# การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน



Xangpheuak Inthavideth

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
วิศวกรรมพลังงานทดแทน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2560

**การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์**
**ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

XANGPHEUAK INTHAVIDETH

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
วิศวกรรมพลังงานทดแทน

**พิจารณาเห็นชอบโดย** **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ)
วันที่ 17 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล)
วันที่ 20 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(อาจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน)
วันที่ 23 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร .....
(อาจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี)
วันที่ 24 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

**บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว** .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 24 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

**ชื่อเรื่อง** การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

**ชื่อผู้เขียน** Mr.Xangpheuak Inthavideth

**ชื่อปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมพลังงานทดแทน

**อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก** รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพโดยรวมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ประมาณ 8% โดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 30 °C และยังพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันต่ำของระบบ ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$) ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยสมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ $h_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) + 1.8222$ สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าประมาณ 0.8 โดยการป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเพื่อไปขับเคลื่อนสารทำงานในระบบอยู่ที่ประมาณ 80-110 °C ซึ่งระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนที่ประมาณ 84 °C ทั้งนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูงและต่ำของสารละลาย น้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ และยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำของระบบ $[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ ในรูปแบบสมการเส้นตรง ซึ่งสมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ และจากผลการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาด 1 TR พบว่า ความสัมพันธ์ของตัวแปรอุณหภูมิในสมการสมรรถนะทั้งสองข้างต้น มีผลโดยตรงต่อ

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งสอง ความสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกด้วย และผลของระบบการทำงานร่วมวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า มีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ระบบร่วมสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประมาณ 101 °C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

| | |
|---|---|
| **Title** | PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED WITH AN ABSORPTION CHILLER |
| **Author** | Mr.xangpheuak inthavideth |
| **Degree** | Master of Engineering in Renewable Energy Engineering |
| **Advisor Committee Chairperson** | Associate Professor Dr.Nattaporn Chaiyat |



## ABSTRACT

This research studies enhancement efficiency of an organic Rankine cycle (ORC) by reducing a working fluid temperature at a condenser. An absorption chiller system is presented to combine with the ORC system, where by the rejected heat of a boiler of the ORC system is recovered and supplied back to an absorption chiller system. In a mathematical model, R-245fa is selected as the ORC working fluid, while in an absorption chiller system a water-lithium bromide solution is used as the working pair. From the study results, it was found that the normal ORC efficiency is around 8% at hot water temperature entering a boiler at between 90-120 °C and the cooling water temperature entering a condenser being 30 °C. Moreover, it was shown that a linear correlation form of the ORC efficiency at the different temperature of the refrigerant temperatures at boiler and condenser, was shown which is $h_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) + 1.8222$. In case of the absorption chiller, it was represented that a coefficient of performance (COP) is around 0.8 at hot water temperature of between 80-110 °C entering the absorption unit. Analyzing the optimal, the minimum temperature for starting the absorption chiller is 84 °C at the strong and weak concentrations of the water-lithium bromide solution at 55 %LiBr and 60 %LiBr, respectively. In addition, it was observed that the performance curve of the absorption chiller is also the linear correlation on the main components temperature in form $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$. From the testing results of a 20 $kW_e$ ORC system and a 1 TR absorption chiller, it also was confirmed that the

temperature correlations in both performance curves directly affected both cycle efficiencies, which also corresponded with the simulation results. When the ORC system is integrated with the absorption chiller, the result was that the ORC efficiency could be increased by 12%, which was an increase 50% compared with the normal ORC system. The optimal temperatures of hot water entering was 101 °C and the cooling water temperature of the modified system was 13 °C, respectively.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกด้าน รวมทั้งการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และ อาจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจโครงร่างวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังเป็นอาจารย์ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนในหลาย ๆ ด้าน

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนแนะนำและตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ "แผนงานพลังงานทดแทนภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน 2558" ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

Xangpheuak Inthavideth

มีนาคม 2560

# สารบัญ

หน้า

หน้า

# สารบัญตาราง

# สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่ หน้า

# สารบัญตารางผนวก

# อักษรย่อ และสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|---|---|---|
| B | ผลตอบแทนต่อปี | Baht/y |
| COP | สัมประสิทธิ์สมรรถนะ | - |
| Cp | ความจุความร้อน | kJ/kg·K |
| EC | อัตรารับซื้อไฟฟ้าต่อหน่วย | Baht/kWh |
| EER | อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน | $kW_{th}/kW_e$ |
| h | เอนทัลปี | kJ/kg |
| Inv | ค่าใช้จ่ายการลงทุนติดตั้งระบบ | Baht |
| LEC | ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย | Baht/kWh |
| $\dot{m}$ | อัตราการไหล | kg/s |
| n | อายุการใช้งานของระบบ | y |
| P | ความดัน | kPa |
| PB | ระยะเวลาคืนทุน | y |
| PEC | ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี | Baht/y |
| q | การถ่ายเทความร้อน | kJ/kg |
| Q | อัตราการถ่ายเทความร้อน | kW |
| r | อัตราส่วนลด | % |
| T | อุณหภูมิ | °C |
| Tvap | อุณหภูมิของไหลสถานะไอ | °C |
| Tliq | อุณหภูมิของไหลสถานะของเหลว | °C |
| t | เวลาการทำงานต่อปี | h/y |
| w | พลังงาน | kJ/kg |
| W | งาน | kW |
| X | ความเข้มข้น | % |
| **ตัวกรีก** | **ความหมาย** | **หน่วย** |
| $\eta$ | ประสิทธิภาพ | % |
| $\varepsilon$ | ประสิทธิผล | |
| $\rho$ | ความหนาแน่น | $kg/m^3$ |

| | | |
|---|---|---|
| $\nu$ | ปริมาตรจำเพาะ | $m^3/kg$ |

| **ตัวห้อย** | **ความหมาย** |
|---|---|
| Act | สภาวะทำงานจริง |
| A | การดูดกลืน |
| AB | ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน |
| B | หม้อต้ม |
| C | เครื่องควบแน่น |
| CW | น้ำเย็น |
| e | ไฟฟ้า |
| E | เครื่องระเหย |
| Exp | เอ็กแพนเดอร์ |
| G | เจนเนอเรเตอร์ |
| Gen | เครื่องกำเนิดไฟฟ้า |
| HW | น้ำร้อน |
| HX | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| H | สูง |
| i | ทางเข้า |
| L | ต่ำ |
| net | สุทธิ |
| o | ทางออก |
| OP | การทำงาน |
| ORC | วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ |
| P | ปั๊มสารทำงาน |
| ref | สารทำงาน |
| S | สารละลาย |
| SP | ปั๊มสารละลาย |
| th | ความร้อน |
| Tur | กังหัน |

# บทที่ 1
# บทนำ

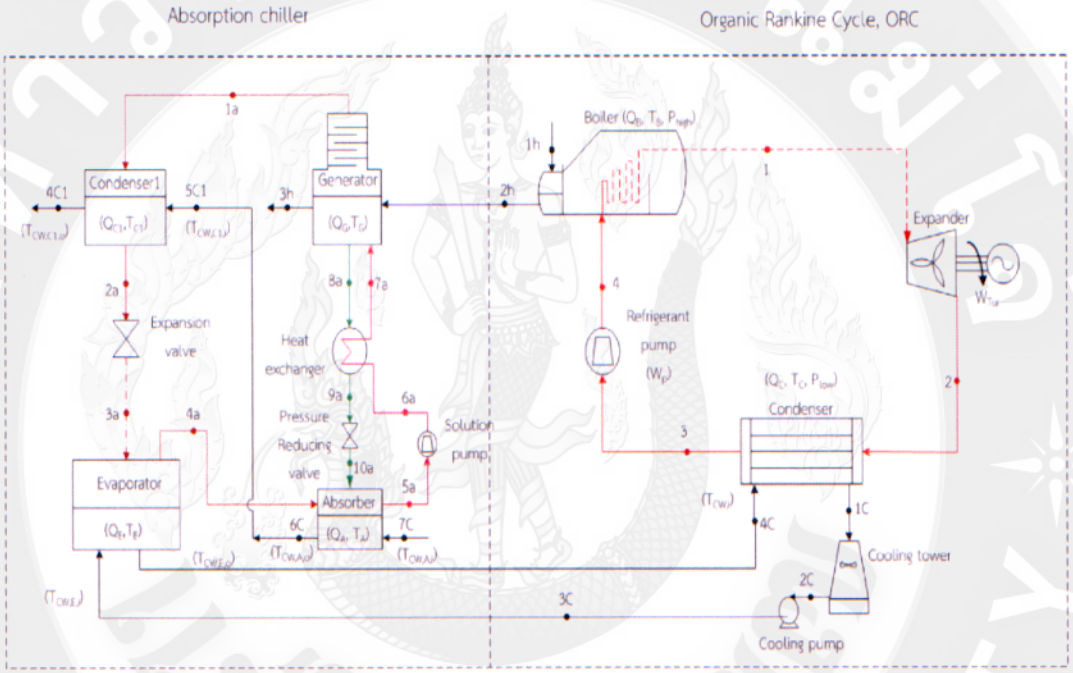
## ความสำคัญและที่มา

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่ง ต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมเพราะจำเป็นต้องใช้พลังงานในทุกขั้นตอนของการดำเนินงาน ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคม เกษตรกรรมและอื่น ๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานที่เห็นได้อย่างชัด คือ อัตราการเพิ่มของประชากร และระดับของการพัฒนา ซึ่งประเทศที่ยิ่งพัฒนามากเท่าไรจะยิ่งมีการบริโภคพลังงานมากขึ้นเป็นเท่าตัว แหล่งพลังงานพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวันโดยทั่วไป คือ น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นต้นเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งประเทศไทยเองต้องอาศัยการนำเข้าพลังงานในปริมาณที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2011 นำเข้าพลังงานเพิ่มขึ้น 30.2% เมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ. 2010 ("Energy Policy and Planning Office (EPPO), Annual year final report," 2010) ซึ่งวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นในปี พ.ศ. 2551 ที่ราคา 150 USD/barrel (1 barrel = 119.24 L) กลายเป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญของการกำหนดนโยบายพลังงานของประเทศไทย เพราะราคาพลังงานที่สูงย่อมส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางภาคเศรษฐกิจ เนื่องจากต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ นอกจากนั้น ปัจจัยที่ว่าประเทศไทยยังต้องพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ถือเป็นปัจจัยเสี่ยงในด้านความมั่นคงทางด้านพลังงาน จึงเป็นที่มาของแผนพัฒนาพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 (PDP 2010) ของกระทรวงพลังงาน ที่ต้องการเพิ่มสัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นเป็น 20% ของกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด (เชียนพาณิช, 2011) ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle; ORC) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการนำพลังงานทดแทนมาผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ทดแทนการใช้พลังงานฟอสซิล

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นระบบผลิตไฟฟ้า มีหลักการทำงานคล้ายกับวัฏจักรไอน้ำแรงคิน แต่ใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์แทนน้ำ ซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ (Tchanche et al., 2011; Jing et al., 2012; Noboru et al., 2014) โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถทำงานร่วมกับพลังงานทดแทนได้หลากหลายชนิด ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ (Man et al., 2013) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Alessandro, 2011) พลังงานความร้อนชีวมวล (Ibrahim et al., 2012) พลังงานความร้อนทิ้ง (Duccio et al., 2013; Ye-Qiang et al., 2014) รวมทั้งใช้ในระบบผลิตพลังงานร่วม (Combine Heating and Power, CHP) เป็นต้น เนื่องจากวัฏจักรแรงคิน

สารอินทรีย์เป็นการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีค่าค่อนข้างต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อผลิตน้ำเย็นช่วยหอระบายความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบร่วมดังกล่าว ดังแสดงแผนภาพการทำงานร่วมในภาพที่ 1




**ภาพที่ 1** แผนภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบการทำความเย็นดูดกลืน

## วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นดูดกลืน
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น
3. เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นดูดกลืน

## ขอบเขตการศึกษา

1. วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดการผลิตไฟฟ้า 20 $kW_e$
2. สารทำงานที่ใช้ในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ R-245fa
3. ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีขนาดการทำความเย็นไม่ต่ำกว่า 1 TR (3.517 kW)
4. สารทำงานที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ($H_2O$-LiBr)

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

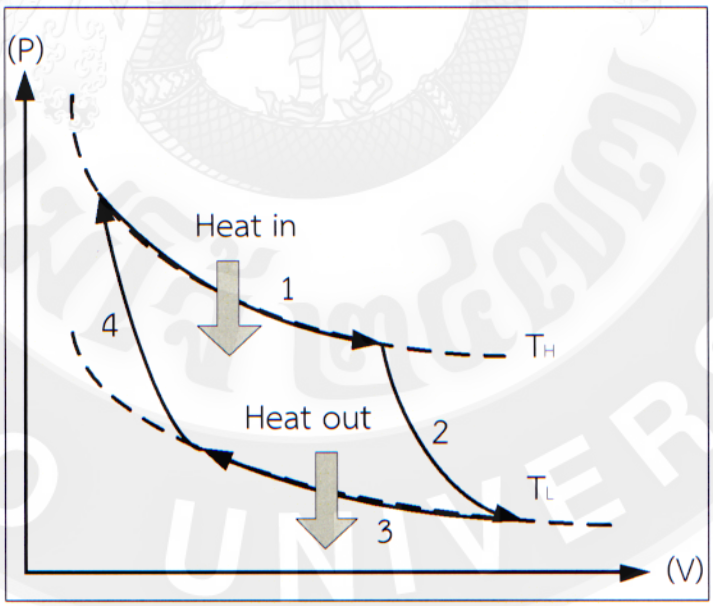
1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์
2. แนวทางการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มาใช้ประโยชน์
3. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์
4. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
5. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

# บทที่ 2
# หลักการและทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบไปด้วย 5 ทฤษฎี คือ วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC) ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ ดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

## วัฏจักรคาร์โนต์

ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของระบบด้านความร้อน สามารถอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพคาร์โนต์ ($\eta_{Carnot}$) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางอุดมคติไม่สามารถทำได้จริงในทางปฏิบัติ โดยวัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรย้อนกลับได้แสดงดังในภาพที่ 2 ซึ่งวัฏจักรคาร์โนต์ประกอบไปด้วย 4 กระบวนการดังต่อไปนี้ (นัฐพร, 2559)




**ภาพที่ 2** วัฏจักรคาร์โนต์

กระบวนการที่ 1 Isentropic expansion หรือการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิสูง ($T_H$) เนื่องจากรับพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ

กระบวนการที่ 2 Adiabatic expansion หรือการขยายตัวโดยไม่มีการสูญเสียความร้อน และมีการลดอุณหภูมิจากของไหลที่อุณหภูมิสูงเป็นของไหลที่อุณหภูมิต่ำ ($T_L$) โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำการจ่ายงานออกจากระบบอีกด้วย

กระบวนการที่ 3 Isentropic compression หรือการอัดตัวที่อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิต่ำ ($T_L$) และมีการปล่อยพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม

กระบวนการที่ 4 Adiabatic compression หรือการอัดแบบไม่มีการสูญเสีย โดยอาศัยงานจากภายนอกป้อนให้แก่ของไหลเข้าสู่ระบบ

จากกระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงประสิทธิภาพคาร์โนต์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{Carnot} = [(T_H - T_L) / T_H] \qquad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดย $T_H$ คือ ของไหลอุณหภูมิสูง (K)

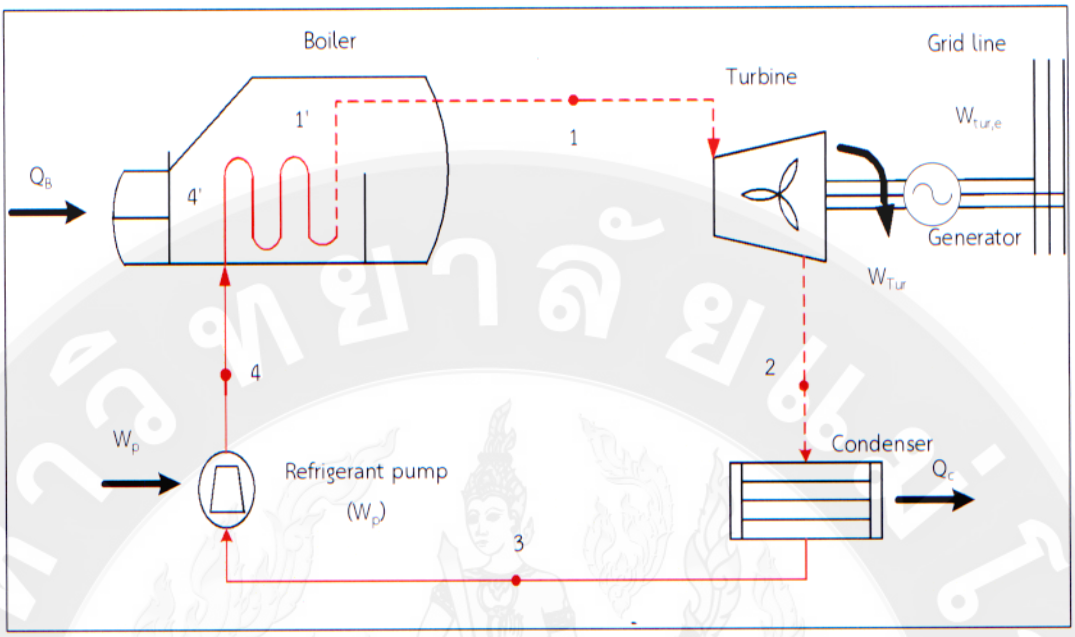
$T_L$ คือ ของไหลอุณหภูมิต่ำ (K)

$\eta_{Carnot}$ คือ ประสิทธิภาพคาร์โนต์ (%)

## วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

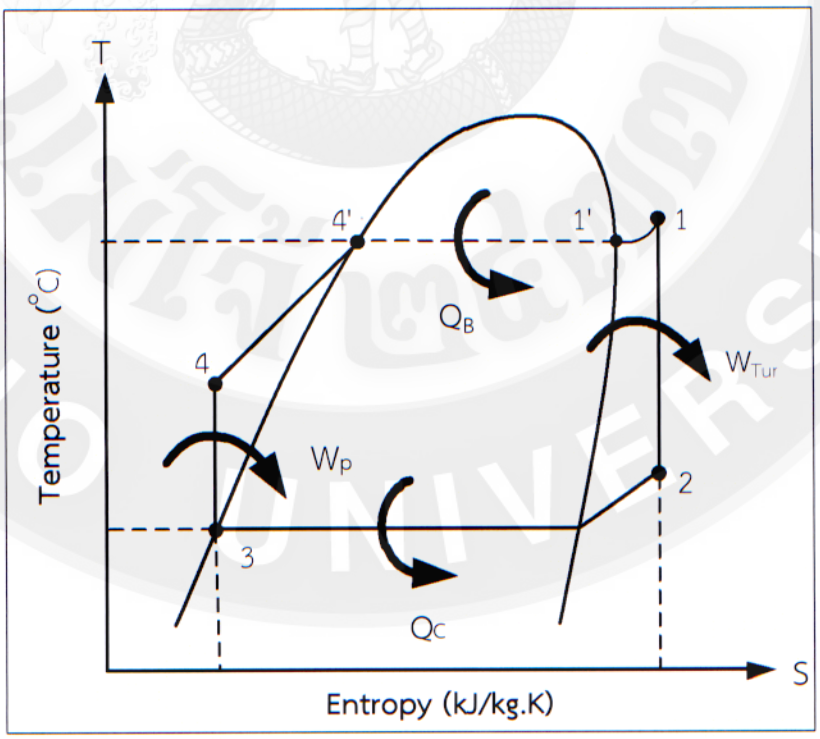
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในวัฏจักรแรงคินทั่วไป ทำให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) (นัฐพร, 2559)

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังแสดงในภาพที่ 3 มีหลักการทำงาน คือ ของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 3) และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิก จนกระทั่งมีความดันสูงขึ้น ($P_H$) (จุดที่ 4) จะเท่ากับความดันภายในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของเหลวจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ ($P_4 = P_{4'}$) จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 4') กลายเป็นไออิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 1') และกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (จุดที่ 1) ในที่สุด ไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการขับเพลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอสารทำงานลดลง ($P_L$) (จุดที่ 2) ที่ทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสถานะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ ($P_2 = P_3$) กลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่จุดที่ 3 อีกครั้ง (นัฐพร, 2559)




**ภาพที่ 3** แผนภาพอย่างง่ายของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4 ดังต่อไปนี้ (กระบวนการทั้งหมดเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ทั้งสิ้น) (นัฐพร, 2559)




**ภาพที่ 4** แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี แสดงกระบวนการต่าง ๆ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการอัดตัวของเหลวแบบไอเซนทรอปิกในปั๊ม

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ในหม้อต้ม

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการขยายตัวของก๊าซแบบไอเซนทรอปิกในกังหัน

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนทิ้งออกจากก๊าซภายใต้ความดันคงที่ในเครื่องควบแน่น

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประกอบไปด้วย 4 อุปกรณ์หลัก คือ ปั๊มสารทำงาน หม้อต้ม กังหัน และเครื่องควบแน่น ดังแสดงในภาพที่ 3 สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์พิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state steady flow, SSSF) ให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของงาน และความร้อนจึงตัดทิ้งได้ พลังงานแต่ละเทอมพิจารณาเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (นัฐพร, 2559)

$$q - w = \Delta h \qquad \text{สมการที่ 2.2}$$

หม้อต้ม (กระบวนการ 4-1) ไม่มีงาน $w = 0$ จะได้ว่า

$$q_B = h_1 - h_4 \qquad \text{สมการที่ 2.3}$$

กังหัน (กระบวนการ 1-2) ไม่มีความร้อน $q = 0$ จะได้ว่า

$$w_{Tur} = h_1 - h_2 \qquad \text{สมการที่ 2.4}$$

เครื่องควบแน่น (กระบวนการ 2-3) ไม่มีงาน $w = 0$ และคิด $q_C$ มีเครื่องหมายบวก จะได้ว่า

$$q_C = h_2 - h_3 \qquad \text{สมการที่ 2.5}$$

ปั๊ม (กระบวนการ 3-4) ไม่มีความร้อน $q = 0$ และคิด $w_P$ มีเครื่องหมายบวก จะได้ว่า

$$w_P = h_4 - h_3 \qquad \text{สมการที่ 2.6}$$

พิจารณาปั๊มในสภาพของเหลว โดยสมมติให้ของของเหลวนั้นเป็นของไหลยุบตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) กล่าวคือ ของไหลจะมีความหนาแน่นหรือปริมาตรจำเพาะเป็นค่าคงที่ตลอดกระบวนการ ซึ่งจะทำให้ของไหลมีพลังงานคงตัว ($\Delta h$) ดังนั้นในกรณีการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิก จะได้ว่า

$$h_4 - h_3 = \nu_3 (P_H - P_L) \qquad \text{สมการที่ 2.7}$$

ดังนั้น

$$w_P = \nu_3 (P_H - P_L) \qquad \text{สมการที่ 2.8}$$

โดยที่ $P_H$ ความดันสูง (kPa)

$P_L$ ความดันต่ำ (kPa)

$\nu_3$ ปริมาตรจำเพาะของของไหลในสภาพของเหลวอิ่มตัวที่จุดที่ 3 ($m^3/kg$)

งานสุทธิของวัฏจักร จะได้ว่า

$w_{net} = q_H - q_D = w_{Tur} - w_P$ สมการที่ 2.9

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญ ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักร ดังนี้

ความสารมารถในการให้ความร้อนสุทธิแก่หม้อต้ม

$Q_{HW} = \dot{m}_{HW}\, Cp_{bulk,HW}\, (T_{HW,i} - T_{HW,o})$ สมการที่ 2.10

พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่หม้อต้ม จะได้ว่า

$Q_B = \varepsilon_{HX}\, Q_{HW}$ สมการที่ 2.11

$Q_B = \dot{m}_{ref}\, (h_1 - h_4)$ สมการที่ 2.12

โดยที่ $\varepsilon_{HX}$ ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness)

พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น จะได้ว่า

$Q_C = \dot{m}_{ref}\, (h_2 - h_3)$ สมการที่ 2.13

พิจารณางานที่ป้อนให้แก่ปั๊มสารทำงาน จะได้ว่า

$W_P = \dot{m}_{ref}\, w_P$ สมการที่ 2.14

$W_P = [(\dot{m}_{ref}\, \nu_3)(P_H - P_L)] / \eta_{s,P}$ สมการที่ 2.15

พิจารณางานที่ได้จากกังหัน จะได้ว่า

$W_{Tur,th} = \dot{m}_{ref}\, (h_1 - h_2)$ สมการที่ 2.16

$W_{Tur,e} = [\dot{m}_{ref}\, (h_1 - h_2)]\, \eta_{Gen}$ สมการที่ 2.17

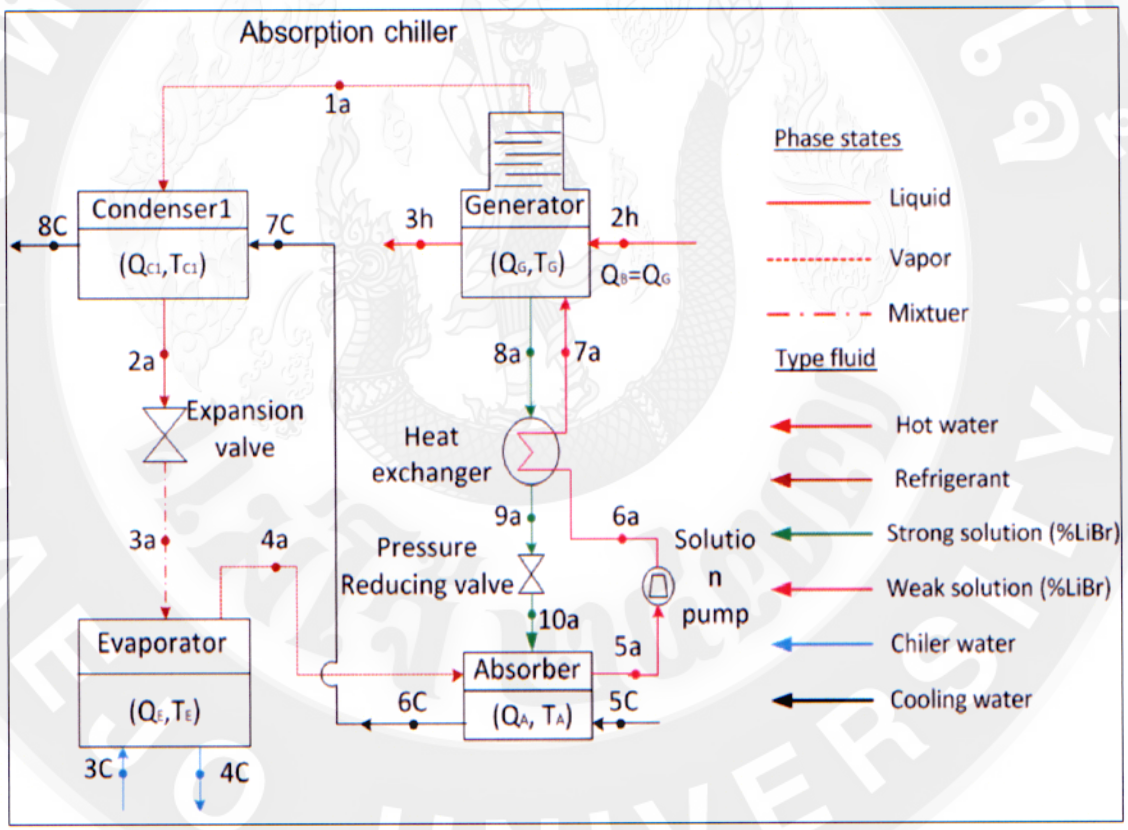
ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จะได้ว่า

$\eta_{ORC} = [(W_{Tur,e} - W_P) / Q_B]$ สมการที่ 2.18

## ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในภาพที่ 5 มีหลักการทำงานดังนี้ คือ ความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์ (Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลาย จากนั้นสารทำงาน (Absorbate) ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสารดูดกลืน (Absorbent) จะระเหยกลายเป็นไอและไหลออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสารทำงานที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1a) ไหลไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser1) แล้วควบแน่นกลายเป็นสารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2a) ที่ความดันสูง จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เพื่อลดความดัน (จุดที่ 3a) เข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งสารทำงานจะรับความร้อนจากของไหล ซึ่งมากพอที่จะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหยกลายเป็นไอ (จุดที่ 4a) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์

(Absorber) สารทำงานสถานะไอดังกล่าวจะถูกดูดกลืนร่วมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ทำให้กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง (จุดที่ 5a) สารละลายดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเจนเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลาย (Solution pump) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 6a) และภายในเจนเนอเรเตอร์เนื่องจากสารทำงานในสารละลายระเหยกลายเป็นไอ ทำให้เหลือสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายังแอบซอร์พเบอร์ (จุดที่ 8a) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลายความเข้มข้นสูงในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 9a) จากนั้นจะผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure reducing valve) (จุดที่ 10a) แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป (นัฐพร, 2559)




**ภาพที่ 5** แผนภาพของระบบการทำความเย็นดูดกลืน

จากภาพที่ 2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยใช้กฎสมดุลพลังงาน กฎสมดุลมวล และกฎสมดุลความเข้มข้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (นัฐพร, 2559)

เจนเนอเรเตอร์

$$Q_G = \dot{m}_{1a} h_{1a} + \dot{m}_{8a} h_{8a} - \dot{m}_{7a} h_{7a}$$ สมการที่ 2.19

เครื่องควบแน่น

$Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a} h_{1a} - \dot{m}_{2a} h_{2a}$ สมการที่ 2.20

เครื่องระเหย

$Q_E = \dot{m}_{4a} h_{4a} - \dot{m}_{3a} h_{3a}$ สมการที่ 2.21

แอบซอร์พเบอร์

$Q_A = \dot{m}_{4a} h_{4a} + \dot{m}_{10a} h_{10a} - \dot{m}_{5a} h_{5a}$ สมการที่ 2.22

ปั๊มสารละลาย

$W_{SP} = [(P_{H,AB} - P_{L,AB})(\nu_{5a} \dot{m}_{5a})] / \eta_{s,SP}$ สมการที่ 2.23.

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$Q_{HX} = \dot{m}_{8a} Cp_{8a} (T_{8a} - T_{9a}) = \dot{m}_{6a} Cp_{6a} (T_{7a} - T_{6a})$ สมการที่ 2.24

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP)

$COP_{AB,Cooling} = Q_E / (Q_G + W_{SP})$ สมการที่ 2.25

**การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

จากภาพที่ 1 การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เนื่องจากการทำงานร่วมของสองระบบนี้ใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นความร้อนที่ออกจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยงานวิจัยนี้พิจารณาแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทั้งสองเป็นความร้อนทิ้ง เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่นำความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (ไม่คิดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มที่หอระบายความร้อน) ได้ดังต่อไปนี้

$\eta_{ORC\text{-}AB} = [(W_{Tur} - W_P - W_{SP}) / Q_B]$ สมการที่ 2.26

**การวิเคราะห์การถดถอย**

การวิเคราะห์การถดถอย คือ วิธีการหาความสัมพันธ์ (Correlation) ของตัวแปร 2 ค่า ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบพลังงานทดแทนใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากการตรวจวัด ทั้งนี้การวิเคราะห์การถดถอยมี 2 รูปแบบ ดังนี้ (นัฐพร, 2559)

แบบที่ 1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) คือ การหาความสัมพันธ์ตัวแปรอิสระในแกน x และตัวแปรตามในแกน y เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง

ของกระบวนการนั้น ๆ การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ไม่ได้แสดงว่า สมการที่ได้นั้นมีความถูกต้องหรือมีสหสัมพันธ์ที่ดี ซึ่งการประเมินความเบี่ยงเบนค่าที่ได้จากสมการนิยมใช้สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือบางครั้งเรียกว่า สัมประสทธิ์สหสัมพันธ์ ตัวย่อ คือ $R^2$ โดยที่การเบี่ยงเบนของค่ามี $R^2$ ถือว่ามีความสัมพันธ์กันแบบถดถอยเชื่อถือได้ ซึ่งงานวิจัยต่าง ๆ จะยอมรับค่าดังกล่าวในช่วง $0.8 \leq R^2 \leq 1$

แบบที่ 2 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) คือ การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรตามแกน y ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระหลายค่า เช่น $x_1$ $x_2$ และ k เป็นต้น รวมทั้งต้องหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple correlation coefficient) เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของสมการด้วยเช่นกัน

## การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาว่างานวิจัยที่ทำการวิจัยนี้มีความเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการลงทุนด้านการเงินมากน้อยเพียงใด โดยทั่วไปเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ คือ ระยะเวลาคืนทุน (นัฐพร, 2559)

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PB) คือ ระยะเวลาผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับเงินลงทุน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (นัฐพร, 2559)

$$PB = Inv / B \qquad \text{สมการที่ 2.27}$$

$$B = EC\, W_{ORC,net}\, t_{OP} \qquad \text{สมการที่ 2.28}$$

เมื่อ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (y)

Inv คือ ค่าใช้จ่ายการลงทุนติดตั้งระบบ (Baht)

B คือ ผลมูลค่าตอบแทนต่อปี (Baht/y)

EC คือ อัตรารับซื้อไฟฟ้า (Electricity Cost, EC) (Baht/kWh)

$W_{ORC,net}$ คือ ปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($kW_e$)

$t_{OP}$ คือ เวลาการทำงานต่อปี (h/y)

สำหรับการใช้พลังงานทดแทนผลิตพลังงานไฟฟ้าสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ การใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Production Electricity Cost, PEC) ที่ขึ้นกับชนิดพลังงานทดแทน ดังนั้นในการคิดค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโครงการ ต้องนำค่าใช้จ่ายในการผลิตไปพิจารณาด้วย ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ (นัฐพร, 2559)

$$B = (EC\ W_{ORC,net}\ t_{OP}) - PEC$$ สมการที่ 2.29

$$B = EC\ W_{ORC,net} - (\dot{C}_{Fuel}\ M_{Fuel}\ t_{OP}) - \dot{Z}_{OM}$$ สมการที่ 2.30

เมื่อ $\dot{C}_{Fuel}$ คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Baht/Unit)

$M_{Fuel}$ คือ ปริมาณเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Unit/y)

$\dot{Z}_{OM}$ คือ อัตราค่าการบำรุงรักษาของระบบต่อปี (Baht/y)

อนึ่งการวิเคราะห์อัตรารับซื้อไฟฟ้าในบางครั้ง อาจใช้ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized Electricity Cost, LEC) แทน ซึ่งสามารถประเมินได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าอัตราส่วนลด (Discount rate, r) ค่าดอกเบี้ยของธนาคาร ค่าเงินเฟ้อ และค่าเสียโอกาส เป็นต้น ซึ่งค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจะมีค่าไม่เท่ากันกับอัตรารับซื้อไฟฟ้าเสมอ เนื่องจากการประเมินค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ไม่พิจารณาระยะเวลาการรับซื้อไฟฟ้าหรือระยะเวลาการคืนทุน ดังนั้นต้องใช้สมการต่อไปนี้ในการวิเคราะห์ค่าต้นทุกการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

$$LEC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^{n} \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{W_{ORC,net}\, t_{OP}}{(1+r)^t}}$$ สมการที่ 2.31

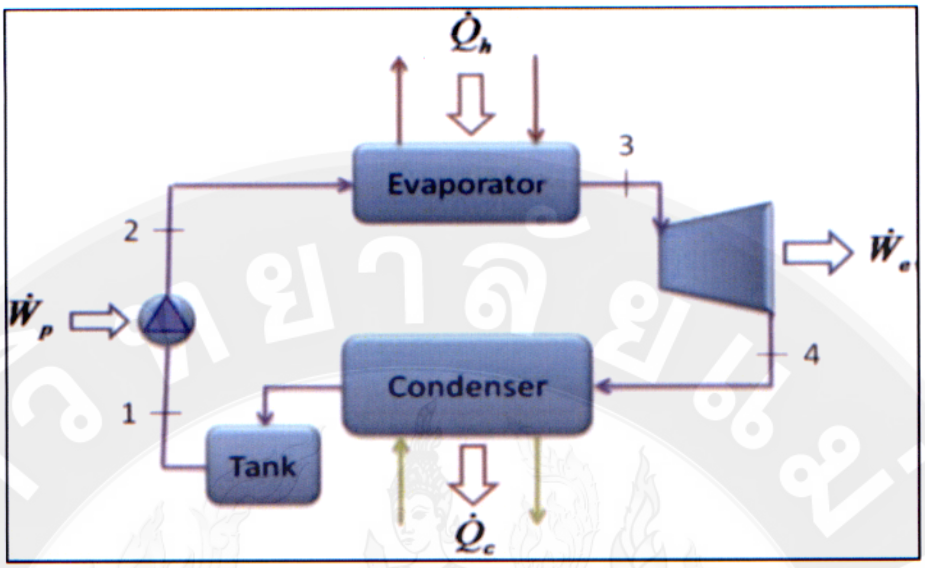
เมื่อ LEC ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized Electricity Cost, LEC) (Baht/kWh)

n อายุการใช้งานของระบบ (y)

r อัตราส่วนลด (%)

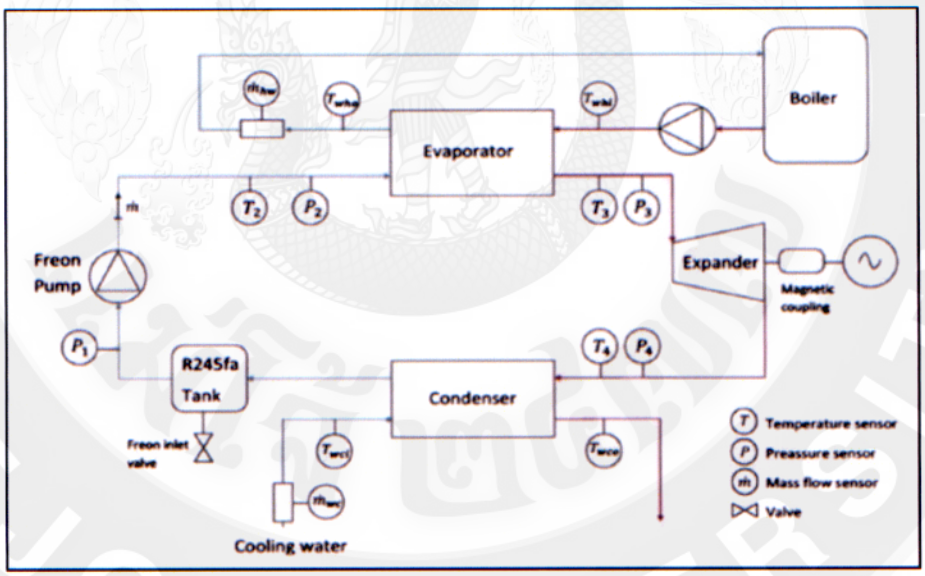
## การตรวจสอบเอกสาร

Galloni et al., (2015) ได้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ที่ใช้สารทำงาน R-245fa สำหรับการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินความเป็นไปได้ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำในช่วง 75-95 °C และอุณหภูมิแหล่งระบายความร้อนในช่วงระหว่าง 20-33 °C สารทำงาน R-245fa ทำงานในช่วงความดัน 6-10 bar ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 1.2 $kW_e$ ที่ปริมาณความร้อนประมาณ 20 kJ/kg และมีประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประมาณ 9% โดยแผนภาพการทำงานของระบบแสดงดังในภาพที่ 6 และรายละเอียดการเก็บข้อมูลในการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็กแสดงดังในภาพที่ 7




**ภาพที่ 6** วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก

ที่มา : Galloni et al., (2015)

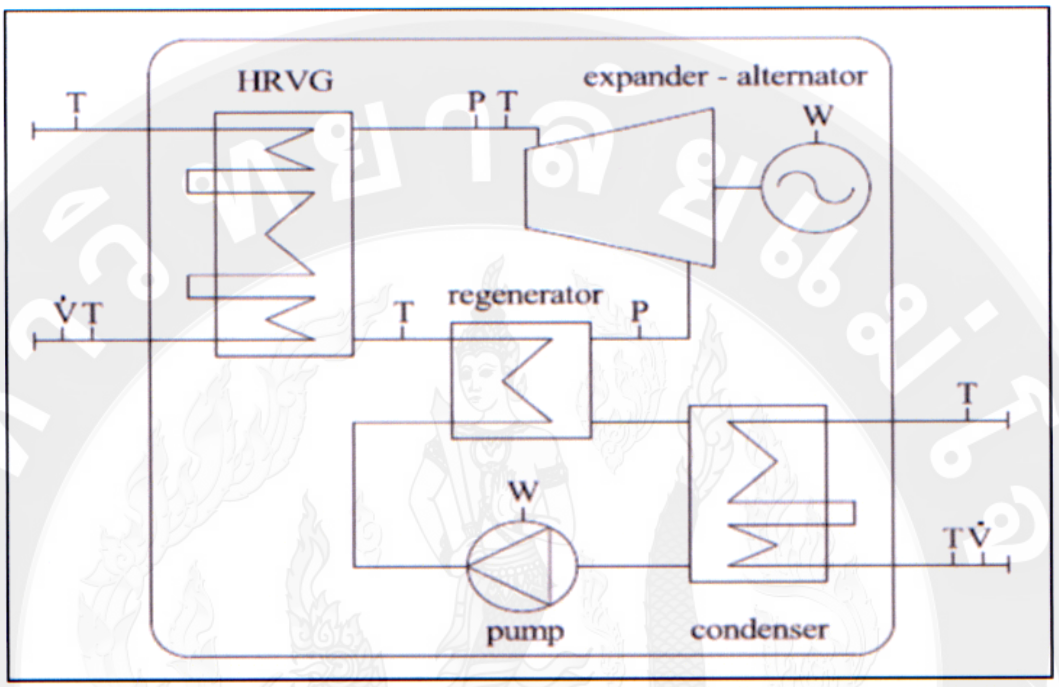



**ภาพที่ 7** รายละเอียดการเก็บข้อมูลของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และตัวแปรหลัก

ที่มา : Galloni et al., (2015)

Peris et al., (2015) ศึกษาการใช้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Combine Heating and Power, CHP) โดยแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน R-245fa รับความร้อนคุณภาพต่ำที่ประมาณ 90-150 °C และระบายความร้อนในช่วง 30 °C ผลการศึกษาที่ได้พบว่า พลังงานไฟฟ้าและความร้อนมีอัตราเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแหล่งความร้อน นอกจากนี้เอ็กแพน

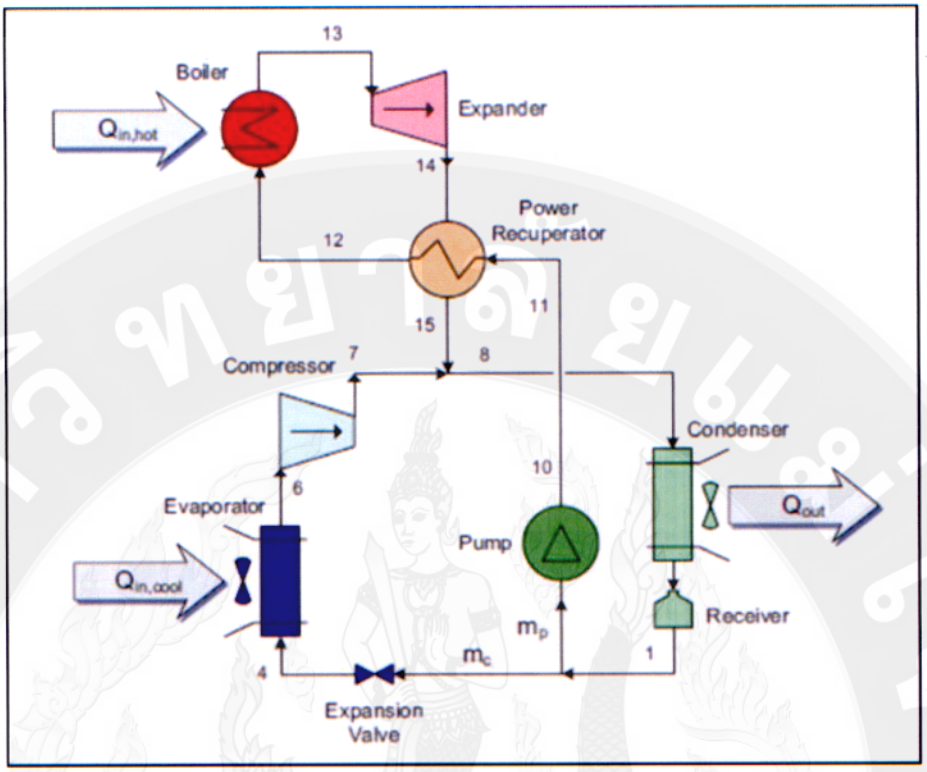
เดอร์ มีประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกประมาณ 70% และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสุทธิของระบบประมาณ 8% โดยแผนภาพการทำงานของระบบแสดงดังในภาพที่ 8




**ภาพที่ 8** รายละเอียดการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก

ที่มา : Peris et al., (2015)

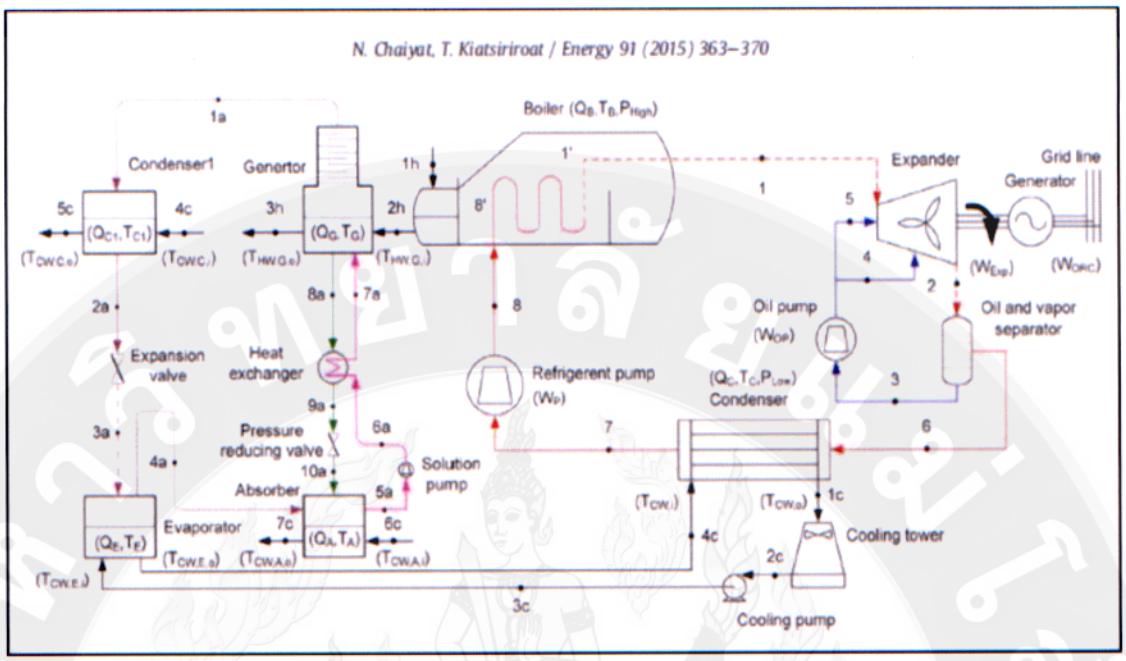
Wang et al., (2011) ศึกษาการออกแบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบอัดไอ (Vapor Compression Cycle; VCC) แสดงดังในภาพที่ 9 โดยแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ความร้อนใต้พิภพ และความร้อนเหลือทิ้ง เป็นต้น เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับการระบายความร้อนด้วยระบบอัดไอ โดยงานวิจัยนี้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานดังนี้ คือ สารทำงานของระบบร่วมใช้ R-245fa อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม 190 °C ระบบอัดไอมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะประมาณ 0.66 อุณหภูมิที่เครื่องระเหย 18 °C ซึ่งผลการศึกษาพบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นเป็น 14.7% จากเดิม 8%




**ภาพที่ 9** แผนภาพการทำงานร่วมของแผนผังขั้นพื้นฐานของวัฏจักร ORC-VCC

ที่มา : Wang et al., (2011)

