การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำร้อนต่อการทำงานของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่น

รศ.ดร.จิตติน แตงเที่ยง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

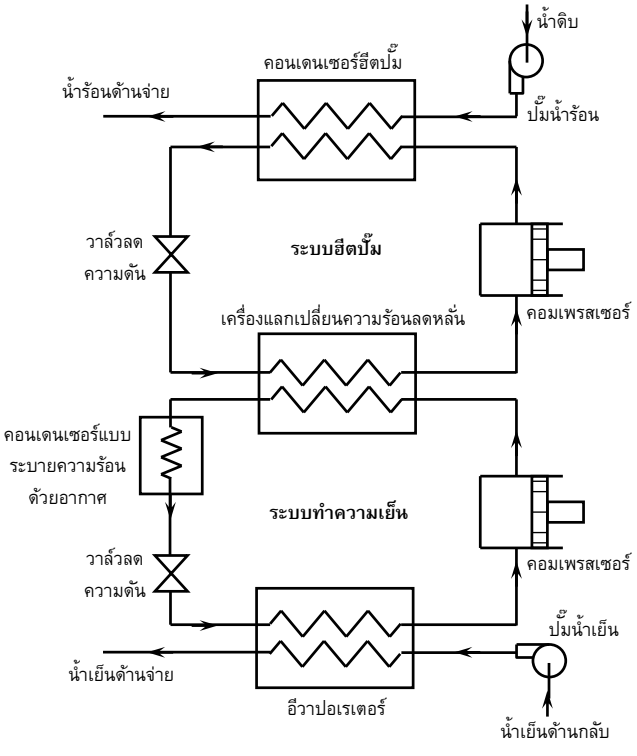
นายวิศิษฏ์ ชูประเสริฐ
ตำแหน่งวิศวกร 5 กองซ่อมบำรุงระบบพลังงานและสาธารณูปโภค
ฝ่ายวิศวกรรมและพัฒนา โรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง
184 ถนนพระรามที่ 4 แขวงคลองเตย เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

1. บทนำ

ในการใช้พลังงานในอาคารในประเทศไทยนั้น จะพบว่าโดยทั่วไปแล้วระบบปรับอากาศจะเป็นระบบหลักที่มีการใช้พลังงานอยู่ในสัดส่วนที่สูงที่สุด ในขณะเดียวกันในอาคารบางประเภทเช่น โรงพยาบาลหรือโรงแรมจะมีความต้องการใช้ความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนสำหรับการอุปโภคอยู่ในระดับหนึ่ง ดังนั้นถ้าหากอาคารที่มีความต้องการความเย็นในการปรับอากาศรวมทั้งความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนในเวลาเดียวกัน การนำความร้อนเหลือทิ้งจากระบบทำความเย็นในงานปรับอากาศเพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อนจึงมีส่วนสำคัญในการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร อย่างไรก็ตามเนื่องจากความต้องการน้ำร้อนในอาคารจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำร้อนเป็นสำคัญ ดังนั้นหากมีการนำระบบฮีตปั๊มมาช่วยเสริมต่อกับระบบทำความเย็นในการปรับอากาศในแบบลดหลั่น (Cascade) ก็จะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนได้สูงขึ้นตามความต้องการของผู้ใช้งาน สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นในประเทศนั้นยังมิได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางนัก ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อหาผลกระทบของอัตราไหลน้ำร้อนที่มีต่อระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่น โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาจะเน้นไปที่การปรับเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อน เนื่องจากความต้องการน้ำร้อนในอาคารอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ ในขณะที่ความต้องการความเย็นในการปรับอากาศจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนดังกล่าวที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นและระบบฮีตปั๊ม

2. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นถูกจำลองด้วยชุดทดลองดังที่แสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นนั้นประกอบด้วยระบบทำความเย็นที่ใช้สาร R-22 เป็นสารทำความเย็นและระบบฮีตปั๊มที่ใช้สาร R-134a เป็นสารทำความเย็น ระบบทั้งสองได้เชื่อมต่อกันด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลดหลั่นดังรูป ตัวระบบทำความเย็นนั้นเป็นการดัดแปลงเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 3 ตันความเย็นโดยการนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) มาเป็นอีวาปอเรเตอร์แทนที่แฟนคอยล์ (Fan coil) ของเครื่องปรับอากาศเดิมเพื่อเปลี่ยนให้เป็นเครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบปรับอากาศในอาคารขนาดใหญ่ ในระหว่างการทำงานระบบทำความเย็นจะระบายความร้อนไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดหลั่นซึ่งเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) แล้วส่งความร้อนต่อไปยังระบบฮีตปั๊ม ในขณะเดียวกันก็จะความร้อนบางส่วนจะระบายออกไปยังคอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ทั้งนี้คอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นมีไว้สำหรับในกรณีที่เครื่องทำน้ำเย็นยังคงทำงานอยู่แต่ไม่มีความต้องการใช้น้ำร้อนในอาคาร ทำให้ระบบฮีตปั๊มต้องหยุดการทำงาน ซึ่งจะให้ความร้อนระบายออกจากระบบทำความเย็นที่คอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยอากาศดังกล่าว ตัวระบบฮีตปั๊มนั้นเมื่อได้รับความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดหลั่นแล้ว ก็จะทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็นภายในฮีตปั๊มให้สูงขึ้นผ่านคอมเพรสเซอร์ขนาดพิกัด 2.1 kW จากนั้นก็จะส่งสารทำความเย็นไปยังคอนเดนเซอร์ของฮีตปั๊มซึ่งจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนตามความต้องการ



รูปที่ 1 ชุดทดลองระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่น

ในส่วนของวิธีการทดลองนั้น จะควบคุมให้ระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นทำงานภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) โดยจะทำการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนจากประมาณ 4 จนถึง 12 L/min โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 L/min ทั้งนี้ตัวแปรที่จะทำการศึกษาจากผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่จะทำการศึกษาจากผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อน

ลำดับที่	ตัวแปรที่วัด	สัญลักษณ์	วิธีการได้มา
1	กำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็น	P_R	วัดด้วย Power meter
2	สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น	COP_R	คำนวณจากสมการที่ 2
3	กำลังไฟฟ้าของระบบฮีตปั๊ม	P_{HP}	วัดด้วย Power meter
4	อุณหภูมิของน้ำร้อนด้านจ่าย	$T_{HW,out}$	วัดด้วย RTD pt-100
5	อัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อน	Q_{HP}	คำนวณจากสมการที่ 3
6	สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม	COP_{HP}	คำนวณจากสมการที่ 4

ในส่วนของระบบทำความเย็นนั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาภาระความเย็นของระบบทำความเย็นจะเป็นดังนี้

$$Q_R = \frac{\rho\, V_{CW}\, C\,(T_{CW,in} - T_{CW,out})}{60} \qquad (1)$$

โดยที่

Q_R คือภาระความเย็นของระบบทำความเย็นในหน่วย kW

ρ คือความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 kg/L

V_{CW} คืออัตราไหลเชิงปริมาตรของน้ำเย็นโดยการวัดด้วย Water flow meter ในหน่วย L/min

C คือความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ4.18kJ/kg-K

$T_{CW,in}$ คืออุณหภูมิน้ำเย็นด้านกลับโดยการวัดด้วย RTD pt-100 ในหน่วย °C

$T_{CW,out}$ คืออุณหภูมิน้ำเย็นด้านจ่ายโดยการวัดด้วย RTD pt-100 ในหน่วย °C

อนึ่งในระหว่างทำการทดลองนั้น V_{CW} จะถูกควบคุมไว้ที่ 26.9-27.0 L/min $T_{CW,out}$ จะถูกควบคุมไว้ให้มีค่าอยู่ในช่วง 8.5-9.5°C ผลจากการควบคุมดังกล่าวจะส่งผลให้ Q_R หรือภาระความเย็นของระบบทำความเย็นถูกควบคุมไว้อยู่ที่ระหว่าง 8.4-8.8 kW หรือประมาณร้อยละ 80 ของภาระความเย็นพิกัด อนึ่งการควบคุมภาระความเย็นของระบบทำความเย็นให้มีค่าค่อนข้างคงที่นั้นเป็นการจำลองสถานการณ์ให้เทียบเคียงกับการเดินระบบปรับอากาศในอาคารในช่วงที่มีภาระความเย็นคงที่ จากนั้นเมื่อความต้องการน้ำร้อนในอาคารมีค่าเปลี่ยนแปลงไปผลกระทบดังกล่าวจะเป็นอย่างไรต่อการทำงานของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่น ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ก็จะมีวัตถุประสงค์หลักในการตอบคำถามดังกล่าว

ในส่วนของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นนั้น จะหาได้จากสมการ

$$COP_R = \frac{Q_R}{P_R} \qquad (2)$$

โดยที่

COP_R คือสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

P_R คือกำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ของระบบทำความเย็นในหน่วย kW

