บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขในงานวิจัย

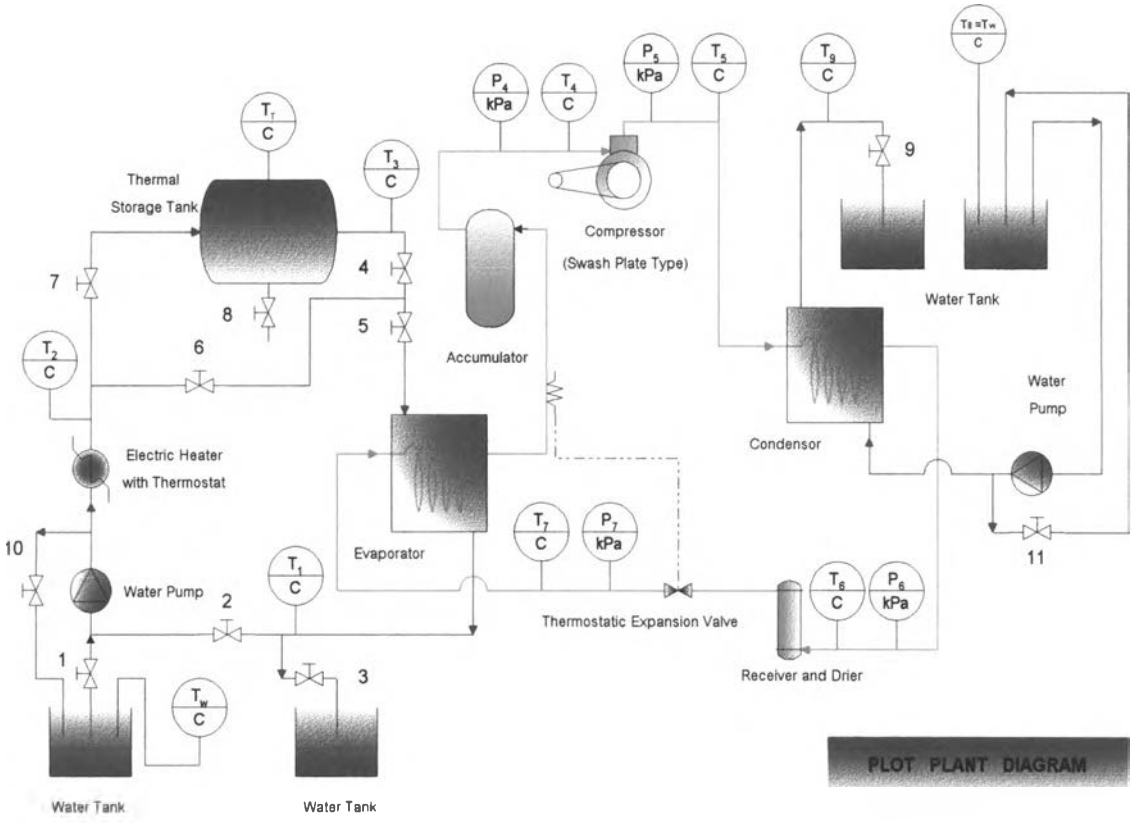
การศึกษาการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทดลอง และการจำลองการทำงานเชิงอุณหพลศาสตร์ในเงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอ (Steady State Condition) ชุดทดลองมีการทำงานเกี่ยวข้องระหว่างอุปกรณ์พื้นฐาน เช่น ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ถังสะสมความร้อน คอมเพรสเซอร์ เครื่องควบแน่น เครื่องระเหย ลิ้นการขยาย เป็นต้น ทั้งนี้ระบบดังกล่าวจะเป็นการต่อตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบกับฮีตพัมป์แบบอนุกรม และมีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค และการศึกษามุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบโดยวิธีการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย และสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมของแต่ละอุปกรณ์ในเงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอ เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงาน ซึ่งจะช่วยให้เราเข้าใจระบบดังกล่าวมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองจะใช้ชุดทำน้ำร้อนที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ในช่วง 30 – 100 องศาเซลเซียส แทนตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ เพื่อความสะดวกในปรับอุณหภูมิของน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากความไม่แน่นอนของแสงอาทิตย์ ซึ่งมีอิทธิพลมาจากตำแหน่งบนพื้นผิวโลกและฤดูกาล การศึกษาวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกจะทดลองการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีระบบสะสมความร้อน ส่วนที่สองจะเพิ่มเติมระบบสะสมความร้อนเข้าไป และส่วนสุดท้ายจะทดลองเฉพาะระบบสะสมความร้อน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างระบบการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค เพื่อดำเนินการทดสอบหาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ โดยใช้ฟรีออน-12 เป็นสารทำความเย็นในระบบฮีตพัมป์ และมีการจ่ายพลังงานความร้อนเข้าที่เครื่องระเหย และดึงพลังงานความร้อนออกที่เครื่องควบแน่น รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบแสดงตามรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบประกอบไปด้วย

