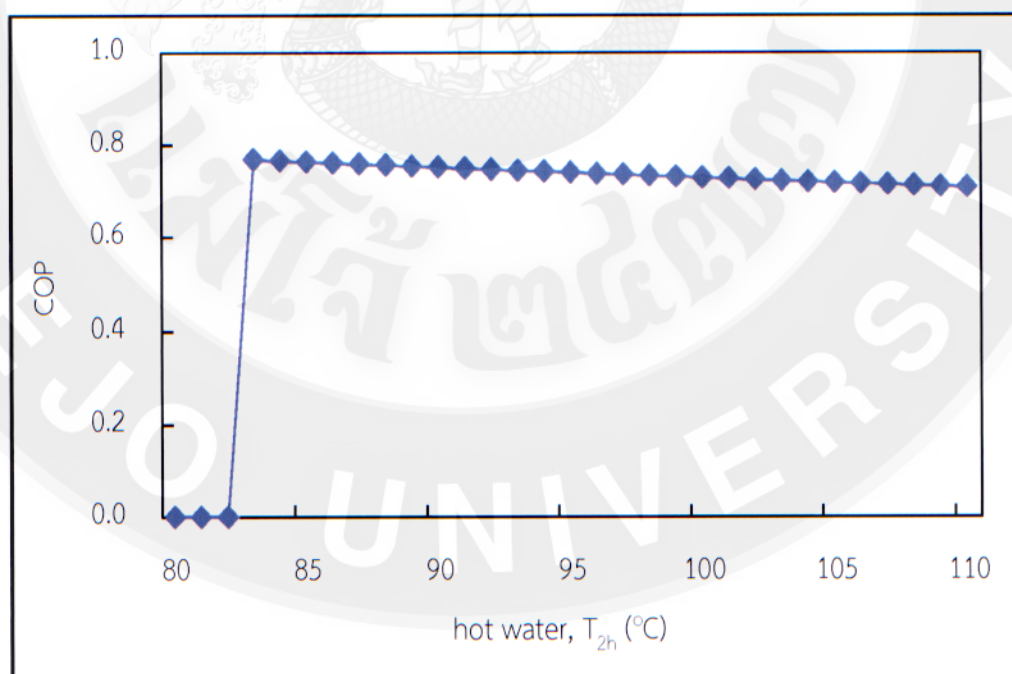
การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์อุณหภูมิที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ โดยยังคงความสามารถการอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ ซึ่งลดความยุ่งยาก ซับซ้อน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ดังนั้นความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์การทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในหัวข้อต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ที่ใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบในช่วง 80-

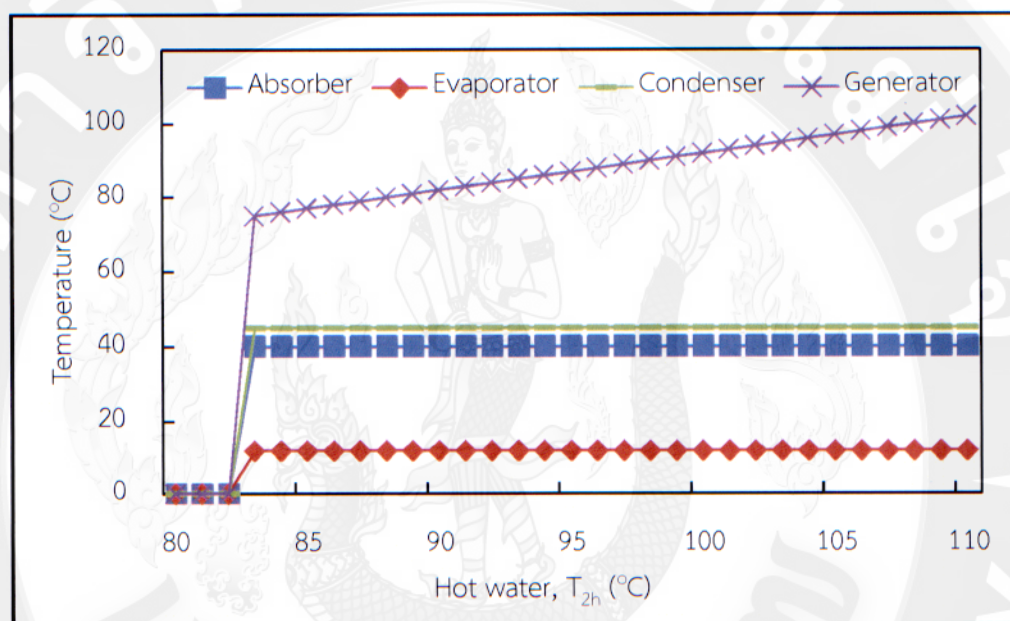
110 °C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32 °C เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการทำงานของระบบ โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ภาพที่ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ (T_{2h}) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบที่เจนเนอเรเตอร์ในช่วง 80-110 °C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32 °C ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนป้อนให้แก่ระบบที่เจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการย้อนกลับของวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น พลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบก็มากขึ้น โดยส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบการทำงานของระบบลดลง และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ยังพบอีกว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนป้อนให้แก่ระบบที่เจนเนอเรเตอร์ประมาณ 84 °C จึงทำให้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถทำงานได้ ทั้งนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูงและต่ำของสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ โดยระบบทำความเย็นสามารถผลิตน้ำเย็นได้ประมาณ 13 °C



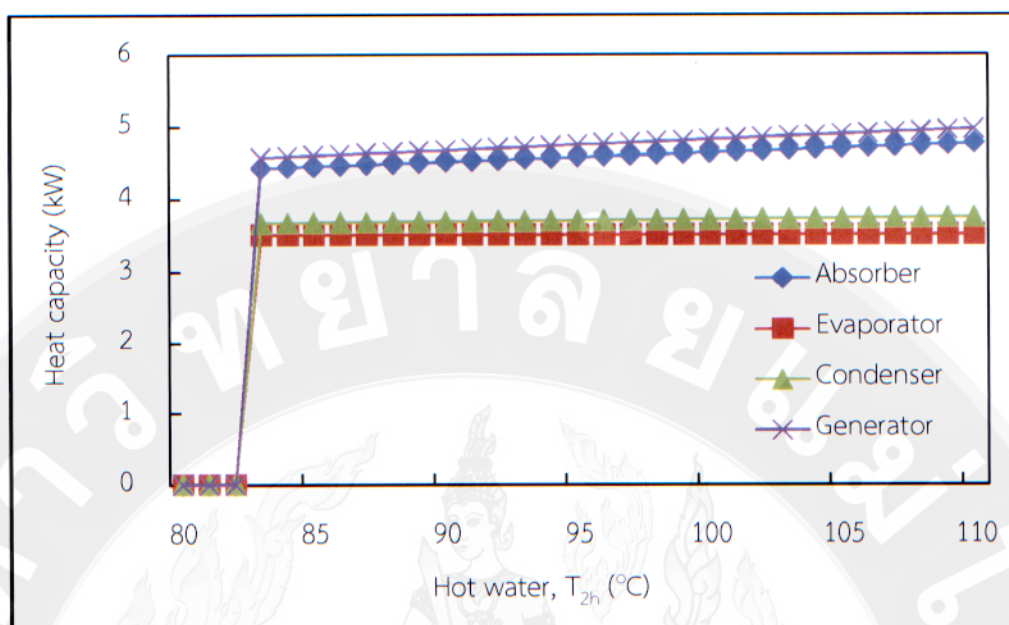
ภาพที่ 46 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำร้อน

ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบที่เจนเนอเรเตอร์ (T_{2h}) กับ อุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ (T_G) เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์มีผลน้อยมาก กับอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ (T_A) เครื่องระเหย (T_E) และ เครื่องควบแน่น (T_C) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่



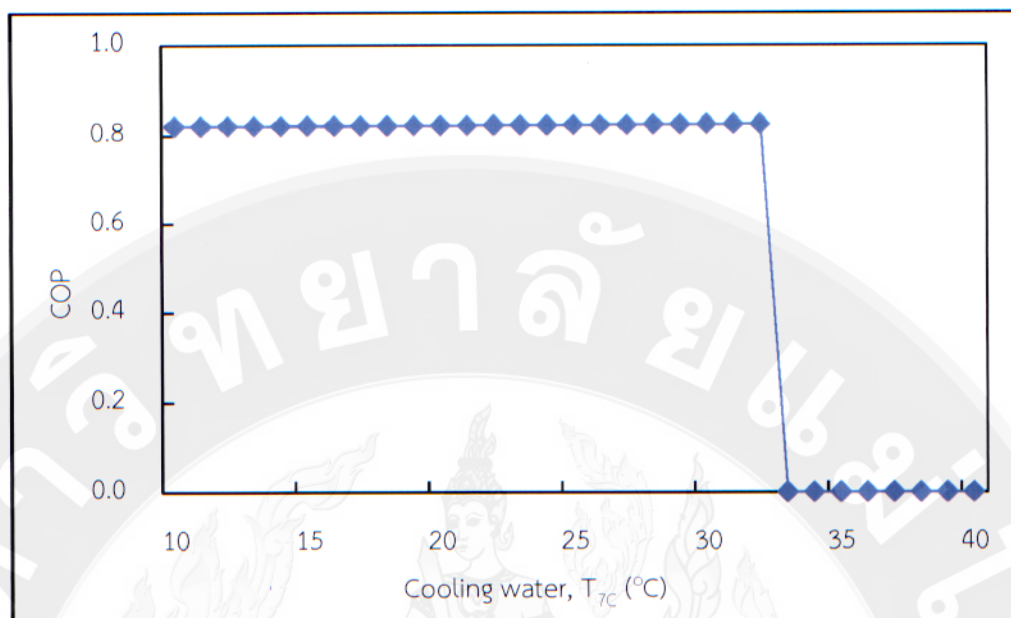
ภาพที่ 47 อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (T_{2h}) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เจนเนอเรเตอร์ (Q_G) และแอบซอร์พเบอร์ (Q_A) เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เจนเนอเรเตอร์ และแอบซอร์พเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีผลค่อนข้างน้อยกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหย (Q_E) และเครื่องควบแน่น (Q_C) ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่



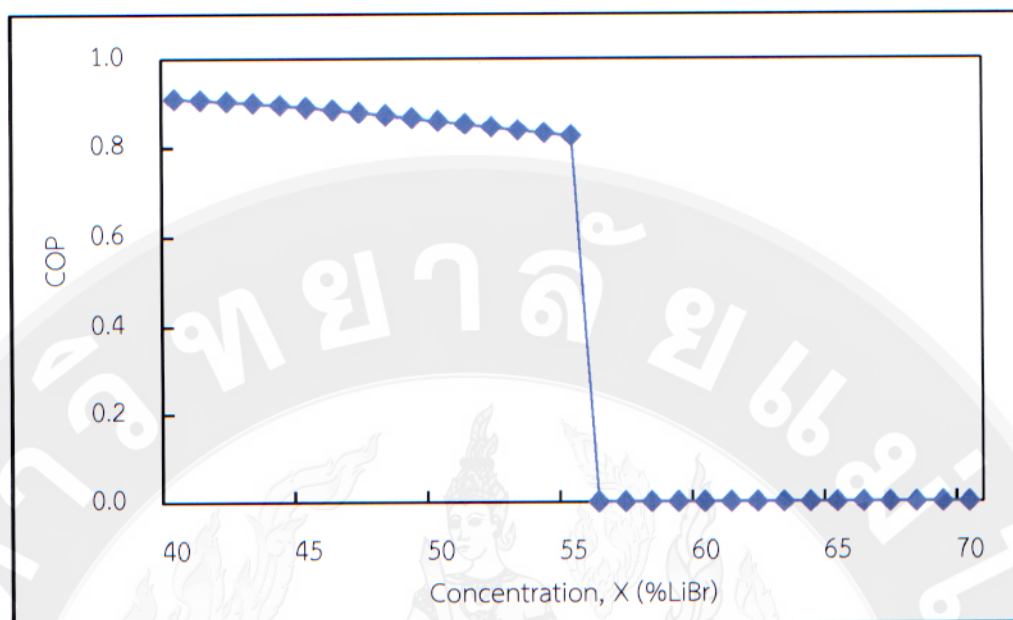
ภาพที่ 48 อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นอยู่ในช่วง 10-40 °C และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เจเนอเรเตอร์ประมาณ 84 °C ผลพบว่า อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนมีผลโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนค่อนข้างน้อย ซึ่งสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าค่อนข้างคงที่ และยังพบว่าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนไม่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนมากกว่า 32 °C เพราะทำให้สารทำงานในระบบตกผลึก และไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูง และต่ำของสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ



ภาพที่ 49 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น

ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลาย โดยความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วง 40-70 %LiBr ซึ่งทำงานภายใต้เงื่อนไขของแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบเท่ากัน (อุณหภูมิความร้อนที่ป้อนให้แก่เจนเนอเรเตอร์ประมาณ 84 °C) ผลที่ได้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนลดลงเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น และยังพบอีกว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวนี้ (อุณหภูมิความร้อนที่ป้อนให้แก่เจนเนอเรเตอร์ประมาณ 84 °C) ไม่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายมากกว่า 55 %LiBr เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายเพิ่มขึ้นตามไปด้วยโดยรายละเอียดอุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 9 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 50 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลาย



2078022842

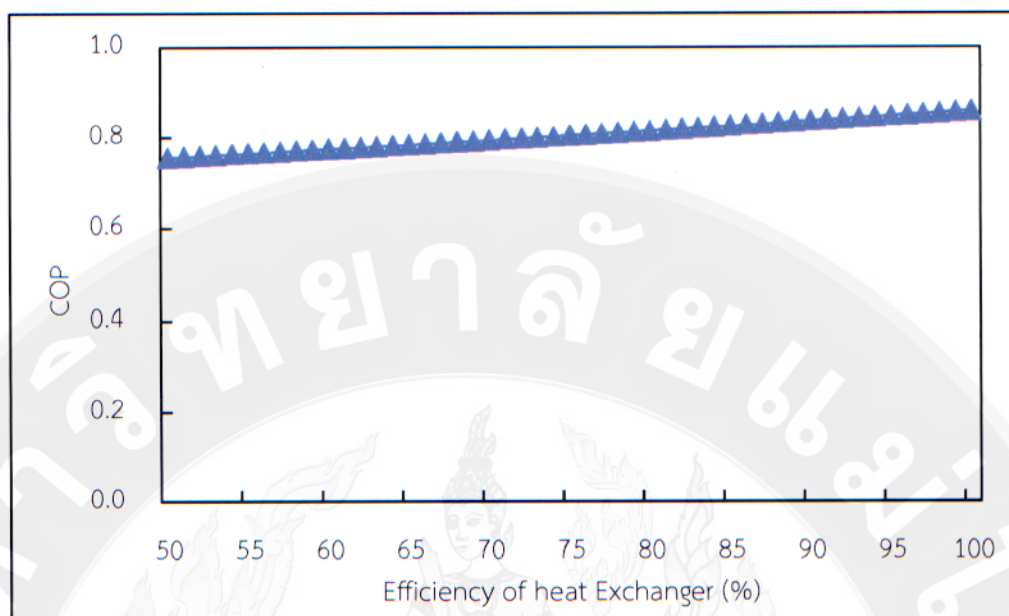
ตารางที่ 9 อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ สารละลาย (%LiBr)	อุณหภูมิจุดเดือดของ สารละลาย (°C)	ความเข้มข้นของ สารละลาย (%LiBr)	อุณหภูมิจุดเดือดของ สารละลาย (°C)
40	50.40	56	76.46
41	51.63	57	78.53
42	52.92	58	80.66
43	54.26	59	82.84
44	55.65	60	85.07
45	57.09	61	87.36
46	58.59	62	89.69
47	60.14	63	92.08
48	61.74	64	94.52
49	63.40	65	97.01
50	65.11	66	99.56
51	66.87	67	102.16
52	68.68	68	104.81
53	70.55	69	107.51
54	72.46	70	Out of range
55	74.43	Out of range	Out of range

ภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนศึกษาในช่วง 0.5-1 (50-100%) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีผลโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



2078022842



ภาพที่ 51 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
ที่เปลี่ยนแปลงตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก และรายละเอียดการคำนวณในภาพที่ 19 ถือว่า สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ตรงตามทฤษฎี แต่ในการสร้างแบบจำลองนี้ถือว่า ยังมีความยุ่งยาก ซับซ้อน ซึ่งต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเอาผลดังกล่าวนี้ไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่ (สะดวก และใช้ง่าย) โดยยังคงความสามารถของการอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ตามทฤษฎี

สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนข้างต้นพบว่า สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ แต่การสร้างแบบจำลองข้างต้นยังพบว่า มีขั้นตอนที่มีความยุ่งยาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาสมการสมรรถนะของความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบรูปแบบต่าง ๆ โดยทำการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น คือ การหาความสัมพันธ์อุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบซึ่งเป็นตัวแปรอิสระในแกน x ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำ

ความเย็นแบบดูดกลืนโดยเป็นตัวแปรตามในแกน y เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งอิงตามหลักทฤษฎีการย้อนกลับของคาร์โนต์ โดยนำผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขั้นตอนที่ผ่านมา เพื่อทำการวิเคราะห์สมการสมรรถนะ อันประกอบไปด้วย 13 รูปแบบดังตารางที่ 10 โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 10 รูปแบบการวิเคราะห์สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปแบบ	แกน y	แกน x
1	COP	$(T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB})$
2	COP	$(T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB})$
3	COP	$[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$
4	COP	$[(T_G - T_C) - (T_A - T_E)]$
5	COP	$[(T_G / T_C) - (T_A / T_E)]$
6	COP	$(T_G - T_E)$
7	COP	(T_G / T_E)
8	COP	$(T_G - T_A)$
9	COP	(T_G / T_A)
10	COP	$(T_C - T_E)$
11	COP	(T_C / T_E)
12	COP	$(T_C - T_A)$
13	COP	(T_C / T_A)

ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น $(T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB})$ และภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น $(T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB})$ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบในช่วง 80-110 °C ผลการศึกษาพบว่า ผลต่างและสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น มีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งส่งผลให้ค่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 0.8 เป็นประมาณ 0.7 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการย้อนกลับของวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า งานที่ป้อนให้แก่วัฏจักร

จะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงตามไปด้วย

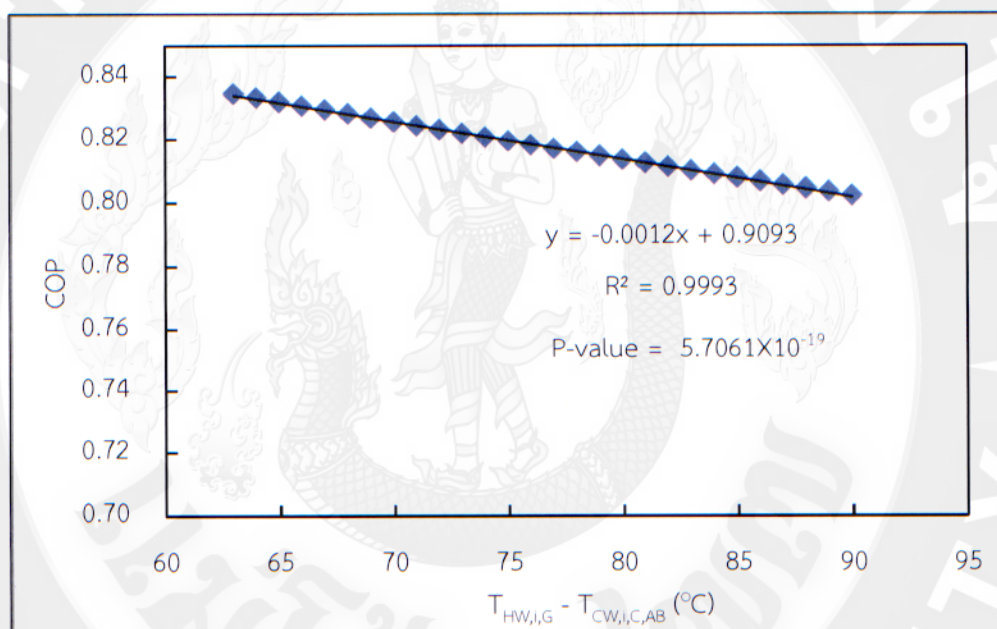
จากภาพที่ 52 และ 53 ยังพบอีกว่าผลต่างและสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าเจนเนอเรเตอร์ และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ เท่ากัน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

$$\text{COP} = -0.0012(T_{\text{HW},i,G} - T_{\text{CW},i,C,AB}) + 0.9093$$

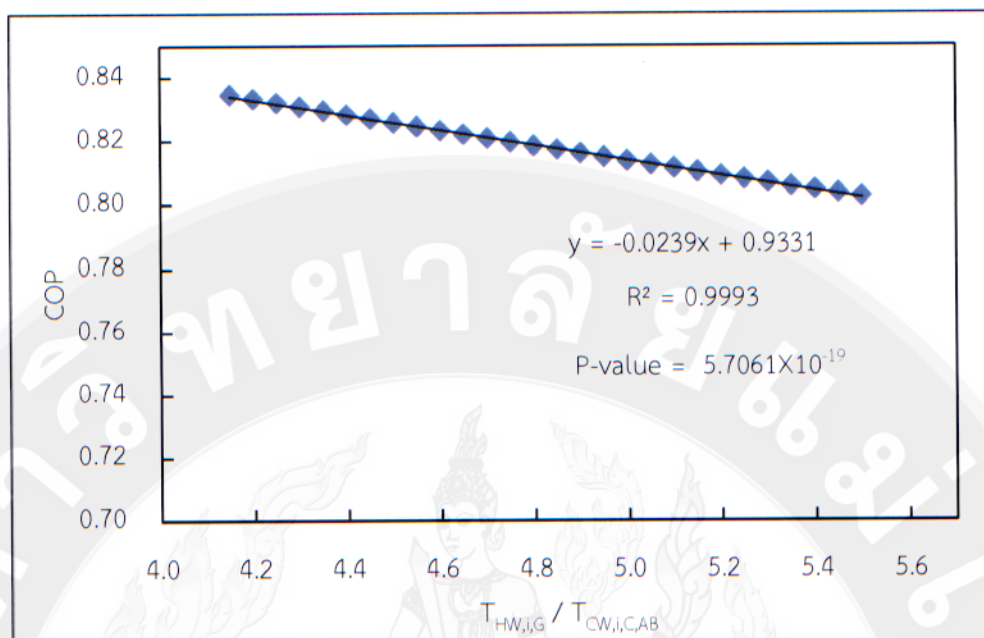
สมการที่ 4.7

$$\text{COP} = -0.0239(T_{\text{HW},i,G} / T_{\text{CW},i,C,AB}) + 0.9331$$

สมการที่ 4.8



ภาพที่ 52 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น



ภาพที่ 53 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วน อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

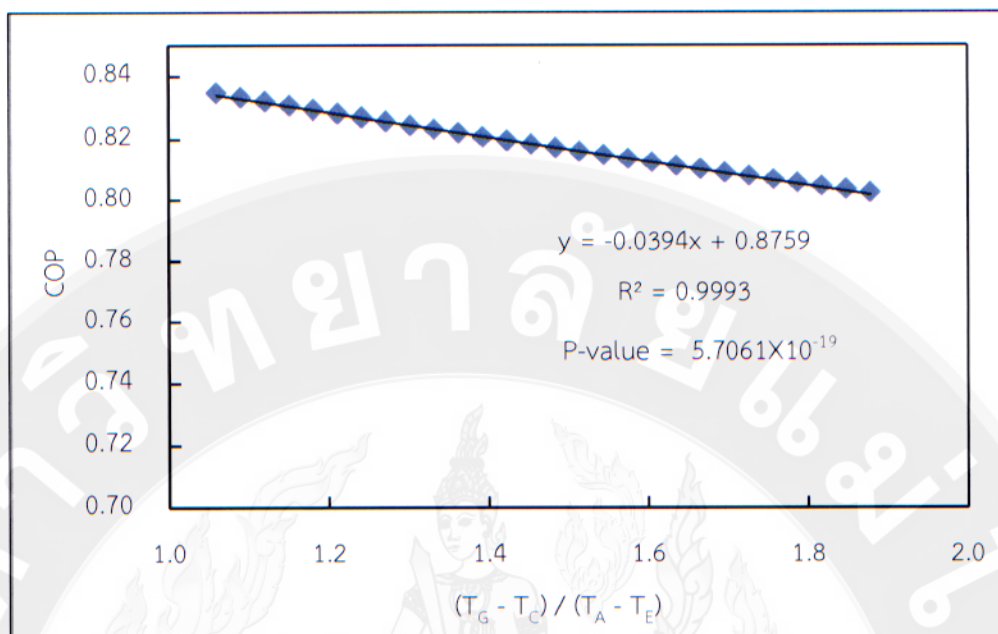
ภาพที่ 54 และ 55 เป็นการวิเคราะห์คล้ายกับภาพที่ 52 และ 53 แต่เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วน $[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ และผลต่าง $[(T_G - T_C) - (T_A - T_E)]$ ของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ ผลที่ได้พบว่า มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยค่า R^2 ของทั้งสองรูปแบบความสัมพันธ์มีค่าเท่ากัน คือ $R^2 = 0.9993$ แต่มีค่า P-value ต่างกัน โดยมีค่า P-value = 5.7061×10^{-19} และ P-value = 5.8408×10^{-19} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ข้างต้นเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{COP} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$$

