

การประเมินพลังงานที่ประหยัดได้ของการนำความร้อนทิ้งกลับใช้ใหม่ จากเครื่องอัดอากาศ

Energy Saving Evaluation in Waste Heat Recovery from Air Compressor

สมเกียรติ บุญณะ *

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2913-2500 ต่อ 6614, โทรสาร 0-2587-4356, E-mail: somkiat@consultant.com

Somkiat Boonnasa *

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 1518 Pibulsongkram Rd., Bangsue, Bangkok 10800, Thailand
Tel. 0-2913-2500 ext. 6614, Fax 0-2587-4356, E-mail: somkiat@consultant.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพลังงานที่สามารถประหยัดได้ โดยการนำความร้อนทิ้งของเครื่องอัดอากาศมาใช้ในการอบโฟมจากเครื่องอัดอากาศแบบหล่อเย็นด้วยอากาศทั้งหมด 3 เครื่อง ขนาด 56 kW จำนวน 2 เครื่อง และ 75 kW จำนวน 1 เครื่อง อากาศที่เข้าห้องอบมีอุณหภูมิและอัตราการไหลเฉลี่ยประมาณ 60 °C และ 5.1 m³/s ตามลำดับ ปริมาตรห้องอบขนาด 67 m³ สามารถอบโฟมได้ครั้งละ 363 kg โดยใช้เวลาประมาณ 1.5 h จากการวิจัยพบว่าเครื่องอัดอากาศขณะเดินเครื่องใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยรวม 180 kW จะสามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอบโฟม 345.6 MJ/h โดยอัตราการระเหยของน้ำมีค่าเฉลี่ยประมาณ 34 kg/h และจะดีที่สุดในช่วงบ่ายเพราะอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ได้จากเครื่องอัดอากาศจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิบรรยากาศ สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้คอยล์ไอน้ำทำงาน 2,640 h/y จะสามารถประหยัดเงินได้ 154,200 Baht/y และมีระยะเวลาคูมทุนที่เร็วมากคือประมาณ 2.4 month

คำสำคัญ: การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่/เครื่องอัดอากาศ/พลังงานที่ประหยัดได้/การอบ

Abstract

The objective of this research is to evaluate energy saving in waste heat recovery from three units of air-cooled compressor (capacity 56 kW each in 2 units and 75 kW in 1 unit) for drying foam. Temperature of dryer air inlet and its flow rate are 60 °C and 5.1 m³/s respectively. The volume of drying room about 67 m³, can dry a foam 363 kg per 1.5 h. It is found that air compressor consumes 180 kW and produces 345.6 MJ/h of waste heat for drying foam. Evaporating rate of water is approximately 34 kg/h. The peak is found in the afternoon because temperature of the hot air increases according to high ambient temperature. In economic analysis, and comparing to conventional system that use steam coil and operate 2,640 h/y, it can save 154,200 Baht/y. Payback period is only 2.4 months.

Keyword; Waste heat recovery/Air compressor/Energy saving/ Drying

* Corresponding author

สาขาการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่ใช้เครื่องอัดอากาศเกือบทั้งหมดระบายความร้อนปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ทำให้สูญเสียพลังงานและยังส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม ในการวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงระบบการผลิตลมร้อนของโรงงานแห่งหนึ่ง โดยการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศมาใช้ในการอบโฟมแทนระบบเดิมคือการใช้คอยล์ไอน้ำ (Steam coil) ที่ใช้น้ำมาจากหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง

เครื่องอัดอากาศสามารถแบ่งตามชนิดของของไหลที่ระบายความร้อน สามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบระบายความร้อนด้วยอากาศและแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยทั่วไปเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กกว่า 110 kW จะระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่ถ้าขนาดใหญ่กว่านี้มักจะระบายความร้อนด้วยน้ำ จะต้องติดตั้งบิมน้ำหล่อเย็นและคูลลิ่งทาวเวอร์ด้วย เครื่องอัดอากาศทำงานโดยการอัดอากาศที่ความดันบรรยากาศ (1 bar_a) ให้ได้ความดันใช้งานตามต้องการเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งความดันนี้มีตั้งแต่ 3 bar_a ขึ้นไป โดยขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ความดันของแต่ละโรงงาน