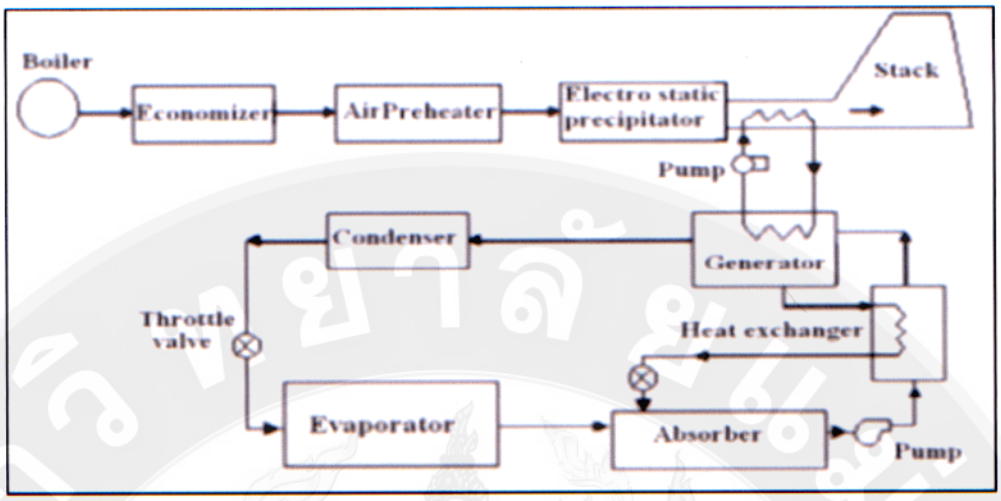
Li et al., (2014) ศึกษาการออกแบบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ สำหรับผลิตความร้อนร่วมกับพลังงานไฟฟ้า (CHP) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการควบแน่นสารทำงาน ที่เหมาะสมสำหรับระบบ ORC-CHP โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์รับความร้อนในช่วง 100-160 °C และใช้สารทำงาน R-123 ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaiyat and Kiatsiriroat (Nattaporn and Tanongkiat, 2015) ที่นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในภาพที่ 10 งานวิจัยนี้ใช้สมการสมรรถนะที่ได้จากผลการทดสอบของระบบทั้งสอง มาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพของระบบร่วม ไม่มีการนำเสนอสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบร่วมดังกล่าว




**ภาพที่ 10** แผนภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Nattaporn and Tanongkiat (2015)

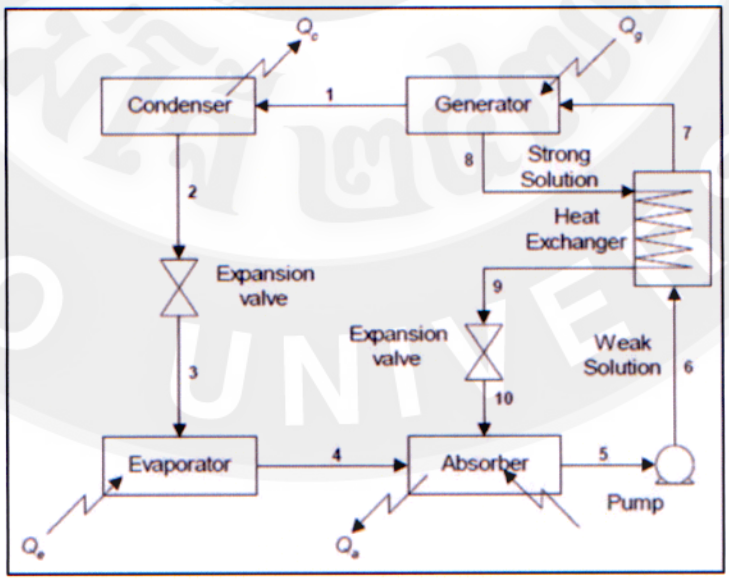
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนประกอบไปด้วย Babu et al., (2015) ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ โดยนำความร้อนจากไอเสียมาเป็นแหล่งความร้อนของระบบทำความเย็น ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การวิเคราะห์หาสภาพการใช้งานที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ผลที่ได้พบว่า ระบบทำความเย็นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งของก๊าซไอเสีย ภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมดังนี้ คือ อุณหภูมิสารทำงานที่คอนเดนเซอร์ และแอบซอร์พเบอร์ ควรมีอุณหภูมิน้อยกว่า 40 °C อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหย มีค่าประมาณ 10 °C และอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ไม่ควรเกิน 85 °C ตามลำดับ




**ภาพที่ 11** แผนภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

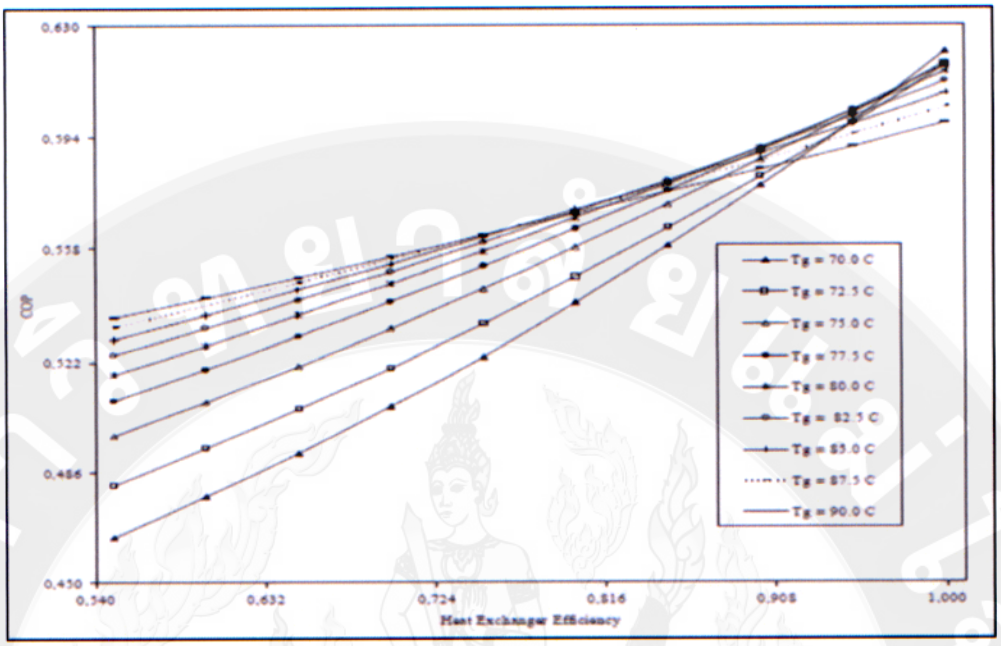
ที่มา : Babu et al., (2015)

Antonio et al., (2000) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่มีแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar absorption refrigeration system) โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังภาพที่ 12 ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 13 และภาพที่ 14 พบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มากกว่าอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์



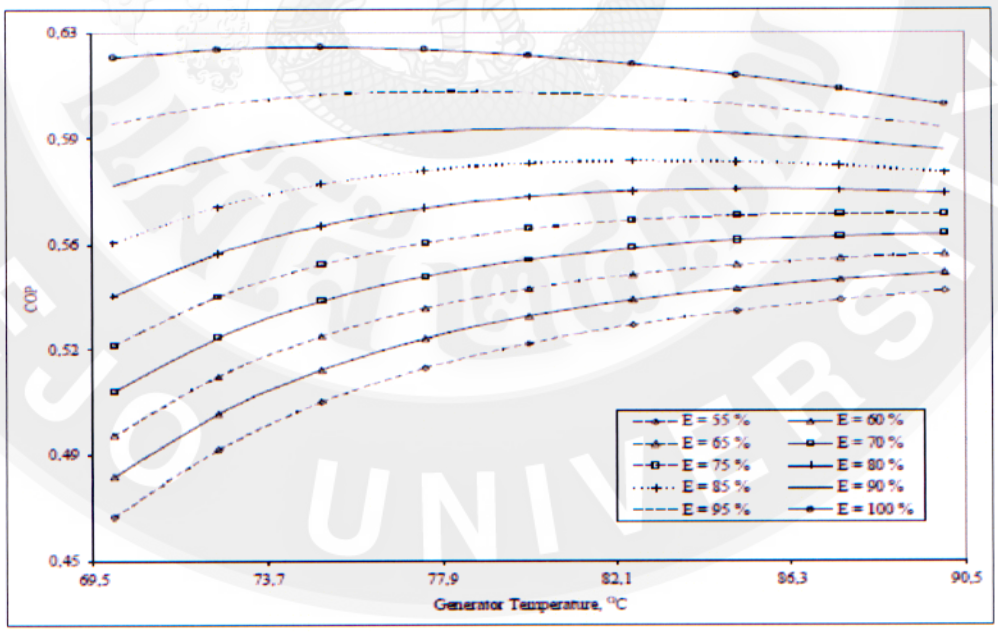

**ภาพที่ 12** แผนภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Antonio et al., (2000)




**ภาพที่ 13** ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์

ที่มา : Antonio et al., (2000)



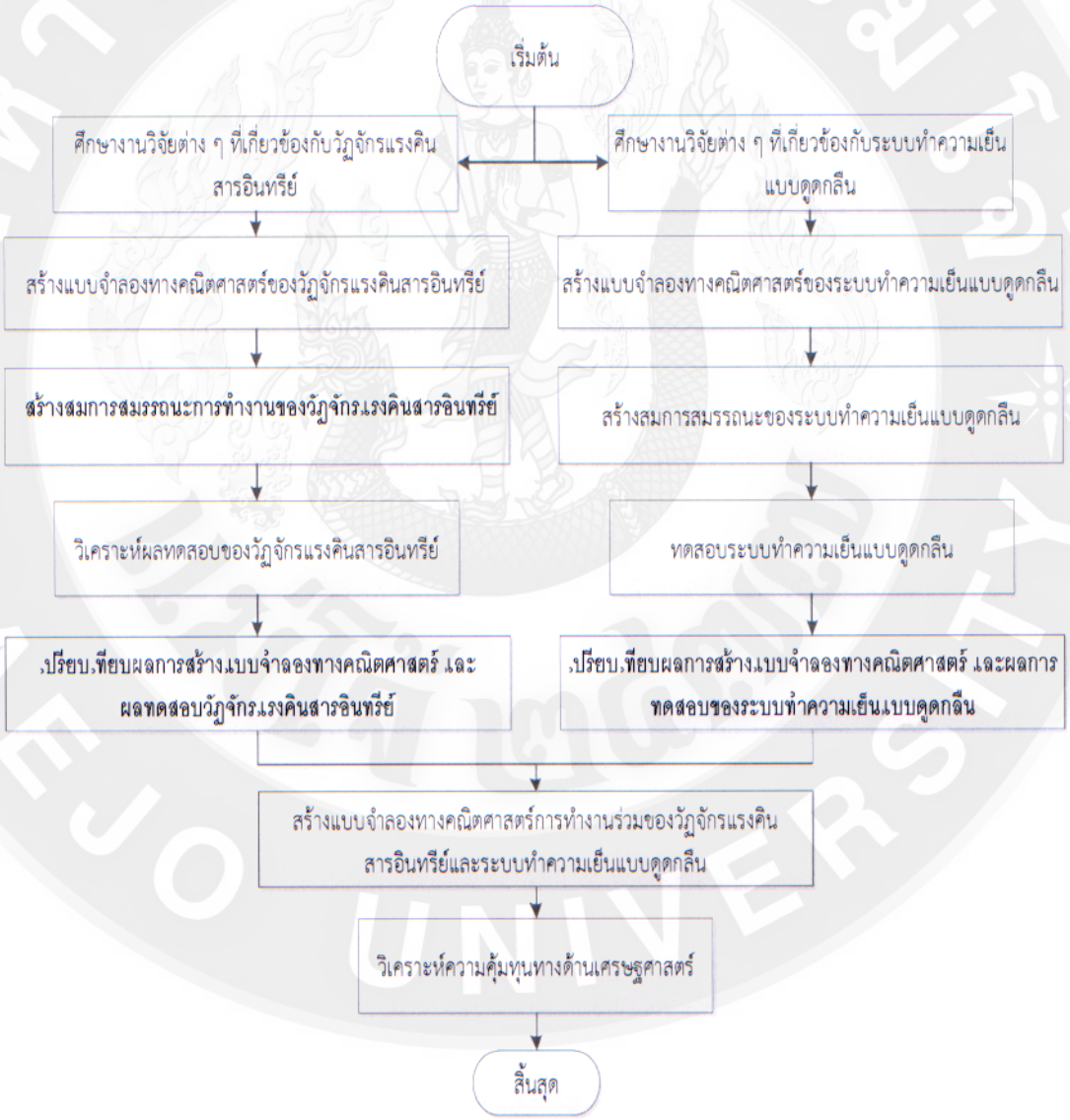

**ภาพที่ 14** ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเปลี่ยนแปลงตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ที่มา : Antonio et al., (2000)

ซึ่งจากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า ยังไม่มีการศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและสมรรถนะทางความร้อน สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อผลิตน้ำเย็นและป้อนให้แก่หอระบายความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

# บทที่ 3
# วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีวิธีการออกแบบการทดสอบ การเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 15 และโดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ ดังกล่าวมีดังต่อไปนี้



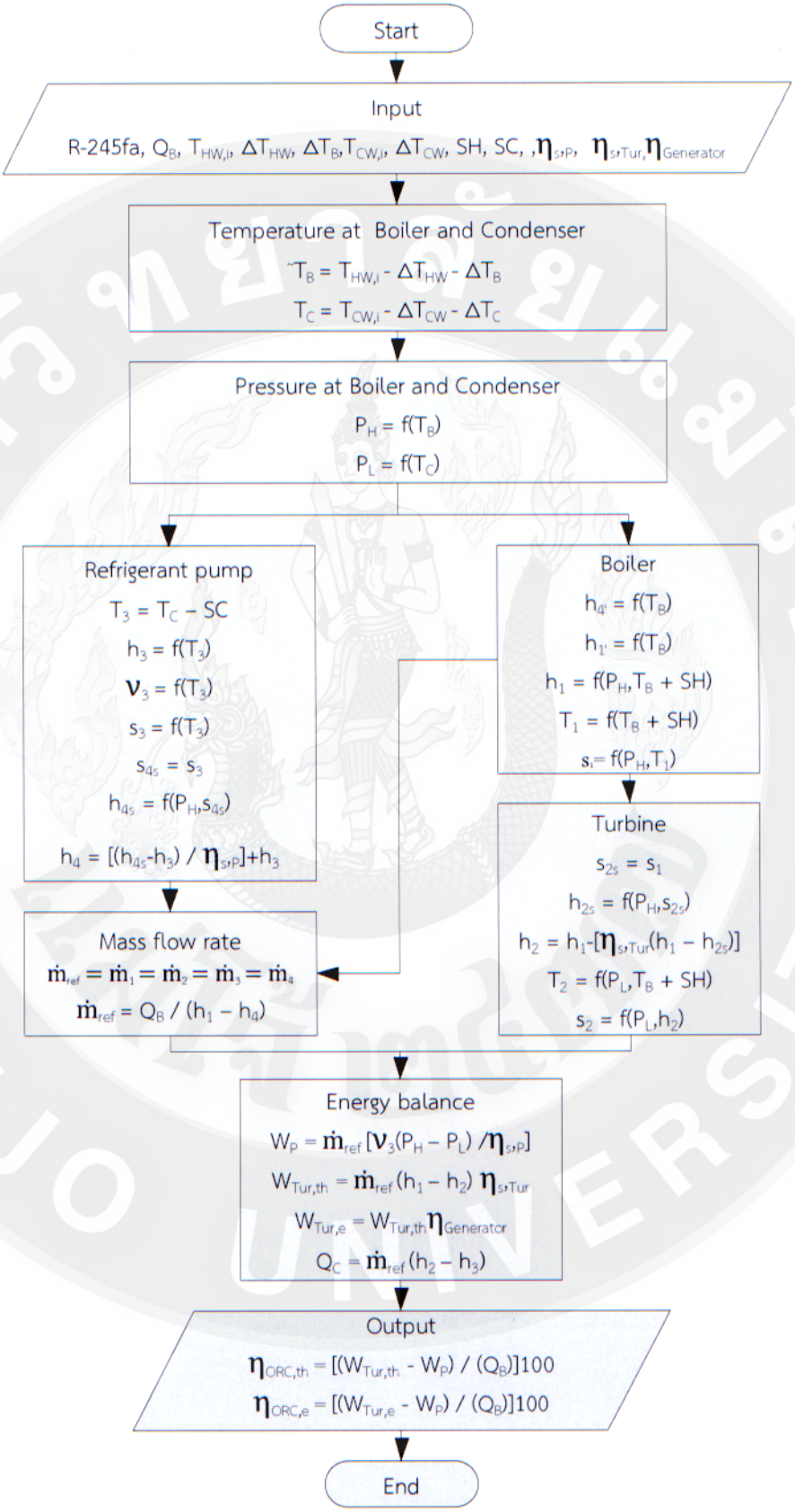

**ภาพที่ 15** แผนผังขั้นตอนวิธีการดำเนินการของงานวิจัย

## การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ เครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบด้านพลังงานทดแทน ที่มีพื้นฐานมาจากกฎพื้นฐานด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบ หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบการทำงานร่วมของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพื่อวิเคราะห์การทำงานในระบบ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบดังต่อไปนี้

1. สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ R-245fa
2. ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม ($Q_B$) เท่ากับ 200 kW
3. อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) เท่ากับ 90-120 °C
4. ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ให้ความร้อนกับสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_{2h} - T_B$) เท่ากับ 3 °C
5. ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกหม้อต้ม ($T_{1h} - T_{2h}$) เท่ากับ 15 °C
6. อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{3C} = T_{4C}$) เท่ากับ 2-32 °C
7. ผลต่างอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนเข้าและออกเครื่องควบแน่น ($T_{1C} - T_{4C}$) เท่ากับ 5 °C
8. ประประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหัน ($\eta_{S,Tur}$) เท่ากับ 85%
9. ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{S,P}$) เท่ากับ 85%
10. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($\eta_{Generator}$) เท่ากับ 85%
11. สมบัติของสารทำงานที่สภาวะต่าง ๆ อ้างอิงจากโปรแกรม Refprop (โดยวิธีการใช้ Function ของโปรแกรมสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Refprop) แสดงในภาคผนวก ก)

ซึ่งนำเอาเงื่อนไขการทำงานข้างต้นนี้ไปวิเคราะห์การทำงานของระบบ เพื่อประเมินหาประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลพลังงาน สมดุลมวล โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก และรายละเอียดการคำนวณในภาพที่ 16 ดังต่อไปนี้




**ภาพที่ 16** แผนผังการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

## การสร้างสมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

สมการสมรรถนะ ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกรูปแบบหนึ่ง โดยการมองระบบเป็นก้อนเดียวหรือเหมารวม เป็นการนำผลที่ได้จากระบบมาสร้างชุดสมการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์สมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิของไหลที่จุดต่าง ๆ ซึ่งนำเอาผลการสร้างแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไหลที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x เพื่อดูพฤติกรรมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่เป็นตัวแปลตามในแกน y โดยการเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไหลที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x อิงตามหลักทฤษฎีของวัฏจักรคาร์โนต์

## การวิเคราะห์ผลทดสอบของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ได้นำผลทดสอบของ Chaiyat (Nattaporn, 2015) ที่ได้ทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ โดยระบบใช้สารทำงาน คือ R-245fa ซึ่งคล้ายกับการจำลองของการสร้างแบบจำลองของงานวิจัยนี้ โดยผลการทดสอบของทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ โดยระบบใช้สารทำงาน คือ R-245fa มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2 และแสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในภาพที่ 17 และ 18 ต่อไปนี้

**ตารางที่ 1** รายละเอียดของผลการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$

| รายละเอียด | หน่วย | สภาวะ 1 | สภาวะ 2 | สภาวะ 3 | สภาวะ 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| สารทำงานในระบบ | - | R-245fa | R-245fa | R-245fa | R-245fa |
| อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) | °C | 116 | 107.8 | 97 | 88.9 |
| อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกหม้อต้ม ($T_{2h}$) | °C | 89.8 | 81 | 75 | 77.8 |
| อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น ($T_{3C}$) | °C | 28 | 28 | 28 | 28 |
| อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกเครื่องควบแน่น ($T_{1C}$) | °C | 35 | 35 | 35 | 35 |
| อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C$) | °C | 37.1 | 37 | 37 | 37 |
| อุณหภูมิสารทำงานที่จุด 1 ($T_1$) | °C | 93.70 | 94.60 | 92.80 | 85.70 |
| อุณหภูมิสารทำงานที่จุด 2 ($T_2$) | °C | 75.00 | 70.60 | 70.60 | 59.50 |
| ความดันด้านสูง ($P_{high}$) | kPa | 1,097.10 | 1,120.00 | 1,074.00 | 811.30 |
| ความดันด้านต่ำ ($P_{low}$) | kPa | 227.40 | 227.40 | 227.00 | 239.30 |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม ($Q_B$) | kW | 243.2 | 248.2 | 203.4 | 188.3 |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ($Q_C$) | kW | 219 | 215.6 | 210.9 | 211 |
| งานที่ป้อนให้แก่ปั๊มสารทำงาน ($W_P$) | $kW_e$ | 1.78 | 1.9 | 1.19 | 1.24 |
| งานที่ป้อนให้แก่ปั๊มน้ำมันหล่อลื่น ($W_{op}$) | $kW_e$ | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| งานที่ได้จากระบบ $W_{ORC}=W_{exp} - W_P - W_{op}$ | $kW_e$ | 21.5 | 21.36 | 16.7 | 9 |

ที่มา : Nattaporn (2015)

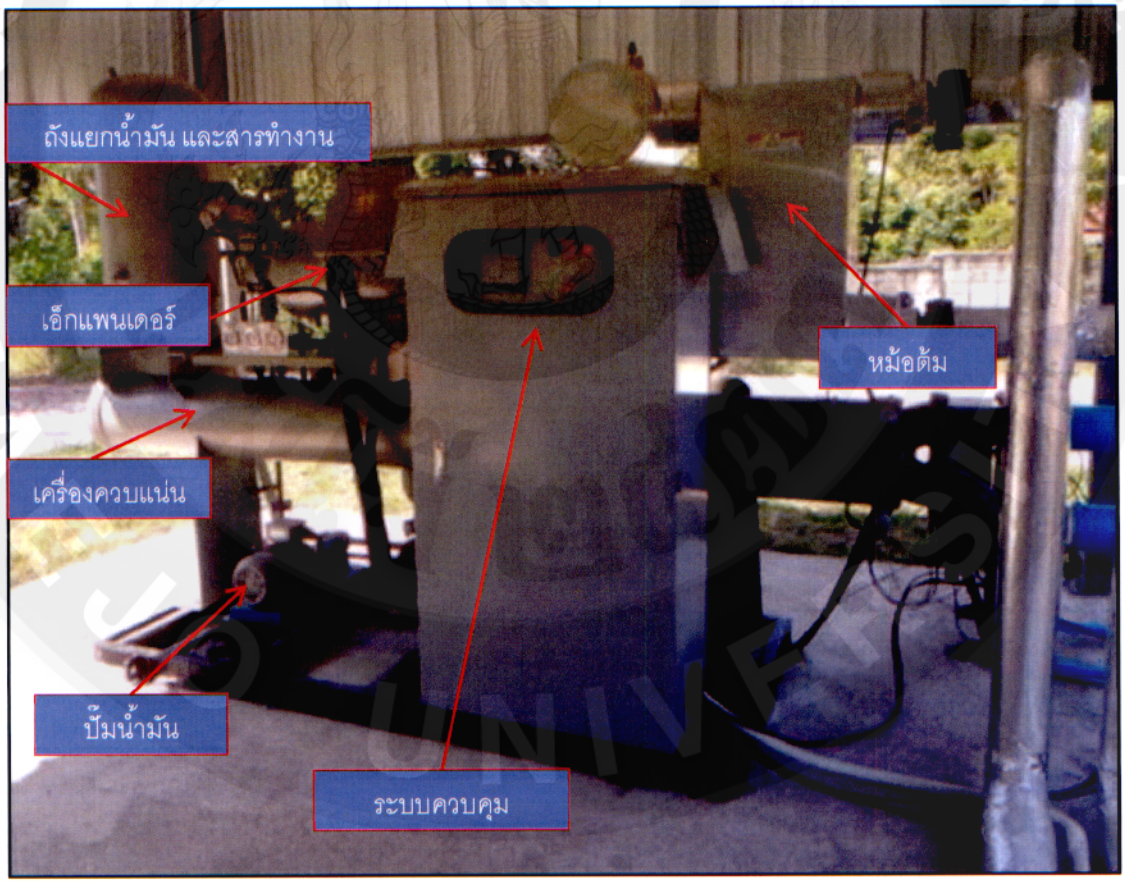
**ตารางที่ 2** รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|---|---|
| หม้อต้ม | SUS 316 plate type heat exchanger |
| เครื่องควบแน่น | Shell and tube heat exchanger<br>Shell : carbon steel 12 inch x 3 m<br>Tube : ¾ inch copper tube |
| กังหัน | Semi-hermetic twin screw type expander<br>Speed 3,000 rpm |
| ถังแยกน้ำมัน และสารทำงาน | Vertical type oil separator with oil tank 18 inch diameter 0.7 m |
| ปั๊มน้ำมัน | Viking heavy duty oil pump GG4195<br>Motor: 3 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz |
| ปั๊มสารทำงาน | Vertical multi-stage centrifugal pump VFD drive<br>Model: BN3-17<br>Motor: 2 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz |
| ปั๊มน้ำร้อน | Ebora model CMB/E 3 T<br>Electrical consumption 2.2 kW<br>Flow rate 100-280 L/m |

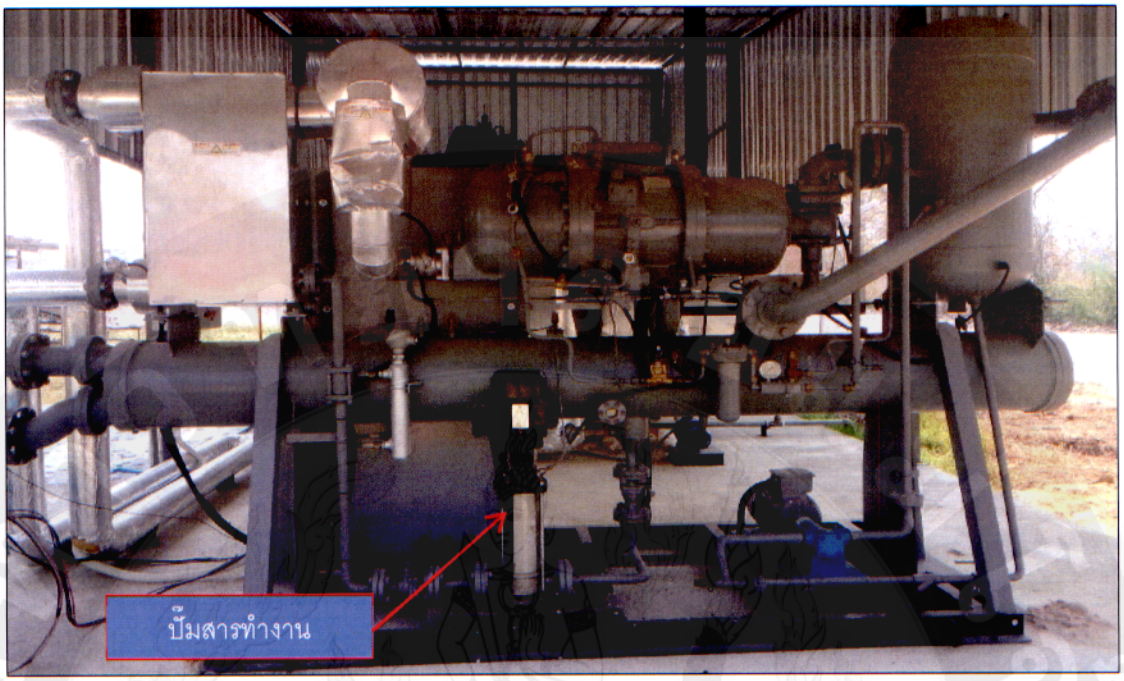
**ตารางที่ 2** (ต่อ)

| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|---|---|
| ระบบควบคุม | PLC programmed controller with 5.7 inch LCD touch screen<br>Human-Machine interface, magnetic switch, main NFB, INT69 power protector, power meter, expander tachometer, pressure sensor, temperature sensor |

ที่มา : Nattaporn (2015)




**ภาพที่ 17** ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (ด้านหน้า)




**ภาพที่ 18** ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (ด้านหลัง)

**การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์**

ซึ่งในขั้นตอนการเปรียบเทียบนี้จะนำผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในหัวข้อที่ผ่านมามาวิเคราะห์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ และเพื่อดูความสัมพันธ์อุณหภูมิที่เป็นตัวแปรในแกน x ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ที่จะนำไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

**การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ เครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบด้านพลังงานทดแทน ที่มีพื้นฐานมาจากกฎพื้นฐานด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบ หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบการทำงานร่วมของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพื่อวิเคราะห์การทำงานในระบบ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบแสดงดังต่อไปนี้

1. คู่สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์
2. ปริมาณความร้อนที่เครื่องเจนเนอเรเตอร์ ($Q_G$) เท่ากับ 200 kW
3. อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ($T_{2h}$) เท่ากับ 80-110 °C
4. ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนกับสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_{3h} - T_G$) เท่ากับ 3 °C
5. ผลต่างของอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_{C,AB} - T_{8C}$) เท่ากับ 3 °C
6. ผลต่างของอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A - T_{6C}$) เท่ากับ 3 °C
7. อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกจากแอบซอร์พเบอร์เท่ากับอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{6C} = T_{7C}$)
8. ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นกับสารทำงานที่เครื่องระเหย ($T_{4C} - T_E$) เท่ากับ 3 °C
9. ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกที่เครื่องควบแน่น แอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหย และเจนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 5 °C
10. ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{S,P}$) เท่ากับ 85%
11. ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($\varepsilon_{HX}$) เท่ากับ 0.85

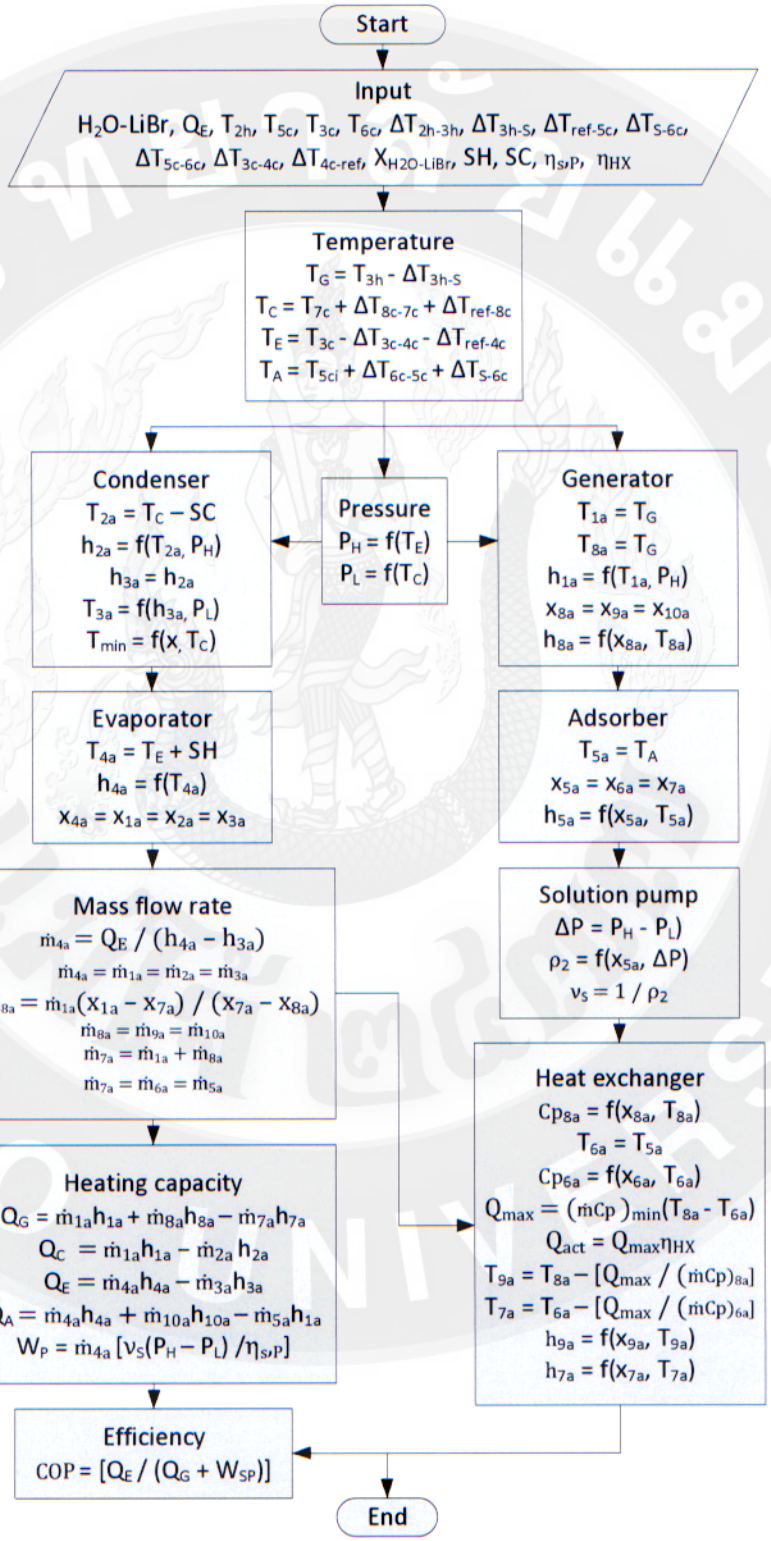
สำหรับสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ไม่มีโปรแกรมรองรับ ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องทำการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมา โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก และในงานวิจัยนี้พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ซึ่งสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ที่ได้พัฒนาอันประกอบไปด้วย 6 ตัวแปร ดังตารางที่ 3 ต่อไปนี้

**ตารางที่ 3** สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์

| ตัวแปร | สมการ | แหล่งที่มา |
|---|---|---|
| 1 เอนทัลปี | $h=\sum_{0}^{4}A_nX^n+T\sum_{0}^{4}B_nX^n+T^2\sum_{0}^{4}C_nX^n$ | ASHRAE (2009) |
| 2 อุณหภูมิสารละลาย | $T=\sum_{0}^{3}B_nX_n+T_{ref}\sum_{0}^{3}A_nX^n$ | ASHRAE (2009) |
| 3 อุณหภูมิสารทำงาน | $T_{ref}=\frac{-2E}{D+(D^2-4E[C-\log(P)])^{0.5}}$<br>$\mathrm{Log}(P) = C + D/T_{ref} + E/T_{ref}^2$ | ASHRAE (2009) |
| 4 ความหนาแน่น | $\rho(T,m) = \rho_0(T)[1 + d_0(T)m + d_1(T)m^{1.5} + d_2(T)m^2]$<br>$m=\frac{(X/100)}{M_S}(1-[X/100])$<br>$d_j(T)=\sum_{i=0}^{4}C_{ji}T^i$ | Khairulin et al., (2006) |
| 5 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ | $Cp = A_0 + A_1X + (B_0 + B_1X)T$ | Kaita (2000) |
| 6 เอนโทรปี | $S=\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}B_{ij}X^jT^i$ | Feuerecker (1993) |

ซึ่งนำเอาเงื่อนไขการทำงานข้างต้นนี้ไปวิเคราะห์การทำงานของระบบ เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลพลังงาน

สมดุลมวล และสมดุลความเข้มข้น โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก และรายละเอียดการคำนวณในภาพที่ 19 ดังต่อไปนี้




**ภาพที่ 19** แผนผังการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

## การสร้างสมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

สมการสมรรถนะ ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกรูปแบบหนึ่ง โดยการมองระบบเป็นก้อนเดียวหรือเหมารวม เป็นการนำผลที่ได้จากระบบมาสร้างชุดสมการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์สมการสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อวิเคราะห์หาสมการสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับอุณหภูมิสารทำงานที่จุดต่าง ๆ ซึ่งนำเอาผลการสร้างแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงบน Microsoft Excel โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสารทำงานที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x เพื่อดูพฤติกรรมที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบที่เป็นตัวแปลตามในแกน y โดยการเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสารทำงานที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x อิงตามหลักทฤษฎีของวัฏจักรคาร์โนต์

## การทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในขั้นตอนการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้ออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีขนาดประมาณ 1 TR (3.517 kW) สารทำงานที่ใช้ในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 4 และภาพโดยรวมของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแสดงดังภาพที่ 20-22 และในการทดสอบระบบให้พลังงานความร้อน คือ หม้อต้มน้ำแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) ดังแสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ในภาพที่ 23 และการให้พลังงานความร้อนที่ป้อนให้แก่หม้อต้มน้ำมีระบบหัวเผาน้ำมันดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 24 ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 4** รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

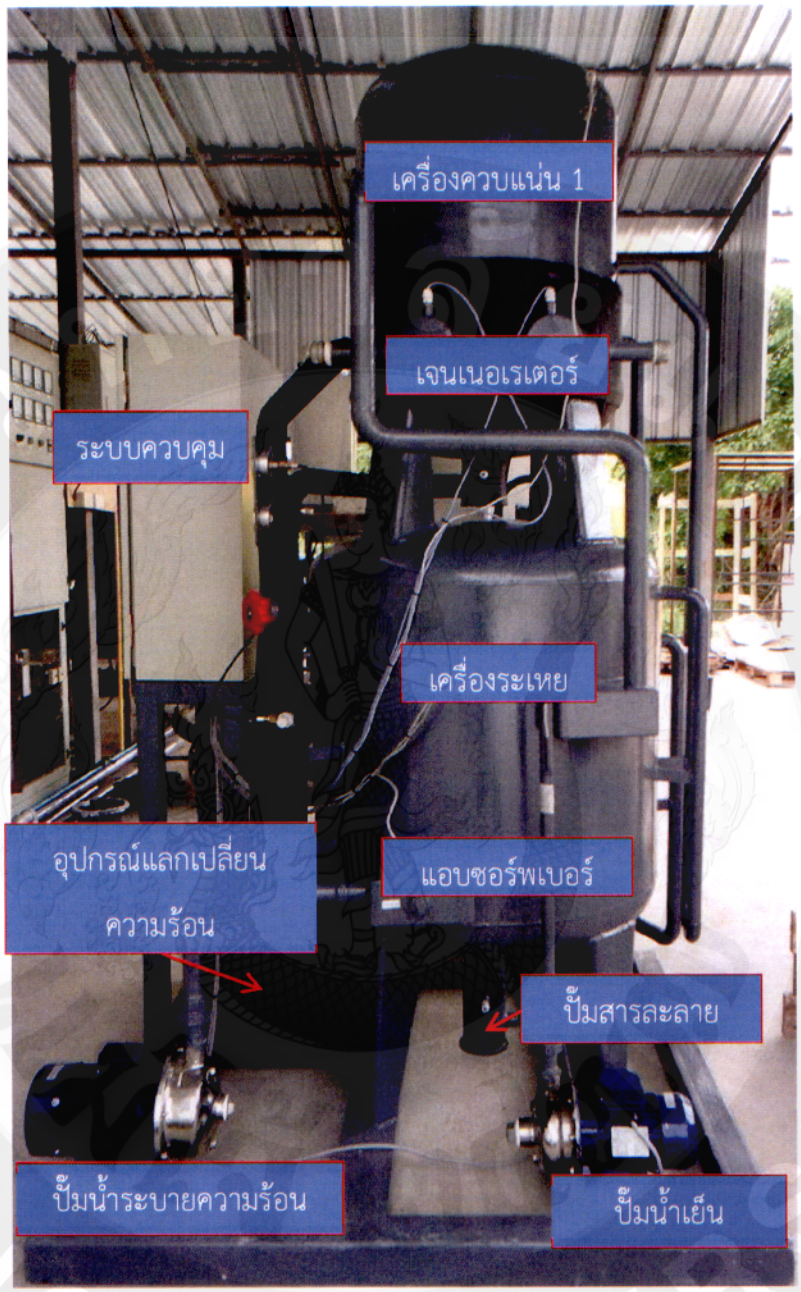
| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|---|---|
| เจนเนอเรเตอร์ | Material: Copper tube<br>Size: 3/8 inch<br>Area: 0.76 $m^2$<br>$Q_G$: 5.25 kW |
| เครื่องควบแน่น 1 | Material: Copper tube<br>Size: 6/8 inch<br>Area: 0.62 $m^2$<br>$Q_C$: 3.71 kW |
| เครื่องระเหย | Material: Copper tube<br>Size: 6/8 inch<br>Area: 0.53 $m^2$<br>$Q_E$: 3.52 kW |
| แอบซอร์พเบอร์ | Material: Copper tube<br>Size: 6/8 inch<br>Area: 2 $m^2$<br>$Q_A$: 5.06 kW |
| อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน | Kaori Brazed Plate heat exchanger<br>Type: K095-28BT-TEMP<br>Max working temperature: 200 °C<br>Max working pressure: 30 bar<br>Test pressure: 43 bar |

**ตารางที่ 4** (ต่อ)

| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|---|---|
| ปั๊มสารละลาย | Flow rate: 1.4 $m^3/h$<br>Head: 12 m<br>Power: 0.37 kW, 220 V, 3 phase, 50 Hz |
| ปั๊มน้ำร้อน 1 | Centrifugal pump<br>Model: SW-61S<br>Power: ½ hp, 1 phase, 220 V, 50 Hz, 2,850 rpm<br>Flow rate: 105-145 L/Min |
| ปั๊มน้ำระบายความร้อน | Centrifugal pump<br>Type: WB70/037<br>Motor: 0.5 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz, 2,900 rpm<br>Flow rate: 1.2-7.2 $m^3/h$ |
| ปั๊มน้ำเย็น | Centrifugal pump<br>Type: WB50/025<br>Motor: 0.33 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz, 2,900 rpm<br>Flow rate: 1.2-4.8 $m^3/h$ |

**ตารางที่ 4** (ต่อ)

| อุปกรณ์ | รายละเอียด |
|---|---|
| ระบบควบคุม | Controller : Hot water temperature, Cooling water temperature, and Chiller water temperature<br>Display : Hot water temperature, Cooling water temperature, and Chiller water temperature |

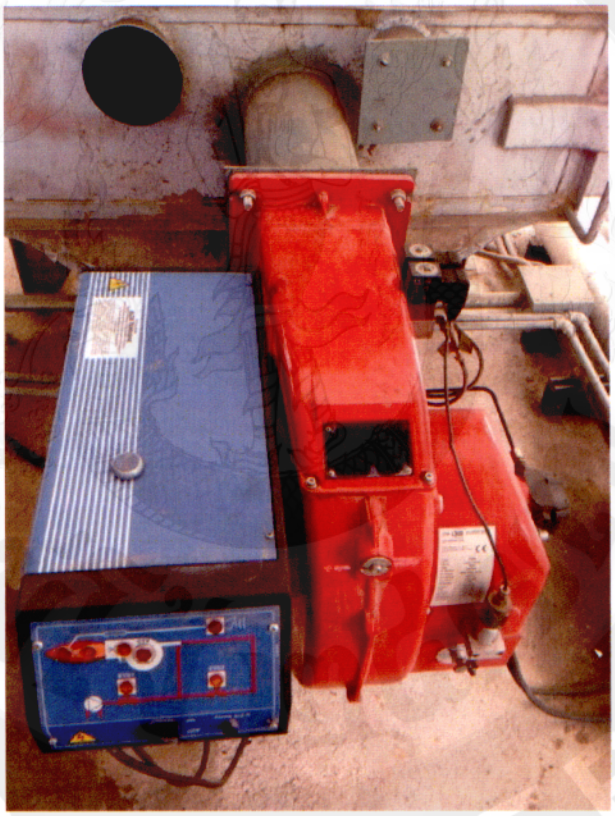



**ภาพที่ 20** ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน


**ภาพที่ 21** ภาพโดยรวมของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (ด้านข้างขวา)

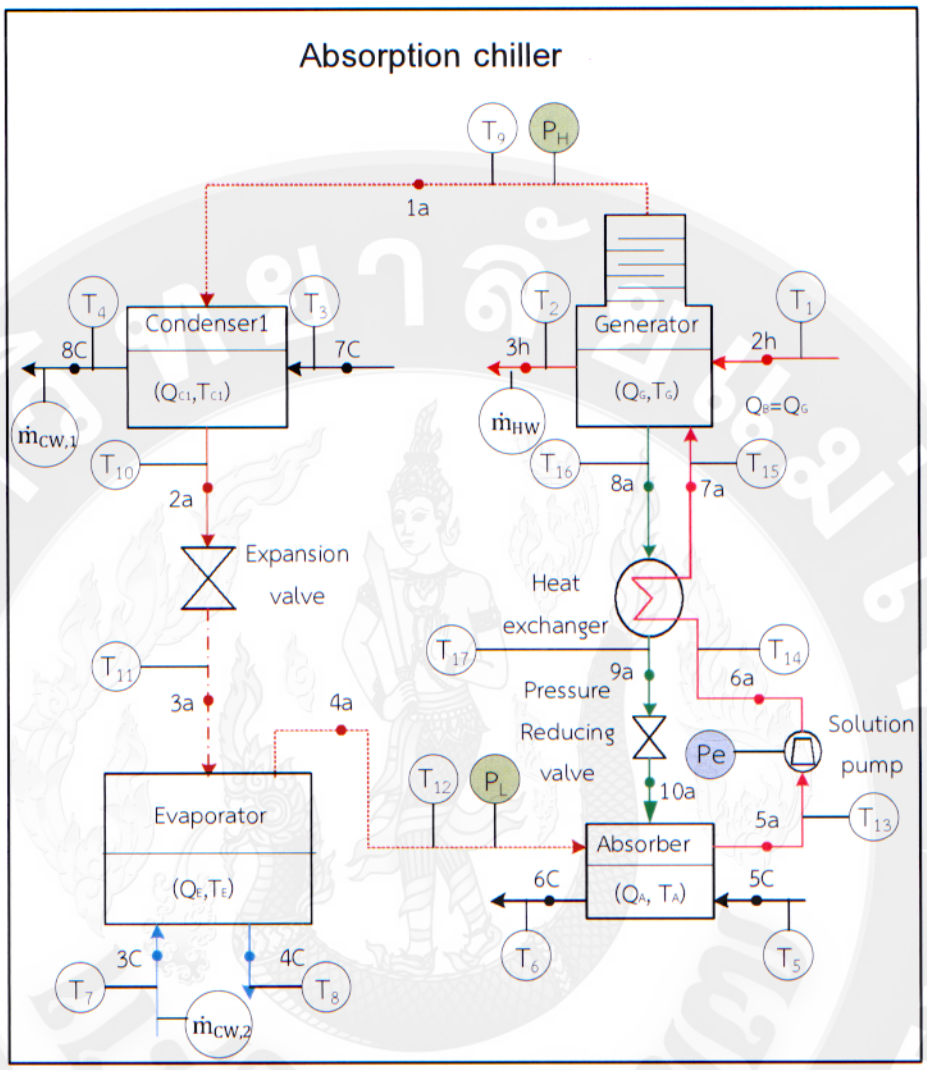

**ภาพที่ 22** ภาพโดยรวมของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแสดง (ด้านข้างซ้าย)

**ภาพที่ 23** หม้อต้มน้ำ



**ภาพที่ 24** ระบบหัวเผาน้ำมันดีเซล

การวัดค่าต่าง ๆ ของการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์และจุดตรวจวัด ดังแสดงในภาพที่ 25 รายละเอียดจุดตรวจวัด ดังแสดงในตารางที่ 5 และรายละเอียดของเครื่องมือตรวจวัด และบันทึกผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 6




**ภาพที่ 25** แผนภาพของระบบการทำความเย็นดูดกลืนและตำแหน่งจุดวัดค่าต่าง ๆ

**ตารางที่ 5** รายละเอียดจุดตรวจวัดค่าต่าง ๆ ในการทดสอบระบบการทำความเย็นดูดกลืน

| จุดตรวจวัด | ตัวแปรที่ต้องการวัด | การเก็บข้อมูล |
|---|---|---|
| | อุณหภูมิ | |
| $T_1$ | อุณหภูมิน้ำร้อนก่อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ ที่จุด 2h | Data logger |
| $T_2$ | อุณหภูมิน้ำร้อนออกจากเจนเนอเรเตอร์ ที่จุด 3h | |
| $T_3$ | อุณหภูมิน้ำเย็นก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ที่จุด 7C | |
| $T_4$ | อุณหภูมิน้ำเย็นออกจากเครื่องควบแน่น ที่จุด 8C | |
| $T_5$ | อุณหภูมิน้ำเย็นก่อนเข้าแอบซอร์พเบอร์ ที่จุด 5C | |
| $T_6$ | อุณหภูมิน้ำเย็นออกจากแอบซอร์พเบอร์ ที่จุด 6C | |
| $T_7$ | อุณหภูมิน้ำเย็นก่อนเข้าเครื่องระเหย ที่จุด 3C | |
| $T_8$ | อุณหภูมิน้ำเย็นออกจากเครื่องระเหย ที่จุด 4C | |
| $T_9$ | อุณหภูมิสารทำงานออกจากเจนเนอเรเตอร์ ที่จุด 1a | |
| $T_{10}$ | อุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่น ที่จุด 2a | |
| $T_{11}$ | อุณหภูมิสารทำงานก่อนเข้าเครื่องระเหย ที่จุด 3a | |
| $T_{12}$ | อุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องระเหย ที่จุด 4a | |
| $T_{13}$ | อุณหภูมิสารละลายออกจากแอบซอร์พเบอร์ ที่จุด 5a | |
| $T_{14}$ | อุณหภูมิสารละลายก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่จุด 6a | |
| $T_{15}$ | อุณหภูมิสารละลายก่อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ ที่จุด 7a | |
| $T_{16}$ | อุณหภูมิสารละลายออกจากเจนเนอเรเตอร์ ที่จุด 8a | |
| $T_{17}$ | อุณหภูมิสารละลายออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่จุด 9a | |
| | ความดัน | |
| $P_H$ | ความดันด้านสูงของระบบ | Pressure gauge |
| $P_L$ | ความดันด้านต่ำของระบบ | |