ในส่วนของระบบฮีตปั๊มนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อนจะสามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{HP} = \frac{\rho\, V_{HW}\, C\,(T_{HW,out} - T_{HW,in})}{60} \qquad (3)$$

โดยที่

Q_{HP} คือภาระความเย็นของระบบทำความเย็นในหน่วย kW

ρ คือความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 kg/L

V_{HW} คืออัตราไหลเชิงปริมาตรของน้ำร้อนโดยการวัดด้วย Water flow meter ในหน่วย L/min

C คือความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ4.18kJ/kg-K

$T_{HW,in}$ คืออุณหภูมิน้ำดิบโดยการวัดด้วย RTD pt-100 ในหน่วย °C

$T_{HW,out}$ คืออุณหภูมิน้ำร้อนด้านจ่ายโดยการวัดด้วย RTD pt-100 ในหน่วย °C

ในระหว่างทำการทดลองนั้น V_{HW} คือตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนตามที่กล่าวมาข้างต้น $T_{HW,in}$ จะถูกควบคุมไว้ให้มีค่าอยู่ในช่วง 27.5-28.5°C และในขณะทำการทดลองอากาศภายนอกอยู่ที่ประมาณ 30-33°C

ในส่วนของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มนั้น จะหาได้จากสมการ

$$COP_{HP} = \frac{Q_{HP}}{P_{HP}} \qquad (4)$$

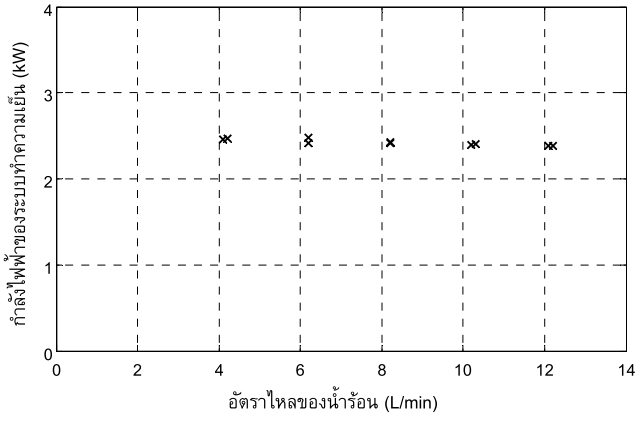
โดยที่

COP_{HP} คือสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม

P_{HP} คือกำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ของระบบฮีตปั๊มในหน่วย kW

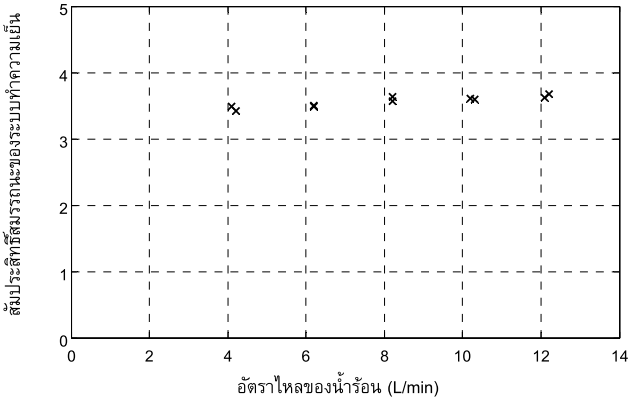
3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาผลกระทบของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของชุดทดลองระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นดังนี้



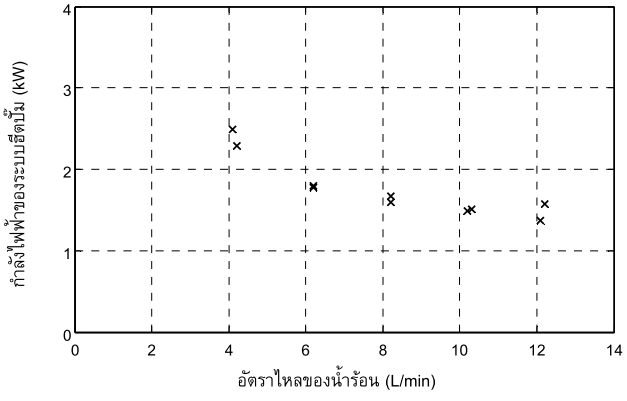
รูปที่ 2 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่อกำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็น

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มค่าอัตราไหลของน้ำร้อนจาก 4 ไปเป็น 12 L/min ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็นจะลดลงอย่างช้าๆ จาก 2.47 ถึง 2.38 kW ซึ่งเทียบเท่ากับการลดลงของประมาณร้อยละ 3.6 เมื่อเทียบกับอัตราไหลของน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น 3 เท่า