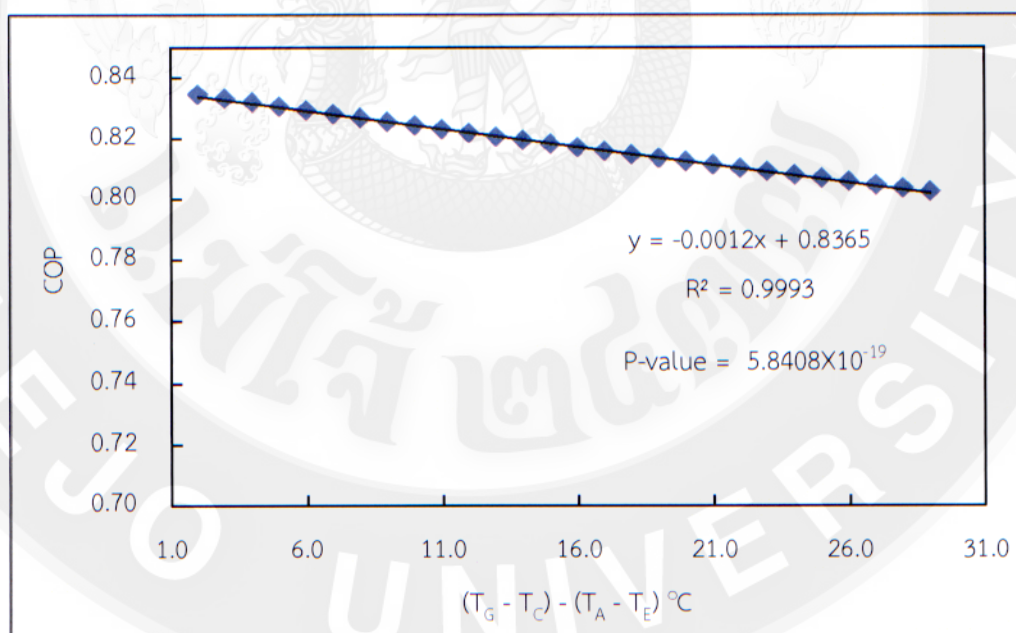
สมการที่ 4.9

$$\text{COP} = -0.0012[(T_G - T_C) - (T_A - T_E)] + 0.8365$$

สมการที่ 4.10



ภาพที่ 54 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ

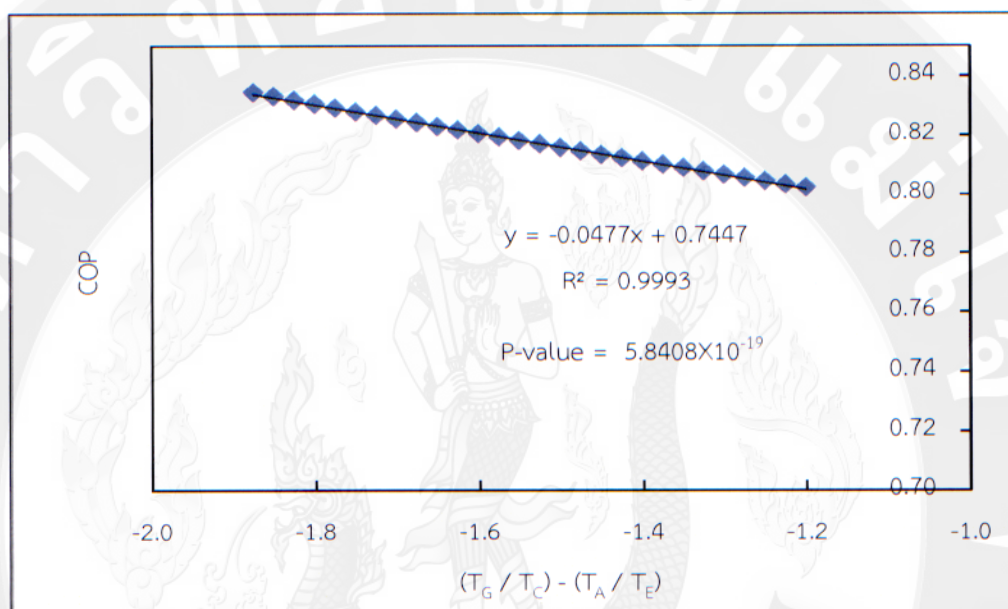


ภาพที่ 55 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างของสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ $[(T_G / T_C) -$

(T_A / T_E)] ผลที่ได้พบว่า ผลต่างของสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ มีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบ และมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.8408 \times 10^{-19}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้ในรูปแบบความสัมพันธ์ข้างต้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{COP} = -0.0477[(T_G / T_C) - (T_A / T_E)] + 0.7447 \quad \text{สมการที่ 4.11}$$

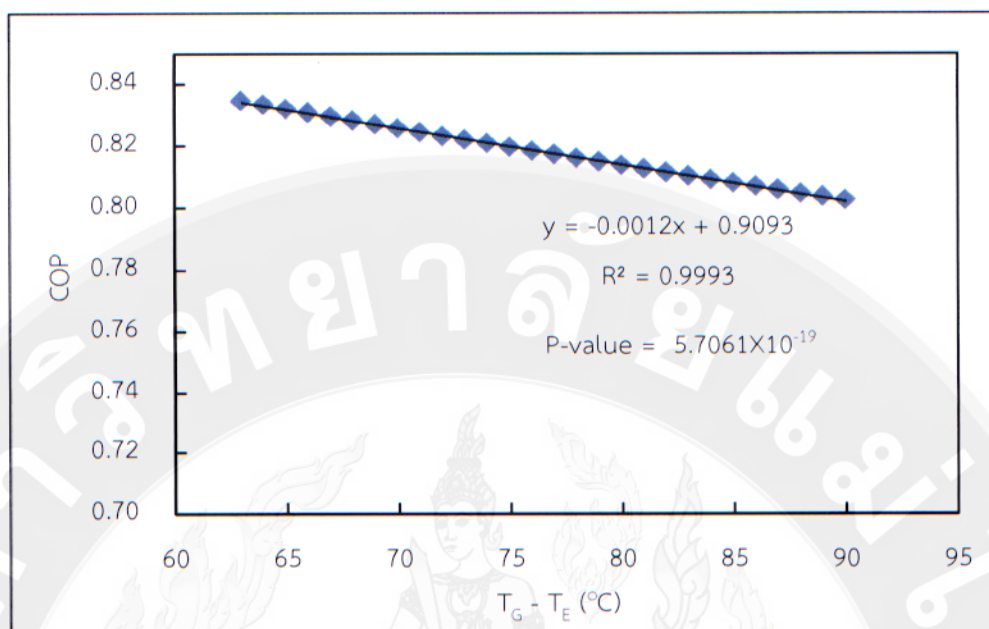


ภาพที่ 56 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ

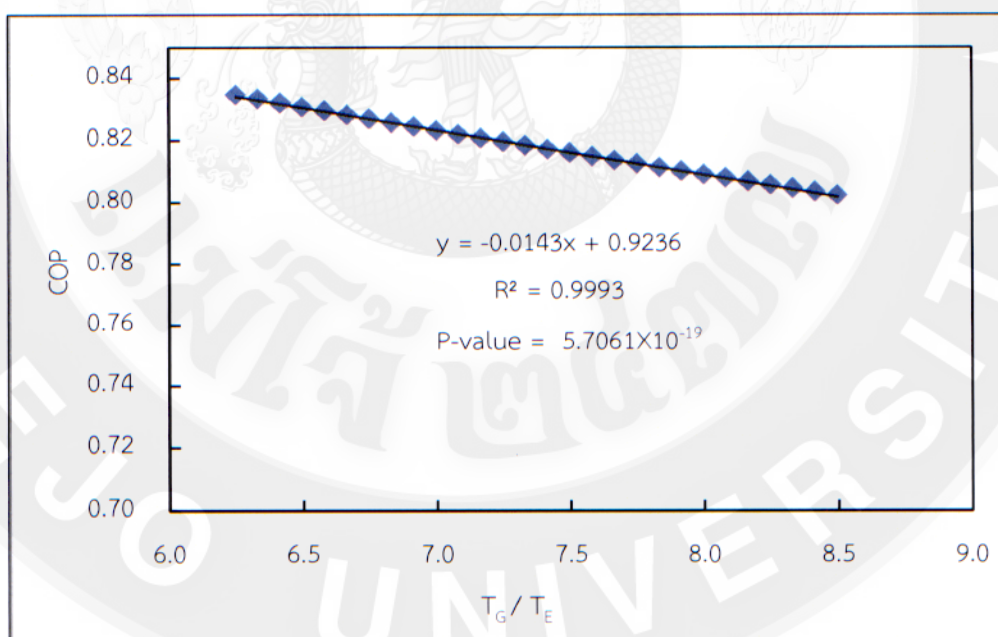
ภาพที่ 57 และ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่าง $(T_G - T_E)$ และสัดส่วน (T_G / T_E) อุณหภูมิสารทำงานที่เจนนอเตอร์และเครื่องระเหย ผลที่ได้พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบเปลี่ยนแปลงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนนอเตอร์และเครื่องระเหย และยังพบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ เท่ากัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{COP} = -0.0012(T_G - T_E) + 0.9093 \quad \text{สมการที่ 4.12}$$

$$\text{COP} = -0.0143(T_G / T_E) + 0.9236 \quad \text{สมการที่ 4.13}$$



ภาพที่ 57 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เจนนอร์เรเตอร์และเครื่องระเหย



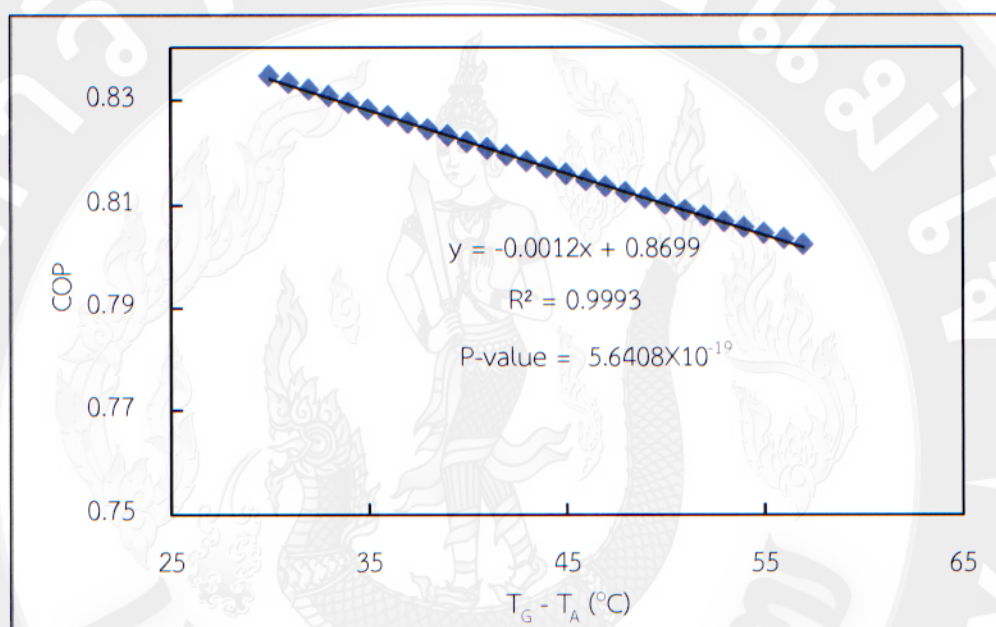
ภาพที่ 58 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนนอร์เรเตอร์และเครื่องระเหย

ภาพที่ 59 และ 60 คล้ายกับภาพที่ 57 และ 58 แต่แสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่าง ($T_G - T_A$) และสัดส่วน (T_G / T_A) อุณหภูมิ