โรงงานแห่งนี้ใช้เครื่องอัดอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศจำนวน 3 เครื่อง คือ ขนาด 56 kW จำนวน 2 เครื่องและขนาด 75 kW จำนวน 1 เครื่อง ทำการปรับปรุงโดยการติดตั้งท่อส่งอากาศร้อนขนาด 60x60 cm จากเครื่องอัดอากาศทั้งสามเครื่องและต่อเข้ากับห้องอบโฟมที่มีขนาด 4.8x5.8x2.4 m โดยระหว่างเครื่องอัดอากาศและห้องอบโฟมมีการติดตั้งพัดลม ขนาด 2 kW(3φ) ดังรูปที่ 1 เพื่อช่วยส่งอากาศร้อนเข้าห้องอบโฟมได้สะดวกขึ้น เพราะถ้าอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องอัดอากาศไหลไม่สะดวก จะทำให้เครื่องอัดอากาศเกิดความร้อนสูงและเครื่องหยุด โดยปกติแล้วเครื่องอัดอากาศจะคายความร้อนประมาณ 80% ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ [1]

2. การประเมินพลังงานที่สามารถประหยัดได้

จากรูปที่ 1 ที่ทางออกของลมร้อนคือจุด 1, 2 และ 3 คือตำแหน่งวัดอุณหภูมิและความเร็ว ส่วนที่ทางเข้าห้องอบคือจุด 4 จะทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็ว เพื่อนำมาคำนวณตาม

หลักการสมดุลความร้อน [2] คือ

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_{Loss} \quad (1)$$

หรือ $Q_{Loss} = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \quad (2)$

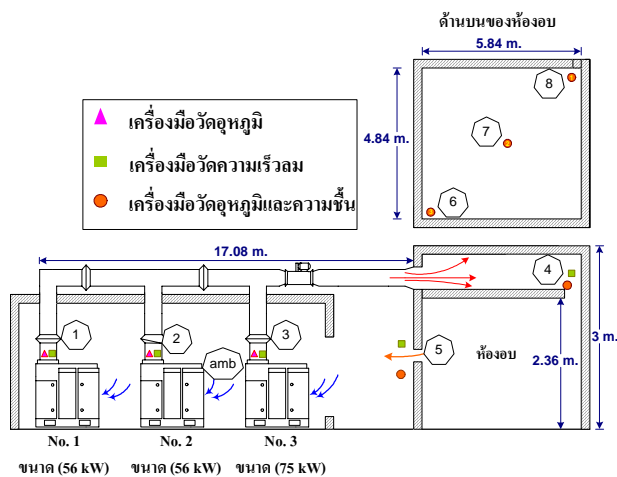
เมื่อ $Q_4 = Q_{in} \quad (3)$

$$Q_n = \dot{m}_a C_{p_a} (T_n - T_{amb}) \quad (4)$$

$$\dot{m}_a = \rho_a v_a A \quad (5)$$

และอัตราการระเหยของน้ำคำนวณจาก

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (w_o - w_i) = \dot{m}_a (w_5 - w_4) \quad (6)$$



รูปที่ 1 แสดงหลักการการทำงานของระบบและจุดที่วัดต่างๆ

2.1 เมื่อเปรียบเทียบกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater)

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่โรงงานต้องใช้ในการอบโม่ ถ้าใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

$$E_e = \frac{P \times \text{time}(h)}{\eta_{eh}} \times 100\% \quad (7)$$

$$C_e = E_e \times Pr_e \quad (8)$$

ค่า Pr_e คือค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของโรงงาน (Baht/kWh) โดยเฉลี่ยจากบิลค่าไฟฟ้าย้อนหลัง 12 เดือน

2.2 เมื่อเปรียบเทียบกับคอตลไอน้ำ (Steam coil)

ค่าพลังงานความร้อนจากหม้อไอน้ำที่โรงงานต้องใช้ในการอบโม่ ในช่วงก่อนทำการปรับปรุง โดยโรงงานใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง [3,4]

$$Q_f = \frac{Q_s}{\eta_b} \quad (9)$$

โดย $Q_f = \dot{m}_f LHV \quad (10)$

$$Q_s = \frac{Q_{in}}{\eta_{sc}} \quad (11)$$

จากสมการที่ 9,10 และ 11 จะได้

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{in}}{\eta_b \times \eta_{sc} \times LHV} \quad (12)$$