1. คอมเพรสเซอร์แบบสวอชเพลต (swash plate) จำนวนสูบ (No. of cylinders) 5 สูบ มีปริมาตรช่วงชักลูกสูบ 8 in^3 และใช้สารทำความเย็น ฟรีออน-12
2. มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า (HP) มีความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที
3. เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย ชนิด ท่อสวนกันโดยเป็นขดฮีลิกซ์ (Helical Coil) ท่อด้านในเป็นท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0127 เมตร และท่อด้านนอกเป็นท่อพลาสติกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.02665 เมตร และมีความยาว 7 เมตร สำหรับเครื่องควบแน่น และ 5 เมตร สำหรับเครื่องระเหย
4. ลิ้นการขยายแบบเทอร์มอสแตต (Thermostatic Expansion Valve)

5. ถังสะสมสารทำความเย็น (Accumulator) ใช้สะสมสารทำความเย็น ที่ระเหยและไหลออกจากเครื่องระเหย ในวัฏภาคไออิ่มตัว ก่อนที่จะถูกส่งไปยังคอมเพรสเซอร์ต่อไป โดยมีขนาดยาว 8 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการทำงานของระบบที่ใช้ในงานวิจัย (ระบบต่อตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบกับฮีตพัมป์แบบอนุกรม และมีการสะสมความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค)

6. ถังพักสารทำความเย็นและดูดความชื้น (Receiver and Drier) เป็นถังสะสมสารทำความเย็น ที่ควบแน่นและไหลออกจากเครื่องควบแน่น ในวัฏภาคของเหลวอิ่มตัว ก่อนที่จะถูกส่งไปยังลิ้นการขยายเพื่อลดความดันลง

7. ถังสะสมความร้อนทำด้วยท่อโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอก/ใน 0.31/0.28 เมตร ยาว 1.15 เมตร ภายในบรรจุท่อเหล็กเคลือบสังกะสี มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.03 เมตร ยาว 1 เมตร จำนวน 35 ท่อน ภายในท่อบรรจุสารเปลี่ยนวัฏภาค ซึ่งเป็นกรดพาล์มติกไว้เต็มท่อเพื่อใช้สะสมความร้อน (มีน้ำประมาณ 42.36 กิโลกรัม และกรดพาล์มติก ประมาณ 25.66 กิโลกรัม)

8. ชุดทำน้ำร้อน จะประกอบไปด้วย ถังน้ำร้อน, ฮีตเตอร์ (Heater) และเทอร์โมสตัท (Thermostat) เป็นชุดที่ใช้สะสมและป้อนน้ำให้กับถังสะความร้อน สามารถเพิ่มอุณหภูมิและรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำได้ตามต้องการ สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะใช้ชุดทำน้ำร้อนแทนตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

9. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง แบบ 10 ตำแหน่ง หัววัดเป็นเทอร์โมคับเปิล ชนิด K

10. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า และเครื่องวัดความเร็วรอบ

11. เกจความดันต่ำ 2 ตัว (0-250 Psig) และเกจความดันสูง 2 ตัว (0-500 Psig) เพื่อใช้ความความดันของฟรีออน-12 ในระบบฮีตพัมป์

วิธีดำเนินศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

1. การศึกษาตอนที่ 1 เป็นการศึกษาการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งไม่มีระบบสะสมพลังงานความร้อน

1.1 กำหนดทิศทางการไหลของน้ำในระบบโดย ปิดลิ้นหมายเลข 2, 4, 7 และ 8 (ลิ้นในตำแหน่งอื่นเปิด)

1.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องระเหย ($\dot{m}_{wf}$) ให้มีค่าเท่ากับ 0.00695 $\frac{kg}{s}$ โดยปรับลิ้นหมายเลข 10 และเครื่องควบแน่น ($\dot{m}_{wc}$) และ 0.005032 $\frac{kg}{s}$ โดยปรับลิ้นหมายเลข 11 (การวัดอัตราการไหลโดยมวลของน้ำ ใช้วิธีการวัดปริมาตรโดยถ้วยตวง ซึ่งสามารถวัดหน่วยปริมาตรเป็นมิลลิลิตร ต่อหน่วยเวลา ซึ่งวัดโดยการใช้นาฬิกาจับเวลา)

1.3 ปรับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากชุดทำน้ำร้อน (T_2) ให้คงที่ โดยให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 65 องศาเซลเซียส ปรับระดับอุณหภูมิ 8 ระดับ

1.4 เดินระบบฮีตพัมป์ และเมื่อระบบอยู่ในสภาพคงตัว (Steady State Condition) โดยพิจารณาจากอุณหภูมิ T_5 และ T_9 ที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง วัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำและสารทำความเย็นในแต่ละตำแหน่ง ยกเว้น T_3 และ T_T รวมทั้งความดันสารทำความเย็น ตามระดับอุณหภูมิ T_2

1.5 วัดและบันทึกพลังงานไฟฟ้าและความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ ตามระดับอุณหภูมิ T_2

2. การศึกษาตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีระบบสะสมพลังงานความร้อน

2.1 กำหนดทิศทางการไหลของน้ำในระบบโดย ปิดลิ้นหมายเลข 2, 6 และ 8 (ลิ้นในตำแหน่งอื่นเปิด)

2.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องระเหย ($\dot{m}_{wf}$) ให้มีค่าเท่ากับ 0.00695 $\frac{kg}{s}$ โดยปรับลิ้นหมายเลข 10 และเครื่องควบแน่น ($\dot{m}_{wc}$) และ 0.005032 $\frac{kg}{s}$ โดยปรับลิ้นหมายเลข 11 (การวัดอัตราการไหลโดยมวลของน้ำ ใช้วิธีการวัดปริมาตรโดยถ้วยตวง ซึ่งสามารถวัดหน่วยปริมาตรเป็นมิลลิลิตร ต่อหน่วยเวลา ซึ่งวัดโดยการใช้นาฬิกาจับเวลา)

2.3 ปรับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากชุดทำน้ำร้อน (T_2) ให้อยู่ในช่วง 30 - 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาโดยประมาณ 14 ชั่วโมง กำหนดคาบเวลาในการปรับอุณหภูมิเท่ากับ 30 นาที โดยปรับอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 90 องศาเซลเซียส ในชั่วโมงที่ 5 และค่อยๆ ปรับอุณหภูมิลดลงจนมีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาการปรับอุณหภูมิขาลงจะยึดถืออุณหภูมิของถังสะสมความร้อนเฉลี่ย (T_T) เป็นหลัก โดยจะปรับลงก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิของของถังสะสมความร้อนเฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของกรดพาล์มติก (ซึ่งมีค่าโดยประมาณ 60 องศาเซลเซียส) ประมาณ 1 –2 ชั่วโมง

2.4 เดินระบบฮีตพัมป์ พร้อมทั้งวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำและสารทำความเย็นในแต่ละตำแหน่ง รวมทั้งความดันของสารทำความเย็น ทุกๆ 30 นาที

2.5 วัดและบันทึกพลังงานไฟฟ้าและความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ ตามคาบเวลา 30 นาที