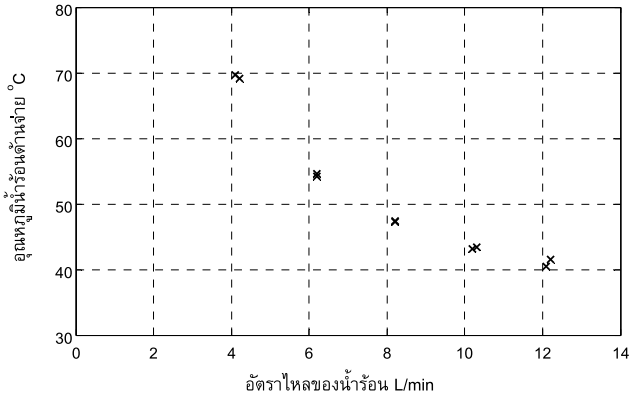
รูปที่ 3 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็น

จากรูปที่ 3 เมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4 ไปยัง 12 L/min ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อยโดยจะเพิ่มขึ้นจาก 3.45 ไปยัง 3.65 ซึ่งเทียบเท่ากับการเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.8 ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากกำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็นที่ลดลงอย่างช้าๆ ในรูปที่ 2 ในขณะที่ภาระความเย็นถูกควบคุมให้มีค่าคงที่



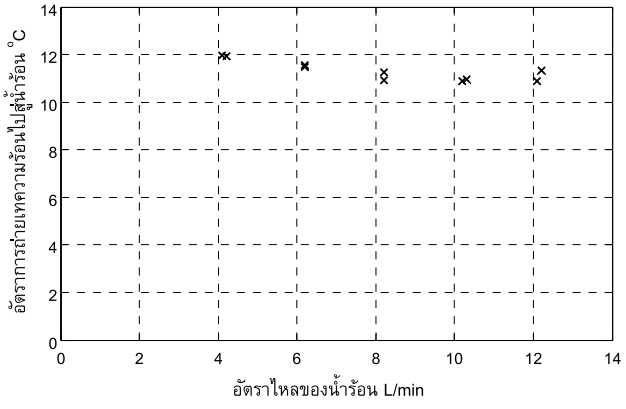
รูปที่ 4 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่อกำลังไฟฟ้าของระบบฮีตปั๊ม

จากรูปที่ 4 ผลของการเพิ่มอัตราไหลของน้ำร้อนจาก 4 ไปยัง 12 L/min จะทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบฮีตปั๊มมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 2.39 ไปเป็น 1.47 kW ซึ่งเทียบเท่ากับการลดลงร้อยละ 38 ทั้งนี้อัตราการลดลงของกำลังไฟฟ้าของระบบฮีตปั๊มจะมีค่าสูงในช่วงอัตราไหลของน้ำร้อนต่ำๆ จากนั้นอัตราการลดลงดังกล่าวจะชะลอลงเมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวมาจากการที่ความดันด้านสูงของระบบฮีตปั๊มมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อความดันด้านสูงหรือก็คือความดันด้านจ่าย (Discharge pressure) ของคอมเพรสเซอร์มีค่าลดลง ก็จะทำให้ภาระในการอัดไอของคอมเพรสเซอร์มีค่าลดลง ส่งผลต่อไปยังกำลังไฟฟ้าที่ลดลงตามลำดับ

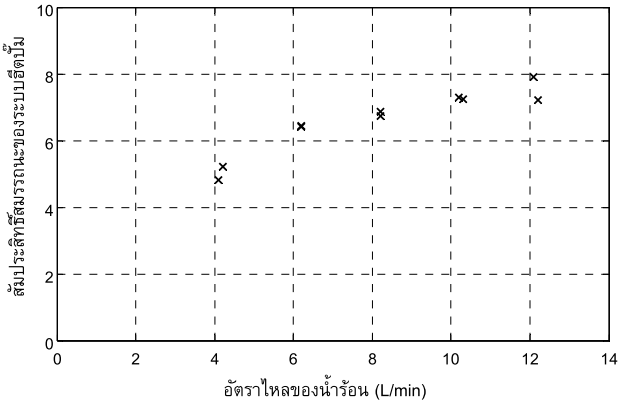


รูปที่ 5 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่ออุณหภูมิน้ำร้อนด้านจ่าย

จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงถึงผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่ออุณหภูมิน้ำร้อนด้านจ่าย จะพบว่าเมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิน้ำร้อนด้านจ่ายก็จะลดลง โดยที่ค่าสูงสุดที่ได้ประมาณ 69.3°C ที่อัตราไหลของน้ำร้อนเท่ากับ 4 L/min และค่าต่ำสุดที่ได้ประมาณ 41.0°C ที่อัตราไหลน้ำร้อนเท่ากับ 12 L/min ทั้งนี้เมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าของอุณหภูมิน้ำร้อนจะมีการลดลงที่ลู่เข้าสู่ค่าๆ หนึ่ง ข้อสังเกตหนึ่งก็คืออุณหภูมิที่ทำได้ดังที่แสดงในรูปที่ 5 นั้นเป็นผลมาจากการทำงานฮีตปั๊มในแบบภาวะคงตัว ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะสามารถเพิ่มให้สูงขึ้นได้หากระบบฮีตปั๊มทำงานแบบชั่วขณะ โดยให้น้ำร้อนไหลวนผ่านคอนเดนเซอร์ในแบบวงปิดและเก็บสะสมน้ำร้อนในถัง ลักษณะการทำงานดังกล่าวจะเป็นการใช้งานของฮีตปั๊มเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 6 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อน



รูปที่ 7 ผลของอัตราไหลของน้ำร้อนที่มีต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊ม

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อนมีค่า 11.9 kW ที่อัตราไหลของน้ำร้อน 4 L/min จากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อนจะลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าคงที่ประมาณ 11.0 kW ที่อัตราไหลของน้ำร้อนเกิน 8 L/min เป็นต้นไป ซึ่งจะเทียบเท่ากับการลดลงประมาณร้อยละ 7.1 ทั้งนี้ผลดังกล่าวเกิดจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างผลต่างอุณหภูมิที่มีค่าจำกัดผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่ออัตราไหลของของไหลด้านหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถึงแม้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้นตามความเร็ว แต่ก็จะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลอีกชนิดซึ่งได้แก่สารทำความเย็นซึ่งมีอัตราไหลที่ถูกควบคุมไว้ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างน้ำร้อนและสารทำความเย็นในระบบฮีตปั๊มจะถูกจำกัดไว้ที่ค่าๆ หนึ่งเช่นกัน

จากรูปที่ 7 เมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4 ไปเป็น 12 L/min ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.01 ไปเป็น 7.56 ซึ่งเทียบเท่ากับการเพิ่มขึ้นร้อยละ 50.9 ผลดังกล่าวมาจากที่กำลังไฟฟ้าของฮีตปั๊มที่มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องดังที่แสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อนมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาสมการที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าของฮีตปั๊มมีสัดส่วนของการลดลงมากกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำร้อน จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้น อนึ่งหากเปรียบเทียบกับระบบฮีตปั๊มเชิงพาณิชย์ที่ใช้อากาศภายนอกเป็นแหล่งให้ความร้อน (Air-source heat pump) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยประมาณ 4 เนื่องจากแหล่งความร้อนของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นจะอาศัยความร้อนเหลือทิ้งจากระบบทำความเย็นซึ่งเป็นแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศภายนอก ผลที่ได้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นจึงมีค่าสูงกว่า

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาทดลองระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นในสภาวะการทำงานแบบคงตัว โดยการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนในขณะที่ยังรักษาภาระความเย็นของระบบทำความเย็นให้มีค่าคงที่ จะพบว่าเมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4 ไปเป็น 12 L/min ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นจะมีค่าลดลงร้อยละ 3.6 และมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.8 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันเมื่ออัตราไหลของน้ำร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4 ไปเป็น 12 L/min อุณหภูมิของน้ำร้อนจะมีค่าลดลงจาก 69°C และลู่เข้าสู่ค่าประมาณ 40°C กำลังไฟฟ้าของระบบฮีตปั๊มมีค่าลดลงร้อยละ 38 อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำร้อนมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 7 ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบฮีตปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 5.0 ไปเป็น 7.6 ซึ่งเทียบเท่ากับการเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 51 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนจะส่งผลกระทบต่อระบบฮีตปั๊มมากกว่าระบบทำความเย็นอย่างเห็นได้ชัด

ทั้งนี้ในอนาคตควรจะมีการศึกษาการทำงานของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นในสภาวะการทำงานแบบชั่วขณะโดยการหมุนเวียนน้ำร้อนในวงปิดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนให้สูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป การขยายผลการศึกษาดังกล่าวจะทำให้การทำงานของระบบฮีตปั๊มแบบลดหลั่นมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติต่อไป