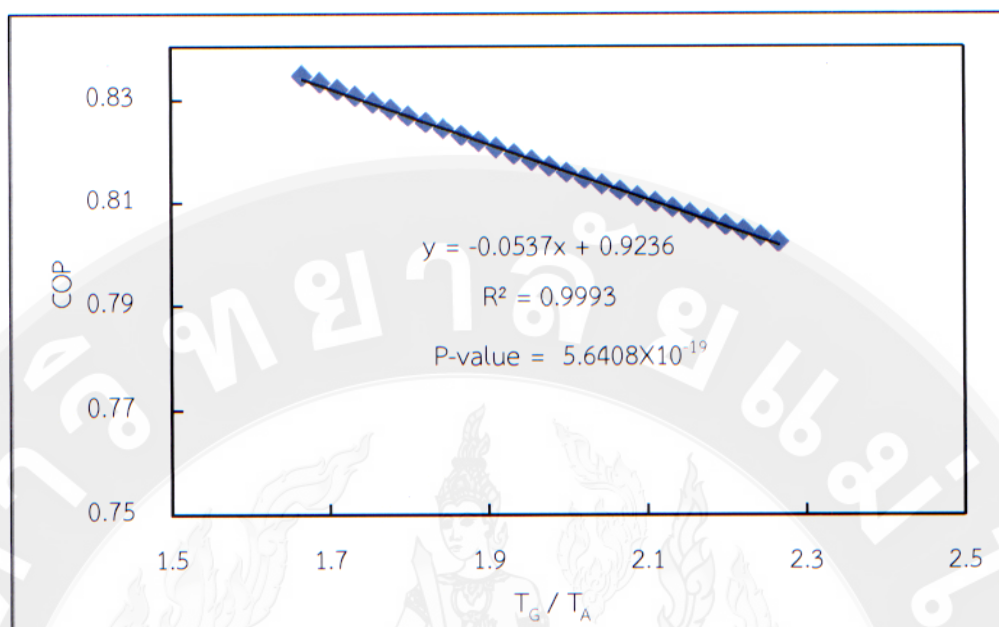
สารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์ ผลที่ได้พบว่า มีลักษณะคล้ายกับภาพที่ 57 และ 58 โดยสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบเปลี่ยนแปลงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์ และยังพบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.6408 \times 10^{-19}$ เท่ากัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{COP} = -0.0012(T_G - T_A) + 0.8699 \quad \text{สมการที่ 4.14}$$

$$\text{COP} = -0.0537(T_G / T_A) + 0.9236 \quad \text{สมการที่ 4.15}$$

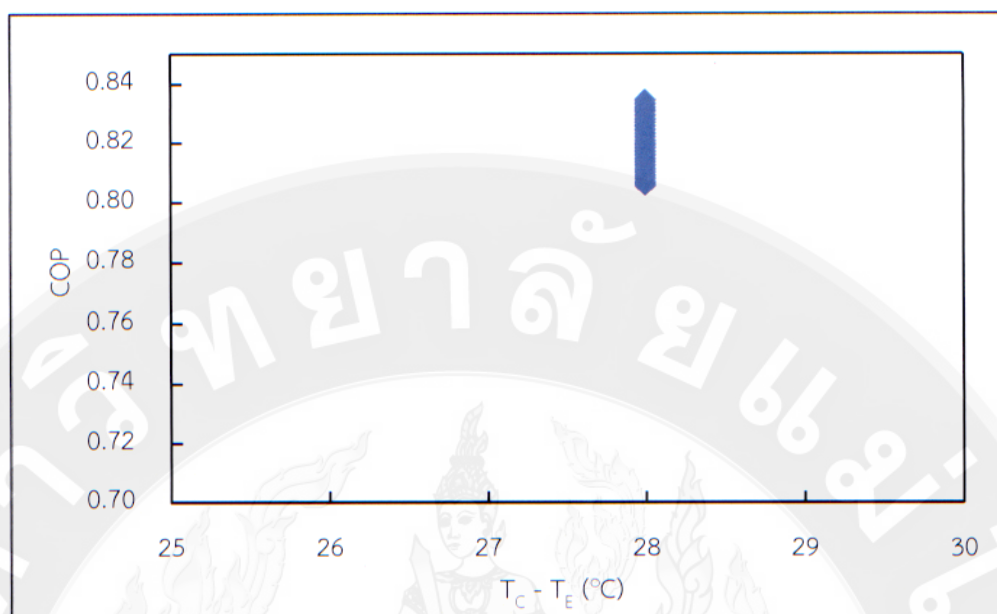


ภาพที่ 59 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์

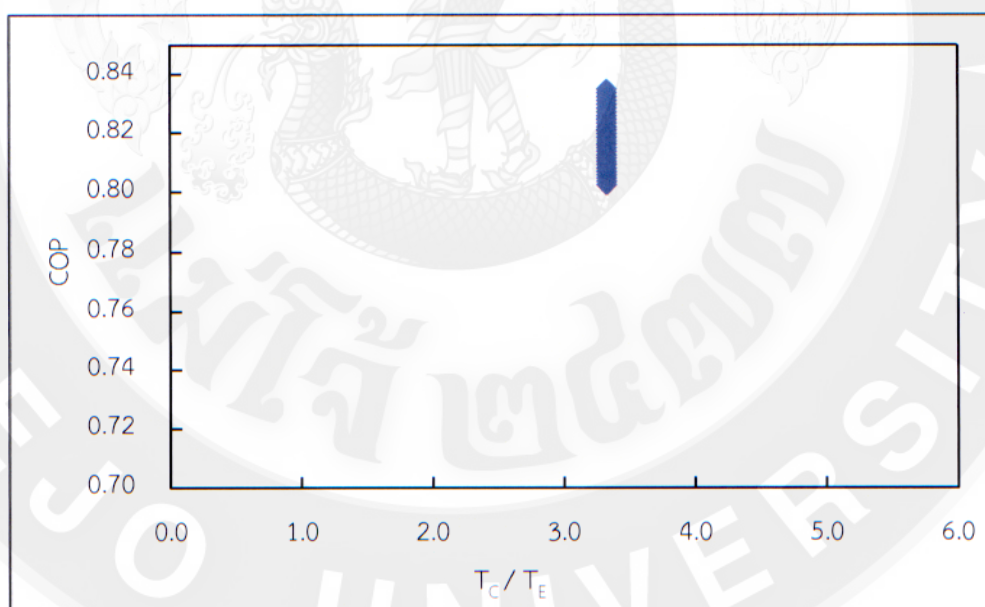


ภาพที่ 60 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนนีโอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์

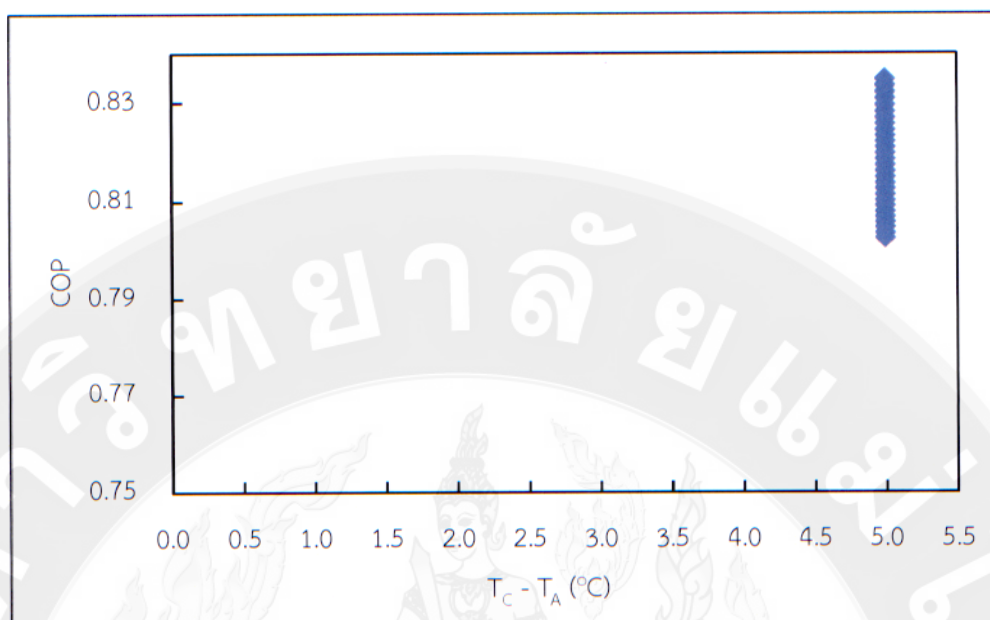
ภาพที่ 61-64 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย และระหว่าง สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์และเครื่องควบแน่นในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ผลที่ได้พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย ซึ่งมีค่า $R^2 = 0$ และ $P\text{-value} = 0$ เพราะว่าอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ เครื่องควบแน่น และเครื่องระเหย มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อระบบทำงาน ซึ่งนำมาหาความสัมพันธ์ในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้ไม่มีผลโดยตรงกับการทำงานของระบบ ดังนั้นรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่สามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้



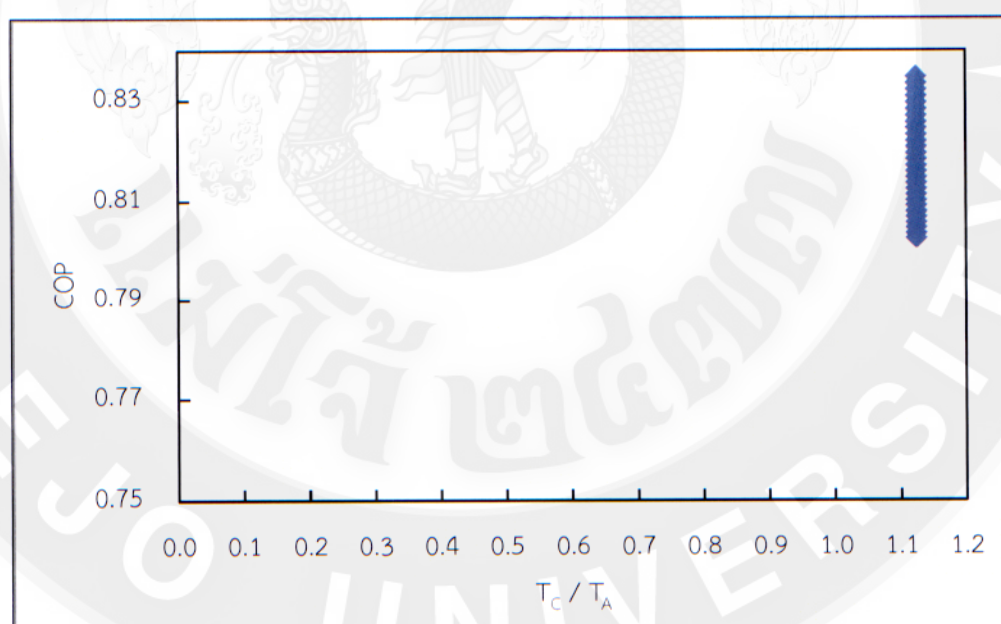
ภาพที่ 61 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย



ภาพที่ 62 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย



ภาพที่ 63 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์และเครื่องควบแน่น



ภาพที่ 64 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับ
สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์และเครื่องควบแน่น

ภาพที่ 65 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ได้จากสมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ และได้จากสมการสมรรถนะในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ผลที่ได้พบว่า สามารถทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแต่ละรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้มีค่า R^2 และค่า P-value ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทำให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันไปด้วย



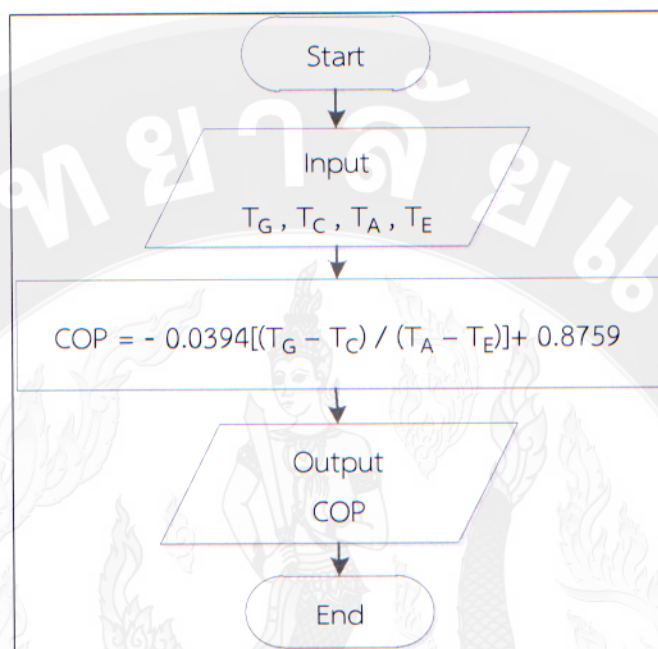
ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ได้จาก
สมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ และได้จากสมการสมรรถนะ

ตารางที่ 11 สรุปสมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปแบบ	สมการสมรรถนะ	R^2	P-value
1	$COP = -0.0012(T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB}) + 0.9093$	0.9993	5.7061×10^{-19}
2	$COP = -0.0239(T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB}) + 0.9331$	0.9993	5.7061×10^{-19}
3	$COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$	0.9993	5.7061×10^{-19}
4	$COP = -0.0012[(T_G - T_C) - (T_A - T_E)] + 0.8365$	0.9993	5.8408×10^{-19}
5	$COP = -0.0477[(T_G / T_C) - (T_A / T_E)] + 0.7447$	0.9993	5.8408×10^{-19}
6	$COP = -0.0012(T_G - T_E) + 0.9093$	0.9993	5.7061×10^{-19}
7	$COP = -0.0143(T_G / T_E) + 0.9236$	0.9993	5.7061×10^{-19}
8	$COP = -0.0012(T_G - T_A) + 0.8699$	0.9993	5.6408×10^{-19}
9	$COP = -0.0537(T_G / T_A) + 0.9236$	0.9993	5.6408×10^{-19}
10	-	-	-
11	-	-	-
12	-	-	-
13	-	-	-