3. การศึกษาตอนที่ 3 เป็นการศึกษาระบบสะสมพลังงานความร้อน

3.1 กำหนดทิศทางการไหลของน้ำในระบบโดย ปิดลิ้นหมายเลข 2, 6 และ 8 (ด้านลิ้นในตำแหน่งอื่นเปิด เฉพาะวงจรน้ำด้านเครื่องระเหย)

3.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องระเหย ($\dot{m}_{wf}$) ให้มีค่าเท่ากับ 0.00695 $\frac{kg}{s}$ โดยปรับลิ้นหมายเลข 10 การวัดอัตราการไหลโดยมวลของน้ำ ใช้วิธีการวัดปริมาตรโดยถ้วยตวง ต่อหน่วยเวลา ซึ่งวัดโดยการใช้นาฬิกาจับเวลา

3.3 วัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำในตำแหน่ง T_2, T_3 และ T_T ทุก ๆ 10 นาที

3.4 ปรับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากชุดทำน้ำร้อน (T_2) ให้อยู่ในช่วง 80 - 90 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่ง อุณหภูมิ T_T มีค่ามากกว่า 60 องศาเซลเซียส แล้วเดินระบบต่อเนื่องทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง

3.5 ตัดระบบไฟฟ้าของชุดทำน้ำร้อนออก วัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำในตำแหน่ง T_2, T_3 และ T_T จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในตำแหน่ง T_T มีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

3.6 การตัดระบบไฟฟ้า จะพิจารณาอุณหภูมิของถังสะสมความร้อนเฉลี่ย (T_T) เป็นหลัก โดยจะตัดกระแสไฟฟ้าก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิของของถังสะสมความร้อนเฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของกรดพาล์มติก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

วิธีดำเนินศึกษาวิจัยในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาการจำลองการทำงานเชิงคณิตศาสตร์ จะพิจารณาเฉพาะการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในเงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอเท่านั้น ในส่วนของการทำน้ำร้อนด้วยฮีตพัมป์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสารเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนวัฏภาค และระบบสะสมพลังงานความร้อน เป็นเงื่อนไขสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady State Condition) ทั้งนี้เนื่องตัวแปรต่างๆ แปรผันตามเวลา ดังนั้นในการพิจารณาจะมีอุปกรณ์พื้นฐานเฉพาะ ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ คอมเพรสเซอร์ เครื่องควบแน่น ลิ้นการขยาย เครื่องระเหย เท่านั้น และในการจำลองการทำงานในเชิงอุณหพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ จะตั้งสมมติฐานบางประการเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ สรุปรายละเอียดได้ดังนี้

ก. ระบบทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอ

ข. ความดันสูญเสียมีค่าน้อยมากในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น สารทำความเย็นจะพิจารณาในวัฏภาคของเหลวอิ่มตัวในขณะออกจากเครื่องควบแน่น

ค. กระบวนการอัดไอจะถูกพิจารณาแบบพอลีทรอปิก (polytropics) ในการการอัดตัวของสารทำความเย็นที่คอมเพรสเซอร์

ง. กระบวนการขยายตัวพิจารณาแบบไอเซนทาลปิก (isenthalpic) ที่ลิ้นการขยาย

ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ใช้ในแบบจำลอง จะพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

หลักสมดุลพลังงานสำหรับตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$n_c \dot{Q}_u = c_{pw} \dot{m}_{wf} (T_2 - T_1)$$

n_c = จำนวนตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

$\dot{Q}_u$ = อัตราพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์โดยถ่ายเทให้กับของเหลว (kW)

$\dot{m}_{wf}$ = อัตราการไหลโดยมวลของน้ำที่ไหลเข้า/ออก ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ($\frac{kg}{s}$)

c_{pw} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$)

2. เครื่องระเหย

จากหลักการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการ (Stocker & Jones, 1988) กล่าวคือ

$$\dot{m}_{wf} c_{pw} (T_2 - T_1) = (UA)_e (T_2 - T_7)$$

$(UA)_e$ = ผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเป็นพื้นที่การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างน้ำกับสารทำความเย็นที่เครื่องระเหย ($\frac{W}{K}$)