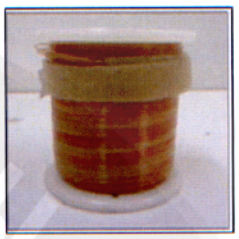
**ตารางที่ 5** (ต่อ)

| จุดตรวจวัด | ตัวแปรที่ต้องการวัด | การเก็บข้อมูล |
|---|---|---|
| | กำลังไฟฟ้า | |
| W | กำลังไฟฟ้ารวมของปั๊มสารละลาย | Power logger |
| | อัตราการไหล | |
| $\dot{m}_{HW}$ | อัตราการไหลของน้ำร้อนที่เข้าและออกเจนเนอเรเตอร์ | Flow meter |
| $\dot{m}_{CW,1}$ | อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่เข้าและออกเครื่องควบแน่น | |
| $\dot{m}_{CW,2}$ | อัตราการไหลของน้ำเย็นที่เข้าและออกเครื่องระเหย | |

**ตารางที่ 6** เครื่องมือตรวจวัด และบันทึกผลการทดสอบ

| อุปกรณ์ | คุณลักษณะ | ภาพ |
|---|---|---|
| เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) | เครื่องบันทึกข้อมูลทำหน้าที่อ่านอุณหภูมิ โดยใช้ร่วมกับสายวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K<br>ค่าความถูกต้อง คือ ± 0.0025 °C<br>รายละเอียด<br>PAPERLESS RECORDER<br>Brand : BrainChild<br>Model : VR18<br>Input : 18 Port AL Input<br>Accuracy ± 0.05% of Span ± 0.0025% / °C |  |

**ตารางที่ 6** (ต่อ)

| อุปกรณ์ | คุณลักษณะ | ภาพ |
|---|---|---|
| สายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple) | สายวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ใช้งานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ คือ -50°C ถึง +450 °C, ±0.75 °C |  |
| เกจวัดแรงดัน (Pressure gauge) | อุปกรณ์วัดความดันสารทำความเย็น |  |
| เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power logger) | รายละเอียด<br>ค่าความถูกต้องแรงดันไฟฟ้า ±0.3%<br>KEW POWER QUALITY ANALYZER<br>Brand : KYORITSU<br>Model : KEW 6310<br>Accuracy ± 0.3% rdg ± 0.2% f.s. |  |
| คอมพิวเตอร์ (Computer) | ใช้ในการบันทึก และสรุปข้อมูลที่ได้จากเครื่องเก็บข้อมูล |  |
| เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) | อุปกรณ์วัดอัตราการไหล |  |

## การเปรียบเทียบผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ซึ่งในขั้นตอนการเปรียบเทียบนี้จะนำผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในหัวข้อที่ผ่านมามาวิเคราะห์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ และเพื่อดูความสัมพันธ์อุณหภูมิที่เป็นตัวแปรในแกน x ที่มีผลต่อค่า COP ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ที่จะนำไปวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

## การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ เครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบด้านพลังงานทดแทน ที่มีพื้นฐานมาจากกฎพื้นฐานด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบ หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระบบการทำงานร่วมของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วม เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบร่วม และดูการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทำงานของระบบร่วม ซึ่งในการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบร่วมดังกล่าว ใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลพลังงาน สมดุลมวล โดยนำเอาแผนผังการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในหัวข้อที่ผ่านมาในภาพที่ 16 มาคำนวณร่วมกับแผนผังการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในภาพที่ 19

## การวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยในการวิเคราะห์มีการกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ค่าดำเนินและบำรุงรักษาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กำหนดให้เป็น 5% ของเงินลงทุนเริ่มต้น (Rentizelas et al., 2009)
2. สินเชื่อเพื่อการประกอบธุรกิจ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ลูกค้ารายย่อยชั้นดีกรณีปกติ (Minimum Retail Rate) 7.62% (ธนาคารกสิกรไทย, 2559)
3. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า คือ วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 1.1

4. อายุการใช้งานของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เท่ากับ 20 y (นัฐพร, 2559)

5. ระเวลาการทำงาน 8,000 h/y (จักรพันธ์ และคณะ, 2557)

6. เงินลงทุนของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์คิดที่ 2,500 USD ต่อ 1 $kW_e$ (นัฐพร, 2559)

7. อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศปัจจุบัน 1 USD = 35.26 Baht (ธนาคารกสิกรไทย, 2560)

8. ค่าภาษีการนำเข้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์คิดที่ 30% ของมูลค่าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

9. มูลค่าซากของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์คิดที่ 1% ของเงินลงทุนเริ่มต้น

10. ระยะเวลาคืนทุน 7 y (Tongsopit and Greacen, 2012)

11. เงินลงทุนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ขนาดประมาณ 1 TR มูลค่า 200,000 Baht

12. ค่าดำเนินและบำรุงรักษาระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกำหนดให้เป็น 5% ของเงินลงทุนเริ่มต้น

13. มูลค่าซากของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนคิดที่ 1% ของเงินลงทุนเริ่มต้น

# บทที่ 4
# ผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

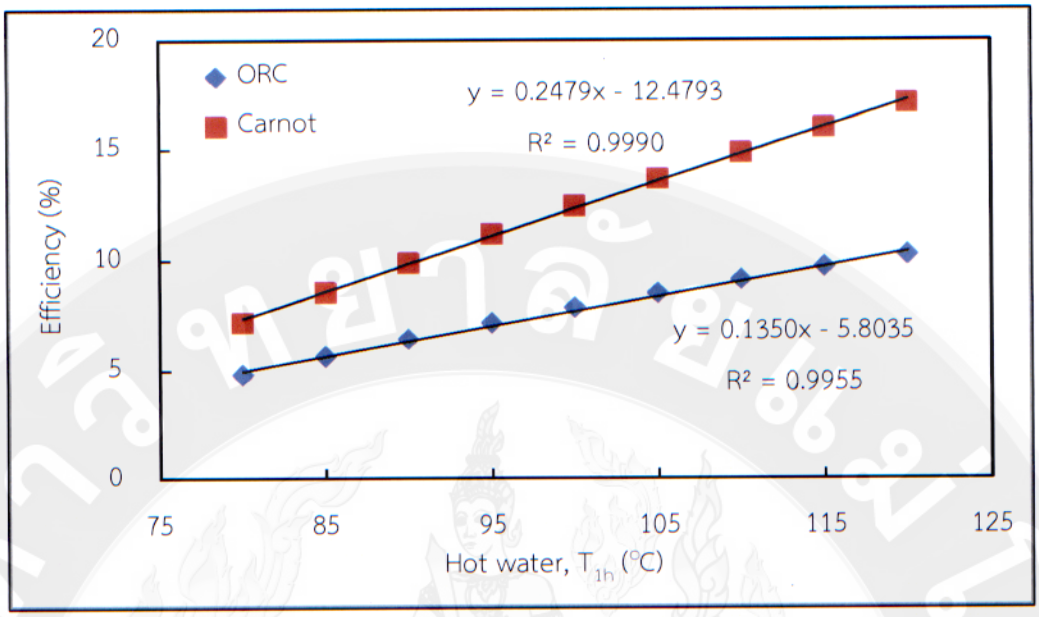
## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการทำงานของระบบ โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) ในช่วง 80-120 $^{\circ}$C โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32 $^{\circ}$C ผลที่ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าที่หม้อต้มเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้น และเมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ 35%

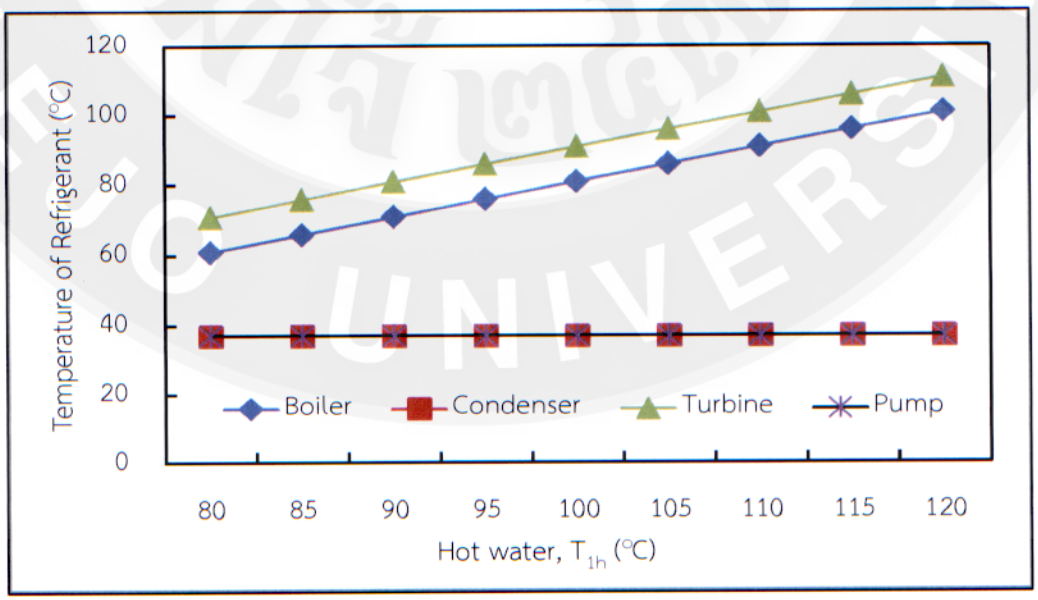
ซึ่งจากภาพที่ 26 ยังพบอีกว่า อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ในรูปแบบสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.1350(T_{1h}) - 5.8035 \qquad \text{สมการที่ 4.1}$$



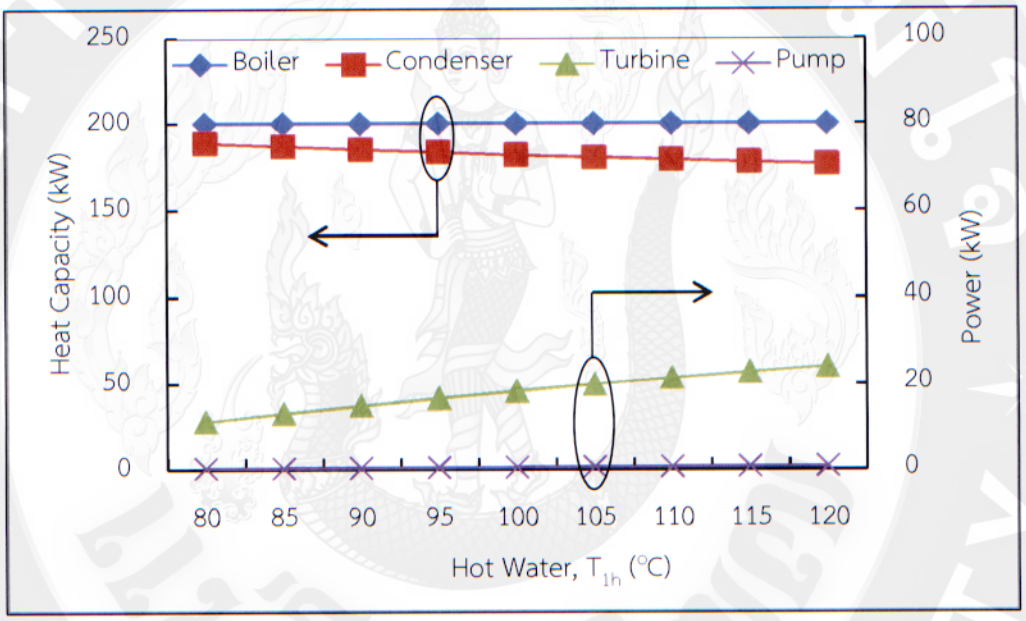

**ภาพที่ 26** แบบจำลองอย่างง่ายของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

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



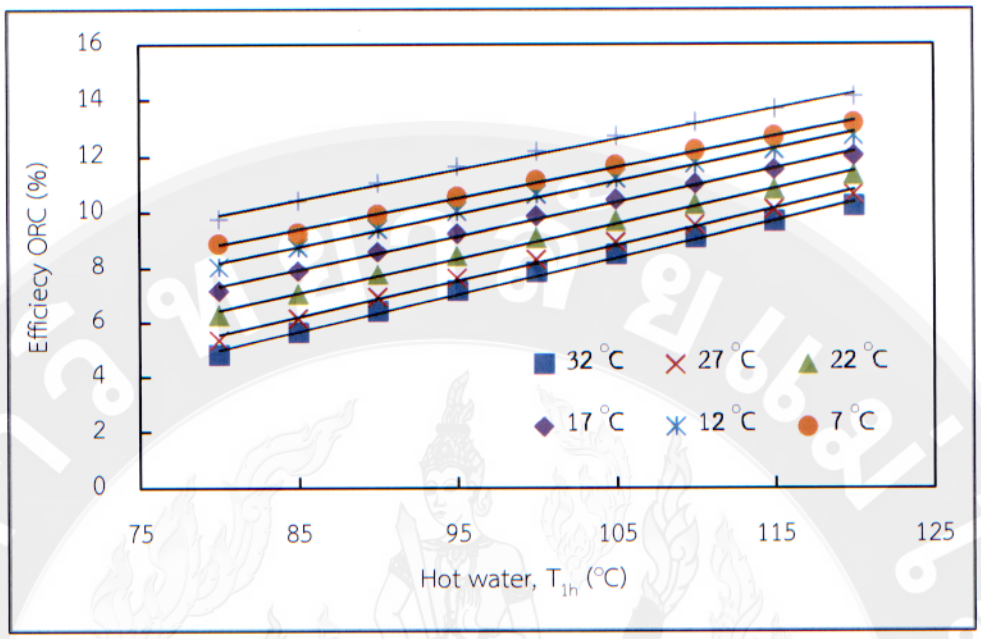

**ภาพที่ 27** อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ภาพที่ 28 แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม และกำลังงานที่ปั๊มสารทำงานในระบบค่อนข้างน้อยโดยมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) มีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานที่กังหัน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นมีค่าลดลง ในขณะกำลังงานที่ผลิตจากกังหันเพิ่มขึ้น




**ภาพที่ 28** อัตราความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ภาพที่ 29 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นในช่วง 2-32 °C ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มอยู่ในช่วง 80-120 °C ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่น เมื่ออุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักคาร์โนต์ที่ว่า ประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น และยังสอดคล้องกับหลักความคิดของงานวิจัยนี้ ที่มีวัตถุประสงค์ต้องการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อผลิตน้ำเย็นช่วยหอระบายความร้อน โดยลดอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์




**ภาพที่ 29** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น

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

## สมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ข้างต้นพบว่า สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ แต่การสร้างแบบจำลองข้างต้นยังพบว่า มีขั้นตอนที่มีความยุ่งยากซึ่งต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรม เช่น สมดุลพลังงาน และสมดุลมวล เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงทำการศึกษาสมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบรูปแบบต่าง ๆ โดยทำการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น คือ การหาความสัมพันธ์อุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบซึ่งเป็นตัว

แปรอิสระในแกน x ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยเป็นตัวแปรตามในแกน y เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งอิงตามหลักทฤษฎีของคาร์โนต์ โดยนำผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขั้นตอนที่ผ่านมา เพื่อทำการวิเคราะห์สมการสมรรถนะ อันประกอบไปด้วย 6 รูปแบบ ดังตารางที่ 7 โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

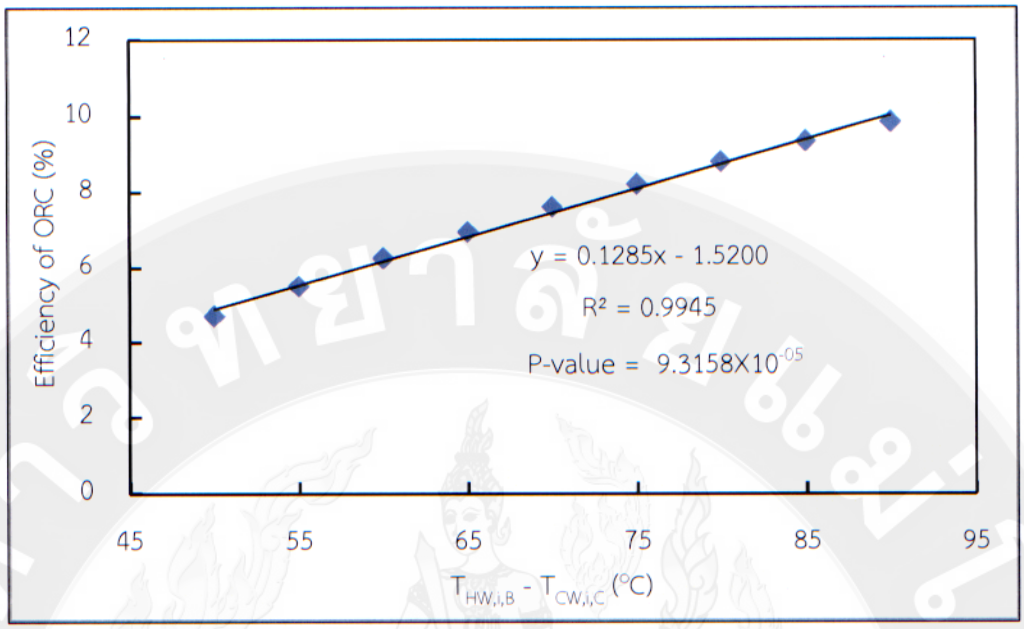
**ตารางที่ 7** รูปแบบการวิเคราะห์สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

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

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

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

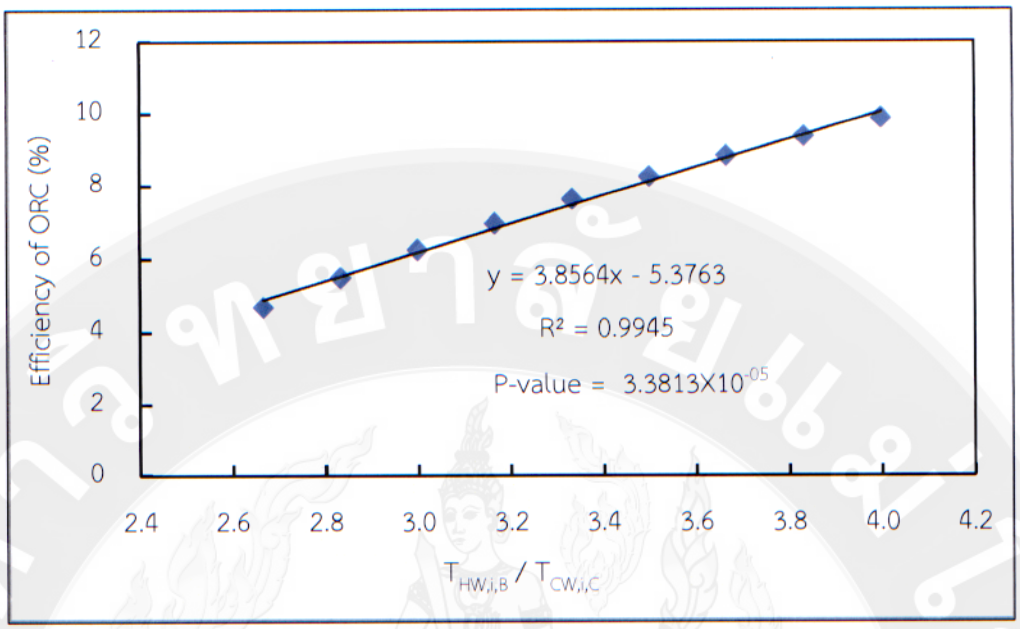
$$\eta_{ORC} = 0.1285(T_{HW,i,B} - T_{CW,i,C}) - 1.5200 \qquad \text{สมการที่ 4.2}$$




**ภาพที่ 30** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

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

$$\eta_{ORC} = 3.8564(T_{HW,i,B} / T_{CW,i,C}) - 5.3763 \qquad \text{สมการที่ 4.3}$$

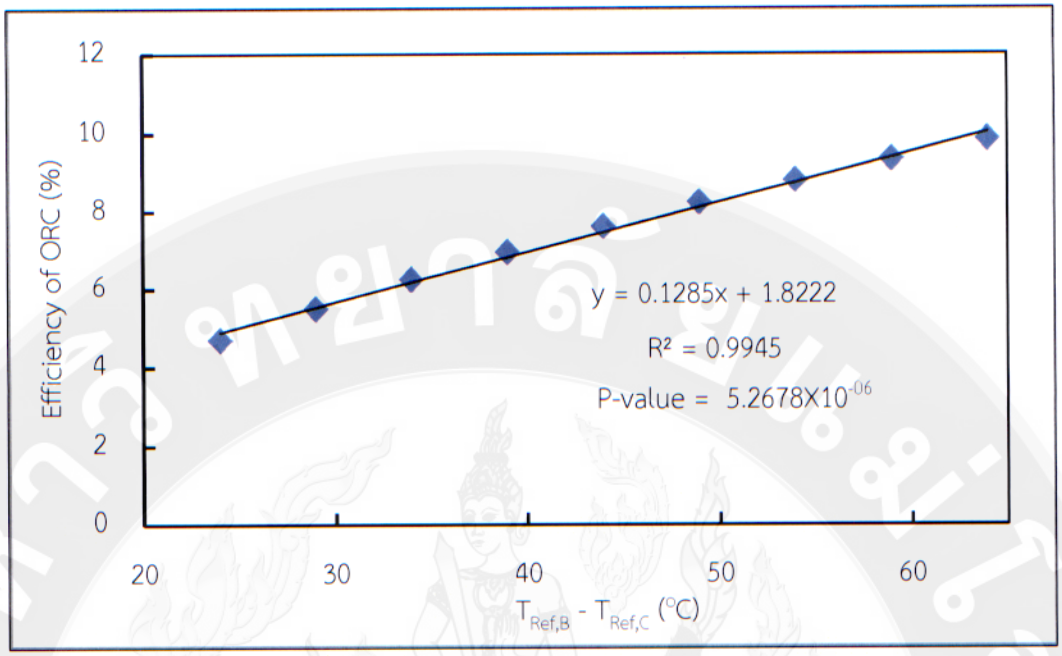



**ภาพที่ 31** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

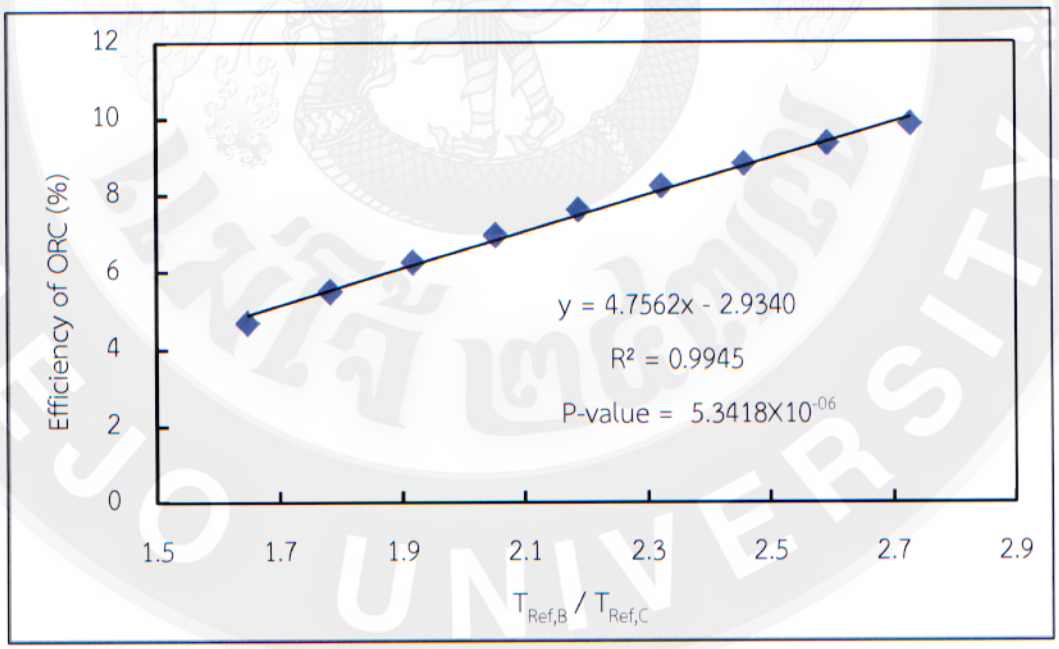
ภาพที่ 32 และ 33 เป็นการวิเคราะห์คล้ายกับภาพที่ 30 และ 31 แต่เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่าง ($T_{Ref,B}$ – $T_{Ref,C}$) และสัดส่วน ($T_{Ref,B}$ / $T_{Ref,C}$) อุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ และยังพบว่า มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ มีค่า $R^2$ = 0.9945 และ P-value = $5.2678 \times 10^{-06}$ และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ มีค่า $R^2$ = 0.9945 และ P-value = $5.3418 \times 10^{-06}$ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) + 1.8222 \qquad \text{สมการที่ 4.4}$$

$$\eta_{ORC} = 4.7562(T_{Ref,B} / T_{Ref,C}) - 2.9340 \qquad \text{สมการที่ 4.5}$$



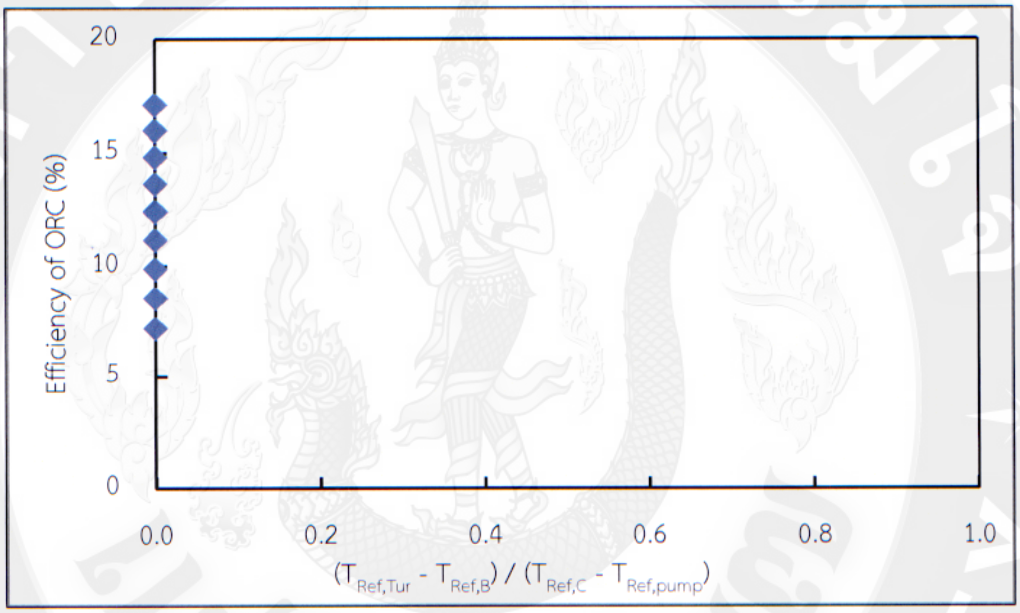

**ภาพที่ 32** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ



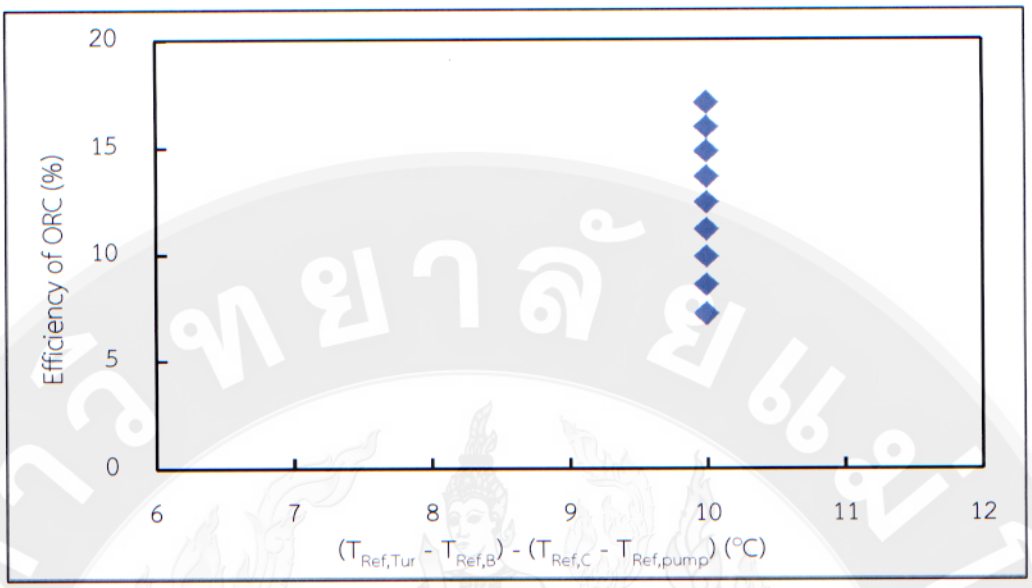

**ภาพที่ 33** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 34 เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ [($T_{Rref,Tur}$ –

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

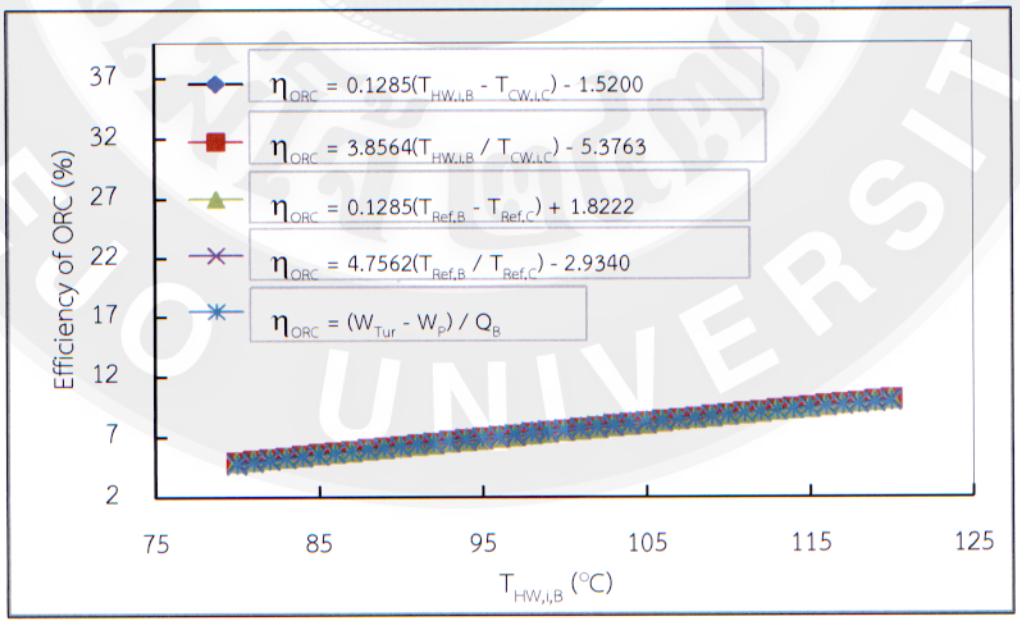



**ภาพที่ 34** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ




**ภาพที่ 35** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่ได้จากสมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของผลที่ได้ข้างต้น ผลการเปรียบเทียบพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและสามารถทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

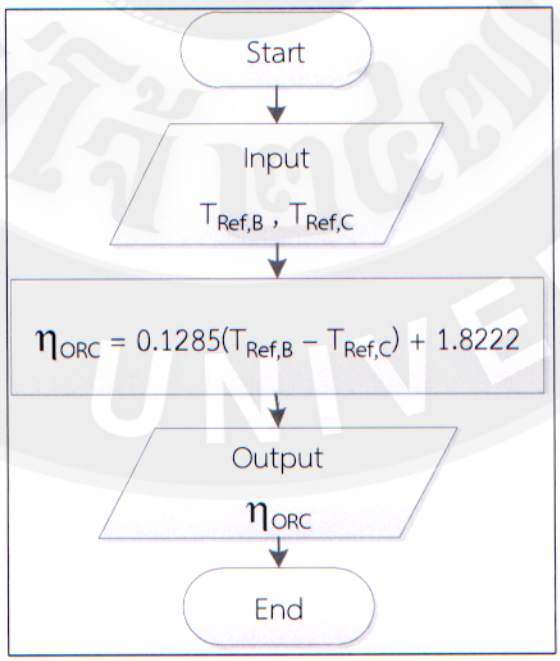



**ภาพที่ 36** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ได้จากสมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ

**ตารางที่ 8** สรุปสมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

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

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



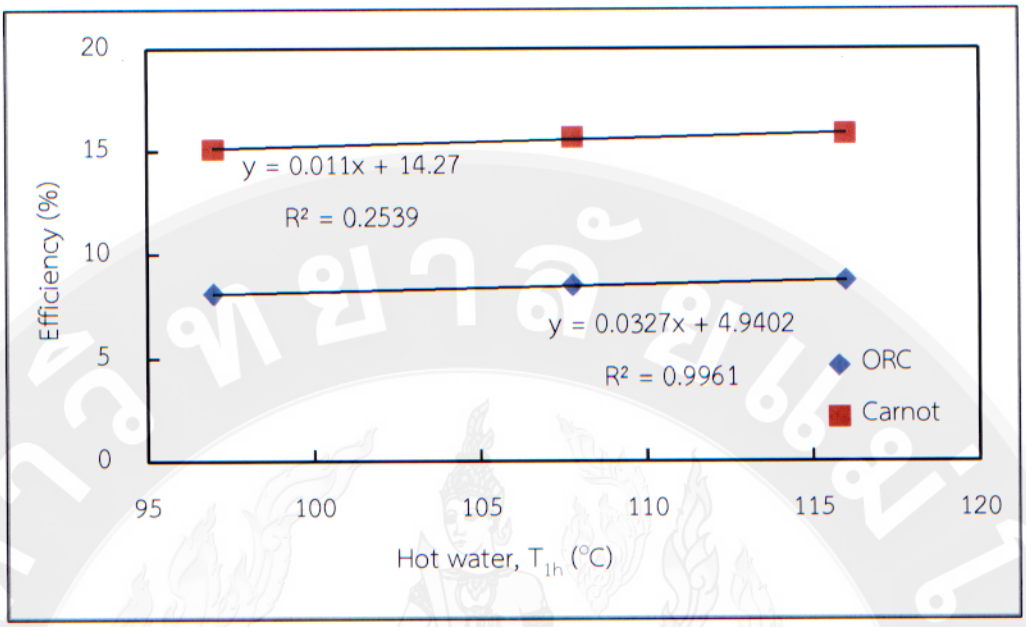

**ภาพที่ 37** แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์แบบใหม่

สมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบรูปแบบต่าง ๆ ถือว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ตามทฤษฎี ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยจะใช้ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะที่ได้นี้ไปทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่อไป แต่เพื่อให้การทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วยสมการสมรรถนะมีความเชื่อถือได้ และถูกต้องตามการทำงานจริงของระบบ งานวิจัยนี้นำผลการทดสอบของ Chaiyat (Nattaporn, 2015) มาวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป และนำผลการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วยสมการสมรรถนะที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบในหัวข้อต่อไป เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของความสัมพันธ์สมการสมรรถนะ

## การวิเคราะห์ผลการทดสอบของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

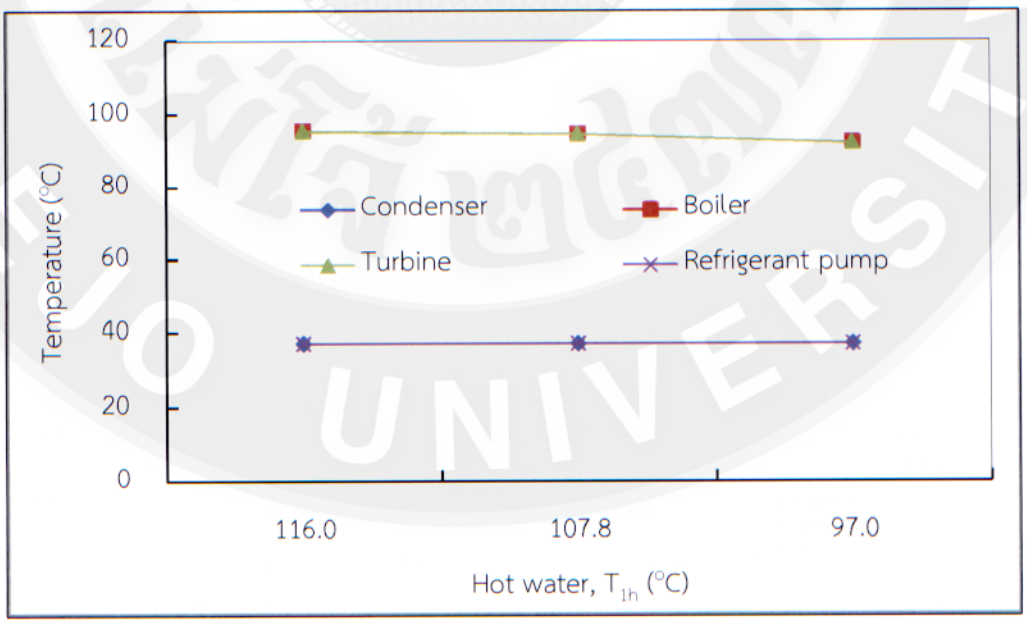
จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ขนาด 20 $kW_e$ ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 28 °C ผลการทดสอบพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบจะลดลงประมาณ 6% เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนต่ำกว่า 100 °C ขณะที่ประสิทธิภาพโดยรวมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ อยู่ที่ประมาณ 8% ดังแสดงในภาพที่ 38 เมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปรียบเทียบ กับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ 46% และจากภาพที่ 38 ยังพบอีกว่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($\eta_{ORC}$) กับอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.0327(T_{1h}) + 4.9402 \qquad \text{สมการที่ 4.6}$$



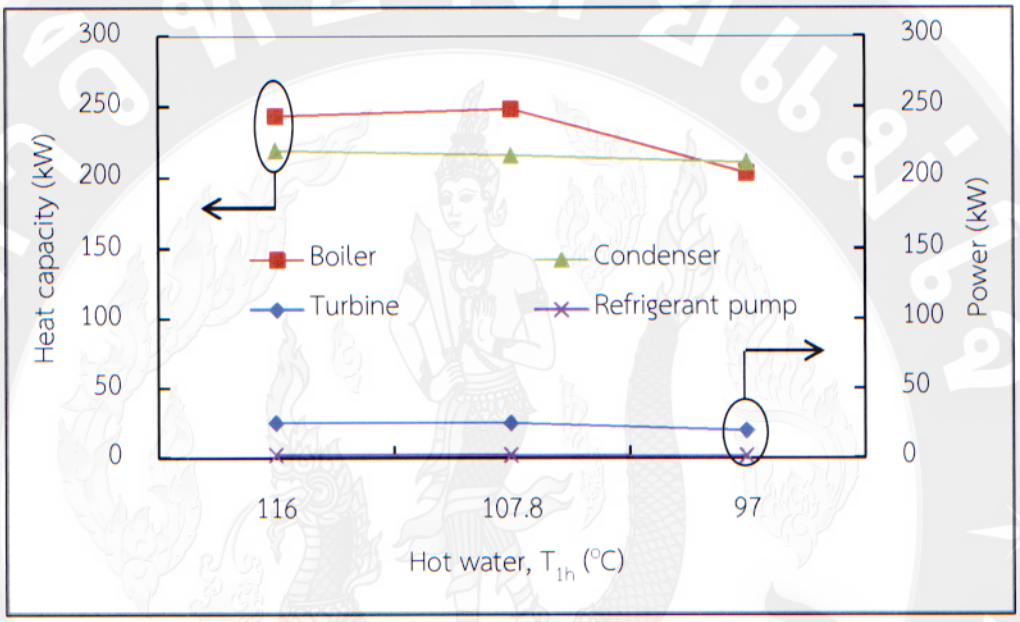

**ภาพที่ 38** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_B$) และอุณหภูมิสารทำงานที่กังหัน ($T_{Tur}$) ในขณะที่อุณหภูมิสารทำงานที่ปั๊มสารทำงาน ($T_P$) และเครื่องควบแน่น ($T_C$) มีค่าคงที่




**ภาพที่ 39** อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

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




**ภาพที่ 40** อัตราความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

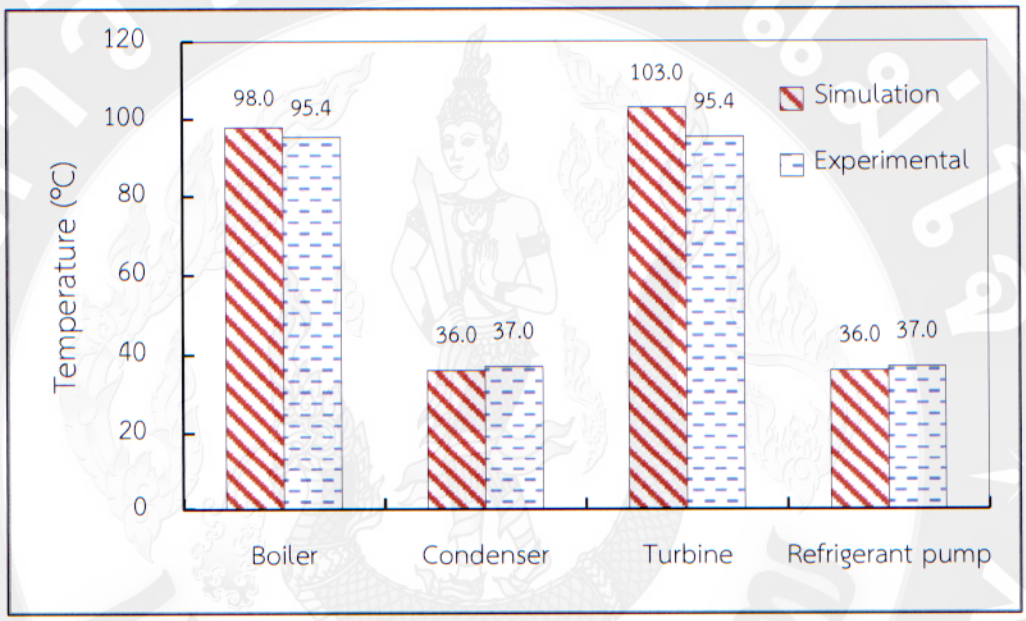
ผลทดสอบของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ขนาด 20 $kW_e$ ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 28 °C ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์อยู่ที่ประมาณ 8% เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลทดสอบของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ กับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อต่อไป

## การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบได้มีเงื่อนไข คือ ปริมาณการทำความร้อนที่ป้อน

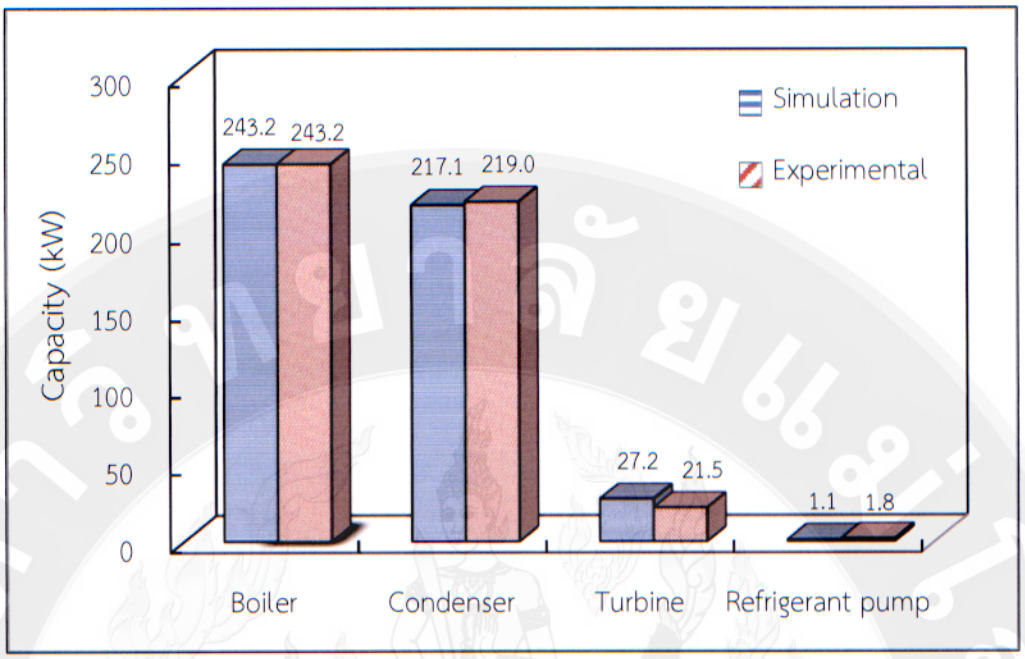
ให้แก่หม้อต้มของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีค่าเท่ากัน โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ภาพที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานโดยเฉลี่ยของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม เครื่องควบแน่น ปั๊มสารทำงาน ค่อนข้างเท่ากัน แต่ที่กังหันอุณหภูมิสารทำงานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สูงกว่าการทดสอบ

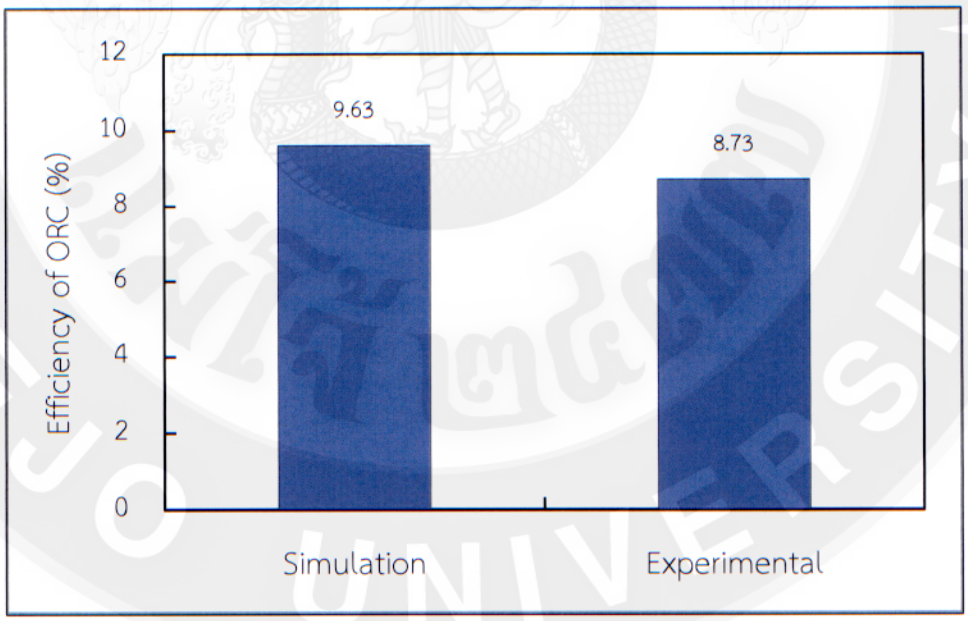



**ภาพที่ 41** การเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 42 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานของปั๊มสารทำงานของการทดสอบมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ในขณะที่กังหันงานที่สามารถผลิตได้ของการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 43



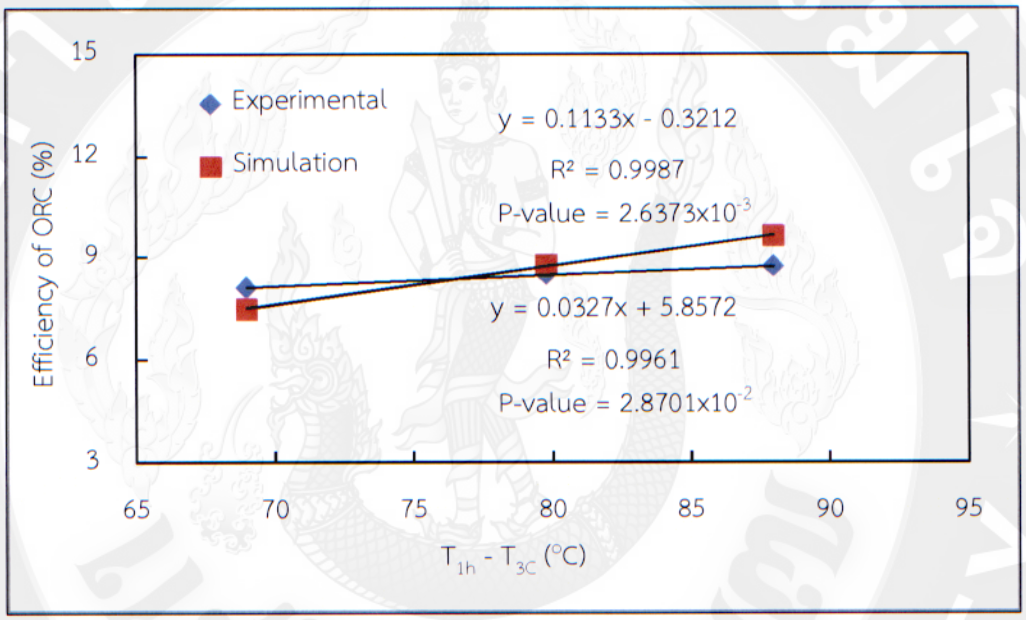

**ภาพที่ 42** การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์




**ภาพที่ 43** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 44 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแหล่ง