โดยจากตารางที่ 11 สรุปสมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนข้างต้นใน รูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไหลในแกน x ที่มีผลต่อ สมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในแกน y มีค่า $R^2 = 0.9993$ เท่ากัน และมีค่า P-value ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็น ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสารทำงานของอุปกรณ์หลักในระบบ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์ สมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิ สารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำมีค่า P-value ต่ำสุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ คือ ความสัมพันธ์สมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนของ ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำ โดยมีค่าสมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ ($COP_{Cooling} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$) ถือว่าเหมาะสม เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ของอุปกรณ์หลักในระบบ ซึ่งทำให้ทำนาย สมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคุม ใช้ทำนายสมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบได้อย่างสะดวก และมีประสิทธิภาพ ดังแสดง

แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบใหม่ในภาพที่ 66 ต่อไปนี้



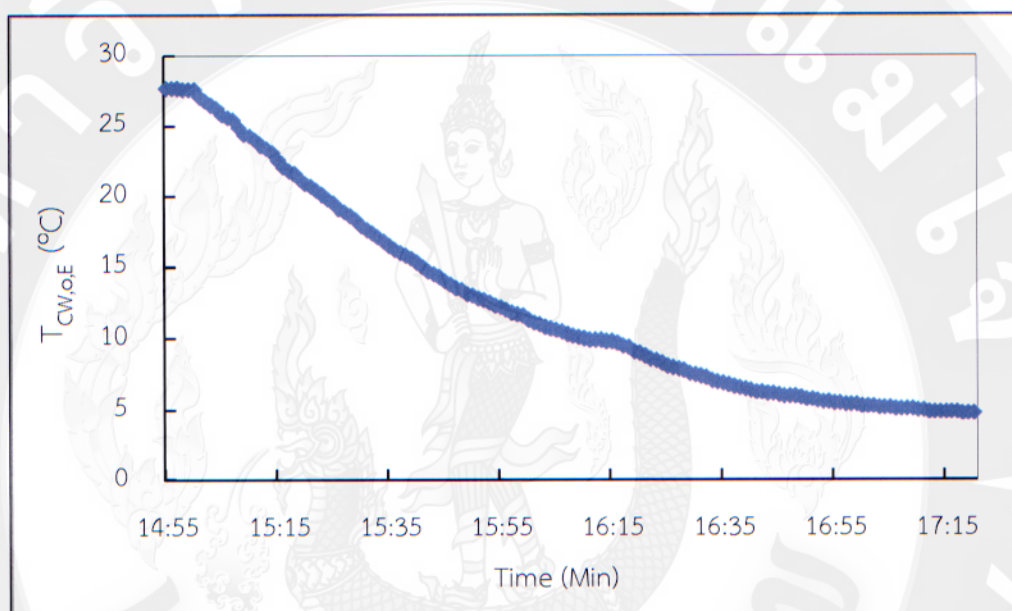
ภาพที่ 66 แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบใหม่

สมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบ ถือว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้ตามทฤษฎี ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยความสัมพันธ์สมการสมรรถนะที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป แต่เพื่อให้การทำนายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบด้วยความสัมพันธ์สมการสมรรถนะมีความเชื่อถือได้ และพิสูจน์ความถูกต้องตามการทำงานจริงของระบบงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในหัวข้อต่อไป และนำผลการทดสอบระบบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง

การทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

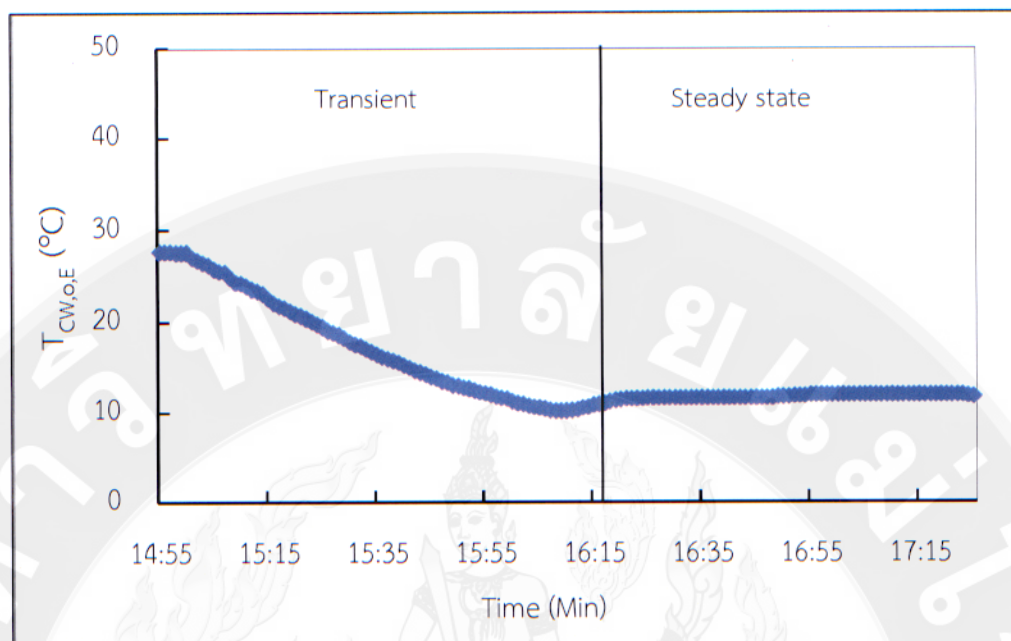
การทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดการทำความเย็นประมาณ 1 TR ที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ ซึ่งระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูงและต่ำของสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ โดยการป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเพื่อไปขับเคลื่อนสารทำงานในระบบอยู่ที่ประมาณ 80-95

°C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าระบบประมาณ 30 °C โดยผลการทดสอบนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเย็นที่ระบบสามารถทำได้ (ประมาณ 100 L) กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 67 ผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเย็นเริ่มต้นประมาณ 27 °C เมื่อระบบทำความเย็นทำงานผ่านไป อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเย็นมีค่าต่ำลง โดยระบบสามารถลดอุณหภูมิน้ำได้ประมาณ 22 °C และสามารถผลิตน้ำเย็นได้อุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 5 °C ในเวลา 2 h 20 Min (140 Min) ดังแสดงในรูปที่ 67 ต่อไปนี้



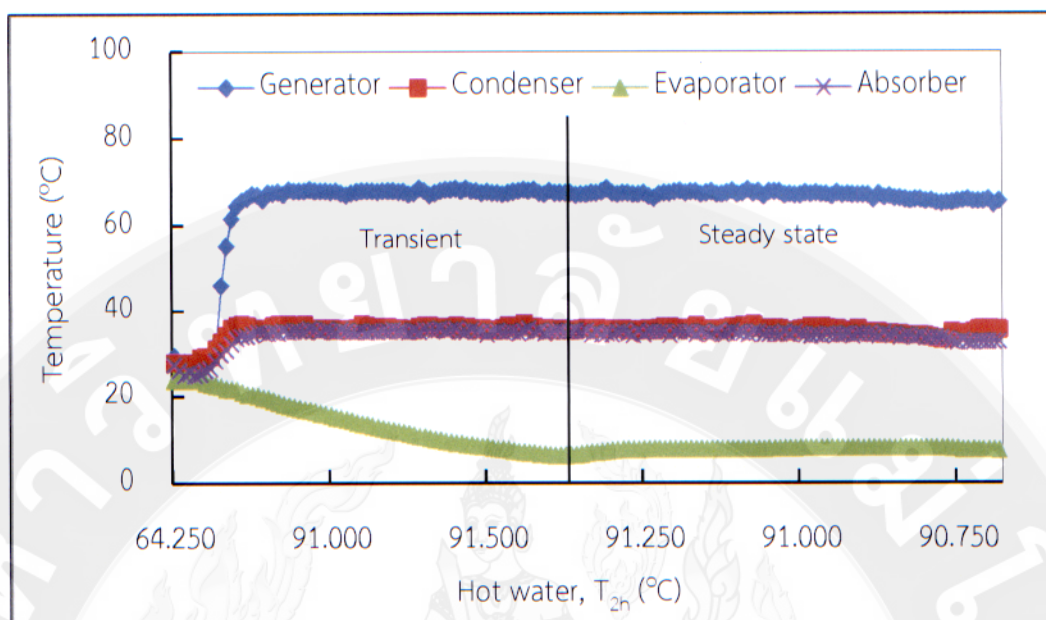
ภาพที่ 67 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ระบบสามารถทำได้ต่ำสุด

ภาพที่ 68 แสดงอุณหภูมิน้ำเย็นที่ระบบทำงานภายใต้สภาวะคงตัว ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงาน อุณหภูมิน้ำเย็นลดลงตามเวลา ซึ่งในช่วงแรกระบบยังทำงานอยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Transient time) แต่เมื่อระบบทำงานไปเรื่อย ๆ ระบบก็จะเข้าสู่ช่วงการทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state time) โดยระบบทำงานภายใต้สภาวะคงตัวอุณหภูมิน้ำเย็นมีค่าประมาณ 12 °C โดยอุณหภูมิที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนประมาณ 90 °C



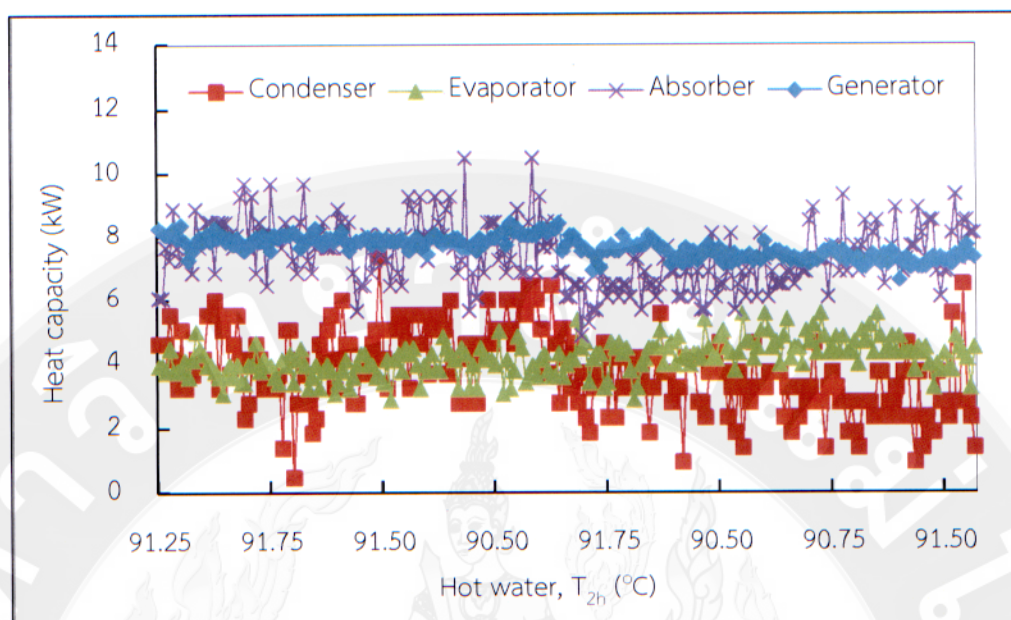
ภาพที่ 68 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ระบบทำงานภายใต้สภาวะคงตัว

ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ (T_{2H}) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า เมื่อระบบเริ่มทำงาน (Transient time) อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำร้อน แต่เมื่อระบบเข้าสู่การทำงานที่สภาวะคงตัวแล้วอุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานระบบค่อนข้างน้อย ซึ่งทำให้อุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์มีค่าคงที่ อุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยเฉลี่ย คือ อุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ (T_G) ประมาณ 67°C แอ็บซอร์พเบอร์ (T_A) 35°C เครื่องระเหย (T_E) 7.6°C และเครื่องควบแน่น (T_C) 36°C



ภาพที่ 69 อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ภาพที่ 70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (T_{2h}) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ในระบบค่อนข้างน้อย ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยเฉลี่ย คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เจนเนอเรเตอร์ (Q_G) ประมาณ 8 kW แอ็บซอร์บเบอร์ (Q_A) 7.5 kW เครื่องระเหย (Q_E) 4 kW และเครื่องควบแน่น (Q_C) 4.2 kW



ภาพที่ 70 อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดการทำความเย็นประมาณ 1 TR ที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ โดยการป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเพื่อไปขับเคลื่อนสารทำงานในระบบอยู่ที่ประมาณ 80-95 °C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าระบบประมาณ 30 °C อุณหภูมิสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 12 ต่อไปนี้