Kiatsiriroat, Chowceun และ Wibulswas (1990) ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อเครื่องระเหย ดังนี้

$$\frac{T_7}{T_2 - T_7} = f(\frac{(UA)_e}{\dot{m}_r}, T_6)$$

$$\frac{T_4 - T_7}{T_2 - T_7} = f(\frac{(UA)_e}{\dot{m}_r})$$

$\dot{m}_r$ = อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในระบบฮีตพัมป์ ($\frac{kg}{s}$)

จากหลักสมดุลพลังงานที่เครื่องระเหย จะได้ว่า

$$c_{pw} \dot{m}_{wf} (T_2 - T_1) = \dot{m}_r (h_4 - h_6)$$

h_4 = เอนทัลปีของสารทำความเย็นด้านดูดของคอมเพรสเซอร์ ($\frac{kJ}{kg}$)

h_6 = เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์ ($\frac{kJ}{kg}$)

3. คอมเพรสเซอร์

Stocker (1989) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันของคอมเพรสเซอร์แบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Compressor) กับตัวแปรต่าง ๆ กล่าวคือ

$$\frac{P_5}{P_4} = f\left(\frac{\dot{m}_r\sqrt{c_p.T_4}}{D.P_4}, \frac{N.D}{\sqrt{c_p.T_4}}\right)$$

P_4 = ความดันสมบูรณ์ด้านดูดของคอมเพรสเซอร์ (kPa)

P_5 = ความดันสมบูรณ์ด้านจ่ายของคอมเพรสเซอร์ (kPa)

c_p = ความร้อนจำเพาะของแก๊สขณะความดันคงที่ ($\frac{kJ}{kg\ .K}$)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (kPa)

N = ความเร็วรอบของใบพัด (RPS)

Kiatsiriroat, Chowceun และ Wibulswas (1990) พิจารณาสมการในรูปแบบเป็นคอมเพรสเซอร์ประเภทลูกสูบ กล่าวคือ

$$\frac{P_5}{P_4} = f\left(\frac{\dot{m}_r\sqrt{T_4}}{P_4}, N\right) \quad \text{และ} \quad \frac{P_4}{P_5} = f\left(\frac{\dot{m}_r\sqrt{T_5}}{P_5}, N\right)$$

ในการวิจัยกำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ และคอมเพรสเซอร์แบบสวอชเพลต สมการจึงลดรูปเป็น

$$\frac{P_5}{P_4} = f\left(\frac{\dot{m}_r\sqrt{T_4}}{P_4}\right) \quad \text{และ} \quad \frac{P_4}{P_5} = f\left(\frac{\dot{m}_r\sqrt{T_5}}{P_5}\right)$$

ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (Superheat Condition) ของสารทำความเย็น

$$h_4 = f(T_4, P_4) \quad , \quad h_5 = f(T_5, P_5)$$

h_5 = เอนทัลปีของสารทำความเย็นด้านจ่ายของคอมเพรสเซอร์ ($\frac{kJ}{kg}$)

กระบวนการอัดไอแบบโปลิทรอปิค (Polytropic Process)

$$T_5 = T_4\left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{p-1}{p}}$$

$$WC = \dot{m}_r (h_5 - h_4)$$

p = ดรรชนีพอลีทรอปิก (Polytropic Index)

WC = กำลังงานของคอมเพรสเซอร์ (kW)

5. เครื่องควบแน่น

จากหลักการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการ (Stocker & Jones, 1988) กล่าวคือ

$$\dot{m}_{wc} c_{pw} (T_9 - T_8) = (UA)_c (LMTD)_c$$

$$(LMTD)_c = \frac{(T_5 - T_9) - (T_5 - T_8)}{\ln\left(\frac{T_5 - T_9}{T_5 - T_8}\right)}$$