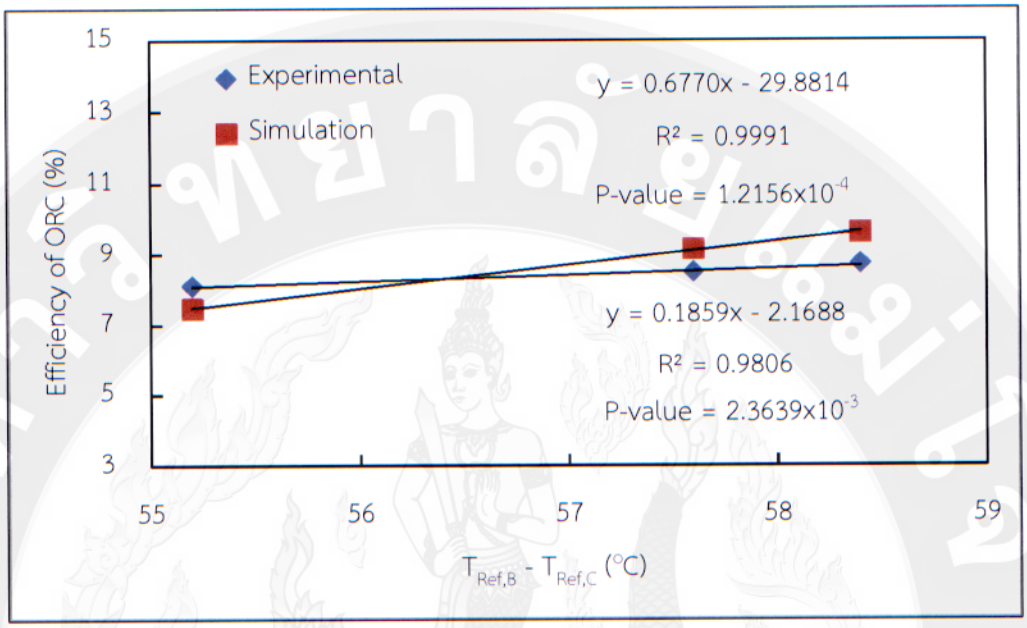
ความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ($T_{1h} - T_{3C}$) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อน เมื่อผลต่างของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนมาก ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ยิ่งเพิ่มขึ้น และยังพบว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้อง




**ภาพที่ 44** ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูง และต่ำของระบบ ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูง และต่ำของระบบ เมื่อผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำของระบบมาก ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ยิ่งเพิ่มขึ้น และยังพบว่า ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า

ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ค่อนข้างถูกต้องตามพฤติกรรมการทำงานจริงของระบบ




**ภาพที่ 45** สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากผลทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

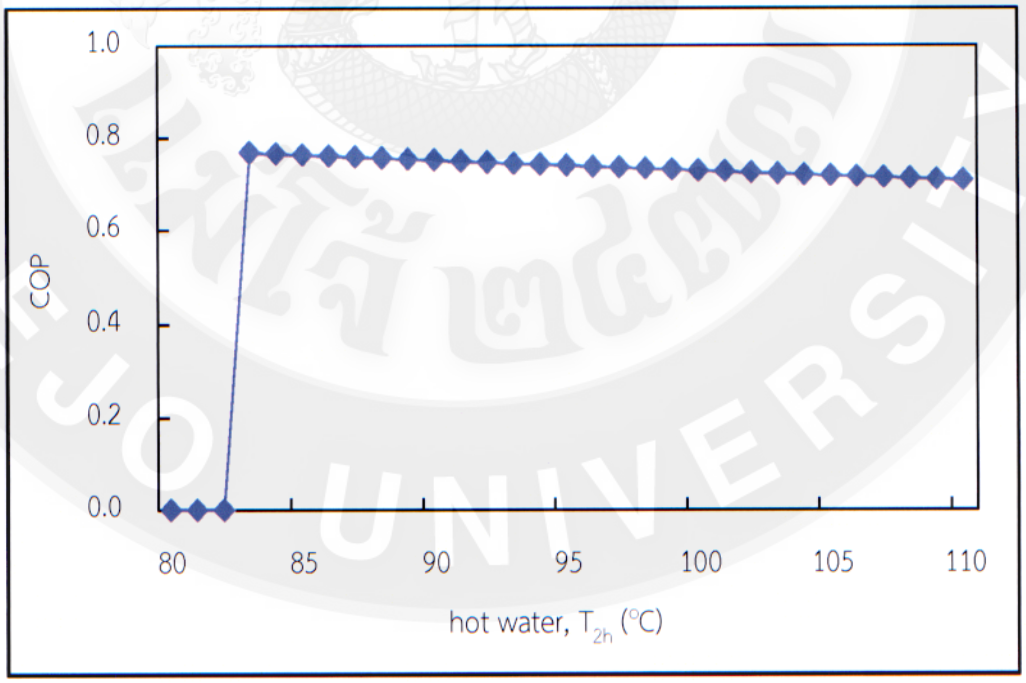
การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเพื่อดูความสัมพันธ์อุณหภูมิที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ โดยยังคงความสามารถการอธิบายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ ซึ่งลดความยุ่งยาก ซับซ้อน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ดังนั้นความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของแบบจำจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์การทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในหัวข้อต่อไป

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ที่ใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบในช่วง 80-

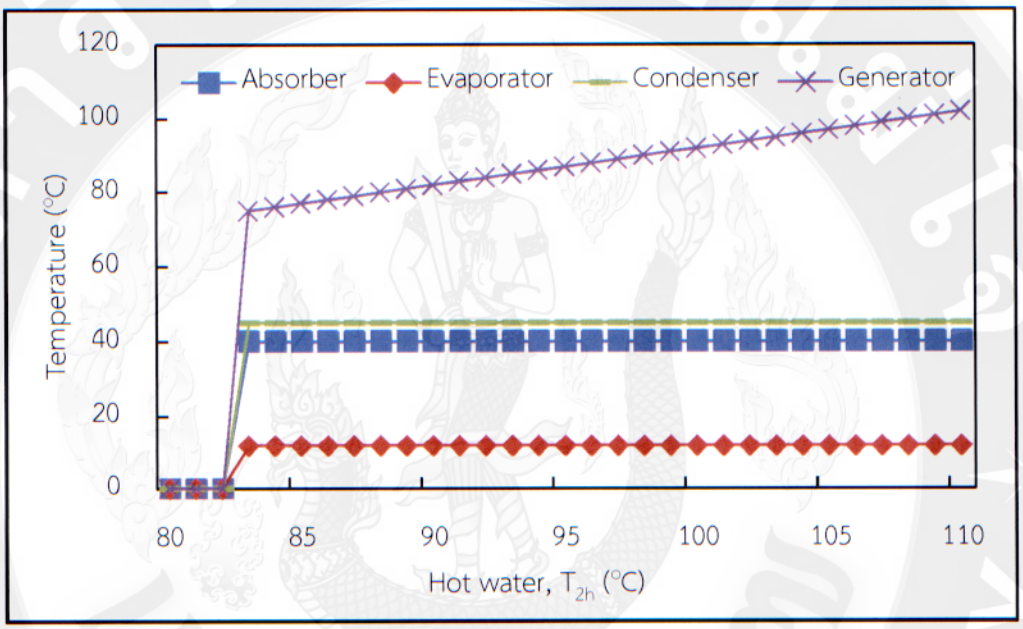
110 °C และอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32 °C เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการทำงานของระบบ โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

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



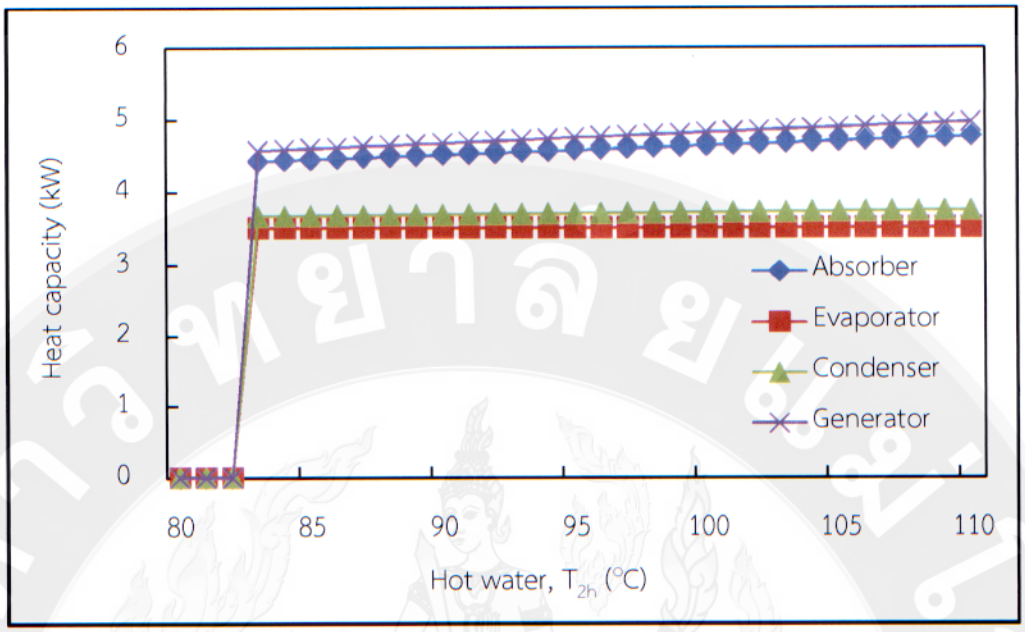

**ภาพที่ 46** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำร้อน

ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_{2h}$) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_G$) เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์มีผลน้อยมาก กับอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A$) เครื่องระเหย ($T_E$) และเครื่องควบแน่น ($T_C$) ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่



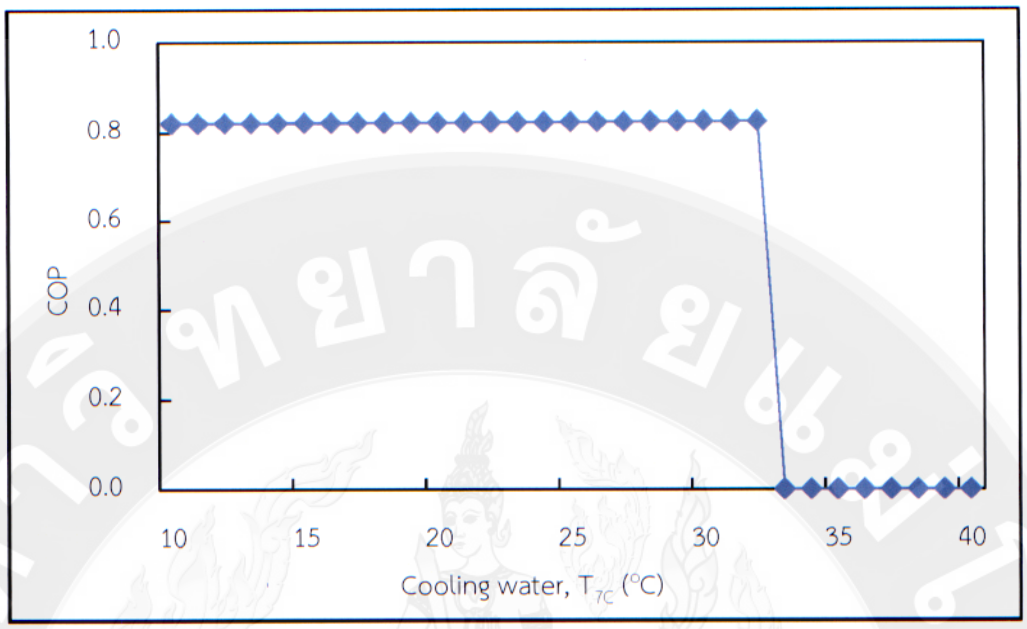

**ภาพที่ 47** อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

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



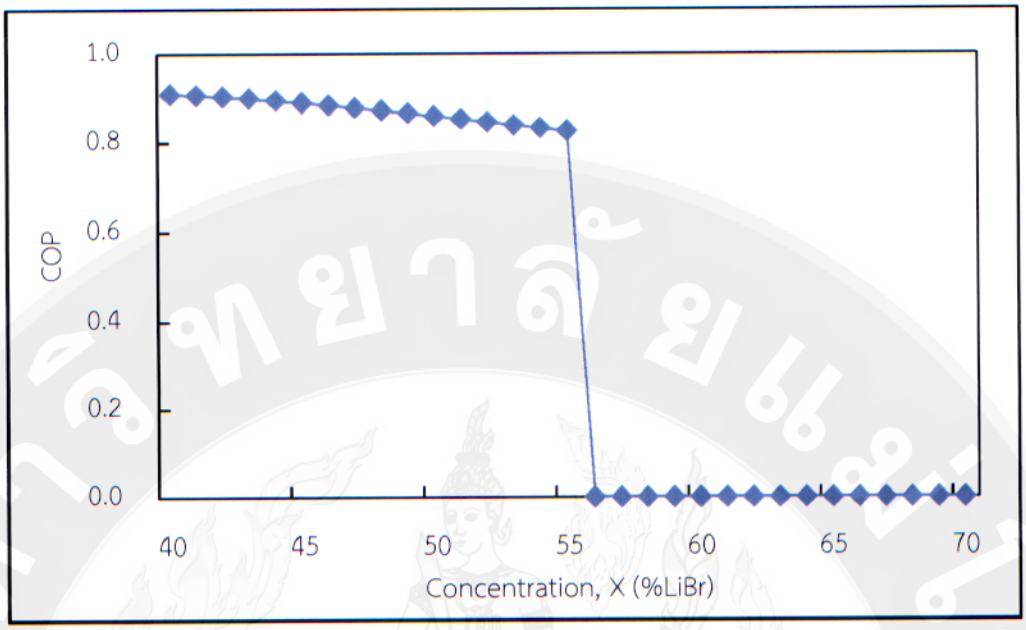

**ภาพที่ 48** อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

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




**ภาพที่ 49** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่น

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

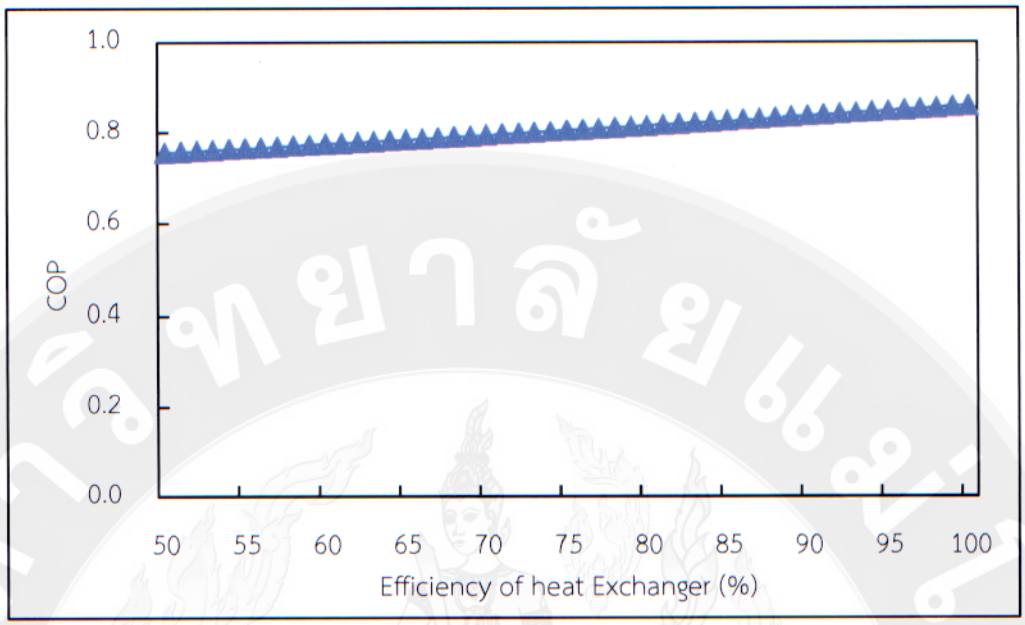



**ภาพที่ 50** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลาย

**ตารางที่ 9** อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายที่สภาวะความเข้มข้นต่าง ๆ

| ความเข้มข้นของสารละลาย (%LiBr) | อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลาย (°C) | ความเข้มข้นของสารละลาย (%LiBr) | อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลาย (°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 แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนศึกษาในช่วง 0.5-1 (50-100%) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีผลโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพิ่มขึ้นตามประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน




**ภาพที่ 51** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ที่เปลี่ยนแปลงตามประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

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 เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งอิงตามหลักทฤษฎีการย้อนกับของคาร์โนต์ 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 | $(T_C / T_A)$ |

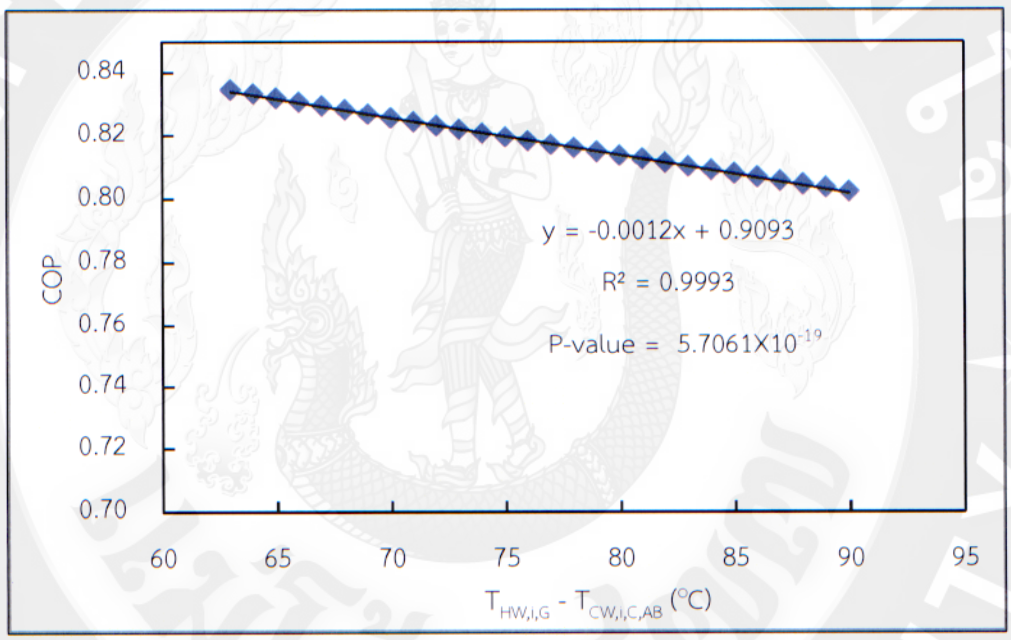
ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น $(T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB})$ และภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น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

จะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงขึ้นตามไปด้วย

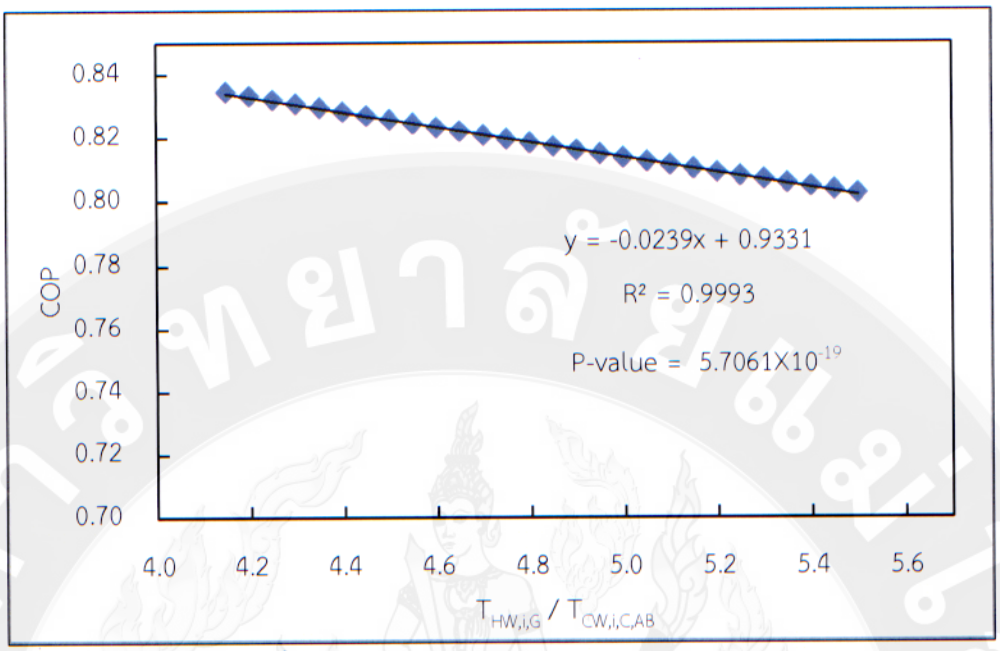
จากภาพที่ 52 และ 53 ยังพบอีกว่าผลต่างและสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9993$ และ P-value = $5.7061 \times 10^{-19}$ เท่ากัน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

$$COP = -0.0012(T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB}) + 0.9093 \qquad \text{สมการที่ 4.7}$$

$$COP = -0.0239(T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB}) + 0.9331 \qquad \text{สมการที่ 4.8}$$




**ภาพที่ 52** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

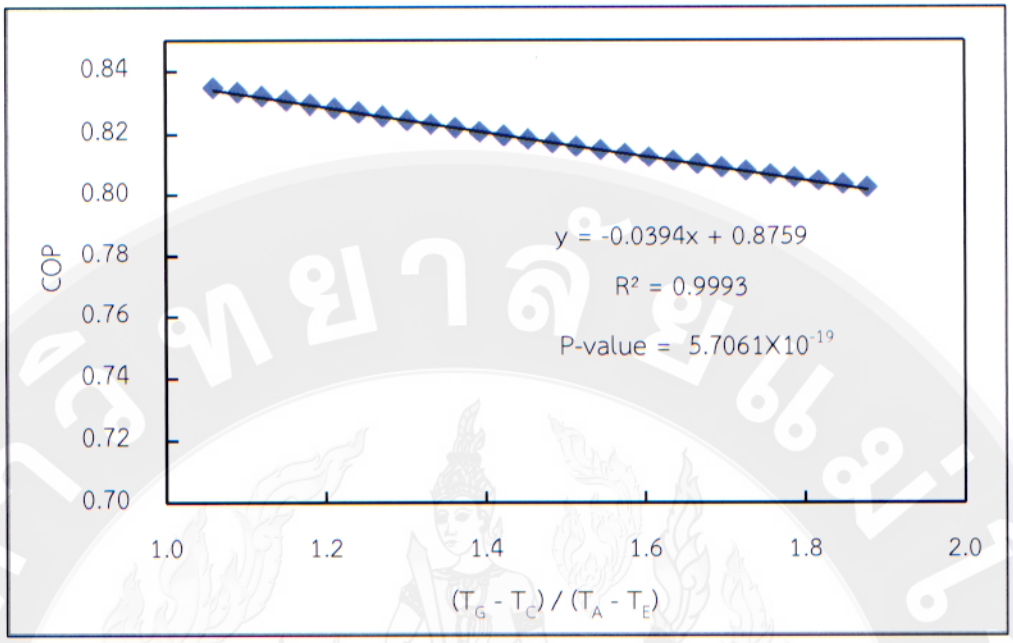



**ภาพที่ 53** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น

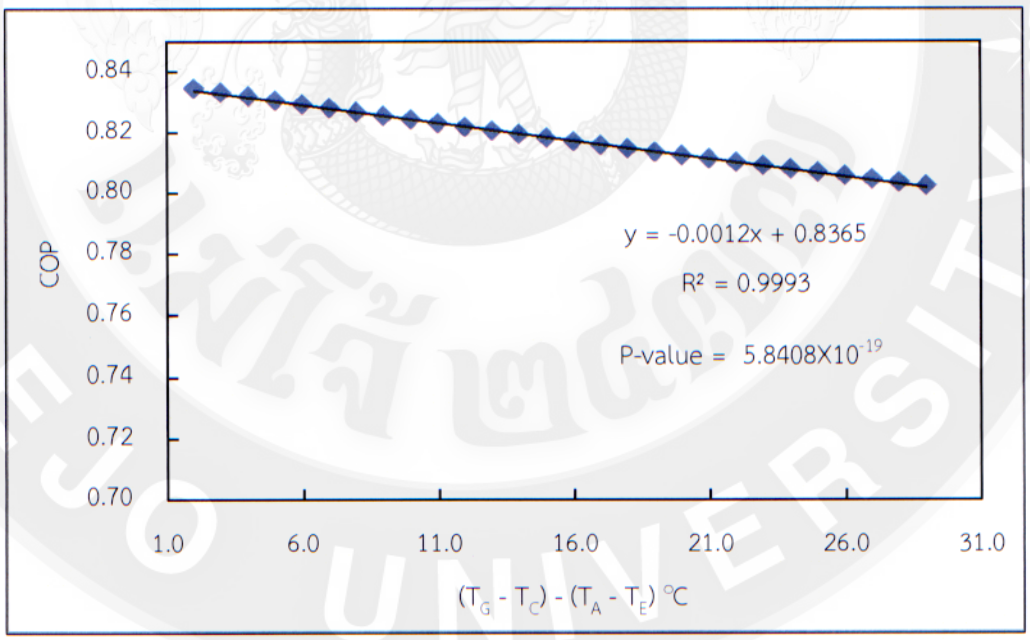
ภาพที่ 54 และ 55 เป็นการวิเคราะห์คล้ายกับภาพที่ 52 และ 53 แต่เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วน $[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ และผลต่าง $[(T_G - T_C) - (T_A - T_E)]$ ของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ ผลที่ได้พบว่า มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบในรูปแบบสม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

$$COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759 \qquad \text{สมการที่ 4.9}$$

$$COP = -0.0012[(T_G - T_C) - (T_A - T_E) + 0.8365 \qquad \text{สมการที่ 4.10}$$




**ภาพที่ 54** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ

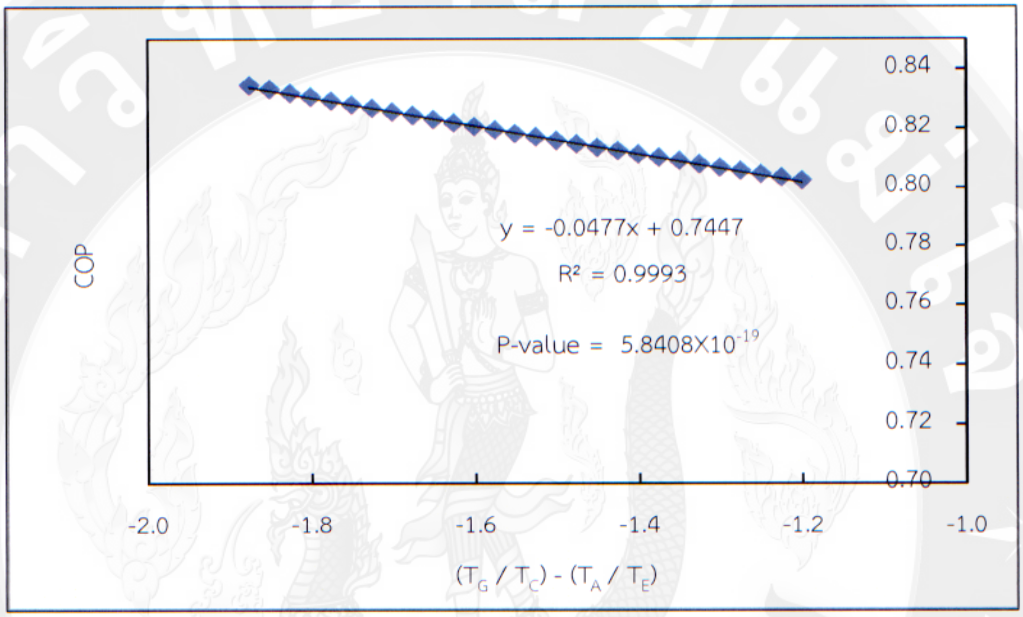



**ภาพที่ 55** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ

ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่างของสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ [($T_G$ / $T_C$) –

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

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

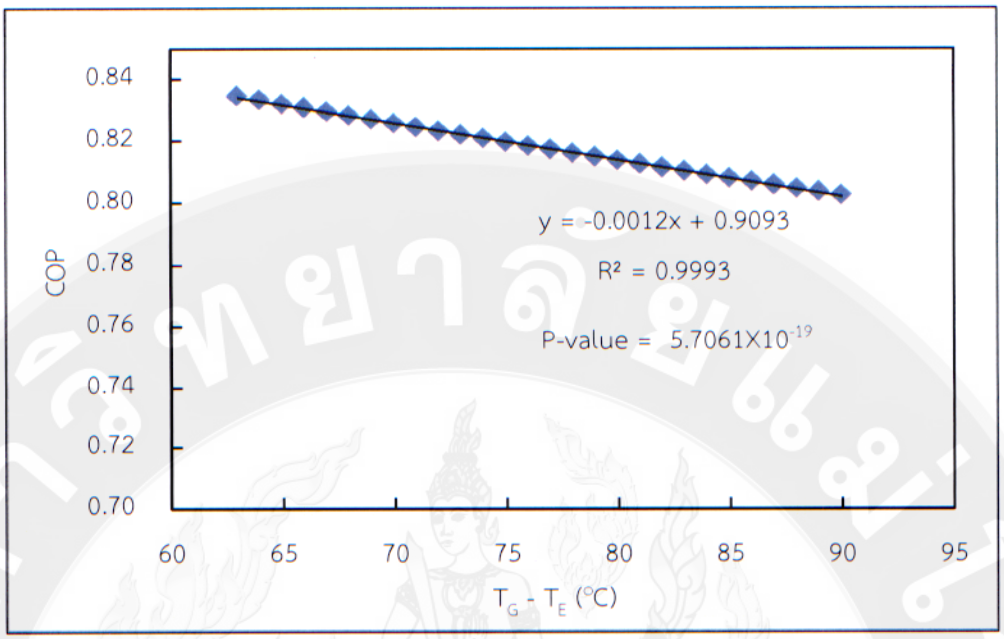



**ภาพที่ 56** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ

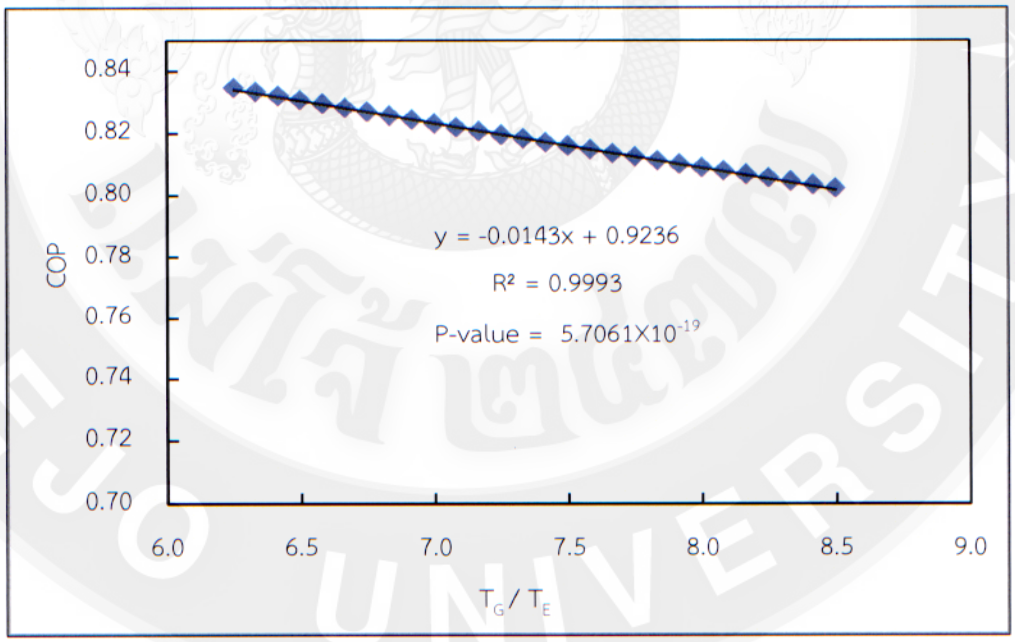
ภาพที่ 57 และ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับผลต่าง $(T_G - T_E)$ และสัดส่วน $(T_G / T_E)$ อุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และเครื่องระเหย ผลที่ได้พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบเปลี่ยนแปรงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และเครื่องระเหย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

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

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




**ภาพที่ 57** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และเครื่องระเหย



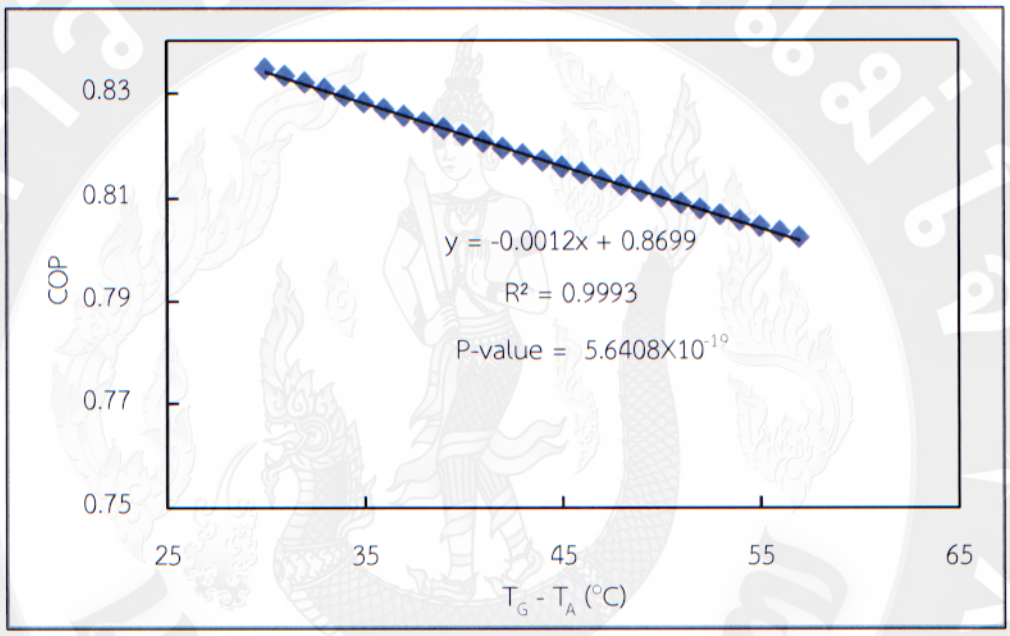

**ภาพที่ 58** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และเครื่องระเหย

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

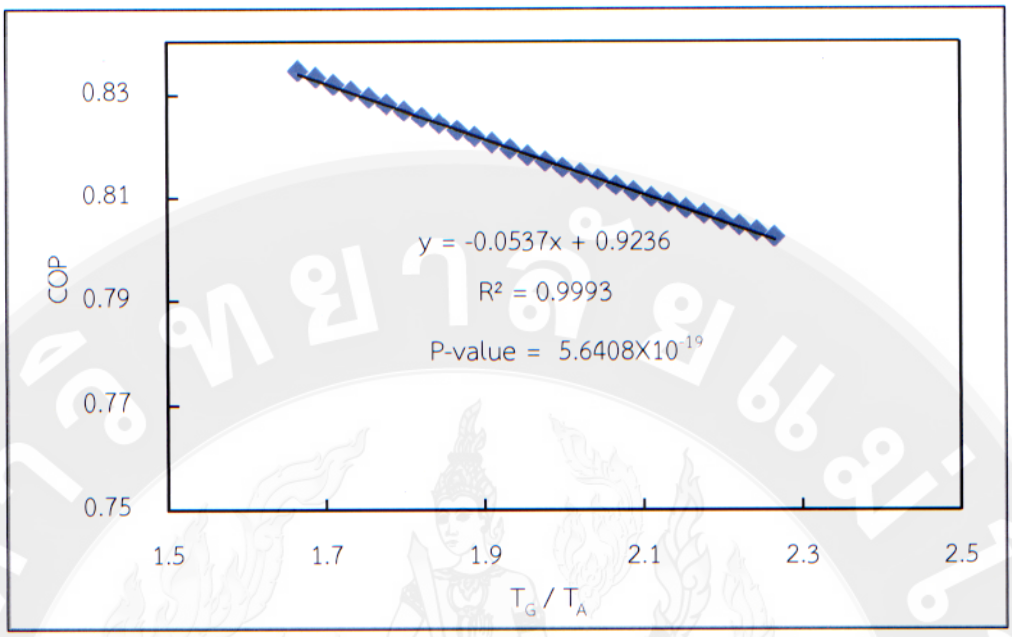
สารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์ ผลที่ได้พบว่า มีลักษณะคล้ายกับภาพที่ 57 และ 58 โดยสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบเปลี่ยนแปลงตามผลต่าง และสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์ และยังพบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยมีค่า $R^2$ = 0.9993 และ P-value = $5.6408 \times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

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

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

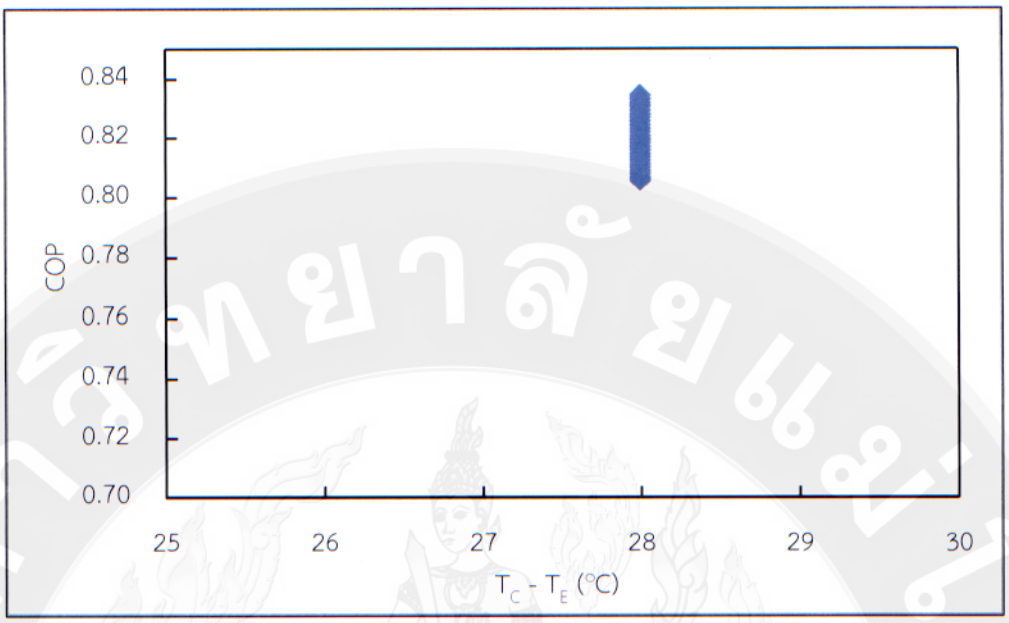



**ภาพที่ 59** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์

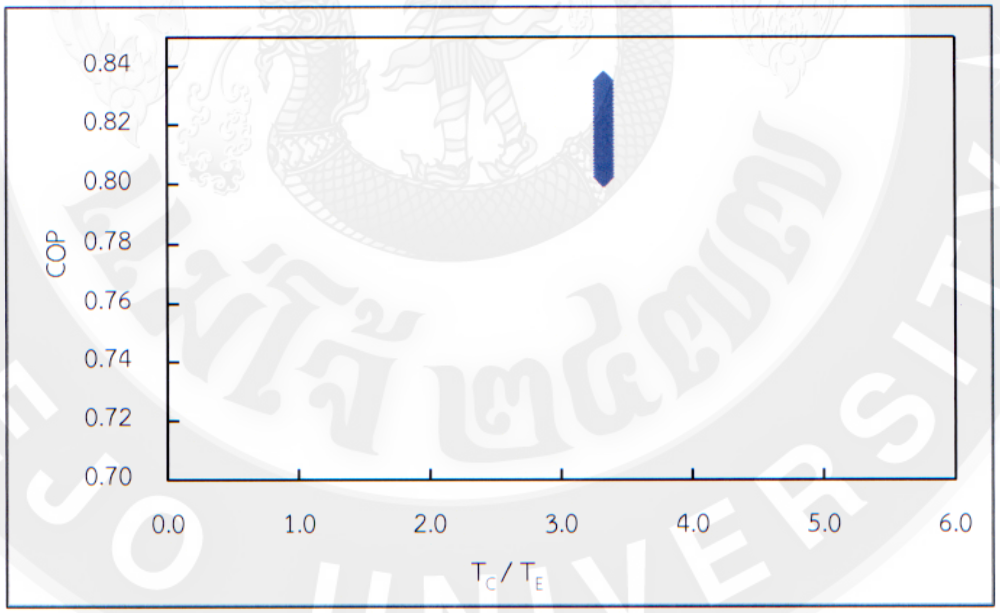



**ภาพที่ 60** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์และแอบซอร์พเบอร์

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

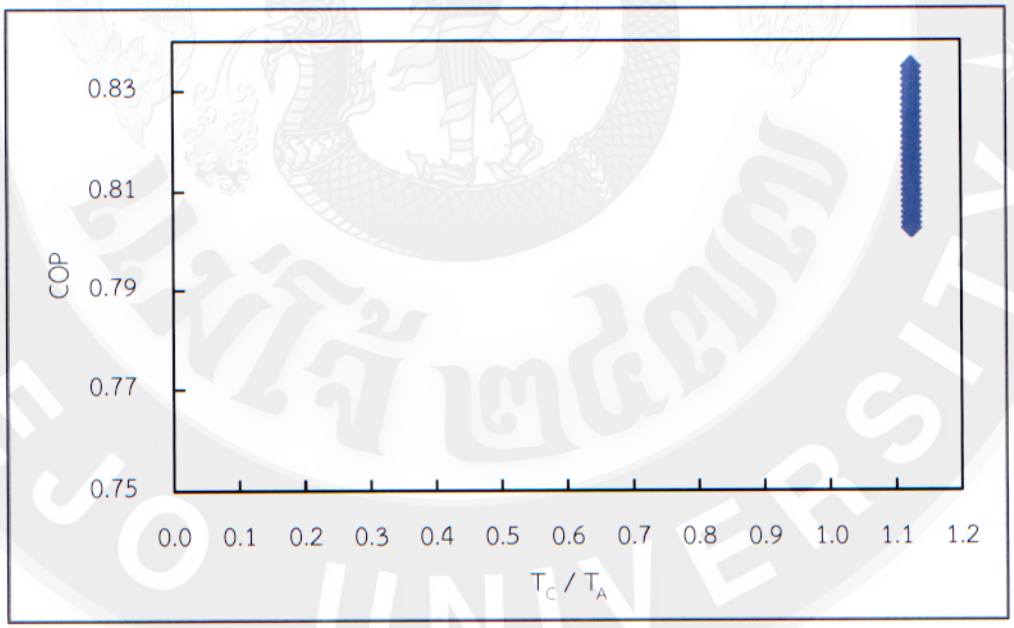



**ภาพที่ 61** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย




**ภาพที่ 62** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย

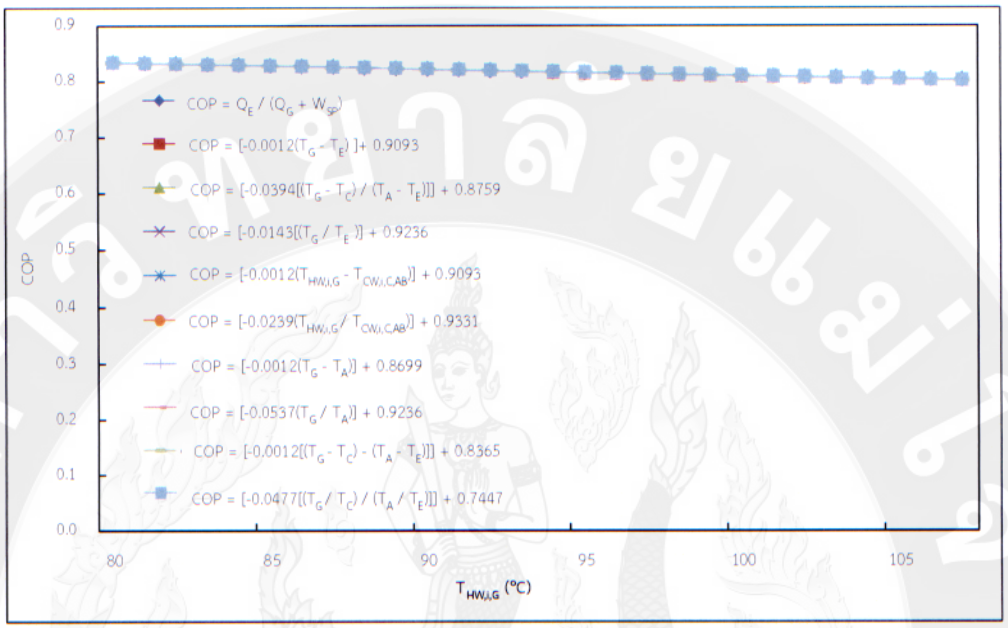

**ภาพที่ 63** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์และเครื่องควบแน่น




**ภาพที่ 64** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์และเครื่องควบแน่น

ภาพที่ 65 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ได้จากสมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ และได้จากสมการสมรรถนะในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ผลที่ได้พบว่า สามารถทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแต่ระรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้มีค่า $R^2$ และค่า P-value ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทำให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันไปด้วย



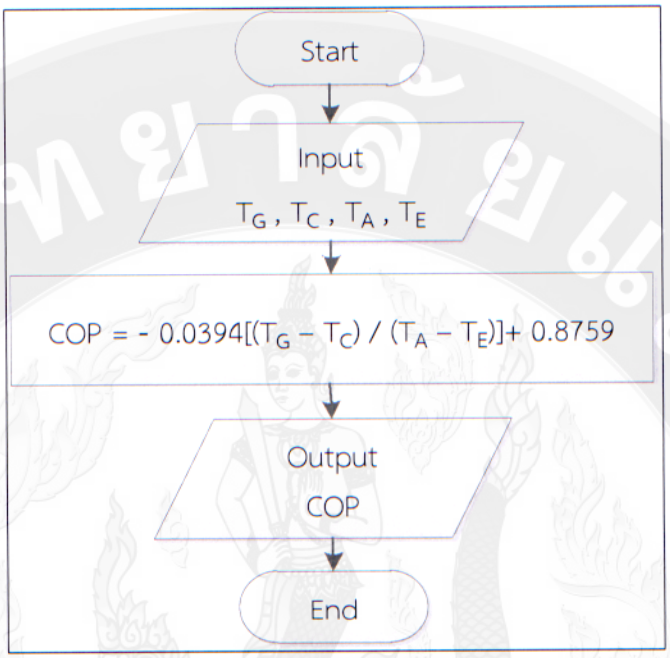

**ภาพที่ 65** การเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ได้จากสมการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ และได้จากสมการสมรรถนะ

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

โดยจากตารางที่ 11 สรุปสมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนข้างต้นในรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไหลในแกน x ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในแกน y มีค่า $R^2$ = 0.9993 เท่ากัน และมีค่า P-value ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสารทำงานของอุปกรณ์หลักในระบบ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำมีค่า P-value ต่ำสุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ คือ ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2$ = 0.9993 และ P-value = $5.7061 \times 10^{-19}$ ($COP_{Cooling} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$) ถือว่าเหมาะสม เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ของอุปกรณ์หลักในระบบ ซึ่งทำให้ทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคุมใช้ทำนายสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบได้อย่างสะดวก และมีประสิทธิภาพ ดังแสดง

แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบใหม่ในภาพที่ 66 ต่อไปนี้



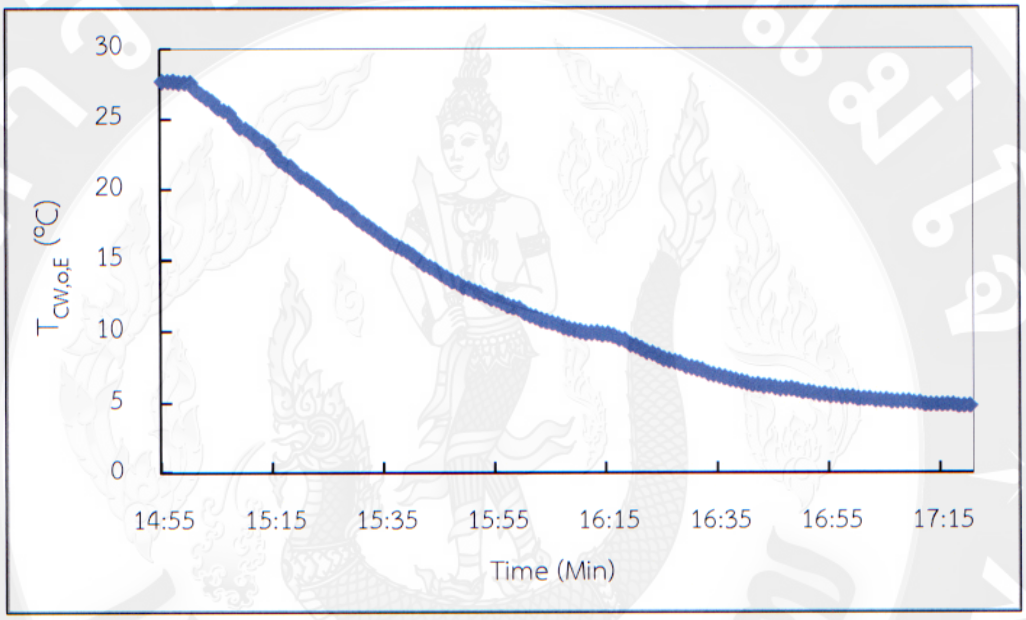

**ภาพที่ 66** แผนผังการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบใหม่

สมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับรูปแบบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบ ถือว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้ตามทฤษฎี ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยความสัมพันธ์สมการสมรรถนะที่ได้นี้จะถูกนำใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป แต่เพื่อให้การทำนายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบด้วยความสัมพันธ์สมการสมรรถนะมีความเชื่อถือได้ และพิสูจน์ความถูกต้องตามการทำงานจริงของระบบ งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในหัวข้อต่อไป และนำผลการทดสอบระบบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง

## การทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

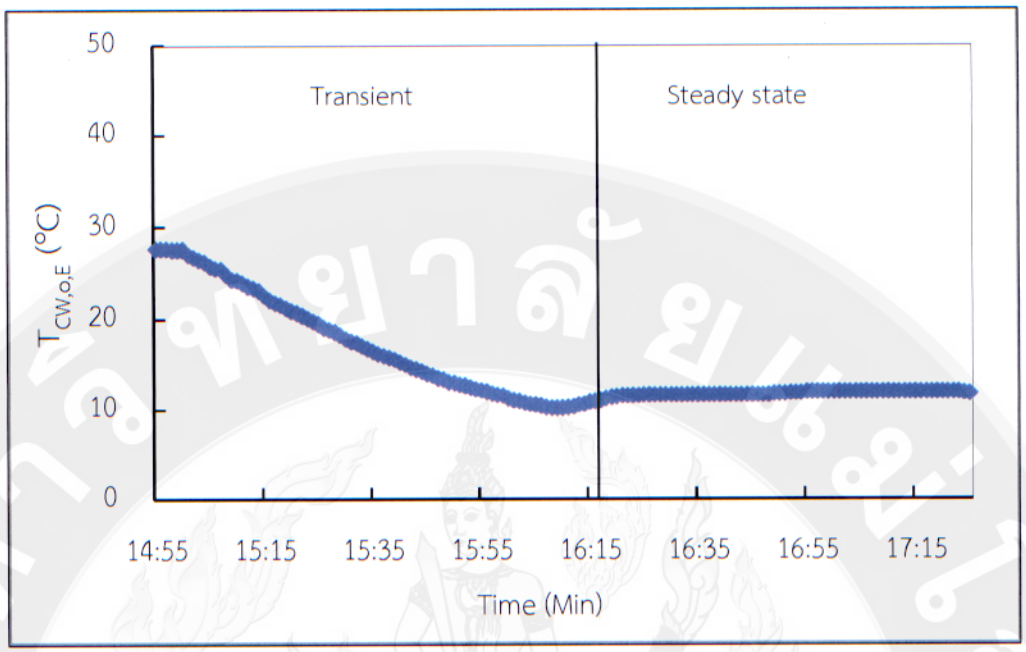
การทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดการทำความเย็นประมาณ 1 TR ที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ซึ่งระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูงและต่ำของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ โดยการป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเพื่อไปขับเคลื่อนสารทำงานในระบบอยู่ที่ประมาณ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



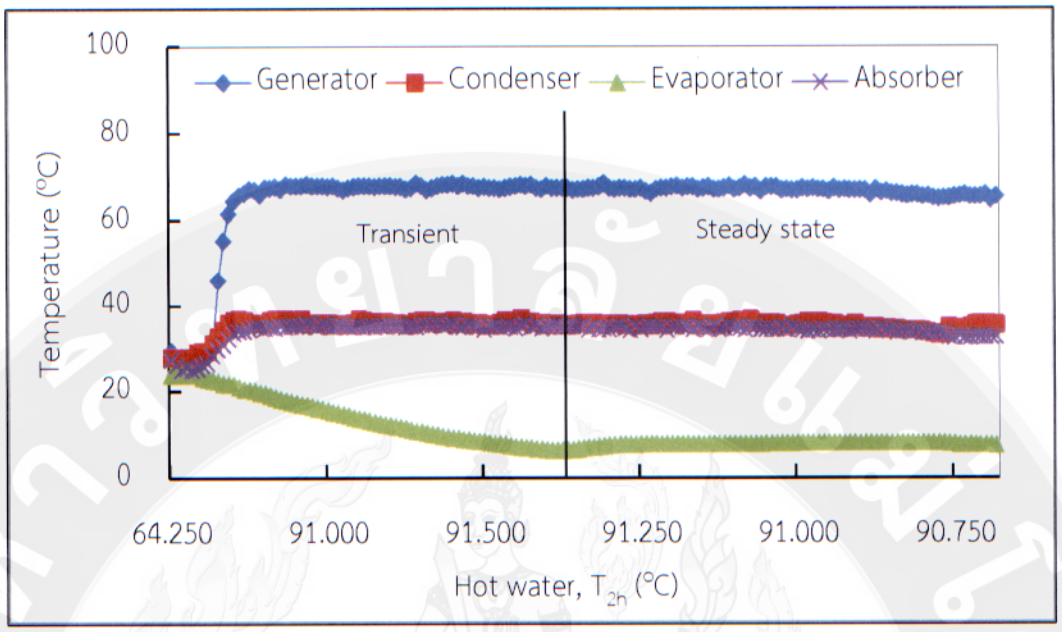

**ภาพที่ 67** อุณหภูมิน้ำเย็นที่ระบบสามารถทำได้ต่ำสุด

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



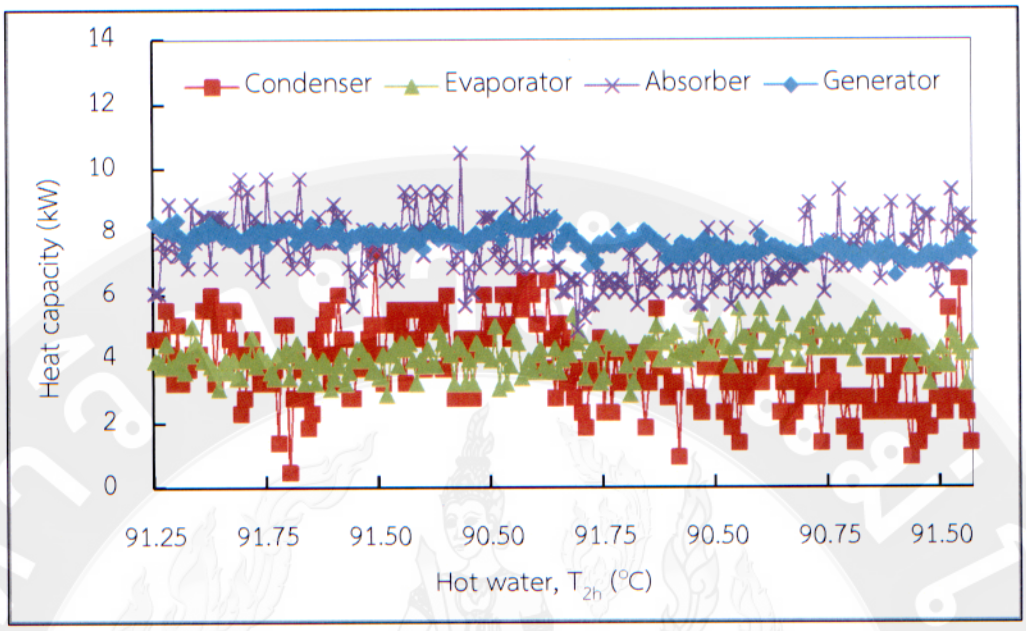

**ภาพที่ 68** อุณหภูมิน้ำเย็นที่ระบบทำงานภายใต้สภาวะคงตัว

ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์ ($T_{2h}$) กับอุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า เมื่อระบบเริ่มทำงาน (Transient time) อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำร้อน แต่เมื่อระบบเข้าสู่การทำงานที่สภาวะคงตัวแล้วอุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานระบบค่อนข้างน้อย ซึ่งทำให้อุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์มีค่าคงที่ อุณหภูมิสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยเฉลี่ย คือ อุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_G$) ประมาณ 67 °C แอบซอร์พเบอร์ ($T_A$) 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 แอบซอร์พเบอร์ ($Q_A$) 7.5 kW เครื่องระเหย ($Q_E$) 4 kW และเครื่องควบแน่น ($Q_C$) 4.2 kW




**ภาพที่ 70** อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

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

**ตารางที่ 12** อุณหภูมิสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

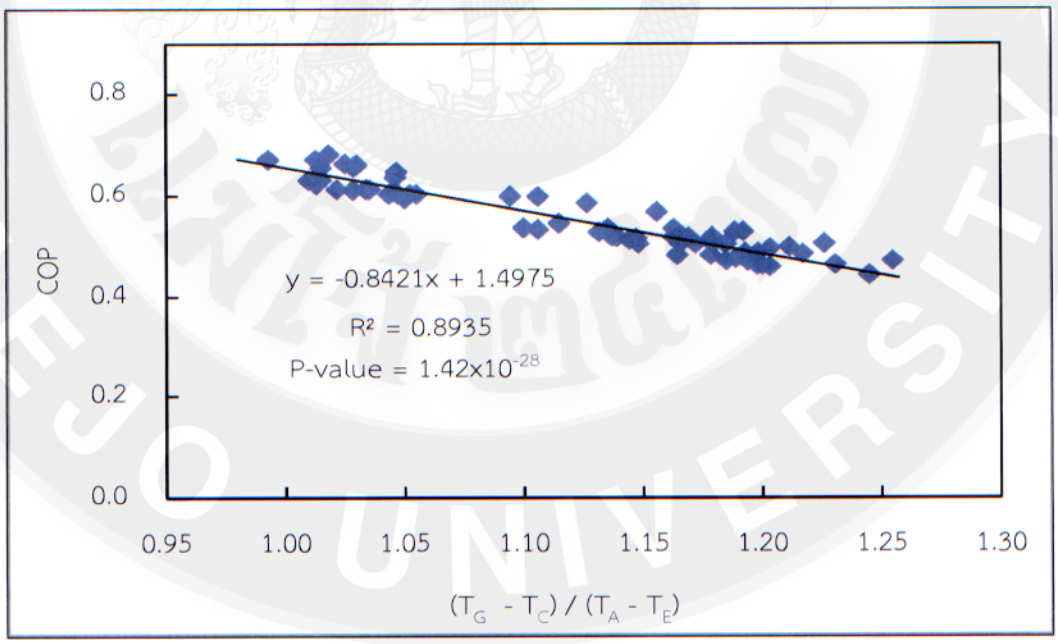
| อุปกรณ์ | อุณหภูมิสารทำงาน | อัตราการถ่ายเทความร้อน |
|---|---|---|
| เจนเนอเรเตอร์ | 67.0 | 8.0 |
| แอบซอร์พเบอร์ | 35.0 | 7.5 |
| เครื่องระเหย | 7.6 | 4.0 |
| เครื่องควบแน่น | 36.0 | 4.2 |

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

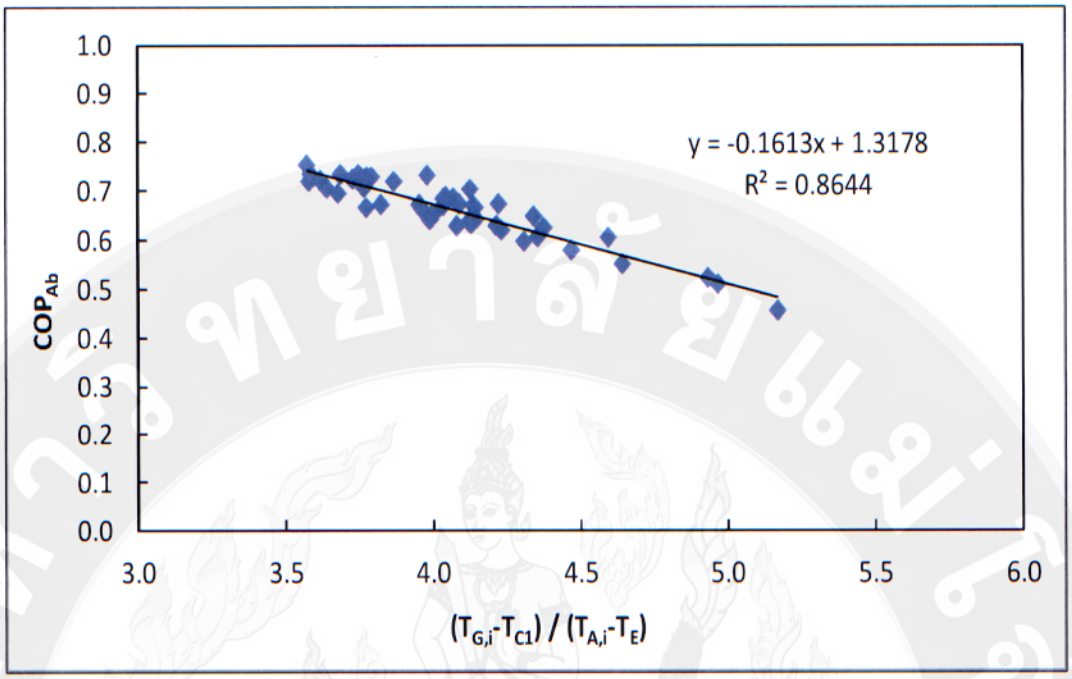
สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งส่งผลให้ค่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 0.6 เป็นประมาณ 0.4 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการย้อนกลับของวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า งานที่ป้อนให้แก่ระบบจะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงขึ้นตามไปด้วย โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถผลิตน้ำเย็นได้ประมาณ 12 $^{\circ}$C

จากภาพที่ 71 ยังพบอีกว่า ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2$ = 0.8935 และ P-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

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




**ภาพที่ 71** สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน




**ภาพที่ 72** สัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Nattaporn and Tanongkiat (2015)

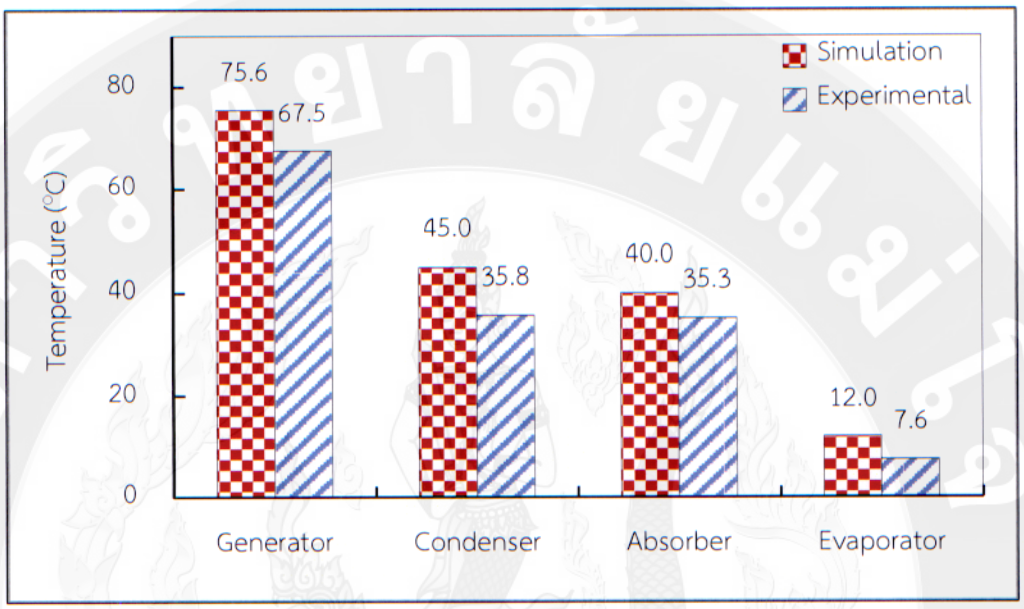
ผลทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR ที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบโดยรวมมีค่าประมาณ 0.5 ซึ่งผลทดสอบที่ได้นี้ถูกนำไปเปรียบเทียบในหัวข้อต่อไปเพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อผ่านมา

## การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อพิสูจน์ความถูกต้อง และความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการเปรียบเทียบได้มีเงื่อนไข คือ ปริมาณการทำความเย็นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกำหนดให้มีค่าเท่ากัน โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

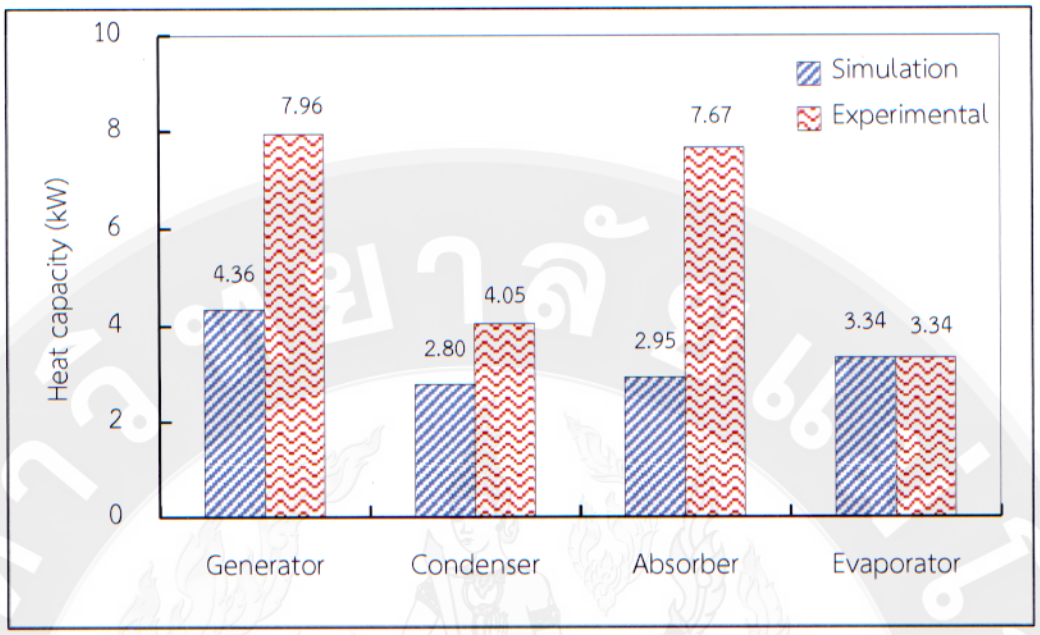
ภาพที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานโดยเฉลี่ยของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์ของระบบ ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิสารทำงานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าการทดสอบ อุณหภูมิสารทำงานในแต่

ละอุปกรณ์ของระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมการทำงานของระบบจริง แสดงว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้อย่างถูกต้อง




**ภาพที่ 73** เปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

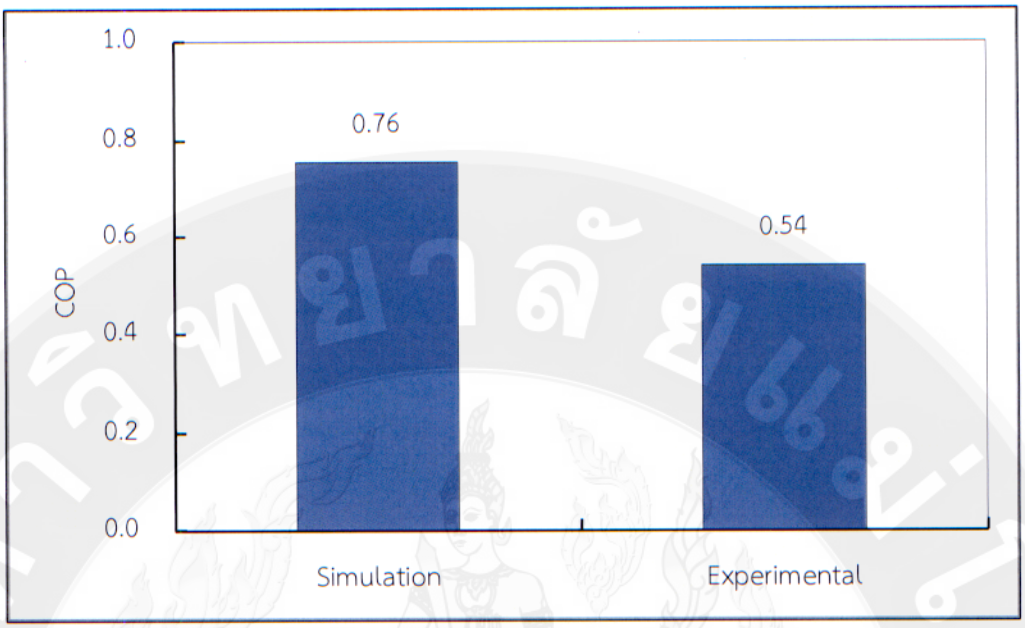
ภาพที่ 74 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้จำลองความสามารถในการทำความเย็นประมาณ 1 TR และในการทดสอบจริงได้ทำการทดสอบระบบทำความเย็นประมาณ 1 TR ดังนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบ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




**ภาพที่ 74** เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

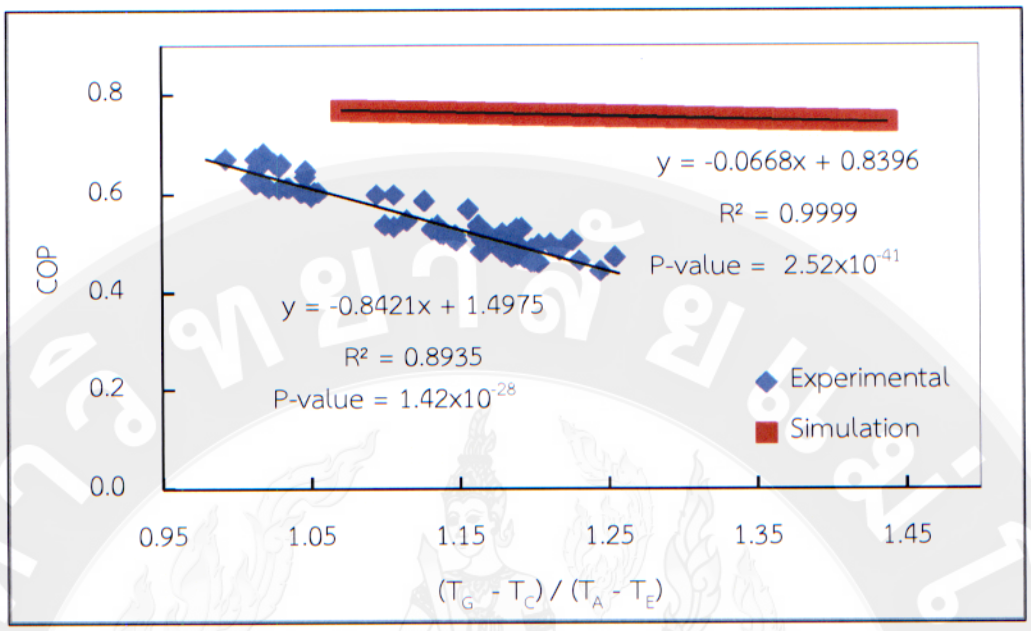
**ตารางที่ 13** ประสิทธิผลในการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

| อุปกรณ์ | ประสิทธิผล ($\varepsilon$) (%) |
|---|---|
| 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 ผลพบว่าผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ ซึ่งหมายความว่า ความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานระบบได้ค่อนข้างถูกต้องตามพฤติกรรมการทำงานของระบบจริง โดยผลการทดสอบมีค่า $R^2$ = 0.8935 และ P-value = $1.42 \times 10^{-28}$ และผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า $R^2$ = 0.9999 และ P-value = $2.52 \times 10^{-41}$



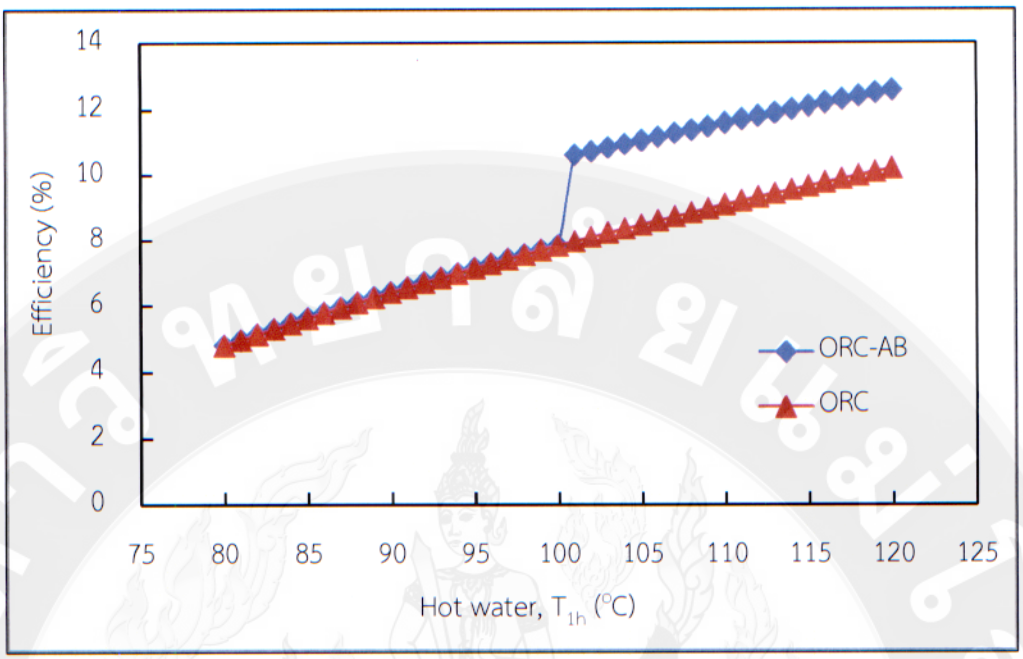

**ภาพที่ 76** เปรียบเทียบสมการสมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเพื่อดูความสัมพันธ์อุณหภูมิที่เป็นตัวแปรต้นในแกน x ที่มีผลต่อค่า COP ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ผลที่ได้พบว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบมีค่า COP แตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้ในการทดสอบมีประสิทธิผลในการถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุปกรณ์มีค่าค่อนข้างต่ำ และในการทดสอบจริงมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก แต่ยังพบว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่มีลักษณะคล้ายกับผลการทดสอบ โดยยังคงความสามารถของการอธิบายพฤติกรรมของสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบได้ และความสัมพันธ์อุณหภูมิในแกน x มีผลต่อค่า COP ที่เป็นตัวแปรตามในแกน y ของระบบ โดยลดความยุ่งยาก ซับซ้อน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังนั้นความสัมพันธ์สมการสมรรถนะของแบบจำจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์การทำงานร่วมกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ในหัวข้อต่อไป

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

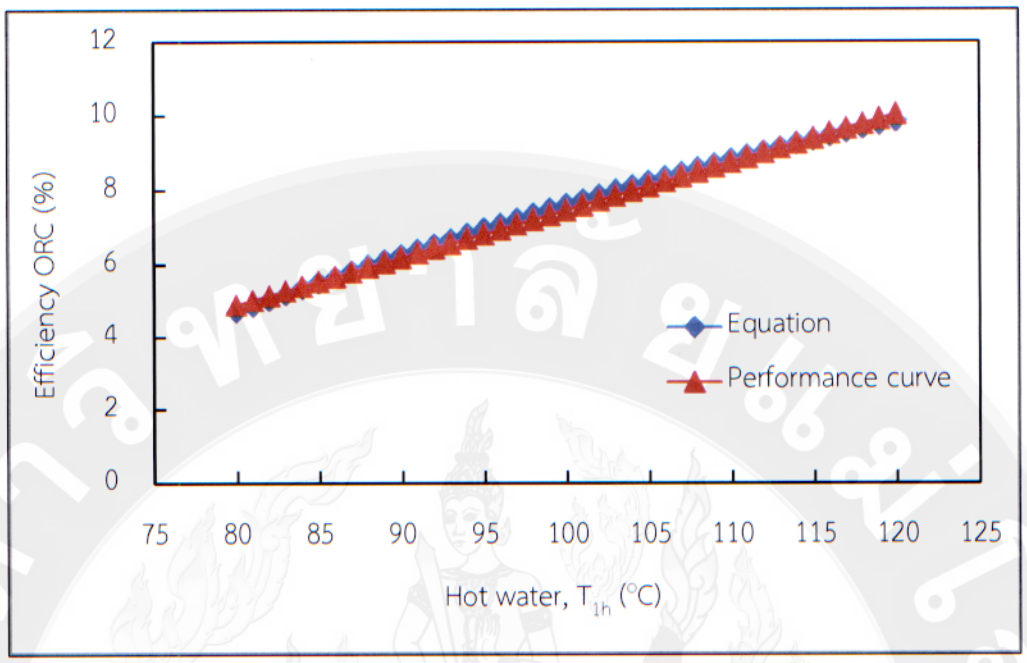
จากการการการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดสอบหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ และยังคงความสามารถของการอธิบายการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจึงใช้แบบจำลอง เพื่อทำนายพฤติกรรมการทำงานร่วมของระบบ โดยผลที่ได้มีรายละเอียดต่อไปนี้

ภาพที่ 77 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อน (วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์) และหลังการปรับปรุง (วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน) โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อน และหลังการปรับปรุงที่หม้อต้ม ($T_{1h}$) ในช่วง 80-120 °C ผลการศึกษาพบว่า ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% ซึ่งสูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง (ซึ่งไม่นำปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด) โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C ในขณะที่ระบบก่อนการปรับปรุงมีอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นประมาณ 32 °C ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นการใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งจากความร้อนทิ้งของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ ขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เหมาะสมในการทำงานร่วมของทั้งสองระบบ คือ ขนาดประมาณ 65 TR จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ยังพบอีกว่า ระบบทั้งสองสามารถเริ่มทำงานร่วมกันได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ($T_{1h}$) ประมาณ 101 °C เพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากหม้อต้มของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ไม่ต่ำกว่า 84 °C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

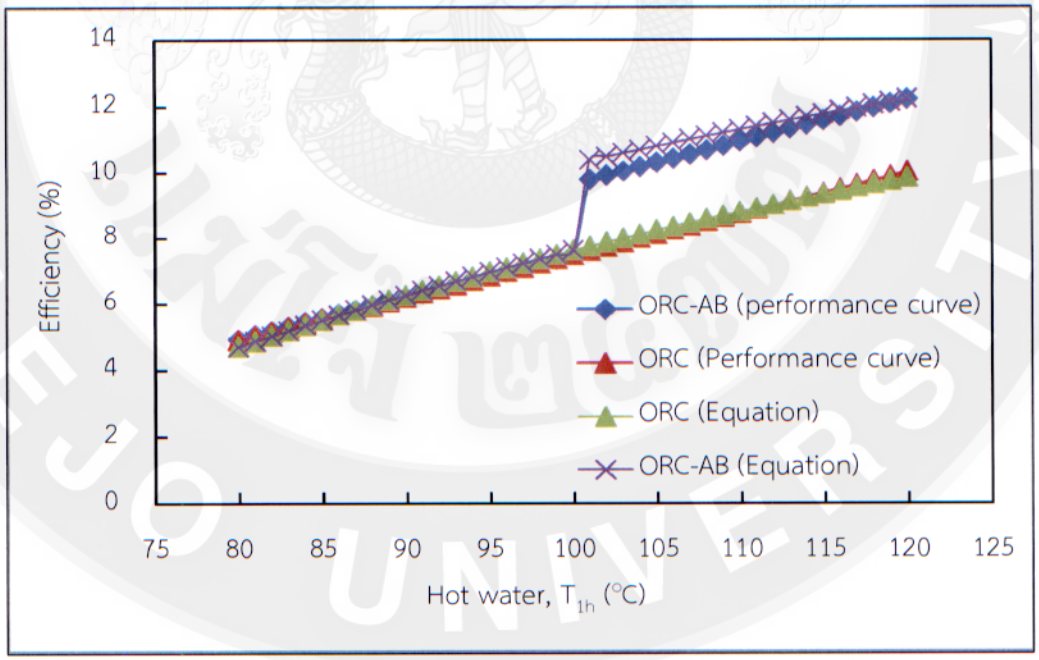



**ภาพที่ 77** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

การเปรียบเทียบความถูกต้องของความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงานของระบบ กับผลการคำนวณของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (สมดุลพลังงาน) ของหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลที่ได้พบว่าผลการเปรียบเทียบมีความใกล้เคียงกัน แต่การใช้สมการสมรรถนะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่า โดยยังคงทำนายพฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในภาพที่ 78 และภาพที่ 79 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง โดยใช้สมการสมรรถนะคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระบบก่อนและหลังปรับปรุง ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานหลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% ซึ่งสูงกว่าระบบก่อนปรังปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง



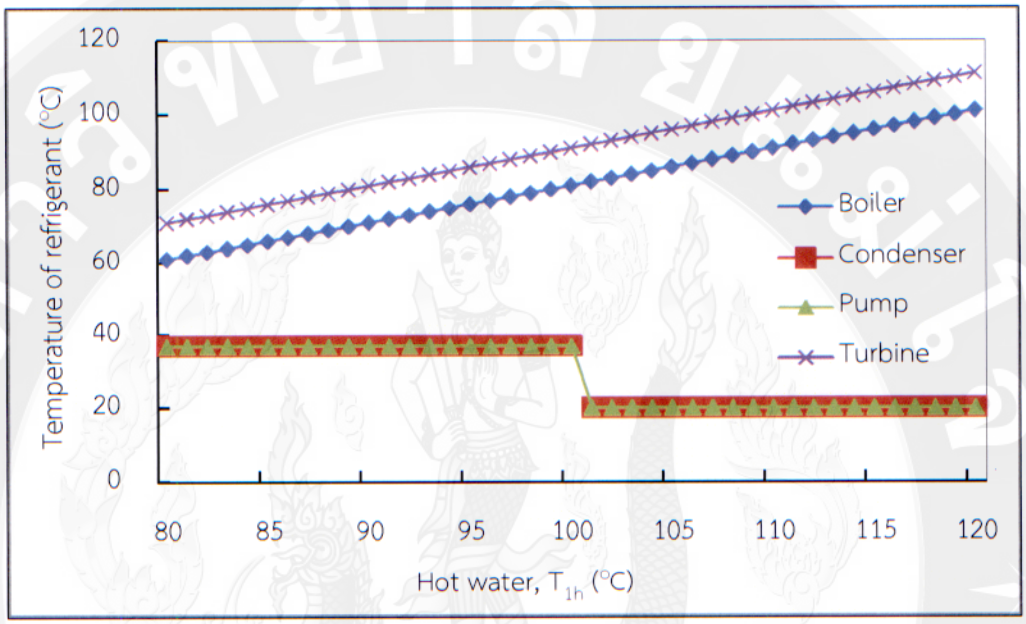

**ภาพที่ 78** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ




**ภาพที่ 79** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

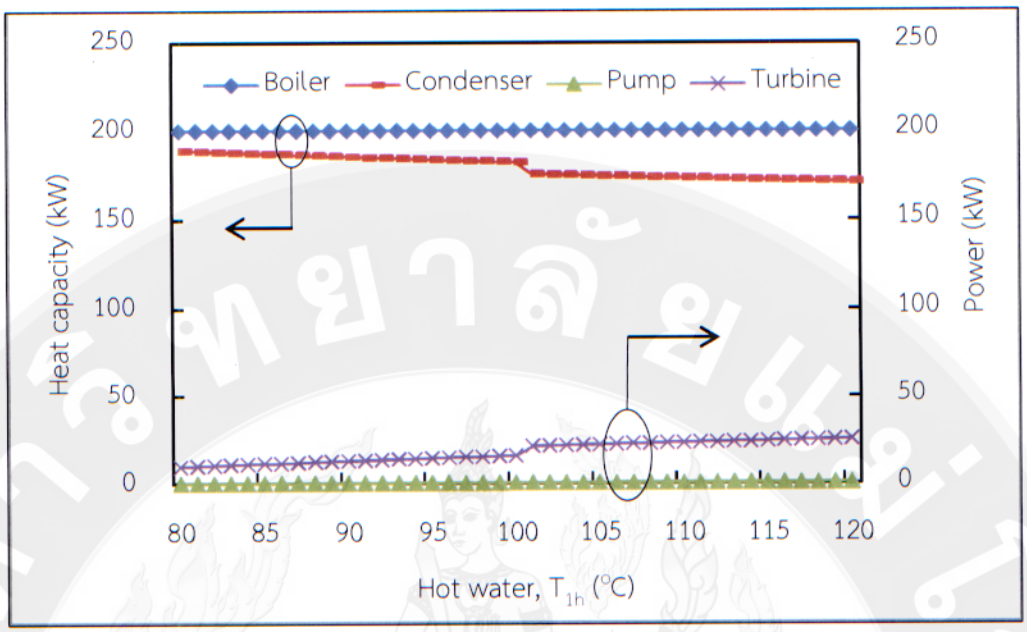
ภาพที่ 80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) ที่มีผลต่ออุณหภูมิสารทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_B$) และกังหัน ($T_{Tur}$) ซึ่งในขณะเดียวกันอุณหภูมิสารทำงาน

ที่เครื่องควบแน่น ($T_C$) และปั๊มสารทำงาน ($T_P$) ค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเริ่มทำงาน พบว่า ทำให้อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น และปั๊มสารทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ลดลง โดยลดลงจากเดิมประมาณ 40 °C มาเหลือประมาณ 20 °C




**ภาพที่ 80** อุณหภูมิสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ภาพที่ 81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบการทำงานร่วม ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้ม และกำลังงานที่ปั๊มสารทำงานในระบบค่อนข้างน้อย โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น และกำลังงานที่กังหัน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นมีค่าลดลง ในขณะกำลังงานที่ผลิตจากกังหันเพิ่มขึ้น และเมื่อระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเริ่มทำงาน พบว่า ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ลดลง ในขณะเดียวกันทำให้งานที่ผลิตได้จากกังหันเพิ่มขึ้น

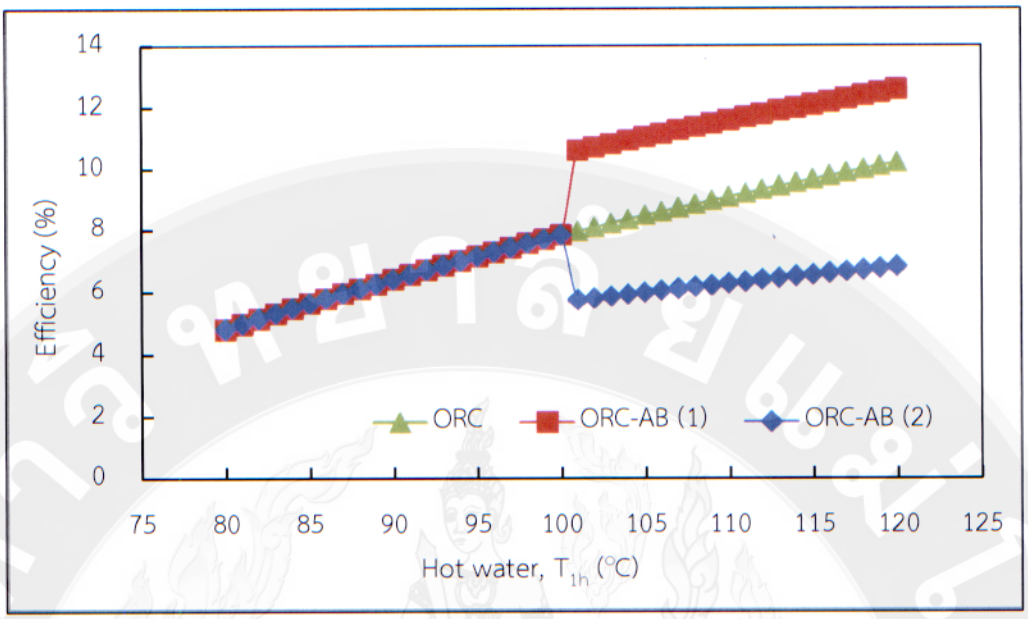



**ภาพที่ 81** อัตราการถ่ายเทความร้อนความร้อนและกำลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

เมื่อพิจารณาปริมาณความร้อนป้อนให้แก่ระทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (ORC-AB (2)) โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC\text{-}AB\ (2)} = [(W_{Tur} - W_P - W_{SP}) / (Q_B + Q_G)] \qquad \text{สมการที่ 4.17}$$

เมื่อนำสมการ 4.17 มาใช้ในการวิเคราะห์การทำงานร่วมของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ที่ใช้สมการ 2.26 ($\eta_{ORC\text{-}AB\ (1)} = [(W_{Tur} - W_P - W_{SP}) / (Q_B)]$) ผลที่ได้พบว่า ระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่นำปริมาณความร้อนป้อนให้แก่ระทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด มีประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง โดยประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 6% ซึ่งต่ำกว่าระบบก่อนปรับปรุง (ORC) ที่มีค่าประมาณ 8% หรือลดลงประมาณ 25% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง ดังแสดงในภาพที่ 82

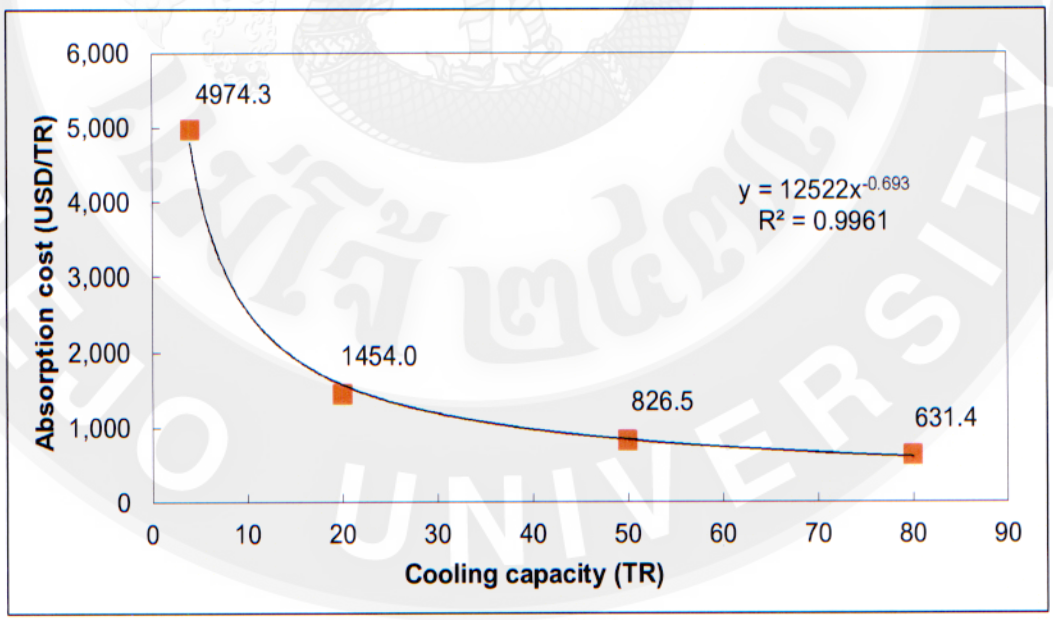



**ภาพที่ 82** การเปรียบเทียบแนวทางการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ใช้สารทำงาน R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนใช้สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ซึ่งอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ($T_{1h}$) ในช่วง 80-120 °C พบว่า ระบบร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% (ซึ่งไม่นำปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาคิด) สูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C โดยระบบทั้งสองสามารถเริ่มทำงานร่วมกันได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้ม ประมาณ 101 °C และระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นการใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งจากความร้อนทิ้งของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ ขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เหมาะสมในการทำงานร่วมของทั้งสองระบบ คือ ขนาดประมาณ 65 TR จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการทำงานร่วมนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในหัวข้อต่อไป

## ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ระบบก่อน และหลังการปรับปรุง โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณามูลค่าของเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เนื่องจากพิจารณาแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทั้งสองเป็นความร้อนทิ้ง ผลที่ได้พบว่า ราคาระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีมูลค่าลงทุนเริ่มต้นประมาณ 5,400,000 Baht ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบหลังการปรังปรุงถือว่ามีมูลค่าต่ำกว่า โดยราคาระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีมูลค่าลงทุนเริ่มต้นประมาณ 7,200,000 Baht แต่เนื่องด้วยระบบหลังการปรังปรุงมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าระบบก่อนการปรับปรุง ทำให้ผลการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (LEC) ของระบบหลังการปรับปรุงมีมูลค่าประมาณ 4.22 Baht/kWh ซึ่งต่ำกว่าระบบก่อนการปรับปรุงที่มีมูลค่าประมาณ 4.46 Baht/kWh หรือลดลงประมาณ 5.5% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยรายระเอียดแสดงดังตารางที่ 14 ซึ่งราคาระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืนคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความสารถในการทำความเย็นที่มีผลต่อราคาของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในภาพที่ 83 ต่อไปนี้




**ภาพที่ 83** ราคาระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืน

ที่มา : Nattaporn and Tanongkiat (2015)

**ตารางที่ 14** ผลการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบก่อน และหลังการปรับปรุง

| รายระเอียด | ระบบก่อนการปรับปรุง | ระบบหลังการปรับปรุง |
|---|---|---|
| วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($kW_e$) | 20 | 20 |
| ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (TR) | - | 65 |
| มูลค่าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์[1] (Baht) | 2,203,750 | 2,203,750 |
| มูลค่าภาษีการนำเข้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Baht) | 661,125 | 661,125 |
| มูลค่าโรงเรือน (Baht) | 2,500,000 | 2,500,000 |
| มูลค่าของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน[2] (Baht) | - | 1,833,520 |
| มูลค่าดำเนิน และบำรุงรักษาของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Baht/y) | 110,188 | 110,188 |
| มูลค่าดำเนิน และบำรุงรักษาของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Baht/y) | - | 91,676 |
| มูลค่าซากของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (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] มูลค่าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ = (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] $W_{Tur} = Q_B \eta_{ORC} t_{op}$

[4] ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยคำนวณจากสมการ 2.31

# บทที่ 5
# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ สามารถสรุปผล และข้อเสนอแนะได้ดังรายละเอียดของงานวิจัยต่อไปนี้

## สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ขนาด 20 $kW_e$ ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่หม้อต้ม ขณะที่อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นอยู่ที่ประมาณ 30 °C ผลพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จะลดลงประมาณ 6% เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนต่ำกว่า 100 °C ขณะที่ประสิทธิภาพโดยรวมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ อยู่ที่ประมาณ 8% และยังพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันต่ำของระบบ ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$) ในรูปแบบสมการเส้นตรง โดยสมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) + 1.8222$

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่มีสารทำงานในระบบ คือ สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ โดยการป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเพื่อไปขับเคลื่อนสารทำงานในระบบอยู่ที่ประมาณ 80-110 °C โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าเครื่องควบแน่นเท่ากับ 32 °C ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีประมาณ 0.8 โดยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนที่ประมาณ 84 °C ทั้งนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไข คือ ความเข้มข้นสูงและต่ำของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ คือ 60 %LiBr และ 55 %LiBr ตามลำดับ และยังพบอีกว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีความสัมพันธ์ กับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำของระบบ

$[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)]$ ในรูปแบบสมการเส้นตรง สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$

จากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีพฤติกรรมการทำงานที่คล้ายกับผลการทดสอบ และยังคงความสามารถของการอธิบายพฤติกรรมการทำงานของระบบได้ ดังนั้นในการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมการทำงานร่วมของระบบ โดยผลชองระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า มีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C นอกจากนี้ยังพบอีกว่าระบบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเป็นการใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งจากความร้อนทิ้งของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ ขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่เหมาะสมในการทำงานร่วมของทั้งสองระบบ คือ ขนาดประมาณ 65 TR โดยระบบร่วมสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มประมาณ 101 °C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## ข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานวิจัย โดยภาพรวมถือว่า ผลการดำเนินงานดังกล่าวเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย แต่งานวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งยังไม่ได้ทำการพิสูจน์โดยผลการทดสอบในการทำงานร่วมกันจริง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ทำการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในสภาวะการทำงานจริงต่อไป

# บรรณานุกรม


จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล, อนุรัตน์ เทวตา, กันยาพร ไชยวงศ์, ธรณิศวร์ ดีทายาท, และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2557. การวิเคาะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากระบบ ORC ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ใน **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7** ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์.

ชัยพร เชียนพาณิช. 2011. **สถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย** [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : http://ton4aliving.blogspot.com/2011/10/blog-post_05.html. (20 ธันวาคม 2559).