ตารางที่ 12 อุณหภูมิสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

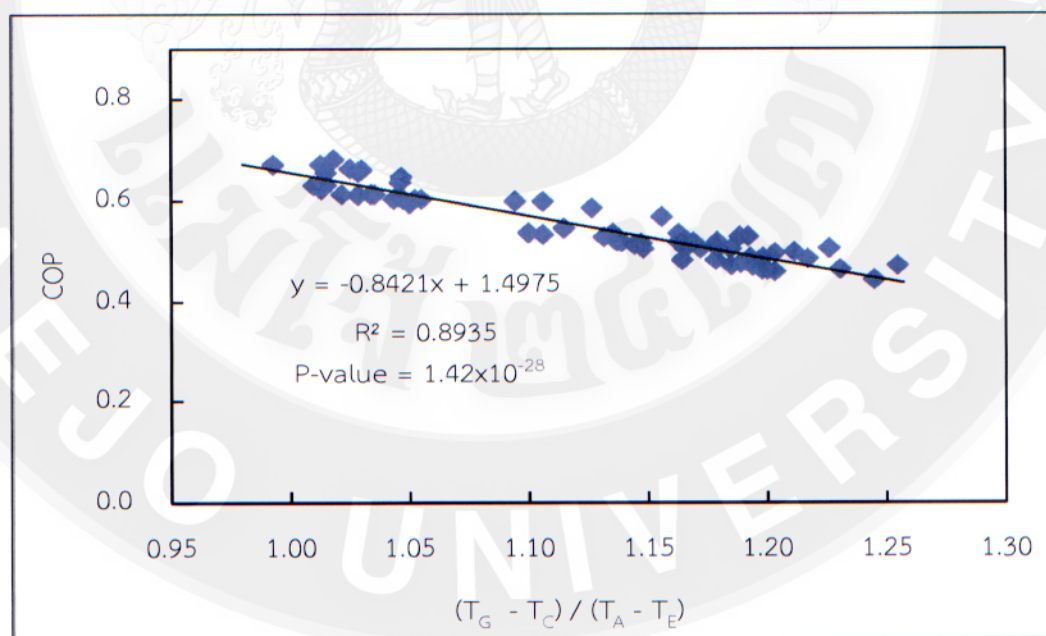
อุปกรณ์	อุณหภูมิสารทำงาน	อัตราการถ่ายเทความร้อน
เจนเนอเรเตอร์	67.0	8.0
แอบซอร์พเบอร์	35.0	7.5
เครื่องระเหย	7.6	4.0
เครื่องควบแน่น	36.0	4.2

ภาพที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วน $[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ ของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบในช่วง 80-95 °C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าระบบประมาณ 30 °C ผลการศึกษาพบว่า ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ มีผลโดยตรงต่อค่า

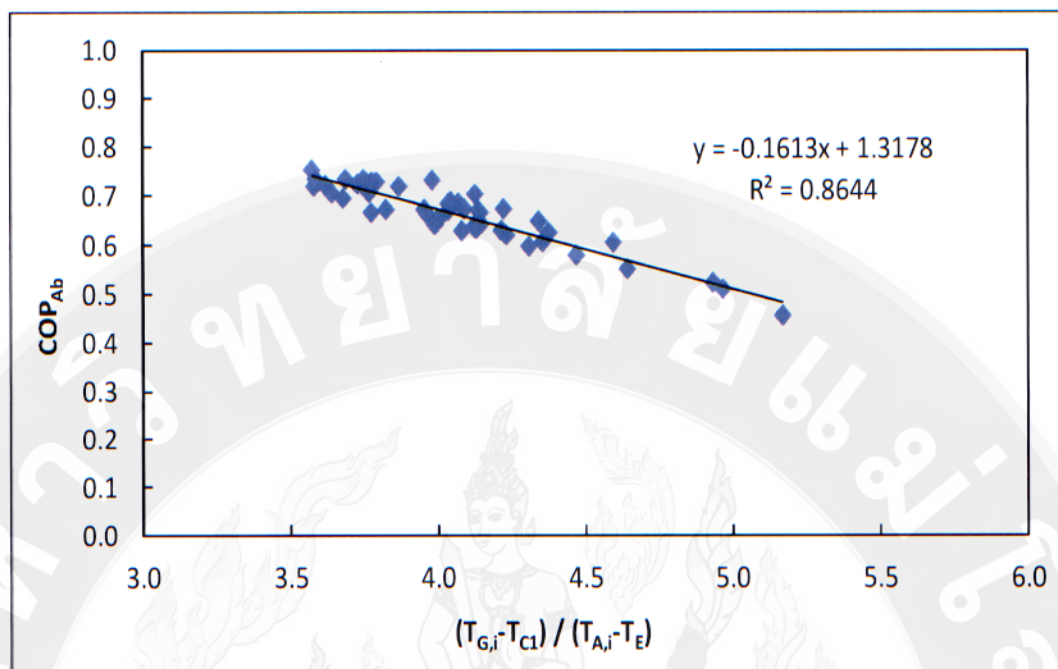
สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งส่งผลให้ค่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 0.6 เป็นประมาณ 0.4 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการย้อนกลับของวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า งานที่ป้อนให้แก่ระบบจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงขึ้นไปด้วย โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถผลิตน้ำเย็นได้ประมาณ 12°C

จากภาพที่ 71 ยังพบอีกว่า ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุณหภูมิความดันสูงและต่ำ มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.8935$ และ $P\text{-value} = 1.42 \times 10^{-28}$ ดังแสดงในสมการที่ 4.16 และเมื่อนำผลการทดลองของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนของ Chaiyat and Kiatsiriroat (2015) ดังแสดงในรูปที่ 72 มาเปรียบเทียบ พบว่า มีความสัมพันธ์คล้ายกัน ซึ่งแนวโน้มของชุดข้อมูลมีความใกล้เคียงกัน แต่งานวิจัยของ Chaiyat and Kiatsiriroat เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำระบายความร้อนที่เข้าระบบ ซึ่งจะต่างจากงานวิจัยนี้ที่วิเคราะห์อุณหภูมิสารทำงานโดยตรง

$$\text{COP} = -0.8421[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 1.4975 \quad \text{สมการที่ 4.16}$$



ภาพที่ 71 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน



ภาพที่ 72 สัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Nattaporn and Tanongkiat (2015)

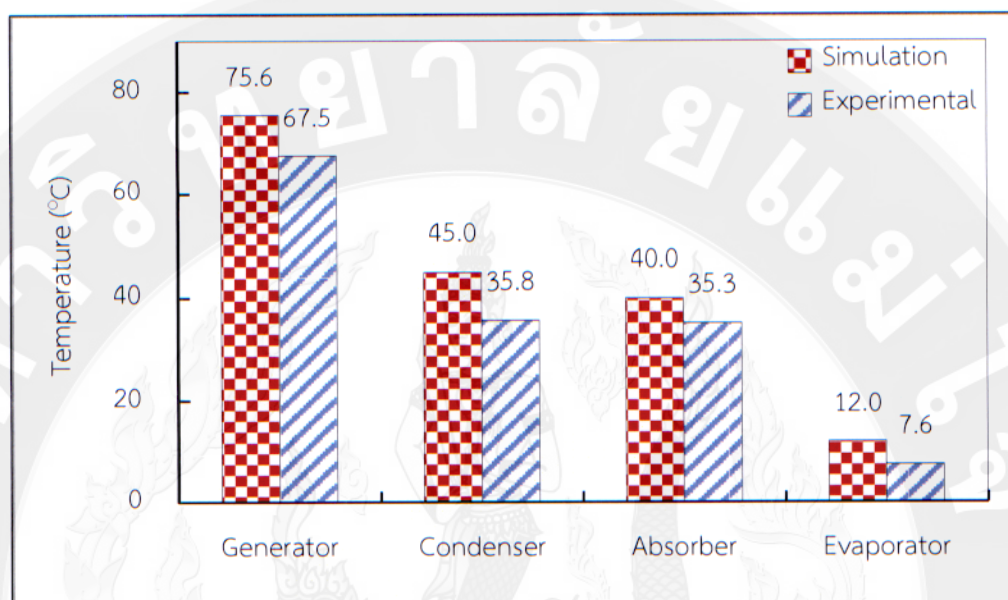
ผลทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR ที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบโดยรวมมีค่าประมาณ 0.5 ซึ่งผลทดสอบที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบในหัวข้อต่อไปเพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อผ่านมา

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบได้มีเงื่อนไข คือ ปริมาณการทำความเย็นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกำหนดให้มีความเท่ากัน โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

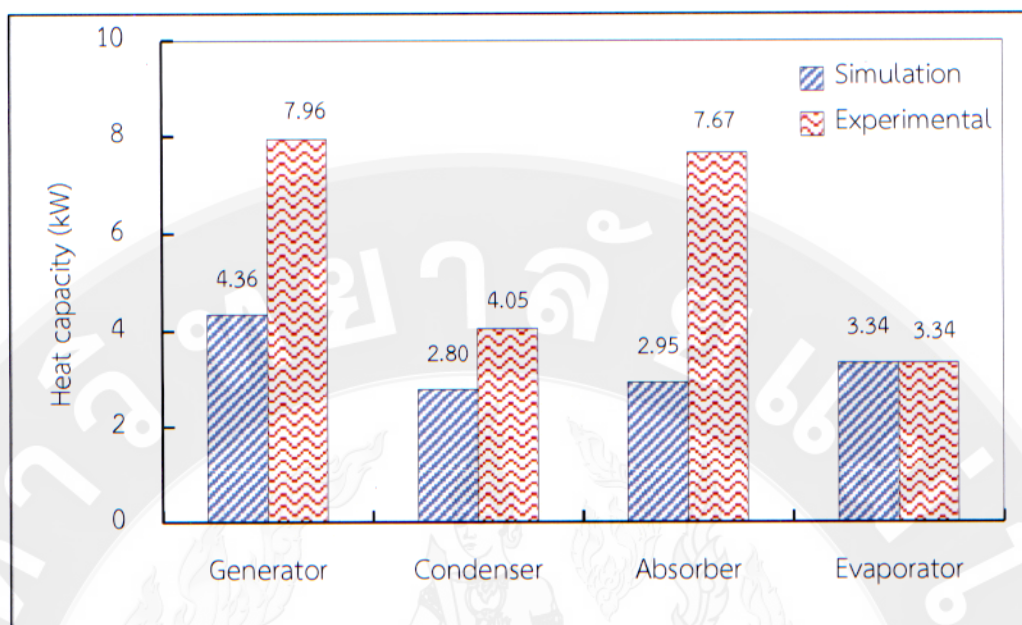
ภาพที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานโดยเฉลี่ยของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิสารทำงานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าการทดสอบ อุณหภูมิสารทำงานในแต่

ละอุปกรณ์ของระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมการทำงานของระบบจริง แสดงว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 73 เปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

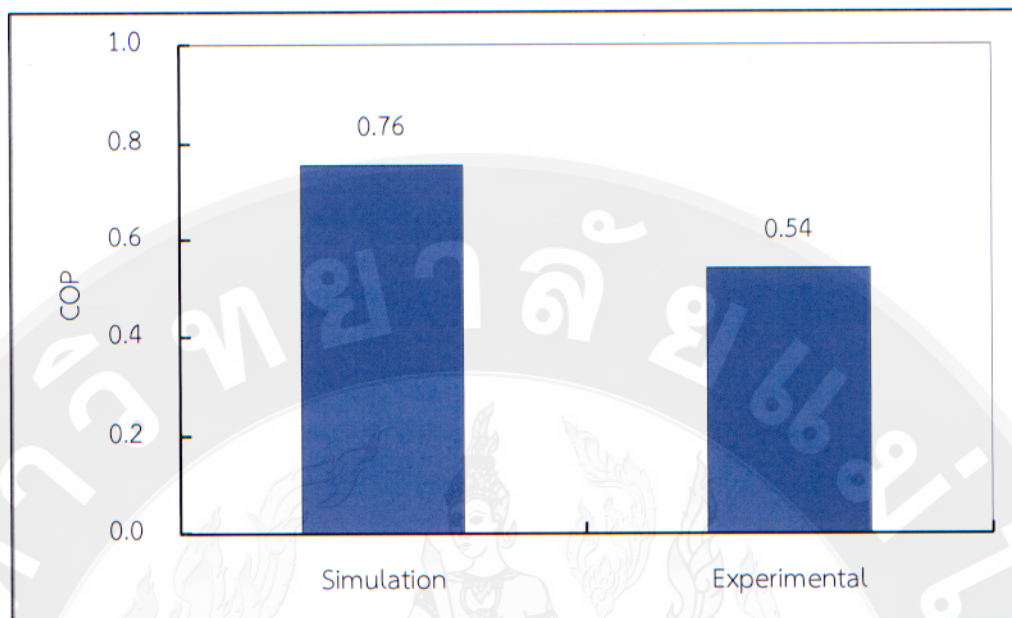
ภาพที่ 74 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้จำลองความสามารถในการทำความเย็นประมาณ 1 TR และในการทดสอบจริงได้ทำการทดสอบระบบทำความเย็นประมาณ 1 TR ดังนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบ พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของการทดสอบมีค่าสูงกว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมการทำงานของระบบจริง แสดงว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้อง โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบ มีประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 13 และในการทดสอบจริงมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของการทดสอบมีค่าประมาณ 0.54 และ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าประมาณ 0.76 ดังแสดงในภาพที่ 75 ต่อไปนี้