จากหลักสมดุลพลังงานของฮีตพัมป์ จะได้ว่า

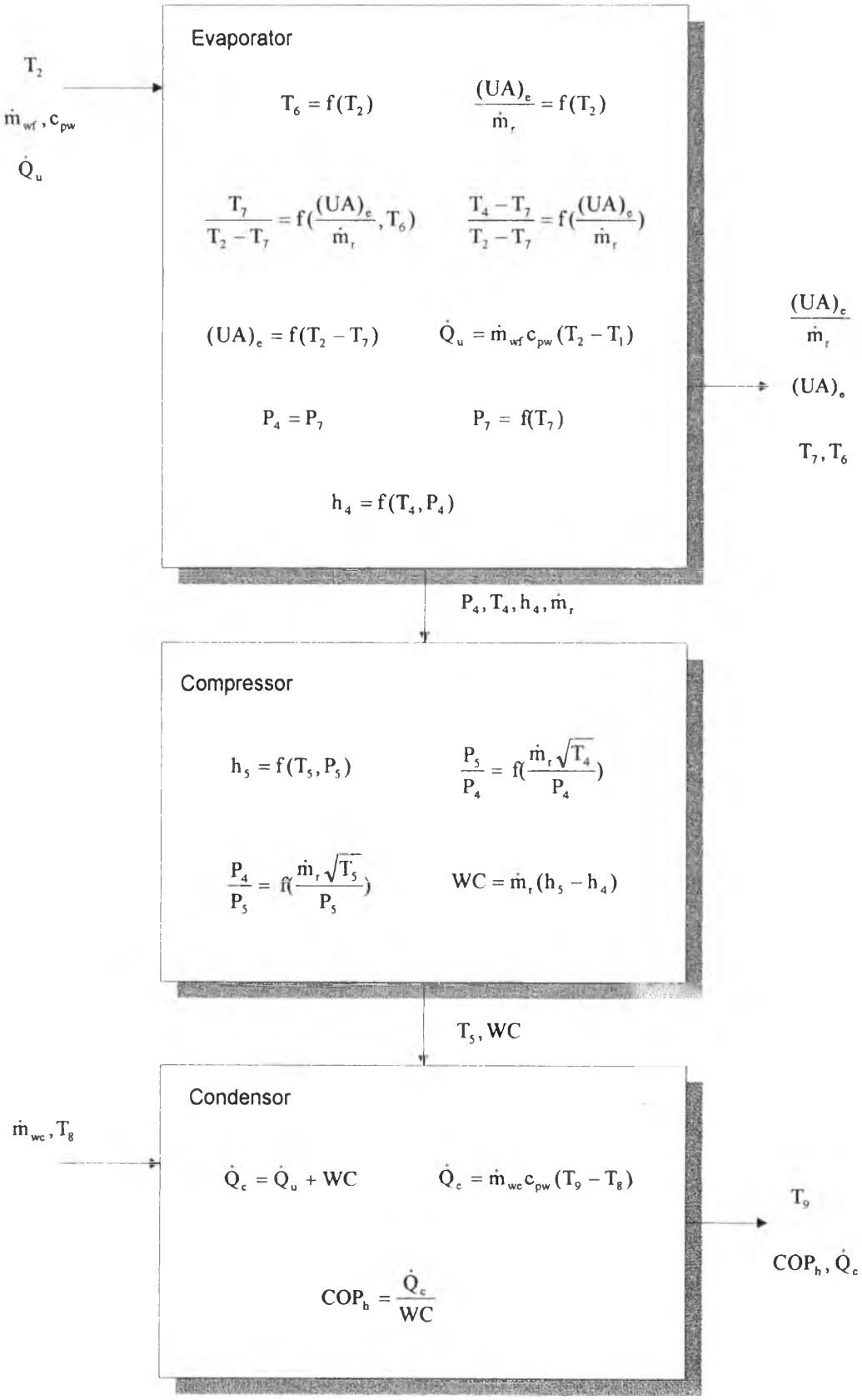
$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_u + WC$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของฮีตพัมป์ (COP_h) คือ

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_c}{WC}$$

การจำลองการทำงานของระบบ

การศึกษาการจำลองการทำงานของระบบ สามารถเขียนแผนผังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.2 และในการคำนวณทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เขียนด้วยภาษา Visual Basic 5.0 ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ จากการทดลองในข้างต้น มาทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบที่ใช้ในงานวิจัย โดยการใช้แบบจำลองประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการการทดลอง



<u>รูปที่ 3.2</u> ขั้นตอนในการจำลองการทำงานของระบบที่ใช้ในงานวิจัย