ธนาคารกสิกรไทย. 2559. **อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ** [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : http://www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/Lending/Pages/Lending.aspx. (20 ธันวาคม 2559).

_____. 2560. **อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ** [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : http://www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/ForeignExchange/Pages/ForeignExchange.aspx. (09 กุมภาพันธ์ 2560).

นัฐพร ไชยญาติ. 2559. **การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery)**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่ : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

_____. 2559. **การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable Energy System Design)**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่ : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Al-Sulaiman, F, Ibrahim, D, & Feridun, H. 2012. Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle. **Energy**, 45, 975-985.

Alessandro, F. 2011. Power production from a moderate temperature geothermal resource with regenerative Organic Rankine Cycles. **Energy for Sustainable Development,** 15, 411-419.

Antotio, J, Luis, F, Diane, L, & Lesme, A. 2000. **Thermodynamic Simulation of a Solar Absorption Refrigeration System Generator-Heat Exchanger.** [Online], Available : http://iies.faces.ula.ve/amse2000/papers/simulation/MSNN2000_Bula.pdf. (20 December 2559).

Babu, B, & Maruthi Prasad, G. Yadav. 2015. Performance Analysis of Lithium-Bromide Water Absorption Refrigeration System Using Waste Heat of Boiler Flue Gases.

**International Journal of Engineering Research And Management,** 02, 042-047.

Bernardo, P, Joaquín, N-E, Francisco, M, Manuel, G, & Adrián, M-B. 2015. Experimental characterization of an ORC (organic Rankine cycle) for power and CHP (combined heat and power) applications from low grade heat sources. **Energy,** 82, 269-276.

Chaiyat, N. 2015. Assessment Alternative Energy for Organic Rankine Cycle Power Plant in Thailand. **International Journal of Engineering and Technology (IJET),** 7, 317-326.

Chaiyat, N, & Kiatsiriroat, T. 2015. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system. **Energy,** 91, 363-370.

Duccio, T, & Daniele, F. 2013. Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy. **Energy,** 58, 45-51.

Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2010. Annual year final report.

F-Tchanche, F, Bertrand, Gr, Lambrinos, A, & Papadakis, G. 2011. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** 15, 3963-3979.

Galloni, E, Fontana, G, & Staccone, S. 2015. Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid. **Energy,** 90, 768-775.

Hailei, W, Richard, P, & Tom, H. 2011. Design study of configurations on system COP for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle). **Energy,** 36, 4809-4820.

Jing, L, Gang, P, Jie, J, Xiaoman, B, Pengcheng, L, & Lijun, X. 2014. Design of the ORC (organic Rankine cycle) condensation temperature with respect to the expander characteristics for domestic CHP (combined heat and power) applications. **Energy,** 77, 579-590.

Jing, L, Gang, P, Yunzhu, L, Dongyue, W, & Jie, J. 2012. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. **Energy,** 38, 85-95.

Man, W, Jiangfeng, W, Yuzhu, Z, Pan, Z, & Yiping, D. 2013. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors. **Applied Thermal Engineering,** 50, 816-825.

Noboru, Y, Yoshihito, T, & Takanori, Y. 2014. Demonstration of 10-Wp micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery. **Energy,** 78, 806-813.

Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Tatsiopoulos, I. 2009. Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. **Energy Conversion and Management,** 50, 674-681.

Tongsopit, S, & Greacen, C. 2012. **Thailand renewable energy policy fits and opportunities for international support**. [Online], Available : http://pdf.wri.org/wri_fair_fit_workshop_presentation_thailand_tongsopit_greacen.pdf. (20 December 2016).

Ye-Qiang, Z, Yu-Ting, W, Guo-Dong, X, Chong-Fang, M, Wei-Ning, J, Shan-Wei, L, & Fu-Bin, Y. 2014. Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for waste heat recovery from exhaust of diesel engine. **Energy**, 77, 499-508.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

# การคำนวณของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## การใช้ Function ของโปรแกรมสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Refprop)

Function การหาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลต่าง ๆ ประกอบไปด้วยคำสั่ง Temperature, Pressure, Density, LiquidDensity, VaporDensity, Volume, Energy, Enthalpy, Entropy, IsochoricHeatCapacity (or: Cv), IsobaricHeatCapacity (or: Cp), SpeedOfSound (or: Sound), Quality, Viscosity, ThermalConductivity, SurfaceTension และ DielectricConstant โดยสามารถเรียกใช้งานบน Microsoft Excel spreadsheet หรือพัฒนาต่อบน Visual basic ก็ได้ ทั้งนี้รูปแบบการเรียกใช้งานของแต่ละ Function มีโครงสร้างดังต่อไปนี้

= Function("Refrigerant","Type","Unit",Input1,Input2)

Function คือ ชื่อสมบัติที่ต้องการทราบ (ชื่อ Function ต่าง ๆ ด้านบน)

Refrigerant คือ ชื่อสารทำงานในระบบที่สามารถเรียกใช้งานได้ โดยสารทำงานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารเดี่ยวที่มีจุดเดือดค่าเดียว ถูกเก็บไว้ใน Folder ของโปรแกรมชื่อ fluids และสารผสมที่เกิดจากสารเดี่ยวหลายชนิดผสมกัน ถูกเก็บไว้ใน Folder ของโปรแกรมชื่อ mixtures

Type คือ ประเภทของข้อมูลที่ทราบค่า โดยปกติต้องป้อน 2 ค่า ใช้เป็นสัญลักษณ์อันประกอบไปด้วย Density (D), Volume(V), Energy (E), Enthalpy (H), Entropy (S), Pressure (P), Temperature (T) และ Quality (Q) เมื่อนำมารวมกันสามารถแสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ TP, TD, TH, TE, TS, TQ, PD, PS, PE, PQ, DH, DS, DE และ HS สำหรับค่าที่เส้นอิ่มตัว (Saturated) สามารถใช้ข้อมูลเพียงค่าเดียว แต่ต้องมีอักษรย่อตามหลัง คือ LIQ (Liquid) และ VAP (Vapor) ดังตัวอย่างต่อไปนี้ TLIQ, TVAP, PLIQ และ PVAP

Unit คือ สัญลักษณ์หน่วยที่ต้องการให้โปรแกรมแสดงผลออกมา โดยอักษรย่อ สัญลักษณ์และหน่วยที่แสดงผลมีดังต่อไปนี้

SI: K, MPa, mol/dm$^3$, J/mol, J/mol·K, m/s, uPa·s, mW/m·K

mks: K, kPa, kg/m$^3$, kJ/kg, kJ/kg·K, m/s, uPa·s, W/m·K

cgs: K, MPa, g/cm$^3$, J/g, J/g·K, cm/s, uPa·s, mW/m·K

E: F, psia. Lb/ft$^3$, ft$^3$/lb, Btu/lb, Btu/lb·R, ft/s, lb/ft·s, Btu/h·ft·F

M: K, psia, g/cm$^3$, cm$^3$/g, J/g, J/g·K, m/s, uPa·s, mW/m·K

Input1 และ Input2 คือ ข้อมูลที่ต้องการป้อนเรียงตามประเภท Type และตามหน่วยของ Unit

ตัวอย่างเช่น =Density("argon","TP","E",100,250)

## ตัวอย่างการคำนวณของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ตัวอย่างการคำนวณของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยจำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa ซึ่งใช้โปรแกรม Refprop (Version 9.1) คำนวณบน Microsoft Excel โดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังต่อไปนี้

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. | สารทำงานในระบบ | R-245fa | |
| 2. | อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม ($T_{1h}$) | 90 | °C |
| 3. | อุณหภูมิน้ำเย็นที่เข้าระบบ ($T_{3C}$) | 32 | °C |
| 4. | ผลต่างของออุณหภูมิสารทำงานกับน้ำระบายความร้อน ($T_{ref} - T_{1C}$) | 3 | °C |
| 5. | ผลต่างของออุณหภูมิน้ำร้อนกับสารทำงาน ($T_{2h} - T_{ref}$) | 3 | °C |
| 6. | ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้า-ออกระบบ ($\Delta T_{HW}$) | 15 | °C |
| 7. | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่หม้อต้ม ($Q_B$) | 200 | kW |
| 8. | ผลต่างของออุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้า-ออกระบบ ($\Delta T_{CW}$) | 5 | °C |
| 9. | ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหัน ($\eta_{S,Tur}$) | 85 | % |
| 10. | ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{S,P}$) | 85 | % |
| 11. | Supper heating (SH) | 10 | °C |
| 12. | Subcooling (SC) | 0 | °C |

แนวทางการวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1) หาอุณหภูมิของสารทำงานที่หม้อต้มและเครื่องควบแน่น

อุณหภูมิสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_B = T_{1h} - \Delta T_{HW} - (T_{2h} - T_{ref})$) 72 °C

อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C = T_{3C} + \Delta T_{CW} + (T_{ref} - T_{1C})$) 40 °C

ขั้นตอนที่ 2) หาความดันของสารทำงานที่หม้อต้มและเครื่องควบแน่น

ความดันด้านสูงพิจารณาที่หม้อต้ม ($P_H = f(T_B)$) 642.79 kPa

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Pressure("R245fa","Tvap","mks",273.15+72)

ความดันด้านต่ำพิจารณาที่เครื่องควบแน่น ($P_L = f(T_C)$) 250.46 kPa

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Pressure("R245fa","Tvap","mks",273.15+40)

ขั้นตอนที่ 3) พิจารณาสารทำงานที่ปั๊มสารทำงาน

อุณหภูมิสารทำงานจุดที่ 1 ($T_1 = T_C - SC$) 40 °C

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 1 ($h_1 = f(T_C - SC)$) 252.57 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Enthalpy("R254fa","Tliq","mks",273.15+40)

ปริมาตรสารทำงานจุดที่ 1 ($\nu_1=f(T_1)$) 0.00077 $m^3$/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Volume("R254fa","Tliq","mks",273.15+40)

เอนโทรปีจุดที่ 1 ($s_1=f(T_1)$) 1.18 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Entropy("R254fa","Tliq","mks",273.15+40)

เอนโทรปีจุดที่ 2 ($s_{2s}=s_1$) 1.18 kJ/kg·K

เอนทัลปีสารทำงานที่จุด 2s ($h_{2s}=f(P_H,s_{2s})$) 252.87 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Enthalpy("R254fa","PS","mks",642.79,1.18)

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 2 $\left( h_2 = \left[ \frac{(h_{2s} + h_1)}{\eta_{s,P}} \right] + h_1 \right)$ 252.93 kJ/kg

อุณหภูมิสารทำงานจุดที่ 2 ($T_2=f(P_H,h_2)$) 40.19 °C

คำสั่งที่ใช้บน Excel คือ = Temperature("R254fa","PH","mks",642.79,252.93)-273.15

ขั้นตอนที่ 4) พิจารณาสารทำงานที่หม้อต้ม

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 2′ ($h_{2'}=f(T_B)$) 297.49 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Enthalpy("R254fa","Tliq","mks",273.15+80)

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 3′ ($h_{3'}=f(T_B)$) 456.36 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Enthalpy("R254fa","Tvap","mks",273.15+80)

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 3 ($h_3=f(T_B+SH,P_H)$) 467.77 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Excel คือ = Enthalpy("R254fa","TP","mks",273.15+80+10,642.79)

อุณหภูมิสารทำงานจุดที่ 3 ($T_3=T_B+SH$) 82 °C

เอนโทรปีจุดที่ 3 ($s_3=f(T_3,P_H)$) 1.81 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Entropy("R254fa","TP","mks",273.15+82,642.79)

ขั้นตอนที่ 5) พิจารณาสารทำงานที่กังหัน

เอนโทรปีจุดที่ 4s ($s_{4s}=s_3$) 1.81 kJ/kg·K

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 4s ($h_{4s} = f(P_L,s_{4s})$) 449.76 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Enthalpy("R254fa","PS","mks",250.46,1.81)

เอนทัลปีสารทำงานจุดที่ 4 ($h_4=h_3-\eta_{s,Tur}(h_3-h_{4s})$) 452.46 kJ/kg

อุณหภูมิสารทำงานจุดที่ 4 ($T_4=f(P_L,h_4)$) 58.69 °C

คำสั่งที่ใช้บน Excel คือ = Temperature("R254fa","PH","mks",250.46,452.46)-273.15

เอนโทรปีจุดที่ 4 ($s_4=f(P_L,h_4)$) 1.82 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Entropy("R254fa","PH","mks",250.46,452.46)

เอนโทรปีของสารทำงานในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิควบแน่น ($s_{f,c}=f(T_C)$)

1.18 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Entropy("R254fa","Tliq","mks",273.15+40)

เอนโทรปีของสารทำงานในสถานะของไออิ่มตัวที่อุณหภูมิควบแน่น ($s_{g,c}=f(T_C)$)

1.76 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Entropy("R254fa","Tvap","mks",273.15+40)

เอนโทรปีของการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิควบแน่น ($s_{fg,C} = s_{g,C} - s_{f,C}$) 0.58 kJ/kg·K

ขั้นตอนที่ 6) พิจารณาปริมาณไอของสารทำงานที่ออกจากกังหัน

ปริมาณไอของสารทำงานที่ออกจากกังหัน $\left( qv_4 = \frac{(s_4 - s_{f,C}) \times 100}{s_{f,C}} \right)$

110.05 %

ขั้นตอนที่ 7) พิจารณาปริมาณอัตราการไหลของสารทำงาน

อัตราการไหลของสารทำงาน ($\dot{m}_{ref} = Q_B / (h_3 - h_2)$) 0.93 kg/s

ขั้นตอนที่ 8) พิจารณาความสูงของของไหลเทียบเท่า

ความหนาแน่นของสารทำงานที่ออกจากปั๊มสารทำงาน ($\rho_2 = f(T_2)$) 1296.16 $kg/m^3$

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = Density("R254fa","Tliq","mks",273.15+40.19)

เทียบเท่าความสูงของของไหล $\left( H_2 = \frac{P_H}{\rho_2 g} \times 1000 \right)$ 50.55 m

ขั้นตอนที่ 9) พิจารณาความสามารถด้านความร้อนของอุปกรณ์ในระบบ

งานที่ได้จากกังหัน ($W_{Tur} = \dot{m}_{ref}(h_3 - h_4)$) 14.25 kW

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น ($Q_C = \dot{m}_{ref}(h_4 - h_1)$) 186.08 kW

งานที่ต้องป้อนให้แก่ปั๊มสารทำงาน ($W_P = (\dot{m}_{ref} v_1 (P_H - P_L))/\eta_{s,P}$) 0.33 kW

ขั้นตอนที่ 10) หาค่าประสิทธิภาพของระบบ ORC

ค่าประสิทธิภาพ ($\eta_{ORC} = [(W_{Tur,e} - W_P) / Q_B]100$ ) 6.97 %

## สมบัติสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์

เอนทัลปี ความเข้มข้นสารละลาย และอุณหภูมิสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (ASHRAE, 2009)

สำหรับ ความเข้มข้น (Concentration) $X < 40$ (%LiBr)

อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $15 < T < 165$ (°C)

$$h = 21.4817157 - 2.38366711(X) + 3.90458186(T) + 0.03625001(X^2) + 5.25010607\times10^{-4}(T^2) - 0.0369249939(T\cdot X), \text{ [kJ/kg]}$$

สำหรับ ความเข้มข้น (Concentration) $40 \le X < 70$ (%LiBr)

อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $15 < T < 165$ (°C)

$$h = \sum_0^4 A_n X^n + T\sum_0^4 B_n X^n + T^2\sum_0^4 C_n X^n, \text{ [kJ/kg]}$$

เมื่อ $A_0$ = -2024.33 $B_0$ = 18.2829 $C_0$ = -3.7008214 E-2

$A_1$ = 163.309 $B_1$ = -1.1691757 $C_1$ = 2.8877666 E-3

$A_2$ = -4.88161 $B_2$ = 3.248041 E-2 $C_2$ = -8.1313015 E-5

$A_3$ = 6.302948 E-2 $B_3$ = -4.034184 E-4 $C_3$ = 9.9116628 E-7

$A_4$ = -2.913705 E-4 $B_4$ = 1.8520569 E-6 $C_4$ = -4.4441207 E-9

อุณหภูมิสารละลาย อุณหภูมิสารทำงาน และความดันสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (ASHRAE, 2009)

สำหรับ อุณหภูมิสารทำงาน (Refrigerant temperature) $-15 < T_{ref} < 110$ (°C)

อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $5 < T < 175$ (°C)

ความเข้มข้น (Concentration) $45 < X < 70$ (%LiBr)

$$T = \sum_0^3 B_n X_n + T_{ref}\sum_0^3 A_n X^n, \text{ [°C]}$$

$$T_{ref} = (T - \sum_0^3 B_n X^n)/\sum_0^3 A_n X^n, \text{ [°C]}$$

$$\text{Log}(P) = C + D/T_{ref} + E/T_{ref}^2 \quad (P = \text{kPa}, T_{ref} = \text{K})$$

$$T_{ref} = \frac{-2E}{D + (D^2 - 4E[C - \log(P)])^{0.5}}, \text{ [P = kPa, } T_{ref} = \text{K]}$$

เมื่อ $A_0$ = -2.00755 $B_0$ = 124.937 C = 7.05

$A_1$ = 0.16976 $B_1$ = -7.71649 D = -1596.49

$A_2$ = -3.133362 E-3 $B_2$ = 0.152286 E = -104095.5

$A_3$ = 1.97668 E-5 $B_3$ = -7.9509 E-4

ความหนาแน่นของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (Khairulin et al., 2006)

สำหรับ อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $T < 250$ (°C)

ความเข้มข้น (Concentration) $30 < X < 65$ (%LiBr)

$$\rho(T,m) = \rho_0(T)[1 + d_0(T)m + d_1(T)m^{1.5} + d_2(T)m^2], \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$m = \frac{(X/100)}{M_S}(1-[X/100]), \text{ [mole/kg]}$$

$$d_j(T) = \sum_{i=0}^{4} C_{ji}T^i$$

$\rho_0(T)$ = Density of pure water (kg/m$^3$)

$M_S$ = 0.086845 [kg/mole]

**ตารางผนวกที่ 1** ค่าคงที่ $C_{ji}$

| j/i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 6.9979 E-2 | -9.36591 E-5 | 1.1770035 E-6 | -2.829722 E-9 | 7.963374 E-12 |
| 1 | -7.30855 E-3 | 1.78947 E-5 | -3.458841 E-8 | -8.88725 E-10 | 1.085224 E-12 |
| 2 | 1.811867 E-4 | -1.9292 E-6 | -1.565022 E-8 | 2.082693 E-10 | -3.761121 E-13 |

ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Cp) ของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (Kaita, 2000)

สำหรับ อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $40 < T < 210$ (°C)

ความเข้มข้น (Concentration) $40 < X < 65$ (%LiBr)

$$Cp = A_0 + A_1X + (B_0 + B_1X)T, \text{ [kJ/kg·K]}$$

เมื่อ $A_0$ = 3.462023 $B_0$ = 1.3499 E-3

$A_1$ = -2.679895 E-2 $B_1$ = -6.55 E-6

เอนโทรปีของสารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ (Feuerecker, 1993)

สำหรับ อุณหภูมิสารละลาย (Solution temperature) $40 < T < 210$ (°C)

ความเข้มข้น (Concentration) $40 < X < 65$ (%LiBr)

$$S = \sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3} B_{ij}X^jT^i, \text{ [kJ/kg·K]}$$

**ตารางผนวกที่ 2** ค่าคงที่ $B_{ij}$

| i | $B_{i0}$ | $B_{i1}$ | $B_{i2}$ | $B_{i3}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 5.127558 E-01 | -1.393954 E-02 | 2.924145 E-05 | 9.035697 E-07 |
| 1 | 1.226780 E-02 | -9.156802 E-05 | 1.820453 E-08 | -7.991806 E-10 |
| 2 | -1.364895 E-05 | 1.068904 E-07 | -1.381109 E-09 | 1.529784 E-11 |
| 3 | 1.021501 E-08 | 0 | 0 | 0 |

## ตัวอย่างการคำนวณของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ตัวอย่างการคำนวณของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังต่อไปนี้

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | สารทำงานที่ใช้ในระบบ คือ | $H_2O$-LiBr | |
| 2 | ความร้อนทิ้ง | WATER | |
| 3 | อุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ($T_{2h}$) | 85 | °C |
| 4 | อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ป้อนเข้าสู่แอบซอร์พเบอร์ ($T_{5C}$) | 32 | °C |
| 5 | ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้า-ออกระบบ ($T_{2h} - T_{3h}$) | 5 | °C |
| 6 | ผลต่างของออุณหภูมิน้ำร้อนกับสารละลาย ($T_{3h} - T_S$) | 3 | °C |
| 7 | ผลต่างของออุณหภูมิสารทำงานกับน้ำระบายความร้อน ($T_{ref} - T_{8C}$) | 3 | °C |
| 8 | ผลต่างของอุณหภูมิสารละลายกับน้ำระบายความร้อน ($T_S - T_{6C}$) | 3 | °C |
| 9 | ผลต่างของออุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้า-ออกแอบซอร์พเบอร์ ($T_{6C} - T_{5C}$) | 5 | °C |
| 10 | อุณหภูมิน้ำที่ป้อนเข้าสู่เครื่องระเหย ($T_{3C}$) | 20 | °C |
| 11 | ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ป้อนเข้า-ออกเครื่องระเหย ($T_{3C} - T_{4C}$) | 5 | °C |
| 12 | ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นกับสารทำงานที่เครื่องระเหย ($T_{4C} - T_{ref}$) | 3 | °C |
| 13 | อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น ($T_{7C} = T_{6C}$) | $T_{6C}$ | °C |
| 14 | ผลต่างของออุณหภูมิน้ำเย็นที่เข้า-ออกเครื่องควบแน่น ($T_{8C} - T_{7C}$) | 5 | °C |
| 15 | ความเข้มข้นของสารละลาย (X) | 55 | %LiBr |
| 16 | ความเข้มข้นของสารละลาย ($X_{1a} = X_{2a} = X_{3a} = X_{4a}$) | 0 | %LiBr |
| 17 | ความเข้มข้นของสารละลาย ($X_{8a} = X_{9a} = X_{10a}$) | 60 | %LiBr |
| 18 | ความเข้มข้นของสารละลาย ($X_{5a} = X_{6a} = X_{7a}$) | 55 | %LiBr |
| 19 | ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($\varepsilon_{HX}$) | 0.85 | - |
| 20 | ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้า-ออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน | 5 | °C |
| 21 | Supper heating (SH) | 5 | °C |
| 22 | Subcooling (SC) | 5 | °C |
| 23 | ความสามารถในการทำความเย็น ($Q_E$) | 165 | kW |

แนวทางการวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1) หาอุณหภูมิของส่วนประกอบต่าง ๆ

อุณหภูมิสารละลายที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A = T_{5C} + (T_{6C} - T_{5C}) + (T_S + T_{6C})$) 40 °C

อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกจากแอบซอร์พเบอร์ ($T_{6C} = T_{5C} + (T_{6C} - T_{5C})$) 37 °C

อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น ($T_{7C} = T_{6C}$) 37 °C

อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C = T_{7C} + (T_{8C} - T_{7C}) + (T_{ref} - T_{8C})$) 45 °C

อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่น ($T_{8C} = T_{7C} + (T_{8C} - T_{7C})$) 42 °C

อุณหภูมิสารละลายที่จุด 5a ($T_{5a} = T_A$) 40 °C

อุณหภูมิสารทำงานของระบบที่จุด 2a ($T_{2a} = T_C - SC$) 40 °C

อุณหภูมิสารทำงานของระบบทีเครื่องระเหย ($T_E = T_{3C} - (T_{3C} - T_{4C}) - (T_{4C} - T_{ref})$) 12 °C

อุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย ($T_{4C} = T_{3C} - (T_{3C} - T_{4C})$) 15 °C

อุณหภูมิสารทำงานของระบบที่จุด 4a ($T_{4a} = T_E + SH$) 17 °C

อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่จุด 3h ($T_{3h} = T_{2h} - (T_{2h} - T_{3h})$) 80 °C

อุณหภูมิน้ำร้อนที่ต่ำสุดต้องเข้าเจนเนอเรเตอร์ ($T_{min} = f(X,T_C)$) 74.44 °C

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ = libr_Tsolution(55,45)

อุณหภูมิสารละลายที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_G = T_{3h} - (T_{3h} - T_S)$) 77 °C

อุณหภูมิสารทำงานของระบบที่จุด 1a ($T_{1a} = T_G$) 77 °C

อุณหภูมิสารละลายของระบบที่จุด 8a ($T_{8a} = T_G$) 77 °C

ความสามารถในการทำความเย็น ($Q_E$) 165 kW

ขั้นตอนที่ 2) หาความดันของสารทำงานด้านสูงและต่ำของระบบ

ความดันสูงของระบบ (ความดันสมบูน) ($P_{H,Abs} = f(T_C)$) 9.59 kPa

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Pressure("WATER","Tliq","mks",273.15+45)

ความดันสูงของระบบ (ความดันเกรด) ($P_{H,Gage} = P_{H,Abs} - P_{astm}$) – 0.917 kPa

ความดันต่ำของระบบ (ความดันสมบูน) ($P_{L,Abs} = f(T_E)$) 1.40 kPa

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Pressure("WATER","Tvap","mks",273.15+12)

ความดันต่ำของระบบ (ความดันเกรด) ($P_{L,Gage} = P_{L,Abs} - P_{astm}$) – 0.999 kPa

ขั้นตอนที่ 3) หาเอนทัลปีของสารทำงานที่จุดต่าง ๆของระบบ

เอนทัลปีของสารทำงานที่จุด 1a ($h_{1a}$ = f($T_{1a}$,$P_{H,Abs}$)) 2643.69 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Enthalpy("WATER","TP","mks",273.15+77,9.59)

เอนทัลปีของสารทำงานที่จุด 2a ($h_{2a}$ = f($T_{2a}$,$P_{H,Abs}$)) 167.53 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Enthalpy("WATER","TP","mks",273.15+40,9.59)

เอนทัลปีของสารทำงานที่จุด 3a (throtting process) ($h_{3a}$ = $h_{2a}$) 167.53 kJ/kg

อุณหภูมิของสารทำงานที่จุด 3a ($T_{3a}$ = f($h_{3a}$,$P_{L,Abs}$)) 285.15 K

12 °C

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Temperature("WATER","HP","mks",167.53,1.40)

เอนทัลปีของสารทำงานที่จุด 4a ($h_{4a}$ = f($T_{4a}$)) 2531.97 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Enthalpy("WATER","Tvap","mks",273.15+17)

ขั้นตอนที่ 4) หาอัตราการไหของสารทำงานและสารละลายที่จุดต่าง ๆของระบบ

ความจุความร้อนของน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบ ($C_{p,Bluk}$ = f($T_{HW,Bluk}$)) 4.19 kJ/kg.K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =Cp("WATER","Tliq","mks",273.15+$T_{HW,Bluk}$)

อัตราการไหลของสารทำงานของระบบที่จุด 4a ($\dot{m}_{4a}$ = $Q_E$ / ($h_{4a}$ – $h_{3a}$))

0.07 kg/s

อัตราการไหลของสารทำงานของระบบที่จุด 4a=3a=2a=1a ($\dot{m}_{4a}$ = $\dot{m}_{3a}$ = $\dot{m}_{2a}$ = $\dot{m}_{1a}$)

0.07 kg/s

อัตราการไหลของสารละลายของระบบ ที่จุด 8a ($\dot{m}_{8a}$=$\dot{m}_{1a}$($X_{1a}$ – $X_{7a}$) / ($X_{7a}$ – $X_{8a}$))

0.76 kg/s

อัตราการไหลของสารละลายของระบบ ที่จุด 8a=9a=10a ($\dot{m}_{8a}$ = $\dot{m}_{9a}$ = $\dot{m}_{10a}$)

0.76 kg/s

อัตราการไหลของสารละลายของระบบ ที่จุด 7a ($\dot{m}_{7a}$ = $\dot{m}_{1a}$ + $\dot{m}_{8a}$) 0.83 kg/s

อัตราการไหลของสารละลายของระบบ ที่จุด 7a=6a=5a ($\dot{m}_{7a}$ = $\dot{m}_{6a}$ = $\dot{m}_{5a}$)

0.83 kg/s

ขั้นตอนที่ 5) หาเอนทานปีสารละลายของระบบ

เอนทัลปีของสารละลายที่จุด 8a ($h_{8a}$ = f($X_{8a}$,$T_{8a}$)) 187.09 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_h(60,77)

เอนทัลปีของสารละลายที่จุด 5a ($h_{5a}$ = f($X_{5a}$,$T_{5a}$)) 93.64 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_h(55,40)

ขั้นตอนที่ 6) พิจารณาปั๊มสารละลาย

ผลต่างความดันของระบบ (ความดันสมบูน) ($\Delta P = P_{H,Abs} - P_{L,Abs}$) 8.19 kPa

ความหนาแน่นของสารละลาย ($\rho_S = f(X_{5a},\Delta P)$) 1164.08 $kg/m^3$

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_density(55,8.19)

ปริมาตรจำเพาะของสารละลาย ($\nu_S = 1 / \rho_S$) 0.00085 $m^3/kg$

กำลังงานที่ป้อนให้แก่ปั๊มสารละลาย ($W_{SP} = (\dot{m}_{5a}\nu_S\Delta P) / \eta_{SP}$)) 0.0069 kW

ขั้นตอนที่ 7) พิจารณาอุปกรณ์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ด้านของไหลร้อน

อุณหภูมิสารละลายของระบบที่จุด 8a ($T_{8a} = T_G$) 77 °C

ความจุความร้อนของสารละลายกะแสร้อนที่จุด 8a ($Cp,_{8a} = f(X_{8a},T_{8a})$)

1.92 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_CP(60,77)

ด้านของไหลเย็น

อุณหภูมิสารละลายที่จุด 6a ($T_{6a} = T_{5a}$) 40 °C

ความจุความร้อนของสารละลายกะแสร้อนที่จุด 6a ($Cp,_{6a} = f(X_{6a},T_{6a})$)

2.02 kJ/kg·K

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_CP(55,40)

ประริมาณความร้อนของอุปกรณ์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($Q_{Max} = (\dot{m}Cp)_{min}(T_{8a} - T_{6a})$)

54.75 kW

($Q_{actual} = Q_{Max}\eta_{HX}$)

46.53 kW

อุณหภูมิของสารละลายกะแสร้อนที่จุด 9a ($T_{9a} = T_{8a} - (Q_{actual} / (\dot{m}_{8a}Cp,_{8a}))$)

45.55 °C

อุณหภูมิของสารละลายกะแสร้อนที่จุด 7a ($T_{7a} = T_{6a} + (Q_{actual} / (\dot{m}_{6a}Cp,_{6a}))$)

67.40 °C

เอนทัลปีของสารละลายที่จุด 9a ($h_{9a} = f(X_{9a},T_{9a})$) 126.41 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_h(60,45.55)

เอนทัลปีของสารละลายที่จุด 10a (thortting process) ($h_{10a} = h_{9a}$) 126.41 kJ/kg

เอนทัลปีของสารละลายที่จุด 7a ($h_{7a} = f(X_{7a},T_{7a})$) 150.36 kJ/kg

คำสั่งที่ใช้บน Microsoft Excel คือ =libr_h(55,67.40)

ขั้นตอนที่ 8) หาปริมาณความร้อน

| | | |
|---|---|---|
| แอบซอร์พเบอร์ $Q_A = \dot{m}_{4a} h_{4a} + \dot{m}_{10a} h_{10a} - \dot{m}_{5a} h_{5a}$ | 195.30 | kW |
| เครื่องระเหย $Q_E = \dot{m}_{4a} h_{4a} - \dot{m}_{3a} h_{3a}$ | 165 | kW |
| เครื่องควบแน่น $Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a} h_{1a} - \dot{m}_{2a} h_{2a}$ | 172.79 | kW |
| เจนเนอเรเตอร์ $Q_G = \dot{m}_{1a} h_{1a} + \dot{m}_{8a} h_{8a} - \dot{m}_{7a} h_{7a}$ | 202.18 | kW |

ขั้นตอนที่ 9) หาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

| | | |
|---|---|---|
| สัมประสิทธิ์สมรรถนะ ($COP = Q_E / (Q_G + W_{SP})$) | 0.81 | - |

# ภาคผนวก ข

## ผลการทดสอบ และการคำนวณสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

## ผลการทดสอบและเก็บข้อมูลของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR ที่ใช้สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ผลการทดสอบและเก็บข้อมูลของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 และ 4 ต่อไปนี้

**ตารางผนวกที่ 3** อุณหภูมิน้ำเย็น น้ำร้อน น้ำระบายความร้อนเข้า-ออกระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14:55 | 27.70 | 32.95 | 87.90 | 83.76 | 27.50 | 26.50 | 27.00 | 27.25 |
| 14:56 | 27.70 | 32.20 | 87.90 | 83.98 | 28.75 | 29.75 | 29.25 | 29.00 |
| 14:57 | 27.70 | 32.70 | 88.60 | 84.68 | 28.75 | 29.75 | 29.25 | 29.75 |
| 14:58 | 27.60 | 30.60 | 91.20 | 87.49 | 28.00 | 29.50 | 29.00 | 29.25 |
| 14:59 | 27.60 | 31.10 | 92.30 | 88.48 | 28.00 | 28.50 | 29.00 | 29.25 |
| 15:00 | 27.60 | 31.35 | 92.50 | 88.38 | 28.25 | 29.50 | 28.50 | 27.25 |
| 15:01 | 27.10 | 31.85 | 92.50 | 88.17 | 27.50 | 28.00 | 28.00 | 25.50 |
| 15:02 | 26.80 | 30.30 | 92.50 | 88.06 | 26.50 | 25.75 | 26.25 | 23.75 |
| 15:03 | 26.50 | 30.75 | 92.50 | 87.15 | 25.50 | 24.25 | 24.00 | 21.50 |
| 15:04 | 26.30 | 30.55 | 92.50 | 91.89 | 24.00 | 22.25 | 22.50 | 20.25 |
| 15:05 | 25.80 | 30.80 | 92.30 | 90.13 | 21.50 | 21.50 | 20.75 | 19.25 |
| 15:06 | 25.60 | 30.60 | 92.10 | 88.95 | 21.75 | 20.00 | 19.50 | 18.00 |
| 15:07 | 25.50 | 31.50 | 91.90 | 88.32 | 23.25 | 20.00 | 19.75 | 17.25 |
| 15:08 | 24.90 | 30.65 | 91.60 | 87.80 | 23.75 | 20.75 | 20.50 | 18.25 |
| 15:09 | 24.40 | 29.65 | 91.40 | 87.44 | 23.75 | 20.50 | 20.50 | 18.00 |
| 15:10 | 24.30 | 29.30 | 91.30 | 87.13 | 23.75 | 20.75 | 19.75 | 18.00 |
| 15:11 | 24.00 | 28.75 | 91.30 | 87.13 | 24.50 | 21.00 | 20.00 | 17.50 |
| 15:12 | 23.60 | 28.35 | 91.20 | 87.30 | 24.50 | 20.75 | 21.00 | 18.00 |
| 15:13 | 23.40 | 28.40 | 91.60 | 87.48 | 24.25 | 29.00 | 28.50 | 28.00 |
| 15:14 | 23.10 | 28.85 | 92.70 | 88.58 | 24.75 | 28.50 | 28.75 | 27.00 |

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:15 | 22.60 | 28.10 | 92.80 | 88.73 | 24.00 | 28.50 | 28.25 | 27.00 |
| 15:16 | 22.10 | 27.60 | 92.80 | 88.84 | 24.25 | 28.25 | 28.25 | 27.00 |
| 15:17 | 21.80 | 27.55 | 92.70 | 88.58 | 23.75 | 28.75 | 27.50 | 27.00 |
| 15:18 | 21.60 | 26.60 | 92.40 | 88.23 | 24.25 | 28.50 | 28.25 | 26.50 |
| 15:19 | 21.20 | 26.45 | 92.20 | 88.13 | 23.75 | 28.25 | 28.25 | 26.75 |
| 15:20 | 20.90 | 26.65 | 91.90 | 87.78 | 23.25 | 27.75 | 28.00 | 27.25 |
| 15:21 | 20.70 | 26.70 | 91.60 | 87.42 | 24.50 | 28.50 | 27.50 | 26.75 |
| 15:22 | 20.40 | 25.90 | 91.50 | 87.43 | 24.00 | 28.00 | 28.00 | 27.00 |
| 15:23 | 20.10 | 25.85 | 91.20 | 87.03 | 23.00 | 28.75 | 28.00 | 27.75 |
| 15:24 | 19.80 | 22.80 | 91.10 | 86.98 | 24.75 | 28.25 | 28.75 | 27.75 |
| 15:25 | 19.50 | 25.00 | 90.90 | 86.73 | 25.25 | 28.50 | 28.75 | 26.75 |
| 15:26 | 19.10 | 23.85 | 90.60 | 86.37 | 25.50 | 29.00 | 28.75 | 28.25 |
| 15:27 | 18.90 | 24.65 | 90.50 | 86.23 | 25.50 | 30.00 | 28.50 | 27.75 |
| 15:28 | 18.60 | 24.10 | 91.20 | 87.08 | 25.25 | 29.50 | 29.00 | 28.00 |
| 15:29 | 18.30 | 23.30 | 92.20 | 88.08 | 25.00 | 29.25 | 29.00 | 27.75 |
| 15:30 | 17.90 | 23.40 | 92.20 | 88.18 | 25.50 | 29.75 | 29.00 | 27.50 |
| 15:31 | 17.60 | 23.10 | 92.20 | 88.18 | 25.50 | 29.25 | 29.00 | 27.50 |
| 15:32 | 17.40 | 23.65 | 92.00 | 87.93 | 25.50 | 29.50 | 29.00 | 27.50 |
| 15:33 | 17.10 | 22.85 | 91.90 | 87.67 | 25.25 | 29.25 | 29.00 | 27.50 |
| 15:34 | 16.80 | 21.55 | 91.90 | 87.68 | 25.50 | 28.75 | 28.75 | 26.75 |
| 15:35 | 16.50 | 22.25 | 91.90 | 87.73 | 24.75 | 28.75 | 28.50 | 27.50 |
| 15:36 | 16.20 | 21.70 | 91.60 | 87.32 | 25.50 | 29.25 | 28.75 | 31.25 |
| 15:37 | 16.00 | 21.50 | 91.40 | 87.17 | 26.00 | 29.75 | 29.00 | 31.50 |
| 15:38 | 15.80 | 21.05 | 91.30 | 87.13 | 25.25 | 30.00 | 29.50 | 32.00 |
| 15:39 | 15.60 | 21.85 | 91.20 | 87.03 | 26.00 | 30.50 | 29.50 | 32.50 |
| 15:40 | 15.30 | 20.55 | 91.20 | 86.93 | 25.50 | 31.00 | 31.00 | 33.25 |

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:41 | 15.00 | 20.25 | 91.20 | 87.08 | 26.25 | 31.00 | 31.25 | 33.00 |
| 15:42 | 14.70 | 19.95 | 91.80 | 87.47 | 26.50 | 31.00 | 30.50 | 33.25 |
| 15:43 | 14.50 | 20.25 | 91.80 | 87.73 | 26.50 | 31.00 | 31.00 | 32.75 |
| 15:44 | 14.30 | 19.30 | 93.00 | 89.25 | 26.75 | 31.50 | 31.50 | 33.50 |
| 15:45 | 14.00 | 19.75 | 93.00 | 89.09 | 27.25 | 31.50 | 31.50 | 33.50 |
| 15:46 | 13.80 | 20.80 | 92.90 | 88.88 | 26.50 | 32.00 | 31.50 | 33.75 |
| 15:47 | 13.50 | 19.75 | 92.70 | 88.58 | 27.25 | 32.00 | 31.75 | 34.00 |
| 15:48 | 13.40 | 19.40 | 92.50 | 88.43 | 27.00 | 32.00 | 31.75 | 34.00 |
| 15:49 | 13.10 | 18.60 | 92.20 | 88.02 | 26.50 | 31.75 | 31.50 | 34.50 |
| 15:50 | 13.00 | 18.50 | 92.00 | 87.93 | 26.75 | 32.00 | 31.75 | 34.75 |
| 15:51 | 12.80 | 18.05 | 91.70 | 87.42 | 27.75 | 32.00 | 31.75 | 35.00 |
| 15:52 | 12.70 | 17.70 | 91.50 | 87.38 | 27.50 | 32.75 | 33.00 | 34.75 |
| 15:53 | 12.50 | 16.75 | 91.20 | 87.03 | 27.75 | 33.00 | 32.75 | 35.50 |
| 15:54 | 12.30 | 17.30 | 91.00 | 86.93 | 27.75 | 33.00 | 33.25 | 36.25 |
| 15:55 | 12.20 | 17.70 | 91.00 | 86.88 | 28.00 | 33.00 | 33.50 | 35.50 |
| 15:56 | 12.00 | 17.00 | 91.00 | 86.98 | 28.25 | 33.00 | 33.50 | 36.00 |
| 15:57 | 11.80 | 17.30 | 91.20 | 87.08 | 28.75 | 33.75 | 33.25 | 36.25 |
| 15:58 | 11.70 | 16.45 | 92.40 | 88.44 | 28.50 | 34.25 | 33.75 | 36.00 |
| 15:59 | 11.60 | 16.35 | 92.80 | 88.89 | 26.75 | 32.75 | 34.00 | 35.25 |
| 16:00 | 11.30 | 16.80 | 92.50 | 88.48 | 28.50 | 33.25 | 33.50 | 35.00 |
| 16:01 | 11.10 | 16.60 | 92.20 | 88.18 | 26.75 | 32.50 | 32.50 | 34.75 |
| 16:02 | 11.00 | 17.50 | 91.90 | 87.78 | 28.75 | 33.00 | 32.25 | 34.75 |
| 16:03 | 10.80 | 16.05 | 91.70 | 87.63 | 27.75 | 33.00 | 32.75 | 35.00 |
| 16:04 | 10.70 | 16.45 | 91.50 | 87.32 | 28.00 | 33.00 | 33.00 | 34.75 |
| 16:05 | 10.60 | 16.10 | 91.40 | 87.38 | 28.50 | 32.50 | 32.75 | 34.50 |
| 16:06 | 10.50 | 16.00 | 91.10 | 87.19 | 27.25 | 33.25 | 32.50 | 34.50 |

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:07 | 10.30 | 15.30 | 90.90 | 86.73 | 27.75 | 32.75 | 33.00 | 34.75 |
| 16:08 | 10.20 | 14.95 | 90.70 | 86.58 | 28.25 | 33.25 | 33.00 | 35.00 |
| 16:09 | 10.20 | 15.95 | 90.50 | 86.33 | 28.25 | 33.00 | 33.00 | 33.75 |
| 16:10 | 10.20 | 15.70 | 90.50 | 86.33 | 28.25 | 33.50 | 33.00 | 35.75 |
| 16:11 | 10.30 | 16.30 | 91.60 | 87.43 | 28.50 | 33.50 | 32.75 | 35.50 |
| 16:12 | 10.40 | 15.15 | 92.30 | 88.08 | 28.25 | 32.75 | 33.25 | 33.50 |
| 16:13 | 10.60 | 16.35 | 92.50 | 88.33 | 28.25 | 32.50 | 32.25 | 33.75 |
| 16:14 | 10.70 | 16.95 | 92.30 | 88.34 | 27.25 | 32.50 | 32.00 | 34.25 |
| 16:15 | 10.90 | 16.40 | 92.30 | 88.28 | 26.75 | 32.75 | 32.00 | 34.00 |
| 16:16 | 11.00 | 15.50 | 92.30 | 88.18 | 27.50 | 32.00 | 31.75 | 33.25 |
| 16:17 | 11.10 | 16.10 | 92.00 | 87.88 | 27.50 | 31.75 | 32.50 | 33.50 |
| 16:18 | 11.30 | 16.80 | 91.70 | 87.42 | 27.25 | 32.00 | 32.75 | 34.00 |
| 16:19 | 11.40 | 15.90 | 91.40 | 87.33 | 27.25 | 32.25 | 31.50 | 34.00 |
| 16:20 | 11.50 | 16.75 | 91.20 | 87.19 | 26.75 | 32.00 | 31.50 | 33.75 |
| 16:21 | 11.60 | 17.10 | 90.90 | 86.78 | 27.00 | 31.75 | 31.50 | 34.25 |
| 16:22 | 11.60 | 16.85 | 90.70 | 86.58 | 26.75 | 31.50 | 31.25 | 34.25 |
| 16:23 | 11.60 | 15.85 | 90.70 | 86.63 | 27.00 | 31.75 | 32.00 | 33.75 |
| 16:24 | 11.60 | 16.35 | 90.50 | 86.38 | 26.75 | 32.25 | 31.50 | 33.75 |
| 16:25 | 11.70 | 16.95 | 90.40 | 86.18 | 26.50 | 31.75 | 31.00 | 34.25 |
| 16:26 | 11.70 | 17.45 | 90.40 | 86.34 | 27.25 | 32.00 | 31.50 | 34.00 |
| 16:27 | 11.70 | 16.20 | 90.40 | 86.50 | 26.75 | 32.00 | 31.00 | 33.50 |
| 16:28 | 11.70 | 16.70 | 92.30 | 88.29 | 27.00 | 31.25 | 31.00 | 32.50 |
| 16:29 | 11.70 | 17.20 | 92.30 | 88.23 | 27.50 | 31.00 | 31.00 | 32.50 |
| 16:30 | 11.70 | 17.70 | 92.10 | 88.03 | 27.50 | 31.50 | 30.50 | 32.50 |
| 16:31 | 11.70 | 17.70 | 91.90 | 87.78 | 27.25 | 31.25 | 30.00 | 32.00 |
| 16:32 | 11.70 | 17.20 | 91.60 | 87.48 | 26.50 | 31.50 | 30.50 | 32.75 |

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:33 | 11.70 | 17.20 | 91.40 | 87.38 | 26.50 | 30.75 | 30.75 | 33.25 |
| 16:34 | 11.70 | 16.70 | 91.20 | 87.08 | 26.75 | 31.25 | 31.00 | 33.75 |
| 16:35 | 11.70 | 16.70 | 91.00 | 86.88 | 27.00 | 31.75 | 30.25 | 34.25 |
| 16:36 | 11.70 | 16.45 | 91.00 | 86.99 | 26.75 | 31.75 | 31.25 | 33.50 |
| 16:37 | 11.70 | 17.45 | 91.00 | 86.88 | 27.75 | 32.25 | 32.00 | 33.75 |
| 16:38 | 11.70 | 15.70 | 90.80 | 86.73 | 28.25 | 32.25 | 32.25 | 35.00 |
| 16:39 | 11.70 | 17.45 | 90.70 | 86.63 | 27.50 | 32.50 | 32.25 | 35.00 |
| 16:40 | 11.70 | 17.70 | 91.20 | 87.13 | 28.50 | 32.75 | 32.50 | 35.50 |
| 16:41 | 11.70 | 16.95 | 92.40 | 88.28 | 28.50 | 32.50 | 32.75 | 35.50 |
| 16:42 | 11.70 | 17.95 | 92.40 | 88.38 | 28.25 | 33.25 | 32.75 | 35.25 |
| 16:43 | 11.70 | 17.70 | 92.40 | 88.49 | 27.50 | 33.25 | 33.25 | 35.00 |
| 16:44 | 11.70 | 17.95 | 92.40 | 88.38 | 28.00 | 33.50 | 32.50 | 35.50 |
| 16:45 | 11.70 | 17.20 | 92.00 | 87.88 | 28.00 | 32.75 | 32.50 | 35.50 |
| 16:46 | 11.70 | 16.20 | 91.70 | 87.74 | 28.00 | 33.75 | 33.25 | 35.75 |
| 16:47 | 11.70 | 17.20 | 91.40 | 87.38 | 28.50 | 33.50 | 33.00 | 36.00 |
| 16:48 | 11.70 | 16.95 | 91.20 | 87.34 | 29.25 | 33.75 | 33.75 | 35.75 |
| 16:49 | 11.80 | 17.80 | 91.10 | 86.98 | 28.50 | 33.50 | 33.75 | 36.50 |
| 16:50 | 11.80 | 17.05 | 90.90 | 86.73 | 28.50 | 34.25 | 34.00 | 36.75 |
| 16:51 | 11.80 | 17.05 | 90.70 | 86.63 | 29.00 | 34.25 | 33.75 | 36.75 |
| 16:52 | 11.90 | 18.65 | 90.50 | 86.49 | 29.25 | 34.25 | 34.25 | 37.00 |
| 16:53 | 11.90 | 18.15 | 90.50 | 86.43 | 29.00 | 34.50 | 34.75 | 36.75 |
| 16:54 | 11.90 | 17.90 | 90.50 | 86.44 | 29.00 | 34.75 | 34.25 | 37.50 |
| 16:55 | 12.00 | 17.75 | 90.50 | 86.38 | 29.75 | 34.50 | 34.50 | 36.75 |
| 16:56 | 12.00 | 16.50 | 92.30 | 88.18 | 29.75 | 34.00 | 34.50 | 36.00 |
| 16:57 | 12.00 | 18.25 | 92.30 | 88.34 | 29.75 | 34.25 | 34.00 | 36.25 |
| 16:58 | 12.00 | 18.00 | 92.10 | 88.14 | 27.75 | 34.25 | 33.00 | 35.50 |