ภาพที่ 74 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

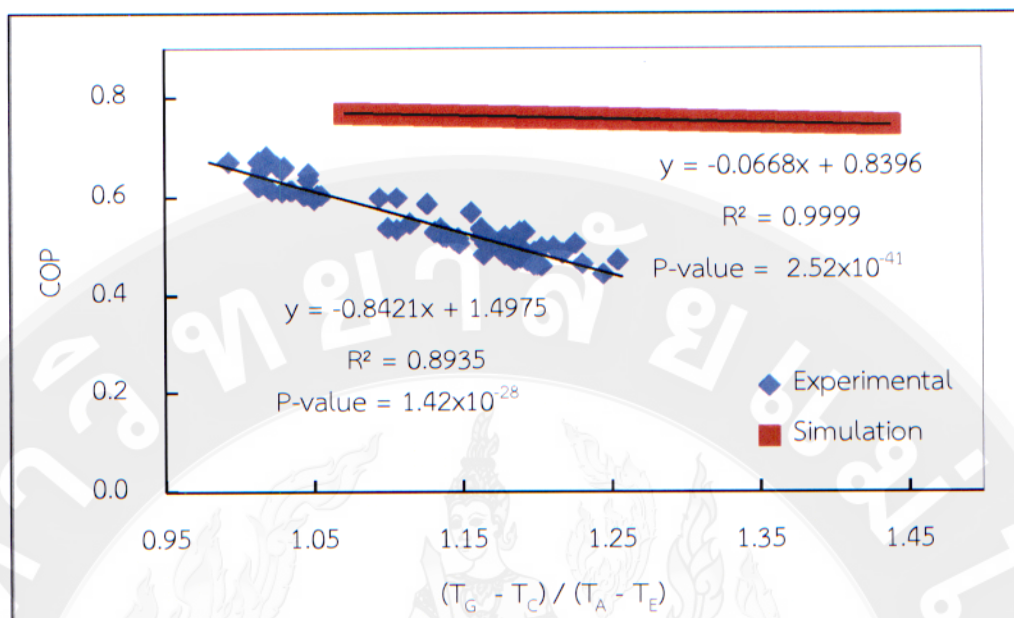
ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

อุปกรณ์	ประสิทธิภาพ (ε) (%)
เจนเนอเรเตอร์	65
เครื่องควบแน่น 1	80
เครื่องระเหย	85
แอบซอร์พเบอร์	70
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	75



ภาพที่ 75 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 76 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำของระบบ $[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลพบว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้องตามพฤติกรรมการทำงานของระบบจริง โดยผลการทดสอบมีค่า $R^2 = 0.8935$ และ $P\text{-value} = 1.42 \times 10^{-28}$ และผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า $R^2 = 0.9999$ และ $P\text{-value} = 2.52 \times 10^{-41}$



ภาพที่ 76 เปรียบเทียบสมการสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเพื่อตรวจสอบสัมพันธภาพของอุณหภูมิที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x ที่มีผลต่อค่า COP ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ผลที่ได้พบว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบมีค่า COP แตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้ในการทดสอบมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุปกรณ์มีค่าค่อนข้างต่ำ และในการทดสอบจริงมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก แต่ยังคงพบว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่มีลักษณะคล้ายกับผลการทดสอบ โดยยังคงความสามารถของการอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบได้ และความสัมพันธ์อุณหภูมิในแกน x มีผลต่อค่า COP ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ของระบบ โดยลดความยุ่งยาก ซับซ้อน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังนั้นความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์การทำงานร่วมกับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในหัวข้อต่อไป

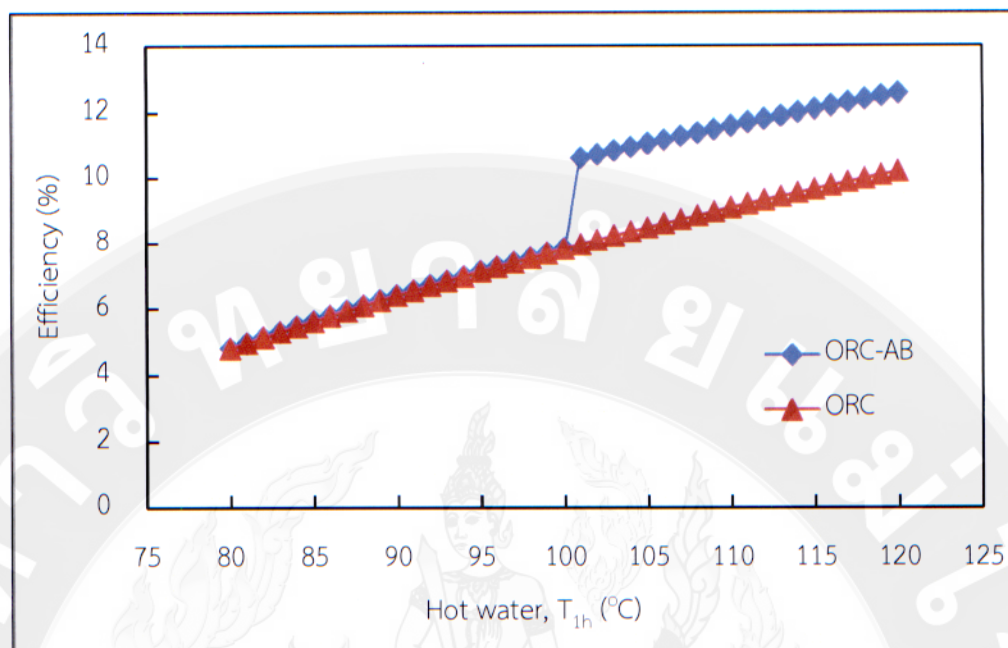
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบหั่วข้อที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ และยังคงความสามารถของการอธิบายการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจึงใช้แบบจำลอง เพื่อทำนายพฤติกรรมการทำงานร่วมของระบบ โดยผลที่ได้มีรายละเอียดต่อไปนี้

ภาพที่ 77 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อน (วัฏจักรแรงดันอินทรีย์) และหลังการปรับปรุง (วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน) โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อน และหลังการปรับปรุงที่หม้อต้ม (T_{in}) ในช่วง $80-120^{\circ}\text{C}$ ผลการศึกษาพบว่า ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% ซึ่งสูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง (ซึ่งไม่นำปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด) โดยอุณหภูมิไ้ระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13°C ในขณะที่ระบบก่อนการปรับปรุงมีอุณหภูมิไ้ระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นประมาณ 32°C ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นการใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งจากความร้อนทิ้งของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เหมาะสมในการทำงานร่วมของทั้งสองระบบ คือ ขนาดประมาณ 65 TR จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ยังพบอีกว่า ระบบทั้งสองสามารถเริ่มทำงานร่วมกันได้ที่อุณหภูมิไ้ร้อนป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่หม้อต้ม (T_{in}) ประมาณ 101°C เพื่อให้ได้อุณหภูมิไ้ร้อนที่ออกจากหม้อต้มของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ไม่ต่ำกว่า 84°C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

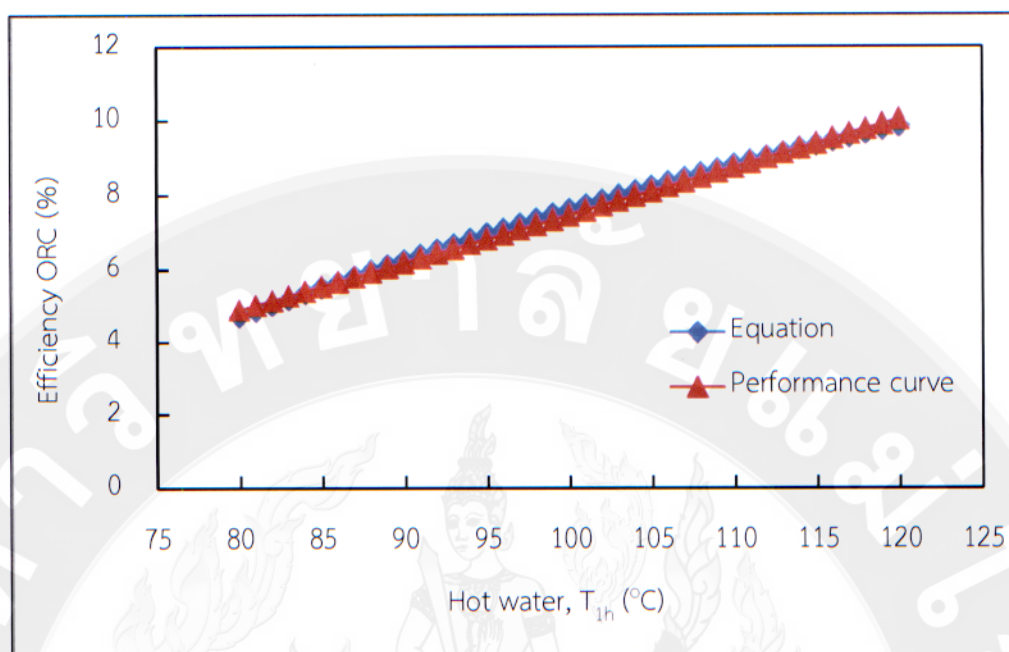


2078022842

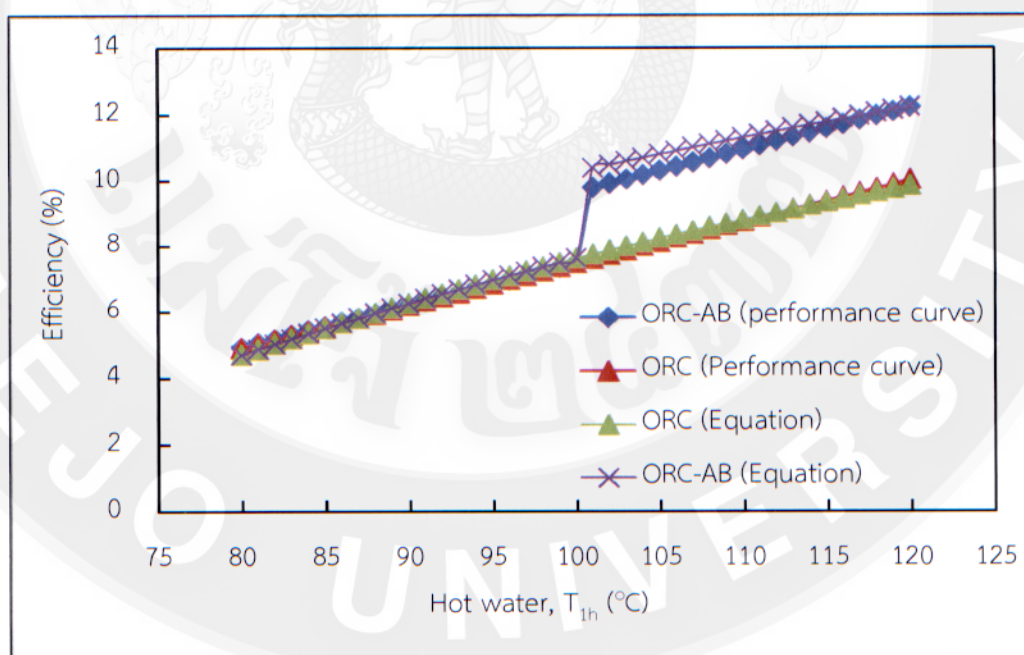


ภาพที่ 77 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

การเปรียบเทียบความถูกต้องของความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงานของระบบ กับผลการคำนวณของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (สมดุลพลังงาน) ของหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลที่ได้พบว่า ผลการเปรียบเทียบมีความใกล้เคียงกัน แต่การใช้สมการสมรรถนะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่า โดยยังคงทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในภาพที่ 78 และภาพที่ 79 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง โดยใช้สมการสมรรถนะคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระบบก่อนและหลังปรับปรุง ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานหลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% ซึ่งสูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง



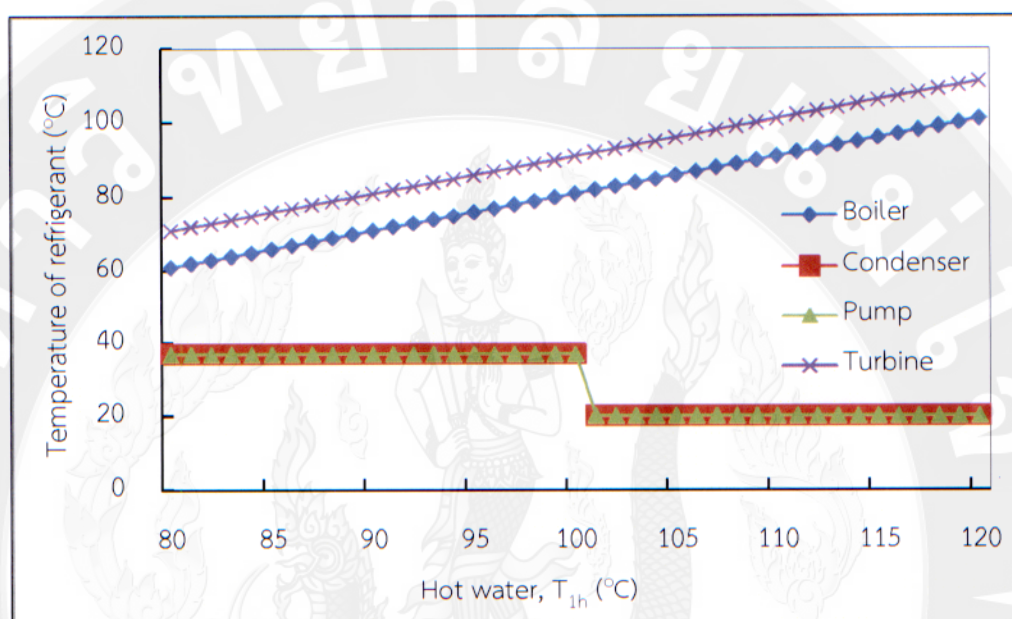
ภาพที่ 78 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ



ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

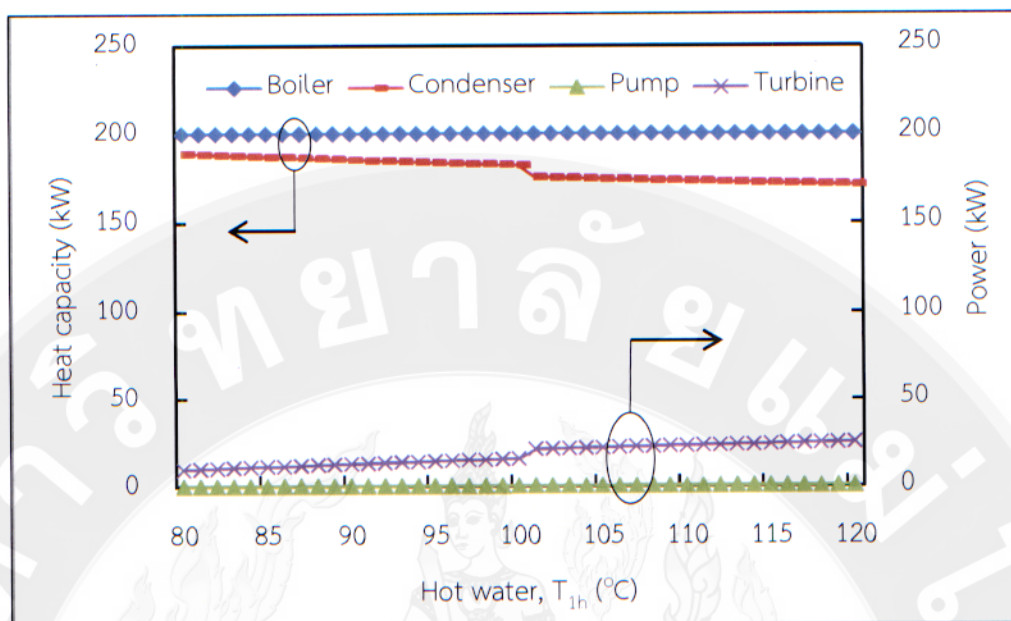
ภาพที่ 80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) ที่มีผลต่ออุณหภูมิสารทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม (T_B) และกังหัน (T_{Tur}) ซึ่งในขณะเดียวกันอุณหภูมิสารทำงาน

ที่เครื่องควบแน่น (T_C) และปั๊มสารทำงาน (T_P) ค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเริ่มทำงาน พบว่า ทำให้อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น และปั๊มสารทำงานของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ลดลง โดยลดลงจากเดิมประมาณ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาเหลือประมาณ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 80 อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ภาพที่ 81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบการทำงานร่วม ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม และกำลังงานที่ปั๊มสารทำงานในระบบค่อนข้างน้อย โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานที่กังหัน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นมีค่าลดลง ในขณะที่กำลังงานที่ผลิตจากกังหันเพิ่มขึ้น และเมื่อระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเริ่มทำงาน พบว่า ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ลดลง ในขณะที่เดียวกันทำให้งานที่ผลิตได้จากกังหันเพิ่มขึ้น

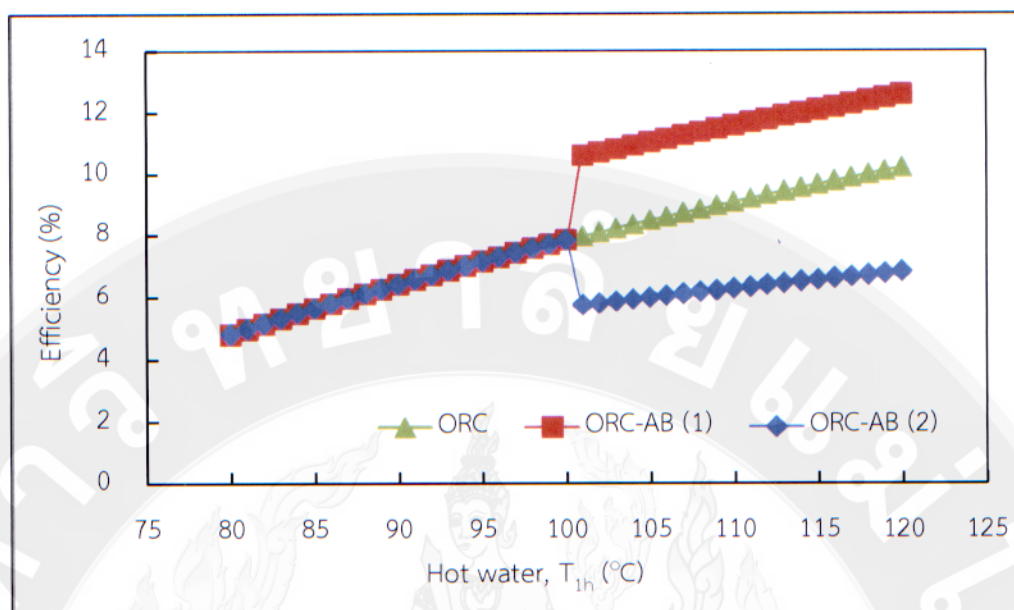


ภาพที่ 81 อัตราการถ่ายเทความร้อนและความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

เมื่อพิจารณาปริมาณความร้อนป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (ORC-AB (2)) โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{\text{ORC-AB (2)}} = [(W_{\text{Tur}} - W_{\text{P}} - W_{\text{SP}}) / (Q_{\text{B}} + Q_{\text{G}})] \quad \text{สมการที่ 4.17}$$

เมื่อนำสมการ 4.17 มาใช้ในการวิเคราะห์การทำงานร่วมของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มาเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ที่ใช้สมการ 2.26 ($\eta_{\text{ORC-AB (1)}} = [(W_{\text{Tur}} - W_{\text{P}} - W_{\text{SP}}) / (Q_{\text{B}})]$) ผลที่ได้พบว่า ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่นำปริมาณความร้อนป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด มีประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง โดยประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 6% ซึ่งต่ำกว่าระบบก่อนปรับปรุง (ORC) ที่มีค่าประมาณ 8% หรือลดลงประมาณ 25% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง ดังแสดงในภาพที่ 82

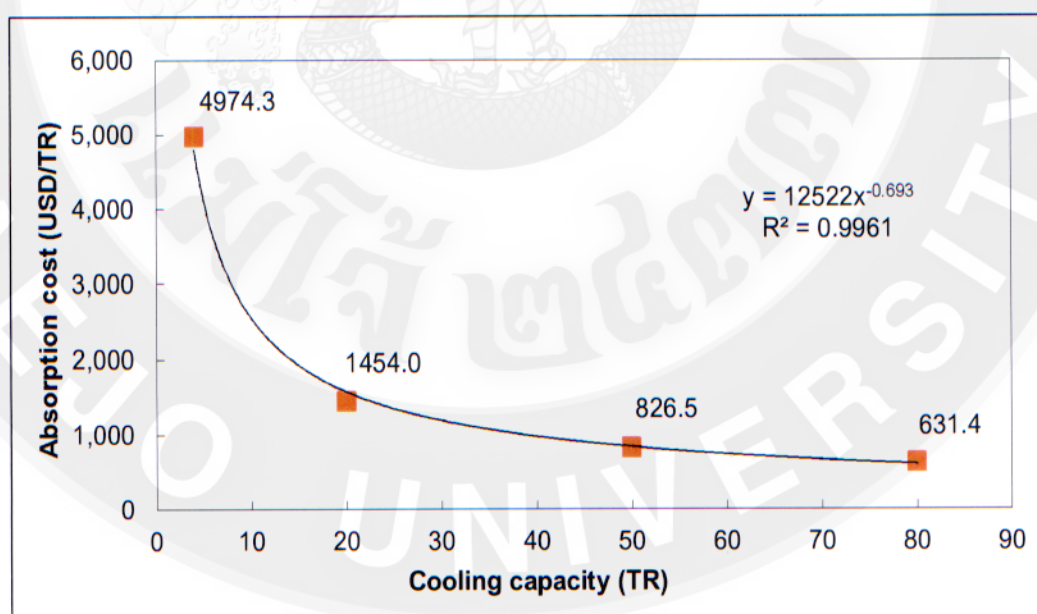


ภาพที่ 82 การเปรียบเทียบแนวทางการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ใช้สารทำงาน R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ ซึ่งอุณหภูมิความร้อนที่ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม (T_{1h}) ในช่วง 80-120 °C พบว่า ระบบรวมของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% (ซึ่งไม่นำปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด) สูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C โดยระบบทั้งสองสามารถเริ่มทำงานร่วมกันได้ที่อุณหภูมิความร้อนที่ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ประมาณ 101 °C และระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นการใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งจากความร้อนทิ้งของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เหมาะสมในการทำงานร่วมของทั้งสองระบบ คือ ขนาดประมาณ 65 TR จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการทำงานร่วมนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในหัวข้อต่อไป

ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ระบบก่อน และหลังการปรับปรุง โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณามูลค่าของเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เนื่องจากพิจารณาแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทั้งสองเป็นความร้อนทิ้ง ผลที่ได้พบว่า ราคาระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีมูลค่าลงทุนเริ่มต้นประมาณ 5,400,000 Baht ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบหลังการปรับปรุงถือว่ามีความคุ้มค่า โดยราคาระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีมูลค่าลงทุนเริ่มต้นประมาณ 7,200,000 Baht แต่เนื่องด้วยระบบหลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าระบบก่อนการปรับปรุง ทำให้ผลการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (LEC) ของระบบหลังการปรับปรุงมีมูลค่าประมาณ 4.22 Baht/kWh ซึ่งต่ำกว่าระบบก่อนการปรับปรุงที่มีมูลค่าประมาณ 4.46 Baht/kWh หรือลดลงประมาณ 5.5% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 14 ซึ่งราคาระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืนคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความสารถในการทำความเย็นที่มีผลต่อราคาของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในภาพที่ 83 ต่อไปนี้



ภาพที่ 83 ราคาระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Nattaporn and Tanongkiat (2015)

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบก่อน และหลังการปรับปรุง

รายละเอียด	ระบบก่อนการปรับปรุง	ระบบหลังการปรับปรุง
กังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ (kW _e)	20	20
ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (TR)	-	65
มูลค่าของกังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ ¹ (Baht)	2,203,750	2,203,750
มูลค่าภาษีการนำเข้าของกังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ (Baht)	661,125	661,125
มูลค่าโรงเรือน (Baht)	2,500,000	2,500,000
มูลค่าของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ² (Baht)	-	1,833,520
มูลค่าดำเนิน และบำรุงรักษาของกังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ (Baht/y)	110,188	110,188
มูลค่าดำเนิน และบำรุงรักษาของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Baht/y)	-	91,676
มูลค่าซากของกังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ (Baht/y)	22,038	22,038
มูลค่าซากของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Baht/y)	-	18,335
กำลังการผลิตไฟฟ้า ³ (kWh/y)	128,000	192,000
ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ⁴ (LEC) (Baht/kWh)	4.46	4.22

หมายเหตุ: ¹ มูลค่าของกังหันไจโรแรงดันอินทรีย์ = (25 kW_e x 2,500 USD/kW_e x 35.26 Baht/USD)

² มูลค่าของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน = 800 USD/TR x 65 TR x 35.26 Baht/USD

³ $W_{Tur} = Q_B \eta_{ORC} t_{cp}$

⁴ ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยคำนวณจากสมการ 2.31



2078022842