**ตารางผนวกที่ 3** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{4C}$ (°C) | $T_{3C}$ (°C) | $T_{2h}$ (°C) | $T_{3h}$ (°C) | $T_{5C}$ (°C) | $T_{6C}$ (°C) | $T_{7C}$ (°C) | $T_{8C}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:59 | 12.00 | 16.50 | 92.10 | 88.14 | 28.75 | 32.25 | 32.25 | 33.75 |
| 17:00 | 12.00 | 17.50 | 91.60 | 87.59 | 28.25 | 32.50 | 32.00 | 34.25 |
| 17:01 | 12.00 | 16.50 | 91.20 | 87.29 | 28.75 | 32.50 | 32.50 | 34.00 |
| 17:02 | 12.00 | 18.25 | 91.00 | 86.88 | 28.25 | 33.00 | 32.75 | 35.25 |
| 17:03 | 12.00 | 17.75 | 90.70 | 86.69 | 29.00 | 33.25 | 32.75 | 35.25 |
| 17:04 | 12.00 | 17.75 | 90.50 | 86.43 | 28.00 | 33.25 | 32.75 | 36.00 |
| 17:05 | 12.00 | 17.75 | 90.20 | 86.08 | 28.25 | 33.50 | 33.00 | 35.50 |
| 17:06 | 12.00 | 17.50 | 90.00 | 85.88 | 27.75 | 33.00 | 32.75 | 35.50 |
| 17:07 | 12.00 | 19.00 | 89.80 | 85.63 | 28.00 | 32.50 | 31.75 | 34.50 |
| 17:08 | 12.00 | 16.25 | 89.60 | 85.38 | 28.00 | 32.75 | 32.00 | 34.75 |
| 17:09 | 12.00 | 17.75 | 89.50 | 85.49 | 27.50 | 31.75 | 31.75 | 35.00 |
| 17:10 | 12.00 | 16.50 | 89.20 | 84.82 | 28.00 | 32.50 | 31.50 | 34.25 |
| 17:11 | 12.00 | 17.25 | 89.10 | 84.88 | 27.50 | 32.50 | 32.50 | 35.00 |
| 17:12 | 12.00 | 18.75 | 88.80 | 84.53 | 27.50 | 33.00 | 31.75 | 35.00 |
| 17:13 | 12.00 | 18.25 | 88.50 | 84.34 | 28.00 | 32.25 | 31.75 | 35.00 |
| 17:14 | 12.00 | 16.75 | 88.20 | 84.04 | 28.00 | 32.25 | 32.50 | 35.50 |
| 17:15 | 12.00 | 17.00 | 88.10 | 83.94 | 27.75 | 33.00 | 32.50 | 36.00 |
| 17:16 | 12.00 | 17.50 | 87.80 | 83.64 | 26.50 | 33.00 | 32.50 | 36.00 |
| 17:17 | 12.00 | 17.00 | 87.60 | 83.44 | 28.00 | 32.25 | 32.50 | 35.75 |
| 17:18 | 12.00 | 17.75 | 87.40 | 83.14 | 28.50 | 34.25 | 33.25 | 36.00 |
| 17:19 | 12.00 | 18.00 | 87.20 | 82.94 | 28.75 | 33.50 | 33.25 | 35.25 |
| 17:20 | 12.00 | 17.25 | 86.90 | 82.69 | 27.50 | 32.75 | 32.75 | 34.75 |
| 17:21 | 12.00 | 17.00 | 86.60 | 82.34 | 27.00 | 31.75 | 31.25 | 34.75 |
| 17:22 | 12.00 | 17.00 | 86.40 | 82.14 | 26.50 | 31.75 | 30.25 | 32.75 |

**ตารางผนวกที่ 4** อุณหภูมิสารทำงาน สารละลายของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14:55 | 27.75 | 28.75 | 27.25 | 25.50 | 29.25 | 28.75 | 28.25 |
| 14:56 | 27.50 | 28.75 | 26.00 | 25.25 | 28.00 | 28.50 | 26.25 |
| 14:57 | 27.75 | 28.50 | 25.00 | 25.25 | 28.00 | 28.50 | 27.00 |
| 14:58 | 27.50 | 28.75 | 25.50 | 25.00 | 26.75 | 28.25 | 26.75 |
| 14:59 | 27.75 | 29.25 | 25.00 | 25.00 | 27.25 | 28.25 | 26.25 |
| 15:00 | 29.00 | 29.00 | 25.25 | 22.75 | 26.50 | 28.25 | 27.25 |
| 15:01 | 29.25 | 22.00 | 26.00 | 22.75 | 27.50 | 28.00 | 27.00 |
| 15:02 | 29.25 | 22.75 | 26.50 | 22.75 | 28.00 | 27.75 | 26.50 |
| 15:03 | 31.00 | 22.50 | 28.25 | 22.75 | 32.25 | 28.25 | 26.25 |
| 15:04 | 32.75 | 23.25 | 29.75 | 60.00 | 46.00 | 29.50 | 27.25 |
| 15:05 | 34.25 | 25.00 | 30.75 | 62.00 | 55.25 | 32.00 | 28.00 |
| 15:06 | 36.00 | 26.00 | 32.25 | 63.75 | 61.50 | 35.00 | 27.50 |
| 15:07 | 36.50 | 26.50 | 33.50 | 64.75 | 64.50 | 35.00 | 27.50 |
| 15:08 | 36.75 | 26.50 | 34.00 | 65.00 | 65.75 | 38.50 | 28.00 |
| 15:09 | 36.50 | 26.25 | 34.00 | 64.75 | 66.25 | 40.50 | 27.25 |
| 15:10 | 36.00 | 26.25 | 34.50 | 64.75 | 67.25 | 41.50 | 27.25 |
| 15:11 | 36.00 | 26.25 | 35.00 | 64.50 | 67.00 | 41.75 | 27.75 |
| 15:12 | 35.75 | 26.00 | 35.00 | 64.75 | 66.00 | 41.25 | 27.25 |
| 15:13 | 36.00 | 25.75 | 34.75 | 65.25 | 67.50 | 42.00 | 26.75 |
| 15:14 | 36.50 | 26.75 | 35.00 | 65.25 | 67.50 | 42.25 | 27.75 |
| 15:15 | 36.75 | 27.25 | 34.75 | 65.75 | 67.75 | 42.25 | 26.75 |
| 15:16 | 36.75 | 26.75 | 35.25 | 65.75 | 67.25 | 42.25 | 27.50 |
| 15:17 | 36.75 | 26.75 | 35.00 | 66.00 | 68.25 | 43.00 | 27.50 |
| 15:18 | 36.50 | 26.75 | 35.25 | 65.50 | 68.00 | 42.50 | 28.25 |
| 15:19 | 36.00 | 26.00 | 35.25 | 66.00 | 68.00 | 42.75 | 27.75 |
| 15:20 | 36.75 | 26.00 | 35.25 | 65.75 | 68.00 | 43.00 | 28.25 |

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:21 | 36.00 | 26.00 | 35.75 | 65.75 | 68.25 | 43.25 | 27.25 |
| 15:22 | 36.00 | 26.25 | 35.50 | 66.00 | 68.00 | 43.25 | 28.50 |
| 15:23 | 35.75 | 26.50 | 35.00 | 65.50 | 68.00 | 43.25 | 27.75 |
| 15:24 | 35.75 | 25.75 | 35.50 | 65.75 | 68.00 | 43.25 | 27.75 |
| 15:25 | 36.00 | 25.25 | 35.25 | 65.25 | 67.75 | 42.00 | 27.25 |
| 15:26 | 35.50 | 25.25 | 35.00 | 65.25 | 68.00 | 43.50 | 27.25 |
| 15:27 | 35.75 | 25.25 | 35.50 | 64.50 | 67.50 | 42.75 | 27.00 |
| 15:28 | 35.75 | 25.50 | 35.25 | 64.75 | 67.00 | 42.50 | 28.00 |
| 15:29 | 35.50 | 26.25 | 35.00 | 65.25 | 67.50 | 42.75 | 27.75 |
| 15:30 | 36.00 | 26.00 | 35.00 | 66.00 | 67.75 | 43.00 | 27.75 |
| 15:31 | 36.75 | 26.75 | 35.25 | 66.25 | 68.00 | 42.75 | 27.50 |
| 15:32 | 36.50 | 26.25 | 35.00 | 66.00 | 68.00 | 42.75 | 27.50 |
| 15:33 | 36.00 | 26.50 | 35.25 | 65.25 | 68.00 | 43.50 | 27.00 |
| 15:34 | 36.00 | 26.00 | 35.00 | 65.00 | 67.75 | 43.00 | 28.00 |
| 15:35 | 36.25 | 26.00 | 35.25 | 65.50 | 68.00 | 43.00 | 27.75 |
| 15:36 | 36.25 | 25.75 | 35.25 | 65.00 | 68.00 | 43.00 | 27.25 |
| 15:37 | 35.75 | 25.75 | 35.50 | 65.25 | 68.00 | 43.25 | 28.00 |
| 15:38 | 36.00 | 25.50 | 35.25 | 65.25 | 67.75 | 43.00 | 28.25 |
| 15:39 | 35.75 | 25.75 | 35.25 | 65.25 | 67.75 | 43.25 | 27.00 |
| 15:40 | 35.75 | 25.75 | 35.00 | 64.25 | 67.25 | 42.50 | 27.00 |
| 15:41 | 35.50 | 25.75 | 35.25 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 27.25 |
| 15:42 | 36.25 | 25.75 | 35.00 | 65.25 | 68.50 | 42.75 | 26.50 |
| 15:43 | 36.50 | 26.50 | 35.50 | 66.00 | 68.00 | 43.25 | 28.00 |
| 15:44 | 36.50 | 26.75 | 35.50 | 66.50 | 67.00 | 43.75 | 28.00 |
| 15:45 | 36.25 | 26.50 | 35.50 | 66.25 | 67.50 | 42.75 | 28.25 |
| 15:46 | 36.00 | 26.50 | 35.75 | 66.25 | 68.00 | 43.00 | 28.25 |

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:47 | 36.25 | 26.50 | 35.25 | 66.00 | 68.25 | 43.00 | 27.75 |
| 15:48 | 36.00 | 26.25 | 35.50 | 66.25 | 68.25 | 43.25 | 27.50 |
| 15:49 | 36.50 | 26.25 | 35.75 | 66.00 | 68.50 | 43.00 | 28.50 |
| 15:50 | 36.00 | 26.00 | 35.00 | 66.00 | 68.00 | 43.25 | 26.50 |
| 15:51 | 36.25 | 26.00 | 35.00 | 65.50 | 68.50 | 43.25 | 26.25 |
| 15:52 | 35.75 | 26.00 | 35.50 | 65.75 | 68.00 | 43.25 | 27.00 |
| 15:53 | 36.00 | 25.75 | 35.25 | 65.50 | 68.00 | 43.00 | 26.00 |
| 15:54 | 36.00 | 26.25 | 35.00 | 65.50 | 67.50 | 43.00 | 26.75 |
| 15:55 | 35.50 | 25.75 | 34.50 | 65.50 | 67.75 | 43.00 | 27.25 |
| 15:56 | 35.50 | 25.50 | 35.00 | 65.75 | 67.50 | 43.25 | 25.50 |
| 15:57 | 35.50 | 25.50 | 35.25 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 26.25 |
| 15:58 | 36.00 | 25.75 | 35.00 | 65.75 | 67.25 | 42.75 | 26.75 |
| 15:59 | 36.50 | 26.50 | 35.00 | 66.25 | 67.50 | 42.75 | 28.00 |
| 16:00 | 36.25 | 26.75 | 35.00 | 66.00 | 67.75 | 43.00 | 27.00 |
| 16:01 | 36.50 | 26.25 | 34.75 | 66.25 | 68.00 | 42.75 | 27.00 |
| 16:02 | 37.00 | 27.00 | 35.25 | 66.00 | 68.25 | 42.75 | 27.25 |
| 16:03 | 36.25 | 26.00 | 35.75 | 66.00 | 68.00 | 43.00 | 27.75 |
| 16:04 | 36.25 | 26.25 | 35.00 | 65.75 | 68.25 | 43.25 | 27.25 |
| 16:05 | 36.00 | 25.75 | 35.25 | 65.75 | 67.50 | 43.00 | 27.50 |
| 16:06 | 36.00 | 25.75 | 34.75 | 66.00 | 67.25 | 42.75 | 27.00 |
| 16:07 | 35.75 | 26.00 | 35.00 | 65.50 | 68.00 | 43.25 | 27.25 |
| 16:08 | 35.50 | 25.75 | 35.25 | 65.25 | 67.50 | 42.25 | 28.00 |
| 16:09 | 35.75 | 25.50 | 35.25 | 65.00 | 67.50 | 43.00 | 27.50 |
| 16:10 | 35.50 | 25.50 | 35.00 | 65.00 | 67.50 | 43.00 | 28.50 |
| 16:11 | 35.50 | 25.25 | 35.00 | 65.00 | 67.50 | 43.00 | 28.75 |
| 16:12 | 35.50 | 25.50 | 35.25 | 64.25 | 67.00 | 42.75 | 28.50 |

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:13 | 35.75 | 25.50 | 35.00 | 64.75 | 67.25 | 42.50 | 27.50 |
| 16:14 | 36.00 | 26.25 | 35.25 | 65.75 | 67.25 | 42.75 | 27.25 |
| 16:15 | 36.00 | 26.25 | 34.50 | 65.75 | 67.50 | 42.50 | 26.50 |
| 16:16 | 36.00 | 26.50 | 35.00 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 26.75 |
| 16:17 | 35.75 | 25.50 | 34.50 | 65.50 | 67.75 | 42.75 | 28.00 |
| 16:18 | 35.75 | 26.00 | 34.75 | 65.50 | 68.50 | 43.00 | 28.50 |
| 16:19 | 35.75 | 25.50 | 34.50 | 65.50 | 67.50 | 43.00 | 27.25 |
| 16:20 | 35.75 | 25.50 | 35.00 | 65.50 | 67.25 | 43.75 | 28.75 |
| 16:21 | 35.75 | 25.50 | 35.25 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 28.75 |
| 16:22 | 35.50 | 25.25 | 34.75 | 65.25 | 67.50 | 43.00 | 28.50 |
| 16:23 | 35.50 | 25.25 | 34.25 | 65.25 | 67.25 | 42.75 | 27.00 |
| 16:24 | 35.25 | 25.00 | 35.25 | 65.00 | 67.25 | 43.25 | 28.25 |
| 16:25 | 35.50 | 25.25 | 34.50 | 64.75 | 67.50 | 43.25 | 26.75 |
| 16:26 | 35.75 | 25.50 | 35.00 | 64.75 | 66.75 | 43.00 | 27.75 |
| 16:27 | 35.25 | 25.50 | 35.00 | 65.00 | 66.25 | 42.75 | 28.25 |
| 16:28 | 36.00 | 26.00 | 35.00 | 65.50 | 67.25 | 43.00 | 27.50 |
| 16:29 | 36.25 | 26.25 | 35.00 | 65.50 | 67.50 | 43.00 | 27.25 |
| 16:30 | 36.25 | 26.25 | 34.25 | 65.50 | 67.50 | 42.25 | 27.00 |
| 16:31 | 36.00 | 25.75 | 35.00 | 65.50 | 67.75 | 42.75 | 27.50 |
| 16:32 | 36.00 | 25.75 | 35.00 | 65.75 | 68.00 | 42.75 | 28.25 |
| 16:33 | 35.75 | 26.00 | 35.00 | 65.75 | 67.50 | 42.00 | 28.25 |
| 16:34 | 35.75 | 25.50 | 35.00 | 65.50 | 67.75 | 43.00 | 28.00 |
| 16:35 | 36.50 | 25.50 | 34.50 | 65.50 | 67.75 | 43.00 | 27.75 |
| 16:36 | 35.75 | 25.50 | 35.00 | 65.50 | 67.25 | 42.50 | 27.50 |
| 16:37 | 35.25 | 25.75 | 34.75 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 29.00 |
| 16:38 | 35.75 | 25.50 | 34.50 | 65.75 | 67.75 | 42.50 | 27.50 |

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:39 | 35.50 | 25.75 | 35.00 | 65.25 | 67.25 | 42.50 | 28.50 |
| 16:40 | 35.50 | 25.75 | 34.50 | 65.25 | 67.25 | 42.75 | 28.00 |
| 16:41 | 36.00 | 25.75 | 34.75 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 27.75 |
| 16:42 | 36.25 | 26.25 | 35.25 | 66.25 | 68.00 | 42.75 | 28.25 |
| 16:43 | 36.25 | 26.25 | 34.75 | 66.00 | 67.25 | 42.75 | 27.00 |
| 16:44 | 36.50 | 26.00 | 34.75 | 65.75 | 67.50 | 42.50 | 27.50 |
| 16:45 | 36.50 | 26.00 | 34.50 | 66.00 | 68.25 | 42.75 | 26.75 |
| 16:46 | 36.75 | 25.50 | 35.00 | 66.00 | 67.50 | 43.00 | 26.25 |
| 16:47 | 36.00 | 26.25 | 35.00 | 66.00 | 67.75 | 42.75 | 27.25 |
| 16:48 | 36.00 | 25.75 | 34.50 | 65.75 | 66.75 | 42.75 | 27.50 |
| 16:49 | 35.75 | 25.50 | 34.50 | 65.50 | 67.75 | 43.00 | 27.00 |
| 16:50 | 36.00 | 25.25 | 34.50 | 65.25 | 67.75 | 42.75 | 28.50 |
| 16:51 | 35.75 | 25.75 | 34.50 | 65.75 | 67.75 | 42.50 | 28.50 |
| 16:52 | 35.00 | 25.50 | 35.00 | 65.25 | 67.00 | 42.75 | 28.50 |
| 16:53 | 35.25 | 25.25 | 34.50 | 65.25 | 67.25 | 42.50 | 27.25 |
| 16:54 | 35.25 | 25.25 | 35.00 | 65.00 | 67.00 | 42.50 | 28.50 |
| 16:55 | 35.50 | 25.25 | 34.50 | 64.75 | 67.00 | 42.25 | 28.75 |
| 16:56 | 35.75 | 25.75 | 34.25 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 28.50 |
| 16:57 | 36.25 | 26.25 | 34.00 | 65.75 | 67.25 | 43.00 | 29.00 |
| 16:58 | 35.75 | 26.00 | 34.25 | 66.00 | 67.50 | 42.75 | 28.00 |
| 16:59 | 36.25 | 26.25 | 34.00 | 65.75 | 67.25 | 42.50 | 27.75 |
| 17:00 | 36.00 | 25.75 | 34.50 | 65.50 | 67.25 | 42.25 | 27.25 |
| 17:01 | 35.75 | 25.75 | 34.25 | 65.50 | 66.75 | 42.75 | 27.25 |
| 17:02 | 35.75 | 25.75 | 34.25 | 65.25 | 67.50 | 42.50 | 28.25 |
| 17:03 | 35.00 | 25.75 | 34.25 | 65.25 | 67.00 | 42.25 | 28.75 |
| 17:04 | 35.25 | 25.50 | 34.50 | 65.25 | 67.25 | 42.75 | 28.50 |

**ตารางผนวกที่ 4** (ต่อ)

| Time (Min) | $T_{2a}$ (°C) | $T_{3a}$ (°C) | $T_{6a}$ (°C) | $T_{7a}$ (°C) | $T_{8a}$ (°C) | $T_{9a}$ (°C) | $T_a$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17:05 | 35.25 | 25.00 | 34.00 | 64.75 | 67.00 | 42.25 | 28.50 |
| 17:06 | 35.75 | 25.00 | 34.50 | 64.75 | 67.00 | 42.50 | 28.00 |
| 17:07 | 35.00 | 24.50 | 34.50 | 64.50 | 67.00 | 42.75 | 28.50 |
| 17:08 | 35.00 | 25.00 | 34.50 | 64.25 | 67.00 | 42.25 | 27.25 |
| 17:09 | 34.75 | 25.50 | 34.25 | 64.25 | 66.00 | 42.25 | 28.00 |
| 17:10 | 35.00 | 24.50 | 34.00 | 63.75 | 67.25 | 42.25 | 27.00 |
| 17:11 | 34.50 | 24.25 | 34.75 | 63.75 | 66.50 | 42.00 | 28.25 |
| 17:12 | 34.75 | 24.75 | 34.25 | 63.75 | 66.75 | 42.00 | 27.50 |
| 17:13 | 34.50 | 24.50 | 34.25 | 63.75 | 66.25 | 42.00 | 27.75 |
| 17:14 | 34.50 | 24.00 | 33.75 | 63.75 | 66.25 | 41.75 | 26.50 |
| 17:15 | 34.25 | 24.25 | 34.00 | 63.50 | 66.00 | 42.00 | 28.25 |
| 17:16 | 34.25 | 24.25 | 34.00 | 63.25 | 65.75 | 41.75 | 28.25 |
| 17:17 | 34.25 | 24.25 | 33.75 | 63.50 | 66.00 | 41.75 | 27.00 |
| 17:18 | 34.25 | 24.00 | 34.00 | 63.00 | 66.00 | 41.75 | 27.75 |
| 17:19 | 34.00 | 23.75 | 33.50 | 62.50 | 65.50 | 41.75 | 27.75 |
| 17:20 | 33.75 | 23.75 | 33.50 | 63.00 | 65.75 | 42.00 | 27.75 |
| 17:21 | 33.50 | 23.75 | 33.50 | 62.25 | 65.25 | 42.00 | 26.75 |
| 17:22 | 33.25 | 23.75 | 33.50 | 62.00 | 65.00 | 41.25 | 26.75 |

**ตารางผนวกที่ 5** อัตราการไหลของน้ำร้อน น้ำเย็น และน้ำระบายความร้อนของระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืน

| รายละเอียด | เวลา (Min) | ปริมาณน้ำ (L) | อัตราการไหล (L/s) |
|---|---|---|---|
| น้ำร้อน | 2:35 | 72 | 0.464 |
| (Hot water) | 2:36 | 72 | 0.461 |
| | 2:35 | 72 | 0.464 |
| | 2:35 | 72 | 0.464 |
| | 2:37 | 72 | 0.458 |
| อัตราการไหลน้ำร้อนเฉลี่ย | | | 0.462 |
| น้ำเย็น | 5:57 | 72 | 0.201 |
| (Chiller water) | 5:56 | 72 | 0.202 |
| | 5:57 | 72 | 0.201 |
| | 5:58 | 72 | 0.201 |
| | 5:58 | 72 | 0.201 |
| อัตราการไหลน้ำเย็นเฉลี่ย | | | 0.201 |
| น้ำระบายความร้อน | 2:09 | 72 | 0.557 |
| (Cooling water) | 2:11 | 72 | 0.548 |
| | 2:10 | 72 | 0.553 |
| | 2:09 | 72 | 0.557 |
| | 2:09 | 72 | 0.557 |
| อัตราการไหลน้ำระบายความร้อนเฉลี่ย | | | 0.554 |

## ผลการคำนวณสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ผลการคำนวณสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR ที่ใช้สารละลายน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 6 และ 7 ต่อไปนี้

**ตารางผนวกที่ 6** กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต่าง ๆ

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 14:55 | 0.359 | 29.25 | 27.75 | 23.70 | 27.25 |
| 14:56 | 0.362 | 28.00 | 27.50 | 23.70 | 26.00 |
| 14:57 | 0.338 | 28.00 | 27.75 | 23.70 | 25.00 |
| 14:58 | 0.323 | 26.75 | 27.50 | 23.60 | 25.50 |
| 14:59 | 0.362 | 27.25 | 27.75 | 23.60 | 25.00 |
| 15:00 | 0.355 | 26.50 | 29.00 | 23.60 | 25.25 |
| 15:01 | 0.309 | 27.50 | 29.25 | 23.10 | 26.00 |
| 15:02 | 0.355 | 28.00 | 29.25 | 22.80 | 26.50 |
| 15:03 | 0.359 | 32.25 | 31.00 | 22.50 | 28.25 |
| 15:04 | 0.309 | 46.00 | 32.75 | 22.30 | 29.75 |
| 15:05 | 0.357 | 55.25 | 34.25 | 21.80 | 30.75 |
| 15:06 | 0.359 | 61.50 | 36.00 | 21.60 | 32.25 |
| 15:07 | 0.316 | 64.50 | 36.50 | 21.50 | 33.50 |
| 15:08 | 0.347 | 65.75 | 36.75 | 20.90 | 34.00 |
| 15:09 | 0.359 | 66.25 | 36.50 | 20.40 | 34.00 |
| 15:10 | 0.334 | 67.25 | 36.00 | 20.30 | 34.50 |
| 15:11 | 0.343 | 67.00 | 36.00 | 20.00 | 35.00 |
| 15:12 | 0.352 | 66.00 | 35.75 | 19.60 | 35.00 |
| 15:13 | 0.35 | 67.50 | 36.00 | 19.40 | 34.75 |
| 15:14 | 0.309 | 67.50 | 36.50 | 19.10 | 35.00 |
| 15:15 | 0.357 | 67.75 | 36.75 | 18.60 | 34.75 |
| 15:16 | 0.359 | 67.25 | 36.75 | 18.10 | 35.25 |
| 15:17 | 0.307 | 68.25 | 36.75 | 17.80 | 35.00 |

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ)

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15:18 | 0.357 | 68.00 | 36.50 | 17.60 | 35.25 |
| 15:19 | 0.357 | 68.00 | 36.00 | 17.20 | 35.25 |
| 15:20 | 0.316 | 68.00 | 36.75 | 16.90 | 35.25 |
| 15:21 | 0.355 | 68.25 | 36.00 | 16.70 | 35.75 |
| 15:22 | 0.362 | 68.00 | 36.00 | 16.40 | 35.50 |
| 15:23 | 0.319 | 68.00 | 35.75 | 16.10 | 35.00 |
| 15:24 | 0.323 | 68.00 | 35.75 | 15.80 | 35.50 |
| 15:25 | 0.357 | 67.75 | 36.00 | 15.50 | 35.25 |
| 15:26 | 0.355 | 68.00 | 35.50 | 15.10 | 35.00 |
| 15:27 | 0.307 | 67.50 | 35.75 | 14.90 | 35.50 |
| 15:28 | 0.359 | 67.00 | 35.75 | 14.60 | 35.25 |
| 15:29 | 0.362 | 67.50 | 35.50 | 14.30 | 35.00 |
| 15:30 | 0.307 | 67.75 | 36.00 | 13.90 | 35.00 |
| 15:31 | 0.359 | 68.00 | 36.75 | 13.60 | 35.25 |
| 15:32 | 0.362 | 68.00 | 36.50 | 13.40 | 35.00 |
| 15:33 | 0.316 | 68.00 | 36.00 | 13.10 | 35.25 |
| 15:34 | 0.383 | 67.75 | 36.00 | 12.80 | 35.00 |
| 15:35 | 0.362 | 68.00 | 36.25 | 12.50 | 35.25 |
| 15:36 | 0.338 | 68.00 | 36.25 | 12.20 | 35.25 |
| 15:37 | 0.319 | 68.00 | 35.75 | 12.00 | 35.50 |
| 15:38 | 0.355 | 67.75 | 36.00 | 11.80 | 35.25 |
| 15:39 | 0.357 | 67.75 | 35.75 | 11.60 | 35.25 |
| 15:40 | 0.307 | 67.25 | 35.75 | 11.30 | 35.00 |
| 15:41 | 0.362 | 67.50 | 35.50 | 11.00 | 35.25 |
| 15:42 | 0.362 | 68.50 | 36.25 | 10.70 | 35.00 |
| 15:43 | 0.314 | 68.00 | 36.50 | 10.50 | 35.50 |
| 15:44 | 0.355 | 67.00 | 36.50 | 10.30 | 35.50 |

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ)

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15:45 | 0.359 | 67.50 | 36.25 | 10.00 | 35.50 |
| 15:46 | 0.314 | 68.00 | 36.00 | 9.80 | 35.75 |
| 15:47 | 0.355 | 68.25 | 36.25 | 9.50 | 35.25 |
| 15:48 | 0.362 | 68.25 | 36.00 | 9.40 | 35.50 |
| 15:49 | 0.345 | 68.50 | 36.50 | 9.10 | 35.75 |
| 15:50 | 0.314 | 68.00 | 36.00 | 9.00 | 35.00 |
| 15:51 | 0.359 | 68.50 | 36.25 | 8.80 | 35.00 |
| 15:52 | 0.359 | 68.00 | 35.75 | 8.70 | 35.50 |
| 15:53 | 0.309 | 68.00 | 36.00 | 8.50 | 35.25 |
| 15:54 | 0.364 | 67.50 | 36.00 | 8.30 | 35.00 |
| 15:55 | 0.357 | 67.75 | 35.50 | 8.20 | 34.50 |
| 15:56 | 0.311 | 67.50 | 35.50 | 8.00 | 35.00 |
| 15:57 | 0.35 | 67.50 | 35.50 | 7.80 | 35.25 |
| 15:58 | 0.59 | 67.25 | 36.00 | 7.70 | 35.00 |
| 15:59 | 0.331 | 67.50 | 36.50 | 7.60 | 35.00 |
| 16:00 | 0.333 | 67.75 | 36.25 | 7.30 | 35.00 |
| 16:01 | 0.359 | 68.00 | 36.50 | 7.10 | 34.75 |
| 16:02 | 0.35 | 68.25 | 37.00 | 7.00 | 35.25 |
| 16:03 | 0.311 | 68.00 | 36.25 | 6.80 | 35.75 |
| 16:04 | 0.357 | 68.25 | 36.25 | 6.70 | 35.00 |
| 16:05 | 0.359 | 67.50 | 36.00 | 6.60 | 35.25 |
| 16:06 | 0.309 | 67.25 | 36.00 | 6.50 | 34.75 |
| 16:07 | 0.357 | 68.00 | 35.75 | 6.30 | 35.00 |
| 16:08 | 0.362 | 67.50 | 35.50 | 6.20 | 35.25 |
| 16:09 | 0.316 | 67.50 | 35.75 | 6.20 | 35.25 |
| 16:10 | 0.345 | 67.50 | 35.50 | 6.20 | 35.00 |
| 16:11 | 0.359 | 67.50 | 35.50 | 6.30 | 35.00 |

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ)

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 16:12 | 0.338 | 67.00 | 35.50 | 6.40 | 35.25 |
| 16:13 | 0.323 | 67.25 | 35.75 | 6.60 | 35.00 |
| 16:14 | 0.357 | 67.25 | 36.00 | 6.70 | 35.25 |
| 16:15 | 0.307 | 67.50 | 36.00 | 6.90 | 34.50 |
| 16:16 | 0.359 | 67.50 | 36.00 | 7.00 | 35.00 |
| 16:17 | 0.359 | 67.75 | 35.75 | 7.10 | 34.50 |
| 16:18 | 0.331 | 68.50 | 35.75 | 7.30 | 34.75 |
| 16:19 | 0.307 | 67.50 | 35.75 | 7.40 | 34.50 |
| 16:20 | 0.359 | 67.25 | 35.75 | 7.50 | 35.00 |
| 16:21 | 0.357 | 67.50 | 35.75 | 7.60 | 35.25 |
| 16:22 | 0.321 | 67.50 | 35.50 | 7.60 | 34.75 |
| 16:23 | 0.355 | 67.25 | 35.50 | 7.60 | 34.25 |
| 16:24 | 0.359 | 67.25 | 35.25 | 7.60 | 35.25 |
| 16:25 | 0.345 | 67.50 | 35.50 | 7.70 | 34.50 |
| 16:26 | 0.319 | 66.75 | 35.75 | 7.70 | 35.00 |
| 16:27 | 0.359 | 66.25 | 35.25 | 7.70 | 35.00 |
| 16:28 | 0.357 | 67.25 | 36.00 | 7.70 | 35.00 |
| 16:29 | 0.307 | 67.50 | 36.25 | 7.70 | 35.00 |
| 16:30 | 0.357 | 67.50 | 36.25 | 7.70 | 34.25 |
| 16:31 | 0.357 | 67.75 | 36.00 | 7.70 | 35.00 |
| 16:32 | 0.309 | 68.00 | 36.00 | 7.70 | 35.00 |
| 16:33 | 0.352 | 67.50 | 35.75 | 7.70 | 35.00 |
| 16:34 | 0.359 | 67.75 | 35.75 | 7.70 | 35.00 |
| 16:35 | 0.328 | 67.75 | 36.50 | 7.70 | 34.50 |
| 16:36 | 0.347 | 67.25 | 35.75 | 7.70 | 35.00 |
| 16:37 | 0.362 | 67.50 | 35.25 | 7.70 | 34.75 |
| 16:38 | 0.35 | 67.75 | 35.75 | 7.70 | 34.50 |

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ)

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 16:39 | 0.314 | 67.25 | 35.50 | 7.70 | 35.00 |
| 16:40 | 0.359 | 67.25 | 35.50 | 7.70 | 34.50 |
| 16:41 | 0.362 | 67.50 | 36.00 | 7.70 | 34.75 |
| 16:42 | 0.307 | 68.00 | 36.25 | 7.70 | 35.25 |
| 16:43 | 0.357 | 67.25 | 36.25 | 7.70 | 34.75 |
| 16:44 | 0.359 | 67.50 | 36.50 | 7.70 | 34.75 |
| 16:45 | 0.309 | 68.25 | 36.50 | 7.70 | 34.50 |
| 16:46 | 0.347 | 67.50 | 36.75 | 7.70 | 35.00 |
| 16:47 | 0.362 | 67.75 | 36.00 | 7.70 | 35.00 |
| 16:48 | 0.338 | 66.75 | 36.00 | 7.70 | 34.50 |
| 16:49 | 0.323 | 67.75 | 35.75 | 7.80 | 34.50 |
| 16:50 | 0.362 | 67.75 | 36.00 | 7.80 | 34.50 |
| 16:51 | 0.357 | 67.75 | 35.75 | 7.80 | 34.50 |
| 16:52 | 0.309 | 67.00 | 35.00 | 7.90 | 35.00 |
| 16:53 | 0.362 | 67.25 | 35.25 | 7.90 | 34.50 |
| 16:54 | 0.359 | 67.00 | 35.25 | 7.90 | 35.00 |
| 16:55 | 0.307 | 67.00 | 35.50 | 8.00 | 34.50 |
| 16:56 | 0.362 | 67.50 | 35.75 | 8.00 | 34.25 |
| 16:57 | 0.359 | 67.25 | 36.25 | 8.00 | 34.00 |
| 16:58 | 0.309 | 67.50 | 35.75 | 8.00 | 34.25 |
| 16:59 | 0.34 | 67.25 | 36.25 | 8.00 | 34.00 |
| 17:00 | 0.359 | 67.25 | 36.00 | 8.00 | 34.50 |
| 17:01 | 0.347 | 66.75 | 35.75 | 8.00 | 34.25 |
| 17:02 | 0.316 | 67.50 | 35.75 | 8.00 | 34.25 |
| 17:03 | 0.362 | 67.00 | 35.00 | 8.00 | 34.25 |
| 17:04 | 0.359 | 67.25 | 35.25 | 8.00 | 34.50 |
| 17:05 | 0.311 | 67.00 | 35.25 | 8.00 | 34.00 |

**ตารางผนวกที่ 6** (ต่อ)

| Time (Min) | I (A) | $T_G$ (°C) | $T_C$ (°C) | $T_E$ (°C) | $T_A$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| 17:06 | 0.362 | 67.00 | 35.75 | 8.00 | 34.50 |
| 17:07 | 0.359 | 67.00 | 35.00 | 8.00 | 34.50 |
| 17:08 | 0.309 | 67.00 | 35.00 | 8.00 | 34.50 |
| 17:09 | 0.352 | 66.00 | 34.75 | 8.00 | 34.25 |
| 17:10 | 0.359 | 67.25 | 35.00 | 8.00 | 34.00 |
| 17:11 | 0.311 | 66.50 | 34.50 | 8.00 | 34.75 |
| 17:12 | 0.359 | 66.75 | 34.75 | 8.00 | 34.25 |
| 17:13 | 0.362 | 66.25 | 34.50 | 8.00 | 34.25 |
| 17:14 | 0.338 | 66.25 | 34.50 | 8.00 | 33.75 |
| 17:15 | 0.311 | 66.00 | 34.25 | 8.00 | 34.00 |
| 17:16 | 0.359 | 65.75 | 34.25 | 8.00 | 34.00 |
| 17:17 | 0.359 | 66.00 | 34.25 | 8.00 | 33.75 |
| 17:18 | 0.307 | 66.00 | 34.25 | 8.00 | 34.00 |
| 17:19 | 0.359 | 65.50 | 34.00 | 8.00 | 33.50 |
| 17:20 | 0.359 | 65.75 | 33.75 | 8.00 | 33.50 |
| 17:21 | 0.316 | 65.25 | 33.50 | 8.00 | 33.50 |
| 17:22 | 0.345 | 65.00 | 33.25 | 8.00 | 33.50 |

**ตารางผนวกที่ 7** อัตราการถ่ายเทความร้อน พลังงานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์สมรรถนะ และค่าอัตราส่วนพลังงาน

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14:55 | 7.88 | 0.46 | 3.73 | 1.62 | 0.20 | 0.46 | 18.58 |
| 14:56 | 7.42 | 0.46 | 3.20 | 1.61 | 0.20 | 0.43 | 15.80 |
| 14:57 | 7.41 | 0.92 | 3.55 | 1.61 | 0.19 | 0.42 | 18.80 |
| 14:58 | 6.99 | 0.46 | 2.13 | 2.42 | 0.18 | 0.30 | 11.81 |
| 14:59 | 7.18 | 0.46 | 2.49 | 0.81 | 0.20 | 0.35 | 12.29 |
| 15:00 | 7.75 | 2.31 | 2.67 | 2.02 | 0.20 | 0.33 | 13.43 |
| 15:01 | 8.15 | 4.62 | 3.38 | 0.81 | 0.17 | 0.38 | 19.54 |
| 15:02 | 8.35 | 4.62 | 2.49 | 1.21 | 0.20 | 0.27 | 12.54 |
| 15:03 | 10.06 | 4.62 | 3.02 | 2.02 | 0.20 | 0.32 | 15.05 |
| 15:04 | 1.14 | 4.16 | 3.02 | 2.83 | 0.17 | 2.74 | 17.49 |
| 15:05 | 4.08 | 2.78 | 3.56 | 0.00 | 0.20 | 0.85 | 17.81 |
| 15:06 | 5.91 | 2.78 | 3.56 | 2.83 | 0.20 | 0.59 | 17.71 |
| 15:07 | 6.73 | 4.63 | 4.27 | 5.26 | 0.18 | 0.62 | 24.15 |
| 15:08 | 7.14 | 4.17 | 4.09 | 4.86 | 0.19 | 0.56 | 21.08 |
| 15:09 | 7.44 | 4.63 | 3.74 | 5.26 | 0.20 | 0.49 | 18.61 |
| 15:10 | 7.84 | 3.24 | 3.56 | 4.86 | 0.19 | 0.44 | 19.05 |
| 15:11 | 7.83 | 4.63 | 3.38 | 5.66 | 0.19 | 0.42 | 17.62 |
| 15:12 | 7.34 | 5.55 | 3.38 | 6.07 | 0.20 | 0.45 | 17.18 |
| 15:13 | 7.74 | 0.92 | 3.56 | 7.68 | 0.20 | 0.45 | 18.18 |
| 15:14 | 7.74 | 3.23 | 4.09 | 6.06 | 0.17 | 0.52 | 23.68 |
| 15:15 | 7.64 | 2.31 | 3.92 | 7.27 | 0.20 | 0.50 | 19.61 |
| 15:16 | 7.44 | 2.31 | 3.92 | 6.46 | 0.20 | 0.51 | 19.51 |
| 15:17 | 7.75 | 0.92 | 4.10 | 8.08 | 0.17 | 0.51 | 23.85 |
| 15:18 | 7.84 | 3.23 | 3.56 | 6.87 | 0.20 | 0.44 | 17.84 |
| 15:19 | 7.65 | 2.77 | 3.74 | 7.27 | 0.20 | 0.48 | 18.73 |

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ)

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:20 | 7.75 | 1.38 | 4.10 | 7.27 | 0.18 | 0.52 | 23.18 |
| 15:21 | 7.85 | 1.38 | 4.28 | 6.46 | 0.20 | 0.53 | 21.53 |
| 15:22 | 7.65 | 1.85 | 3.92 | 6.46 | 0.20 | 0.50 | 19.36 |
| 15:23 | 7.85 | 0.46 | 4.10 | 9.29 | 0.18 | 0.51 | 22.97 |
| 15:24 | 7.75 | 1.85 | 2.14 | 5.66 | 0.18 | 0.27 | 11.84 |
| 15:25 | 7.84 | 3.69 | 3.92 | 5.25 | 0.20 | 0.49 | 19.63 |
| 15:26 | 7.94 | 0.92 | 3.39 | 5.65 | 0.20 | 0.42 | 17.06 |
| 15:27 | 8.04 | 1.38 | 4.10 | 7.27 | 0.17 | 0.50 | 23.87 |
| 15:28 | 7.73 | 1.85 | 3.92 | 6.87 | 0.20 | 0.49 | 19.53 |
| 15:29 | 7.74 | 2.31 | 3.57 | 6.87 | 0.20 | 0.45 | 17.61 |
| 15:30 | 7.55 | 2.77 | 3.92 | 6.86 | 0.17 | 0.51 | 22.85 |
| 15:31 | 7.55 | 2.77 | 3.92 | 6.06 | 0.20 | 0.51 | 19.54 |
| 15:32 | 7.65 | 2.77 | 4.46 | 6.46 | 0.20 | 0.57 | 22.02 |
| 15:33 | 7.94 | 2.77 | 4.10 | 6.46 | 0.18 | 0.50 | 23.21 |
| 15:34 | 7.94 | 3.69 | 3.39 | 5.25 | 0.21 | 0.42 | 15.82 |
| 15:35 | 7.84 | 1.85 | 4.10 | 6.46 | 0.20 | 0.51 | 20.27 |
| 15:36 | 8.04 | 4.61 | 3.93 | 6.06 | 0.19 | 0.47 | 20.76 |
| 15:37 | 7.94 | 4.61 | 3.93 | 6.06 | 0.18 | 0.48 | 22.00 |
| 15:38 | 7.84 | 4.61 | 3.75 | 7.67 | 0.20 | 0.46 | 18.87 |
| 15:39 | 7.84 | 5.53 | 4.46 | 7.27 | 0.20 | 0.55 | 22.34 |
| 15:40 | 8.03 | 4.15 | 3.75 | 8.88 | 0.17 | 0.45 | 21.83 |
| 15:41 | 7.74 | 3.23 | 3.75 | 7.67 | 0.20 | 0.47 | 18.52 |
| 15:42 | 8.14 | 5.07 | 3.75 | 7.27 | 0.20 | 0.45 | 18.52 |
| 15:43 | 7.65 | 3.23 | 4.11 | 7.27 | 0.18 | 0.52 | 23.38 |
| 15:44 | 7.05 | 3.69 | 3.57 | 7.67 | 0.20 | 0.49 | 17.99 |
| 15:45 | 7.35 | 3.69 | 4.11 | 6.86 | 0.20 | 0.54 | 20.45 |

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ)

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:46 | 7.55 | 4.15 | 5.00 | 8.88 | 0.18 | 0.64 | 28.47 |
| 15:47 | 7.75 | 4.15 | 4.47 | 7.67 | 0.20 | 0.56 | 22.49 |
| 15:48 | 7.65 | 4.15 | 4.29 | 8.07 | 0.20 | 0.54 | 21.17 |
| 15:49 | 7.85 | 5.53 | 3.93 | 8.48 | 0.19 | 0.48 | 20.37 |
| 15:50 | 7.65 | 5.53 | 3.93 | 8.47 | 0.18 | 0.50 | 22.38 |
| 15:51 | 8.05 | 5.99 | 3.75 | 6.86 | 0.20 | 0.45 | 18.69 |
| 15:52 | 7.75 | 3.22 | 3.57 | 8.47 | 0.20 | 0.45 | 17.80 |
| 15:53 | 7.85 | 5.06 | 3.04 | 8.47 | 0.17 | 0.38 | 17.58 |
| 15:54 | 7.65 | 5.52 | 3.58 | 8.47 | 0.20 | 0.45 | 17.56 |
| 15:55 | 7.75 | 3.68 | 3.93 | 8.07 | 0.20 | 0.49 | 19.69 |
| 15:56 | 7.55 | 4.60 | 3.58 | 7.66 | 0.17 | 0.46 | 20.55 |
| 15:57 | 7.74 | 5.52 | 3.93 | 8.07 | 0.20 | 0.49 | 20.09 |
| 15:58 | 7.44 | 4.14 | 3.40 | 9.28 | 0.33 | 0.44 | 10.29 |
| 15:59 | 7.35 | 2.30 | 3.40 | 9.68 | 0.19 | 0.45 | 18.35 |
| 16:00 | 7.55 | 2.76 | 3.93 | 7.66 | 0.19 | 0.51 | 21.12 |
| 16:01 | 7.55 | 4.14 | 3.93 | 9.28 | 0.20 | 0.50 | 19.59 |
| 16:02 | 7.75 | 4.61 | 4.65 | 6.86 | 0.20 | 0.58 | 23.74 |
| 16:03 | 7.65 | 4.14 | 3.76 | 8.47 | 0.17 | 0.48 | 21.59 |
| 16:04 | 7.85 | 3.22 | 4.11 | 8.07 | 0.20 | 0.51 | 20.60 |
| 16:05 | 7.55 | 3.22 | 3.94 | 6.45 | 0.20 | 0.51 | 19.59 |
| 16:06 | 7.35 | 3.68 | 3.94 | 9.68 | 0.17 | 0.52 | 22.77 |
| 16:07 | 7.85 | 3.22 | 3.58 | 8.07 | 0.20 | 0.44 | 17.92 |
| 16:08 | 7.74 | 3.68 | 3.40 | 8.07 | 0.20 | 0.43 | 16.79 |
| 16:09 | 7.84 | 1.38 | 4.11 | 7.66 | 0.18 | 0.51 | 23.27 |
| 16:10 | 7.84 | 5.06 | 3.94 | 8.47 | 0.19 | 0.49 | 20.39 |
| 16:11 | 7.84 | 5.06 | 4.29 | 8.07 | 0.20 | 0.53 | 21.38 |

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ)

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:12 | 7.93 | 0.46 | 3.40 | 7.26 | 0.19 | 0.42 | 17.98 |
| 16:13 | 7.84 | 2.76 | 4.11 | 6.86 | 0.18 | 0.51 | 22.77 |
| 16:14 | 7.44 | 4.15 | 4.47 | 8.47 | 0.20 | 0.58 | 22.39 |
| 16:15 | 7.54 | 3.69 | 3.93 | 9.68 | 0.17 | 0.51 | 22.91 |
| 16:16 | 7.74 | 2.76 | 3.22 | 7.26 | 0.20 | 0.40 | 16.03 |
| 16:17 | 7.74 | 1.84 | 3.58 | 6.86 | 0.20 | 0.45 | 17.81 |
| 16:18 | 8.05 | 2.30 | 3.93 | 7.67 | 0.19 | 0.47 | 21.24 |
| 16:19 | 7.64 | 4.61 | 3.22 | 8.07 | 0.17 | 0.41 | 18.74 |
| 16:20 | 7.55 | 4.15 | 3.76 | 8.47 | 0.20 | 0.48 | 18.70 |
| 16:21 | 7.74 | 5.07 | 3.93 | 7.67 | 0.20 | 0.49 | 19.69 |
| 16:22 | 7.74 | 5.53 | 3.75 | 7.67 | 0.18 | 0.47 | 20.91 |
| 16:23 | 7.64 | 3.22 | 3.04 | 7.67 | 0.20 | 0.39 | 15.31 |
| 16:24 | 7.74 | 4.15 | 3.40 | 8.88 | 0.20 | 0.43 | 16.92 |
| 16:25 | 7.94 | 5.99 | 3.75 | 8.48 | 0.19 | 0.46 | 19.45 |
| 16:26 | 7.64 | 4.61 | 4.11 | 7.67 | 0.18 | 0.52 | 23.04 |
| 16:27 | 7.34 | 4.61 | 3.22 | 8.47 | 0.20 | 0.43 | 16.03 |
| 16:28 | 7.54 | 2.77 | 3.58 | 6.86 | 0.20 | 0.46 | 17.91 |
| 16:29 | 7.64 | 2.77 | 3.93 | 5.65 | 0.17 | 0.50 | 22.90 |
| 16:30 | 7.64 | 3.69 | 4.29 | 6.46 | 0.20 | 0.54 | 21.48 |
| 16:31 | 7.74 | 3.69 | 4.29 | 6.46 | 0.20 | 0.54 | 21.48 |
| 16:32 | 7.75 | 4.15 | 3.93 | 8.07 | 0.17 | 0.49 | 22.75 |
| 16:33 | 7.55 | 4.61 | 3.93 | 6.86 | 0.20 | 0.51 | 19.97 |
| 16:34 | 7.74 | 5.07 | 3.58 | 7.27 | 0.20 | 0.45 | 17.81 |
| 16:35 | 7.74 | 7.37 | 3.58 | 7.67 | 0.18 | 0.45 | 19.49 |
| 16:36 | 7.55 | 4.15 | 3.40 | 8.07 | 0.19 | 0.44 | 17.50 |
| 16:37 | 7.74 | 3.22 | 4.11 | 7.26 | 0.20 | 0.52 | 20.30 |

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ)

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:38 | 7.65 | 5.07 | 2.86 | 6.46 | 0.20 | 0.36 | 14.61 |
| 16:39 | 7.64 | 5.07 | 4.11 | 8.07 | 0.18 | 0.52 | 23.41 |
| 16:40 | 7.64 | 5.53 | 4.29 | 6.86 | 0.20 | 0.54 | 21.36 |
| 16:41 | 7.74 | 5.06 | 3.75 | 6.45 | 0.20 | 0.47 | 18.54 |
| 16:42 | 7.55 | 4.60 | 4.47 | 8.07 | 0.17 | 0.57 | 26.02 |
| 16:43 | 7.35 | 3.22 | 4.29 | 9.28 | 0.20 | 0.57 | 21.48 |
| 16:44 | 7.54 | 5.53 | 4.47 | 8.87 | 0.20 | 0.57 | 22.25 |
| 16:45 | 7.75 | 5.53 | 3.93 | 7.67 | 0.17 | 0.49 | 22.75 |
| 16:46 | 7.45 | 4.60 | 3.22 | 9.28 | 0.19 | 0.42 | 16.58 |
| 16:47 | 7.55 | 5.52 | 3.93 | 8.07 | 0.20 | 0.50 | 19.42 |
| 16:48 | 7.24 | 3.68 | 3.75 | 7.26 | 0.19 | 0.50 | 19.86 |
| 16:49 | 7.75 | 5.06 | 4.29 | 8.07 | 0.18 | 0.54 | 23.74 |
| 16:50 | 7.84 | 5.06 | 3.75 | 9.28 | 0.20 | 0.46 | 18.54 |
| 16:51 | 7.65 | 5.52 | 3.75 | 8.47 | 0.20 | 0.48 | 18.80 |
| 16:52 | 7.54 | 5.06 | 4.83 | 8.06 | 0.17 | 0.62 | 27.92 |
| 16:53 | 7.64 | 3.68 | 4.47 | 8.87 | 0.20 | 0.57 | 22.07 |
| 16:54 | 7.64 | 5.98 | 4.29 | 9.27 | 0.20 | 0.54 | 21.36 |
| 16:55 | 7.74 | 4.14 | 4.11 | 7.66 | 0.17 | 0.52 | 23.94 |
| 16:56 | 7.74 | 2.76 | 3.22 | 6.85 | 0.20 | 0.40 | 15.89 |
| 16:57 | 7.44 | 4.14 | 4.47 | 7.26 | 0.20 | 0.58 | 22.25 |
| 16:58 | 7.45 | 4.60 | 4.29 | 10.49 | 0.17 | 0.56 | 24.82 |
| 16:59 | 7.44 | 2.76 | 3.22 | 5.65 | 0.19 | 0.42 | 16.92 |
| 17:00 | 7.54 | 4.15 | 3.93 | 6.86 | 0.20 | 0.51 | 19.58 |
| 17:01 | 7.34 | 2.76 | 3.22 | 6.05 | 0.19 | 0.43 | 16.58 |
| 17:02 | 7.74 | 4.60 | 4.47 | 7.66 | 0.18 | 0.56 | 25.28 |
| 17:03 | 7.54 | 4.60 | 4.11 | 6.86 | 0.20 | 0.53 | 20.30 |

**ตารางผนวกที่ 7** (ต่อ)

| Time (Min) | $Q_G$ (kW) | $Q_C$ (kW) | $Q_E$ (kW) | $Q_A$ (kW) | $W_{SP}$ ($kW_e$) | COP (-) | EER ($kW_{th}/kW_e$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17:04 | 7.64 | 5.99 | 4.11 | 8.47 | 0.20 | 0.52 | 20.47 |
| 17:05 | 7.74 | 4.60 | 4.11 | 8.47 | 0.17 | 0.52 | 23.63 |
| 17:06 | 7.74 | 5.06 | 3.93 | 8.47 | 0.20 | 0.49 | 19.42 |
| 17:07 | 7.84 | 5.07 | 5.00 | 7.26 | 0.20 | 0.62 | 24.91 |
| 17:08 | 7.93 | 5.07 | 3.04 | 7.67 | 0.17 | 0.37 | 17.58 |
| 17:09 | 7.53 | 5.99 | 4.11 | 6.86 | 0.20 | 0.53 | 20.88 |
| 17:10 | 8.23 | 5.07 | 3.22 | 7.26 | 0.20 | 0.38 | 16.02 |
| 17:11 | 7.93 | 4.61 | 3.75 | 8.07 | 0.17 | 0.46 | 21.58 |
| 17:12 | 8.03 | 5.99 | 4.83 | 8.88 | 0.20 | 0.58 | 24.03 |
| 17:13 | 7.83 | 5.99 | 4.47 | 6.86 | 0.20 | 0.55 | 22.06 |
| 17:14 | 7.83 | 5.53 | 3.40 | 6.86 | 0.19 | 0.42 | 17.97 |
| 17:15 | 7.83 | 6.45 | 3.58 | 8.47 | 0.17 | 0.44 | 20.55 |
| 17:16 | 7.83 | 6.45 | 3.93 | 10.49 | 0.20 | 0.49 | 19.58 |
| 17:17 | 7.83 | 5.99 | 3.58 | 6.86 | 0.20 | 0.44 | 17.80 |
| 17:18 | 8.03 | 5.06 | 4.11 | 9.28 | 0.17 | 0.50 | 23.94 |
| 17:19 | 8.02 | 3.68 | 4.29 | 7.66 | 0.20 | 0.52 | 21.36 |
| 17:20 | 7.93 | 3.68 | 3.75 | 8.47 | 0.20 | 0.46 | 18.69 |
| 17:21 | 8.02 | 6.45 | 3.58 | 7.67 | 0.18 | 0.43 | 20.23 |
| 17:22 | 8.01 | 4.61 | 3.58 | 8.48 | 0.19 | 0.43 | 18.53 |

# ภาคผนวก ค

# การเผยแพร่งานวิจัย

## บทความทางวิชาการที่ 1

ชื่อผู้แต่ง: Xangpheuak Inthavideth
นัฐพร ไชยญาติ

ชื่อบทความ: การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
Performance analysis of an organic Rankine cycle combined with an absorption chiller

ชื่อวารสาร: การประชุมวิชาการ เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15)

เล่มที่: หน้า 88-93, ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559, ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท, สมุย, จังหวัดสุราษฎร์ธานี, ประเทศไทย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประกาศนียบัตรฉบับนี้มอบไว้เพื่อแสดงว่า

Xangpheuak Inthavideth, Nattaporn Chaiyat

ได้เสนอบทความ เรื่อง การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ในการประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15)

จัดขึ้นระหว่างวันที่ 30–31 มีนาคม 2559

ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ให้ไว้ ณ วันที่ 31 มีนาคม 2559

(ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)

ประธานการจัดประชุมวิชาการ

เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15)

การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล
ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15)
ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559 ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี

# การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

# PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED WITH AN ABSORPTION CHILLER



**Xangpheuak Inthavideth**
**นัฐพร ไชยญาติ**
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อนโดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงานคือน้ำ-ลิเธียมโบรไมด์ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีค่าประมาณ 8%ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มในช่วง90-120 °C สำหรับระบบร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า ระบบร่วมต้องการน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 105 °Cเพื่อให้ความร้อนทิ้งที่ออกจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ สามารถขับเคลื่อนระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบร่วมสามารถลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่นได้ประมาณ 13 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50%เทียบกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุง

**คำสำคัญ:** วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Abstract**

This researchstudies enhancement efficiencyof an organic Rankine cycle (ORC) by reducinga working fluid temperature at a condenser.An absorption chiller is presented to combine with the ORC system, which the rejected heat at a boiler of the ORC system isrecovered and supplied back to the absorption chiller.In simulation process, R-245fa is selected as the ORC working fluid, while theabsorption cycle is obtained a water-lithium bromide solution as the working pair.From the study results, it could be found that the normal ORC efficiency is around 8%at hot water temperature entering a boiler between 90-120 °C.In case of the ORC system combined with the absorption chiller, it could be found that the minimum hot water temperature enteringthe modified systemis around 105 °C for operating the ORC and absorption systems. The modified system could reduce the cooling water temperature to be around13°C and the ORC efficiency could be increased at around12%, which increases approximately50% compared with the normal ORC system.

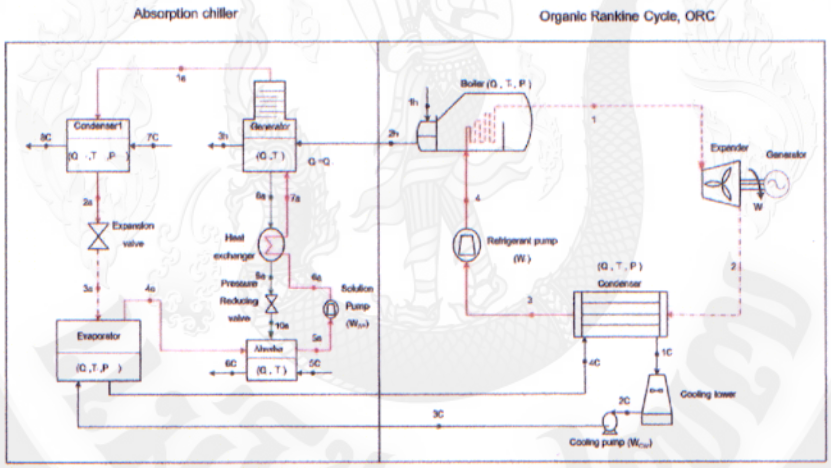
**Keywords:** Organic Rankine Cycle, Absorption chiller,Mathematical model

**บทนำ**

ประเทศไทยนำเข้าพลังงานในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.2011 นำเข้าพลังงานเพิ่มขึ้น 30.2%เมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ.2010 [1] ดังนั้นรัฐบาลได้กำหนดกรอบและทิศทางนโยบายพลังงานของประเทศซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความมั่นคงด้านพลังงานเพื่อให้มั่นใจว่ามีเสถียรภาพด้านพลังงานสำหรับประเทศไทยโดยการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็น 25%ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศในปี ค.ศ. 2021ซึ่งวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์(Organic Rankine Cycle; ORC) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้พลังงานทดแทนผลิตพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์มีดังต่อไปนี้การใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำมาขับเคลื่อนวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ [2-4] การนำวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์มาใช้ร่วมกับพลังงานทดแทน อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ [5] พลังงานความร้อนใต้พิภพ [6] พลังงานชีวมวล [7]นอกจากนี้ยังมีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานโดยวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ของระบบผลิตพลังงานร่วม (Combine heating and power, CHP) อีกด้วย[8-10] Brophy [12]Kose[13] และ Dagdas[14] วิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ได้รับความสนใจกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันอาทิเช่น การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์โดยผลการศึกษาส่วนมาก พบว่า สารทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการศึกษาเหล่านี้ คือ R-134a และ R-245fa[15-22] สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของสำหรับวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ Chaiyat and Kiatsiriroat [23] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) โดยใช้สมการสมรรถนะของระบบทั้งสองที่ได้จากผลการทดสอบ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นประมาณ 7%

จากการศึกษาข้างต้น พบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอสมรรถนะการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น(Condenser) ของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่มุ่งศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในรูปที่ 1




รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์และระบบการทำความเย็นดูดกลืน

**ทฤษฎี**

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบไปด้วย 3ทฤษฎีคือวัฏจักรคาร์โนต์ (Camot cycle)วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยรายละเอียดของหัวข้อต่างๆ ดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

**ก. วัฏจักรคาร์โนต์**

ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของระบบด้านความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพคาร์โนต์ ($\eta_{Carnot}$) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางอุดมคติไม่สามารถทำได้จริง โดยวัฏจักรคาร์โนต์สามารถย้อนกลับได้ ประสิทธิภาพคาร์โนต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้[24]

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

**ข. วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์**

วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของระบบแรงดิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในระบบแรงดินทั่วไปทำให้วัฏจักร

แรงดันสารอินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C)[24]

วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 1มีหลักการทำงาน คือ ของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 3) และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิก จนกระทั่งมีความดันสูงขึ้น ($P_{H,AB}$) (จุดที่ 4) ภายในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของเหลวจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ และกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (จุดที่ 1) ในที่สุด ไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการขับเพลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอสารทำงานลดลง ($P_{L,AB}$) (จุดที่ 2) ที่ทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสถานะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ กลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (3) อีกครั้ง

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์พิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state steady flow, SSSF) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_B = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4) \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$Q_C = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_3) \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$W_P = \dot{m}_{ref}(h_4 - h_3) \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_2) \quad \text{สมการที่ 5}$$

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{Q_B} \quad \text{สมการที่ 6}$$

$$W_{net} = W_{Tur} - W_P - W_{CW} \quad \text{สมการที่ 7}$$

**ค. ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในรูปที่ 1มีหลักการทำงานดังนี้ คือ ความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์(Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลาย จากนั้นสารทำงาน (Absorbate) ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสารดูดกลืน (Absorbent) จะระเหยกลายเป็นไอและไหลออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสารทำงานที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1a) ไหลไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser1) แล้วควบแน่นกลายเป็นสารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2a) ที่ความดันสูง จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน(Expansion valve) เพื่อลดความดัน (จุดที่ 3a) เข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งสารทำงานจะรับความร้อนจากของไหล ซึ่งมากพอที่จะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหยกลายเป็นไอ (จุดที่ 4a) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์ (Absorber) สารทำงานสถานะไอดังกล่าวจะถูกดูดกลืนรวมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger) ทำให้กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง (จุดที่ 5a) สารละลายดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเจนเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลาย (Solution pump) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 6a) และภายในเจนเนอเรเตอร์เนื่องจากสารทำงานในสารละลายระเหยกลายเป็นไอทำให้เหลือสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายังแอบซอร์พเบอร์ (จุดที่ 8a) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลายความเข้มข้นสูงในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 9a) จากนั้นจะผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure reducing valve) (จุดที่ 10a) แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป[24]

จากรูปที่ 1สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$Q_G = \dot{m}_{1a}h_{1a} + \dot{m}_{8a}h_{8a} - \dot{m}_{7a}h_{7a} \quad \text{สมการที่ 8}$$

$$Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a}h_{1a} - \dot{m}_{2a}h_{2a} \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$Q_E = \dot{m}_{4a}h_{4a} - \dot{m}_{3a}h_{3a} \quad \text{สมการที่ 10}$$

$$Q_A = \dot{m}_{4a}h_{4a} + \dot{m}_{10a}h_{10a} - \dot{m}_{5a}h_{5a} \quad \text{สมการที่ 11}$$

$$W_{SP} = (P_{H,AB} - P_{L,AB})\frac{V_{5a}\dot{m}_{5a}}{\eta_{SP}} \quad \text{สมการที่ 12}$$

$$Q_{HX} = \dot{m}_{8a}Cp_{8a}(T_{8a} - T_{9a}) = \dot{m}_{6a}Cp_{6a}(T_{7a} - T_{6a}) \quad \text{สมการที่ 13}$$

$$COP_{AB} = \frac{Q_E}{Q_G + W_{SP}} \quad \text{สมการที่ 14}$$

ดังนั้นการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบร่วม ได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_{ORC\text{-}AB} = \frac{W_{net}}{Q_B} \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$W_{net} = W_{Tur} - W_P - W_{SP} - W_{CW} \quad \text{สมการที่ 16}$$

**วิธีการดำเนินงาน**

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
3. วิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานจากการจำลองระบบดังต่อไปนี้
   - สารทำงานที่ใช้กับระบบคือ R-245fa
   - ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม ($Q_B$)คือ 200kW
   - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์($T_{1h}$) คือ90-120 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่ให้ความร้อนกับสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_{2h} - T_B$) เท่ากับ 3 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกหม้อต้ม ($T_{1h} - T_{2h}$) เท่ากับ15 °C
   - อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{3C} = T_{4C}$) เท่ากับ 32 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าและออกเครื่องควบแน่น ($T_{1C} - T_{4C}$) เท่ากับ 5 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C - T_{1C}$) เท่ากับ 3 °C
4. วิเคราะห์การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีรายละเอียดของเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองระบบดังต่อไปนี้
   - คู่สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ $H_2O$-Libr

- ปริมาณความร้อนที่เครื่องเจนเนอเรเตอร์ ($Q_G = Q_B$) คือ 200 kW
- อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ($T_{2h}$)คือ 75-105 °C
- ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนกับสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์($T_{3h}$ – $T_G$) เท่ากับ 3 °C
- ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น($T_{C,AB}$ – $T_{BC}$) เท่ากับ 3 °C
- ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนกับสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A$ – $T_{BC}$) เท่ากับ 3 °C
- ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นกับสารทำงานที่เครื่องระเหย ($T_{4C}$ – $T_E$) เท่ากับ 3 °C
- อุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย($T_{4C}$) เท่ากับ 2-32 °C
- ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกที่เครื่องควบแน่นแอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหยและเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 5 °C

5. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

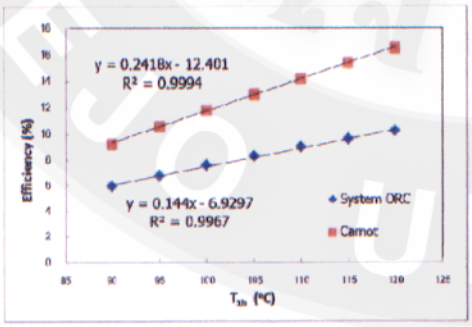
**ผลและการอภิปรายผล**

**ก. สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์**

รูปที่ 2แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม($T_{1h}$)ในช่วง90-120 °Cผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าที่หม้อต้มเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน(Heat source) และแหล่งระบายความร้อน(Heat sink) เพิ่มขึ้นและเมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ3%

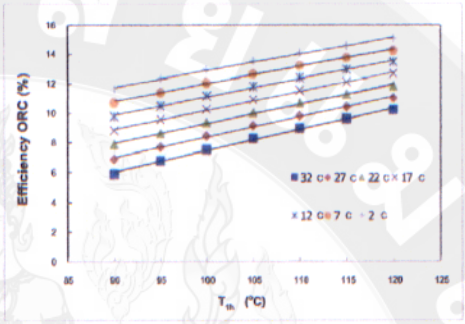
รูปที่ 2ยังพบอีกว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม($T_{1h}$) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ในรูปแบบสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.144(T_{1h}) - 6.9297 \qquad \text{สมการที่17}$$




รูปที่ 2 แบบจำลองอย่างง่ายของระบบ ORC

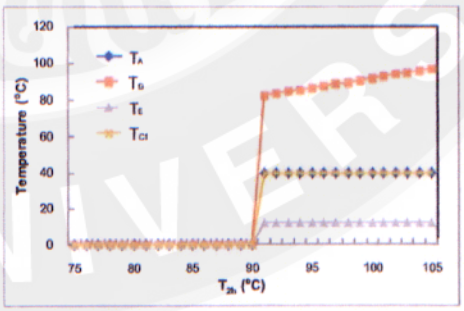
รูปที่ 3แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในช่วง 2-32 °C ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ และกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มอยู่ในช่วง90-120 °C ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องควบแน่นลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักคาร์โนต์ที่ว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิที่ของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น




รูปที่ 3ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปรงตามอุณหภูมิน้ำ

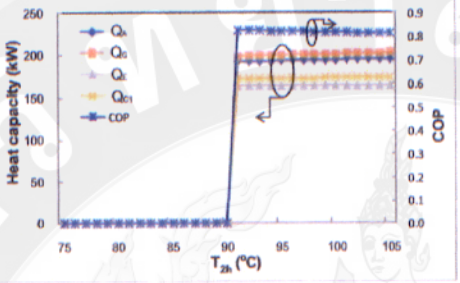
**ข. สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

รูปที่ 4แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์($T_{2h}$) กับอุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_G$) ในขณะที่อุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนประมาณ 91 °C หรือน้ำร้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ประมาณ 105 °C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไขคือ ความเข้มข้นต้นสูงและต่ำของสารละลาย $H_2O$-Libr คือ53.6 และ 58.6 %Libr ตามลำดับ



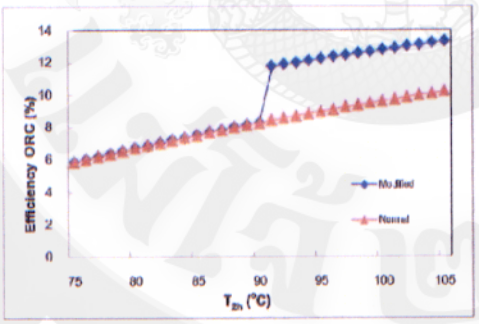

รูปที่ 4อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปที่ 5แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ในระบบค่อนข้างน้อย ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่ และส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าเกือบคงที่ประมาณ 0.8 ตามไปด้วย




รูปที่ 5อัตราความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปที่ 6แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ผลการคำนวณพบว่า ระบบร่วมของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12%สูงกว่าระบบก่อนปรังปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °Cในขณะที่ระบบก่อนการปรับปรุงมีอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ประมาณ 32 °C




รูปที่ 6การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

## สรุปผลการศึกษา

จากการจำลองวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$ ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ $H_2O$-Librสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ก่อนการปรังปรุงเท่ากับ 8%ที่น้ำร้อนเข้าหม้อต้มในช่วง90-120°C
- ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์หลังการปรังปรุง โดยทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มีค่าประมาณ 12%
- ประสิทธิภาพการทำงานของระบบหลังการปรังปรุงเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง
- ระบบร่วมต้องป้อนน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 105 °C เพื่อให้น้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสูงกว่า 91 °Cและสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ความเข้มข้นต้านสูงและต่ำของสารละลาย $H_2O$-Libr ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ 53.6 และ 58.6 %Librตามลำดับ
- ระบบร่วมมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ที่ประมาณ 13 °C

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ภายใต้ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา"และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ แผนงานพลังงานทดแทนภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน ๒๕๕๘ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

## อ้างอิง

[1] Energy Policy and Planning Office (EPPO), *"Annual year final report"*, 2010.

[2] Yamada N, Tominaga Y, Yoshiba T, Demonstration of 10-$W_e$ micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery. *Energy*, 2014, 78, 806 – 13.

[3] Li J, Pei G, Li Y, Wang D, Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperature. *Energy*, 2012, 38, 85 – 95.

[4] Tchanche BF, Lambrinos Gr, Frangoudakis A, Papadakis G. Low grade heat conversion into power using organic Rankine cycle – a review of various applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15, 3963 – 79.

[5] Wang M, Wang J, Zhao Y, Zhao P, Dai Y. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collector. *Appl Therm Eng*, 2013, 50, 816 – 25.

[6] Franco A. Power production from a moderate temperature geothermal resource with regenerative organic Rankine cycle. *Energy Sustain Dev*. 2011, 15, 411 – 9.

[7] Al-Slulaiman F, Dincer I, Humdullahpur F. Energy and exergy analysis of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle. *Energy*, 2012, 45, 411 – 85

[8] Tempesti D, Fiaschi D. Thermo-economic assessment of a micro CHP system feulled by geothermal and solar energy. *Energy*, 2013, 58, 45 – 51

[9] Zhang YQ, Wu YT, Xia GD, Ma CF, Ji WN, Liu SW, Yang K, Yang FB. Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for west heat recovery from exhaust of diesel engine. *Energy*, 2014, 77, 499 – 508.

[10] Khatita MA, Ahmed TS, Ashour FH, Ismail IM. Power generation using west heat recovery by organic Rankine cycle in oil and gas sector in Egypt: a case study. *Energy*, 2014, 64, 462 – 72.

[11] Campana F, Bianchi M, Branchini L, Pascale AD, Peretto A, Baresi M, Fermi A, Rossetti N, Vescovo R. ORC west heat recovery in European energy intensive industries: energy and GHG savings. *Energy Convers Manag*, 2013, 76, 244 – 52.

[12] Brophy P. Environmental advantages to the utilization of geothermal energy.*Renewable Energy*, 1997, 10, 367- 377,

[13] Kose R.Research on the generation of electricity from the geothermal resources in Simav region Turkey.*Renewable Energy*, 2005,30, 67-79.

[14] Dagdas A. Heat exchanger optimization for geothermal district heating systems: A fuel saving approach. *Renewable Energy*, 2007, 32,1020-1032.

[15] Hettiarachchi H.D.M, Golubovica M, Worek W.M, Ikegamib Y. Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy*, 2007, 32, 1698-1706.

[16] Schuster A, Karellas S, Karl J. Simulation of an innovative stand-alone solar desalination system with an Organic Rankine Cycle In: the 46th Conference on Simulation and Modeling. *Trondheim, Norway, October*, 2005, 13-14.

[17] Guo T, Wang H.X, Zhang S.J. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources. *Energy*, 2011, 36, 2639-2649.

[18] Sauret E, Rowlands A.S. Candidate radial-inflow turbines and high-density working fluids for geothermal power systems, *Energy*, 2011, 36, 4460-4467.

[19] Liu B, Riviore P, Coquelet C,Gicquel G,David F.Investigation of a two stage Rankine cycle for electric power plants. *Applied Energy*, 2012, 100,285-294.

[20] Edrisi B.H,Michaelides E.E.Effect of the working fluid on the optimum work of binary-flashing geothermal power plants, *Energy*, 50, 389-394.

[21] Li T, Zhu J, Zhang W. Comparative analysis of series and parallel geothermal systems combined power, heat and oil recovery in oilfield, *Applied Thermal Engineering*,2013, 50, 1132-1141.

[22] RodriguezC.E.C,Palacio J.E.C, Venturini O.J,Silva L.E.E,Cobas V.M.D, Santos D.M, Dotto F.R.L,Gialluca V,Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature Antonio Yock,. *In: Proceeding of Seminar on Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, El Salvador, October* 2009, 17-30.

[23] Chaiyat N, Kiatsiriroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, *Energy*, 2015, Vol.91, 363-370.

[24] นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2558, 324 หน้า.

**รายการสัญลักษณ์**

**สัญลักษณ์**

| | |
|---|---|
| COP | สัมประสิทธิ์สมรรถนะ |
| Cp | ความจุความร้อน (kJ/kg·K) |
| h | เอนทัลปี (kJ/kg) |
| $\dot{m}$ | อัตราการไหล (kg/s) |
| P | ความดัน (kPa) |
| Q | อัตราความร้อน (kW) |
| T | อุณหภูมิ (°C) |
| v | ปริมาณจำเพาะ ($m^3$/kg) |
| W | กำลังงาน (kW) |

**ตัวกรีก**

| | |
|---|---|
| η | ประสิทธิภาพ (%) |

**ตัวห้อย**

| | |
|---|---|
| A | การดูดกลืน |
| AB | ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน |
| B | หม้อไอน้ำ |
| C | คอนเดนเซอร์ |
| CW | น้ำหล่อเย็น |
| e | ไฟฟ้า |
| E | เครื่องระเหย |
| G | เจนเนอเรเตอร์ |
| HW | น้ำร้อน |
| HX | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| H | สูง |
| i | ทางเข้า |
| L | ต่ำ |
| o | ทางออก |
| ORC | วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ |
| P | ปั๊มสารทำงาน |
| ref | สารทำงาน |
| SP | ปั๊มสารละลาย |
| Tur | กังหัน |

## บทความทางวิชาการที่ 2

ชื่อผู้แต่ง: Xangpheuak Inthavideth
นัฐพร ไชยญาติ

ชื่อบทความ: การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
Thermal Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle with an Absorption Chiller

ชื่อวารสาร: การประชุมวิชาการ ประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 (The 9th Thailand Renewable Energy Community Association Conference: TREC-09)

เล่มที่: หน้า 130-138, ระหว่างวันที่ 29 พฤศจิกายน – 1 ธันวาคม 2559, ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ดอยสะเก็ด), จังหวัดเชียงใหม่, ประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ร่วมกับ

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

**ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า**

*ช้างเผือก อินทะวิเดด และณัฐพร ไชยญาติ*

**ได้นำเสนอบทความ "ภาคบรรยาย"**

*เรื่อง การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน*

ในการประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9

The 9th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-9)

**ระหว่างวันที่ 29 พฤศจิกายน - 1 ธันวาคม 2559**

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ดอยสะเก็ด)

ให้ไว้ ณ วันที่ 30 พฤศจิกายน 2559

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปัยุทธ ลงค์ธนาพิทักษ์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรชัย โรยนรินทร์)
นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

TREC-9 ประชุมสัมมนาวิชาการ
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9

# การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

# Thermal Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle with an Absorption Chiller

ช้างเผือก อินทะวิเดต และ ณัฐพร ไชยญาติ*

Xangpheuak Inthavideth and Nattaporn Chaiyat*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้63 ถ.เชียงใหม่-พร้าว ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

*Email: benz178tii@hotmail.com, +66(0)882523088



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกันกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดประมาณ20 $kW_e$ ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดความสามารถการทำความเย็นประมาณ 160 kW ที่ใช้คู่สารทำงาน คือ น้ำ-ลิเธียมโบรไมด์โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สำหรับผลิตน้ำเย็นช่วยในการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อหาสมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับอุณหภูมิสารทำงานที่จุดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรังปรุงมีค่าประมาณ 8%จากสมการสมรรถนะ5 รูปแบบ ผลที่ได้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำสามารถทำนายพฤติกรรมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า $R^2 = 0.9945$และ P-value = $5.2678\times10^{-06}$ในรูปแบบ $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{ReCD} - T_{ReCC}) - 1.8222$และสมการสมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนวิเคราะห์ทั้งหมด 3 รูปแบบ ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ในรูปแบบ $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ โดยมีค่า$R^2 = 0.9993$ และ P-value = $5.7061\times10^{-19}$ทั้งนี้ระบบร่วมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ประมาณ 12%

## Abstract

This research studiesthe parameters analysis of an R-245fa organic Rakine cycle(ORC) at capacity around 20 $kW_e$combined witha Water-LiBr absorption chiller at cooling capacity around 160 kW to find out thermal performance of the both systems. Waste heat from the ORC system is recovered to supply the absorption chiller for cooling refrigerant temperature of the ORC condenser. From the study results, it could be found that the ORCefficiency is around 8% from 5 correlations, which $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{ReCD} - T_{ReCC}) - 1.8222$ at $R^2 = 0.9945$ and P-value = $5.2678\times10^{-06}$ is the best correlation performance of the ORC system. While, the best correlation performance of the absorption chiller is $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$at $R^2 = 0.9993$ and P-value = $5.7061 \times 10^{-19}$compared with 3 correlations. For the modified system, it could be seen that the efficiency of modified system is around 12%.

**คำสำคัญ:** วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สมการสมรรถนะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Keywords:** Organic Rankine cycle, Absorption chiller, Performance curve, Mathematical model

## 1. บทนำ

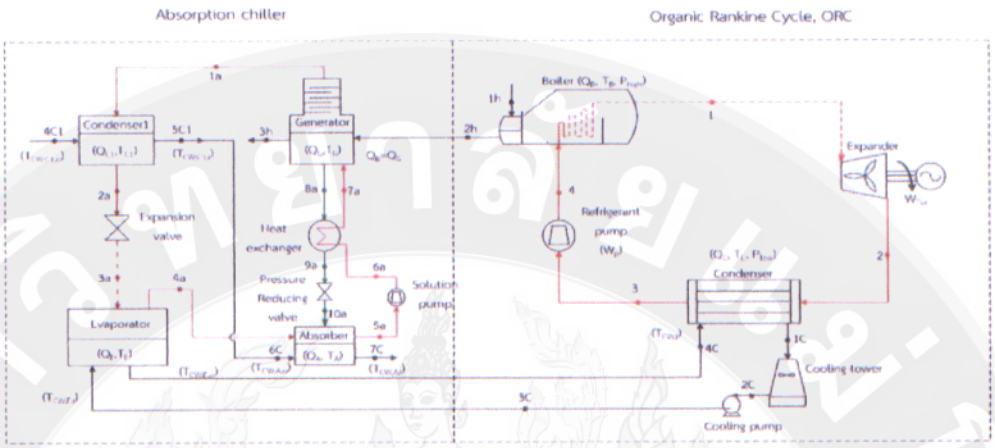
พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมเพราะจำเป็นต้องใช้พลังงานในทุกขั้นตอนของการดำเนินงานทั้งทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคม เกษตรกรรมและอื่นๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้

พลังงานที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ จำนวนประชากร อัตราการเพิ่มของประชากร และระดับของการพัฒนา โดยแหล่งพลังงานพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวันทั่วไป คือ น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นต้นเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นรัฐบาลไทยเห็นความสำคัญของปัญหาดังกล่าว โดยได้กำหนดกรอบและทิศทางนโยบายพลังงานของประเทศ ซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความมั่นคงด้านพลังงาน เพื่อให้มั่นใจว่ามีเสถียรภาพด้านพลังงานสำหรับประเทศไทย โดยการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็น 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศในปี ค.ศ. 2021 ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้พลังงานทดแทนการใช้พลังงานฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าและการทำความเย็น

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นวัฏจักรที่ใช้สารอินทรีย์เป็นสารทำงานแทนน้ำ จุดเดือดของสารอินทรีย์ต่ำกว่าน้ำ การใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำมาขับเคลื่อนวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [1-3] การนำวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มาใช้ร่วมกับพลังงานทดแทนอาทิเช่นความร้อนเหลือทิ้ง [4-6] พลังงานความร้อนใต้พิภพ[7-9] พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์[10-12]พลังงานความร้อนชีวมวล [13-15]และ พลังงานความร้อนมหาสมุทร [16-18]

สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ Chaiyat and Kiatsiriroat [19] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) โดยใช้สมการสมรรถนะ (Performance curve) ของระบบทั้งสองที่ได้จากผลการทดสอบ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นประมาณ 7% เทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง สอดคล้องกับ Inthavideth and Chaiyat[20] ที่นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เทียบกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุง สาเหตุเนื่องมาจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ช่วยลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอความรูปแบบสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำนายประสิทธิภาพการทำงาน ในรูปแบบสมรรถนะของการทำงานร่วมวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยลดอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนของหอผึ่งความร้อน จากน้ำเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 1ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้




รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบการทำความเย็นดูดกลืน

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในรูปแบบความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงาน (Performance curve)

## 3. แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 วัฏจักรคาร์โนต์

ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของระบบด้านความร้อน สามารถอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพคาร์โนต์ ($\eta_{Carnot}$) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางอุดมคติไม่สามารถทำได้จริง โดยวัฏจักรคาร์โนต์สามารถย้อนกลับได้ ประสิทธิภาพคาร์โนต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้[22]

$$\eta_{Carnot} = (T_H - T_L) / T_H = 1 - (T_L / T_H) \qquad (1)$$

### 3.2 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในวัฏจักรแรงคินทั่วไป ทำให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) [22]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการทำงาน คือ ของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 3) และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิกจนกระทั่งมีความดันสูงขึ้น ($P_H$) (จุดที่ 4) ภายในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของเหลวจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ และกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (จุดที่ 1) ในที่สุดไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการขับเพลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอสารทำงานลดลง ($P_L$) (จุดที่ 2) ที่ทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสถานะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ กลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (3) อีกครั้ง [22]

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ พิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state steady flow, SSSF) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_B = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4) \quad (2)$$

$$Q_C = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_2) \quad (4)$$

$$W_P = \dot{m}_{ref}V_3(P_H - P_L) / \eta_{s,P} \quad (5)$$

$$\eta_{ORC} = (W_{Tur} - W_P) / Q_B \quad (6)$$

### 3.3 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการทำงานดังนี้ คือ ความร้อนอุณหภูมิสูงเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์ (Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลาย จากนั้นสารทำงาน (Absorbate) ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสารดูดกลืน (Absorbent) จะระเหยกลายเป็นไอและไหลออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสารทำงานที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1a) ไหลไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser1) แล้วควบแน่นกลายเป็นสารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2a) ที่ความดันสูง จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เพื่อลดความดัน (จุดที่ 3a) เข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งสารทำงานจะรับความร้อนจากของไหลซึ่งมากพอที่จะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหยกลายเป็นไอ (จุดที่ 4a) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์ (Absorber) สารทำงานสถานะไอดังกล่าวจะถูกดูดกลืนรวมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ทำให้กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง (จุดที่ 5a) สารละลายดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเจนเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลาย (Solution pump) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 6a) และภายในเจนเนอเรเตอร์เนื่องจากสารทำงานในสารละลายระเหยกลายเป็นไอ ทำให้เหลือสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายังแอบซอร์พเบอร์ (จุดที่ 8a) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลายความเข้มข้นสูงในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 9a) จากนั้นจะผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure reducing valve) (จุดที่ 10a) แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์พเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป [22]

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$Q_G = \dot{m}_{1a} h_{1a} + \dot{m}_{8a} h_{8a} - \dot{m}_{7a} h_{7a} \quad (7)$$

$$Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a} h_{1a} - \dot{m}_{2a} h_{2a} \quad (8)$$

$$Q_E = \dot{m}_{4a} h_{4a} - \dot{m}_{3a} h_{3a} \quad (9)$$

$$Q_A = \dot{m}_{4a} h_{4a} + \dot{m}_{10a} h_{10a} - \dot{m}_{5a} h_{5a} \quad (10)$$

$$W_{SP} = [(P_{H,AB} - P_{L,AB})(V_{5a}\dot{m}_{5a})] / \eta_{s,SP} \quad (11)$$

$$Q_{HX} = \dot{m}_{8a} Cp_{8a} (T_{8a} - T_{9a}) = \dot{m}_{6a} Cp_{6a} (T_{7a} - T_{6a}) \quad (12)$$

$$COP_{AB} = Q_E / (Q_G + W_{SP}) \quad (13)$$

## 4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
2. วิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานจากการจำลองระบบดังต่อไปนี้ [19-20]
   - สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือR-245fa
   - ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม ($Q_B$) เท่ากับ200 kW
   - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{1h}$) เท่ากับ90-120 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่ให้ความร้อนกับสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_{2h} - T_B$) เท่ากับ 3 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกหม้อต้ม ($T_{1h} - T_{2h}$) เท่ากับ 15 °C
   - อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{3C} = T_{4C}$) เท่ากับ 30°C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าและออกเครื่องควบแน่น ($T_{1C} - T_{4C}$) เท่ากับ 5 °C

- ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C - T_{1C}$) เท่ากับ 3 °C

3. วิเคราะห์การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดง มีรายละเอียดของเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองระบบดังต่อไปนี้ [20]
   - คู่สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ $H_2O$-LiBr
   - ปริมาณความร้อนที่เครื่องเจนเนอเรเตอร์ ($Q_G = Q_B$) เท่ากับ200 kW
   - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ($T_{2h}$) เท่ากับ75-105 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนกับสารทำงานที่เจนเนอเรเตอร์ ($T_{3h} - T_G$) เท่ากับ 3 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_{C,AB} - T_{5C}$) เท่ากับ 3 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A - T_{7C}$) เท่ากับ 3 °C
   - อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่นเท่ากับอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่เข้าแอบซอร์พเบอร์ ($T_{5C1} = T_{6C}$)
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นกับสารทำงานที่เครื่องระเหย ($T_{4C} - T_E$) เท่ากับ 3 °C
   - ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกที่เครื่องควบแน่น แอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหย และเจนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 5 °C
4. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จุดต่างๆ
5. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรังปรุง

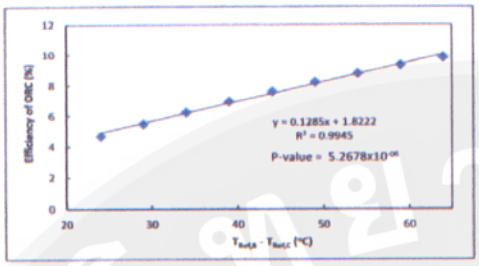
## 5. ผลและอภิปรายผลการศึกษา

### 5.1 วัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์

การศึกษาสมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบในรูปแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- ผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) ($T_{HW,AB} - T_{CW,AC}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มและน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,AB}/T_{CW,AC}$)
- ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น($T_{Ref,B} / T_{Ref,C}$)
- สัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ[($T_{Rref,Tur} - T_{Ref,B}$) / ($T_{Ref,C} - T_{Ref,Pump}$)]

โดยผลจากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นในรูปแบบ $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) - 1.8222$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือบางครั้งเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($R^2$) เท่ากับ 0.9945เมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ในรูปแบบอื่นๆ ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าความน่าจะเป็น (Probabilityvalue,P-value)ที่ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรแกน x มีผลต่อค่าในแนวแกน y เท่ากับ$5.2678 \times 10^{-06}$ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2ถือว่าเหมาะสม เพราะทำให้การทำนายการทำงานของวัฏจักรแรงดินสารอินทรีย์ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า ประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น



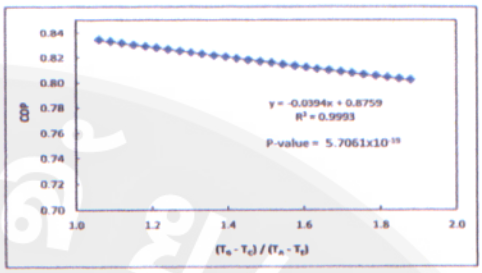

รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ

5.2 **ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

การศึกษาสมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ(Coefficient of performance, COP) กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบในรูปแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB}$)
- สัดส่วนผลต่างอุณหภูมิในรูปแบบ $(T_G - T_C) / (T_A - T_E)$

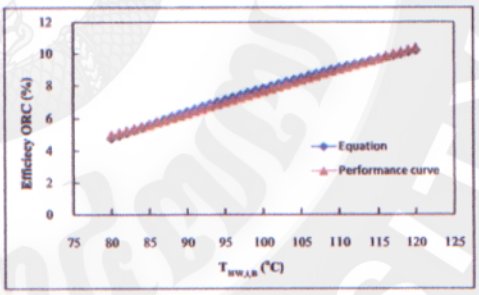
โดยผลจากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำในรูปแบบของ $COP_{AB} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ P-value = $5.7061 \times 10^{-19}$ ดังแสดงในรูปที่ 3ถือว่าเหมาะสม เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ของอุปกรณ์หลักในระบบ ซึ่งทำให้ทำนายการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้ถูกต้อง ควบคุม ใช้ทำนายการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ




รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ

5.3 **ประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน**

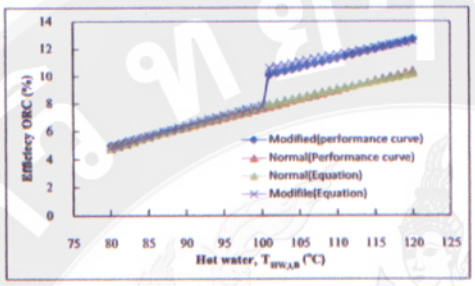
การเปรียบเทียบความถูกต้องของสมการสมรรถนะการทำงานของระบบ กับผลการคำนวณของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (สมดุลพลังงาน) ของ Xangpheuak and Nattaporn [20] ซึ่งผลที่ได้ พบว่า ผลการเปรียบเทียบมีความใกล้เคียงกัน แต่การใช้สมการสมรรถนะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าแต่ยังคงทำนายพฤติกรรมการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4




รูปที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานหลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% สูงกว่าระบบก่อนปรังปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือ

ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง แต่ระบบร่วมจะเริ่มทำงานได้อุณหภูมิน้ำร้อนประมาณ 101°C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ




รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

โดยการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบทั้งสองจากการคำนวณ ยังไม่ได้ทำการพิสูจน์ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวโดยผลการทดสอบซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงภาพถ่ายของต้นแบบระบบทั้งสองที่จะทำการทดสอบต่อไป ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

รูปที่ 6วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 $kW_e$

รูปที่ 7ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR

## 6. สรุปผลการศึกษา

จากการจำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20$kW_e$ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ $H_2O$-LiBr สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์คือ $R^2$ = 0.9945และ P-value = $5.2678\times10^{-06}$ $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) - 1.8222$
- สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ$R^2$ = 0.9993 และ P-value = $5.7061\times10^{-19}$ $COP = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$
- ประสิทธิภาพการทำงานของระบบหลังการปรังปรุงเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา" และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ แผนงานพลังงานทดแทนภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน 2559 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

## 8. เอกสารอ้างอิง

[1] Yamada N, Tominaga Y, Yoshiba T, Demonstration of 10-WP micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery. Energy, 2014, 78, 806 – 813.

[2] Li J, Pei G, Li Y, Wang D, Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperature. Energy, 2012, 38, 85 – 95.

[3] Tchanche BF, Lambrinos Gr, Frangoudakis A, Papadakis G. Low grade heat conversion into power using organic Rankine cycle – a review of various applications. Renew Sustain Energy Rev, 2011, 15, 3963 – 3979.

[4] Roy JP, Mishra MK, Misra A. Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic Rankine cycle. *Energy*, 2010;35(12):5049-5062.

[5] Quoilin S, Declaye S, Tchanche BF, Lemort V. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2011;31(14-15):2885-2893.

[6] Shu GQ, Liu LN, Tian H, Wei HQ, Yu GP. Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heatrecovery.*Applied Energy*, 2014;113:1188-1198.

[7] Astolfi M, Romano MC, Bombarda P, Macchi E, Binary ORC. (organicRankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources e part A: thermodynamic optimization. *Energy*, 2014;66:423-434.

[8] Hu DS, Li SL, Zheng Y, Wang JF, Dai YP. Preliminary design and off-design performance analysis of an organic Rankine cycle for geothermal sources.*Energy Conversion Management*, 2015;96:175-187.

[9] Liu Q, Duan YY, Yang Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids. *Energy*, 2013;63:123-132.

[10] Marion M, Voicu I, Tiffonnet AL. Wind effect on the performance of a solar organic Rankine cycle. *Renewale Energy*, 2014;68:651-661.

[11] Wang JF, Yan ZQ, Zhao P, Dai YP. Off-design performance analysis of a solarpoweredorganic Rankine cycle. *Energy Conversion Management*, 2014;80:150-157.

[12] Rayegan R, Tao YX. A procedure to select working fluids for solar organicRankine cycles (ORCs). *Renewable Energy*, 2011;36(2):659-670.

[13] Jradi M, Riffat S. Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scaletri-generation system with an organic Rankine cycle and liquid desiccantcooling unit. *Energy*, 2014;71:80-93.

[14] Uris M, Linares JI, Arenas E. Techno-economic feasibility assessment of abiomass cogeneration plant based on an organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, 2014;66:707-713.

[15] Drescher U, Brueggemann D. Fluid selection for the organic Rankine cycle(ORC) in biomass power

and heat plants. *Applied Thermal Engineering*, 2007;27(1):223-228.

[16] Jung H, Hwang JH. Feasibility study of a combined ocean thermal energyconversion method in South Korea. *Energy*, 2014;75:443-452.

[17] Sun FM, Ikegami Y, Jia BJ, Arima H. Optimization design and exergy analysis oforganic rankine cycle in ocean thermal energy conversion. *Applied Ocean Research*, 2012;35:38-46.

[18] Hung TC, Wang SK, Kuo CH, Pei BS, Tsai KF. A study of organic working fluidson system efficiency of an ORC using low-grade energy sources. *Energy*,2010;35:1403-1411.

[19] Chaiyat N, Kiatsiriroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, *Energy*, 2015, Vol.91, 363-370.

[20] XangpheuakInthavideth and NattapornChaiyat. การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15), 2016, 88-93.

[21] นัฐพร ไชยญาติ. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable energy system design). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2559, 291 หน้า.

[22] นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2558, 324 หน้า.

**รายการสัญลักษณ์**

**สัญลักษณ์**

| | |
|---|---|
| COP | สัมประสิทธิ์สมรรถนะ |
| Cp | ความจุความร้อน (kJ/kg-K) |
| h | เอนทัลปี (kJ/kg) |
| $\dot{m}$ | อัตราการไหล (kg/s) |
| P | ความดัน (kPa) |
| Q | อัตราความร้อน (kW) |
| T | อุณหภูมิ (°C) |
| W | กำลังงาน (kW) |

**ตัวกรีก**

| | |
|---|---|
| $\eta$ | ประสิทธิภาพ (%) |
| V | ปริมาณจำเพาะ ($m^3$/kg) |

**ตัวห้อย**

| | |
|---|---|
| A | การดูดกลืน |
| AB | ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน |
| B | หม้อไอน้ำ |
| C | คอนเดนเซอร์ |
| CW | น้ำหล่อเย็น |
| e | ไฟฟ้า |
| E | เครื่องระเหย |
| G | เจนเนอเรเตอร์ |
| HW | น้ำร้อน |
| HX | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| H | สูง |
| i | ทางเข้า |
| L | ต่ำ |
| o | ทางออก |
| ORC | วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ |
| P | ปั๊มสารทำงาน |
| ref | สารทำงาน |
| SP | ปั๊มสารละลาย |
| Tur | กังหัน |





บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

# ประวัติผู้วิจัย

| | | |
|---|---|---|
| **ชื่อ** | Mr Xangpheuak Inthavideth | |
| **เกิดเมื่อ** | 02,May 1994 | |
| **ประวัติการศึกษา** | 2554 | จบมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมสมบูรณ์นาชายทอง |
| | 2558 | จบปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแห่งชาติลาว |