3. การอบโม่ด้วยพลังงานความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศ

เนื่องจากโรงงานแห่งนี้ผลิตโม่ที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นโม่ที่ผลิตได้จะต้องแห้งพอสมควร แต่เนื่องจากโม่ออกจากแม่พิมพ์(ใช้น้ำเป็นแหล่งความร้อน)ที่ผลิตได้มีความชื้น ดังนั้นก่อนส่งขายจะต้องนำโม่เหล่านี้มาเข้าห้องอบก่อน โดยพนักงานจะจัดเรียงโม่ ขึ้นรถเข็นและเข้าห้องอบ ครั้งละ 363 kg อบให้แห้งเหลือประมาณ 312 kg ใช้เวลาครั้งละ 1.5 h โดยอบได้เฉลี่ยวันละ 5 ครั้ง

สาขาการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน

- การคำนวณหาความร้อนที่เข้าห้องอบ

อัตราการความร้อนที่ได้จากเครื่องอัดอากาศและส่งเข้าห้องอบโม่ที่จุด 4 ในรูปที่ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 คือ

$$Q_{in} = Q_4 = \dot{m}_a C_{p_a} (T_4 - T_{amb}) \quad (13)$$

- การคำนวณหาความร้อนที่ทำให้ไน้ระเหย คำนวณได้จาก

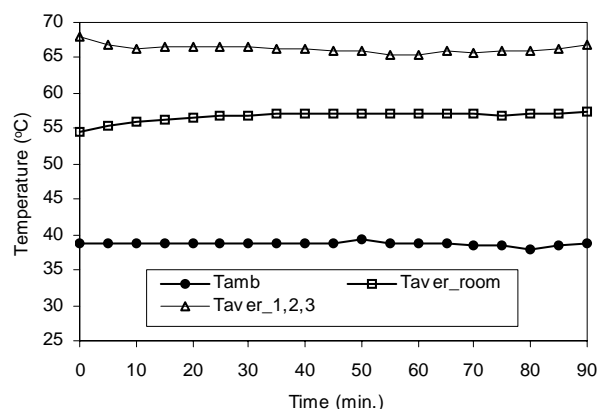
$$Q_{ev} = \dot{m}_a (w_o - w_i) h_{fg} \quad (14)$$

- การคำนวณหาประสิทธิภาพของการอบโม่ คำนวณได้จาก

$$\eta_d = \frac{Q_{ev}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (15)$$

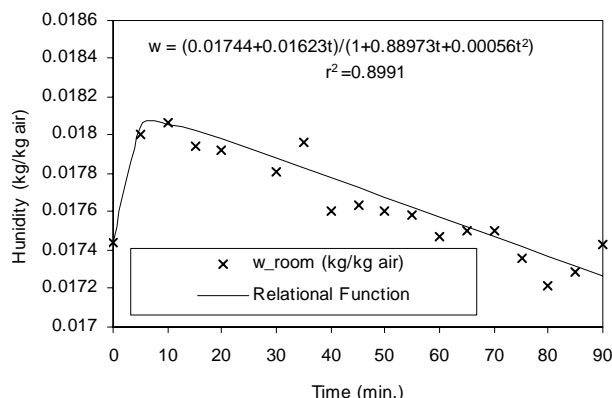
4. ผลการวิจัย

พนักงานจัดเรียงโม่ขึ้นรถเข็นและนำเข้าห้องอบโม่ครั้งละประมาณ 363 kg พบว่าโม่หลังอบมีน้ำหนักประมาณ 312 kg ใช้เวลาประมาณ 90 นาที ซึ่งคุณภาพของโม่ที่ได้ตรงตามที่ทางโรงงานตั้งไว้คือให้ไน้ระเหยออกประมาณ 17% ของน้ำหนักก่อนอบ จากสมการที่ 6 จะได้การระเหยของไอน้ำเฉลี่ยประมาณ 65.7 kg ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากการซึ่งคือ 51 kg



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ตามช่วงเวลาที่อบ

จากรูปที่ 2 อากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 38.8 °C ไหลเข้าเครื่องอัดอากาศเพื่อระบายความร้อนและอากาศร้อนที่ได้มีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสามเครื่อง (จุด 1,2 และ 3) คือ 66.7 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 27.9 °C สำหรับภายในห้องอบโม่มีการติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ 3 จุด คือ จุด 6,7 และ 8 โดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยคือ 56.7 °C จะพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเวลาในการอบนานขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของบรรยากาศและอากาศที่ออกจากเครื่องอัดอากาศค่อนข้างคงที่

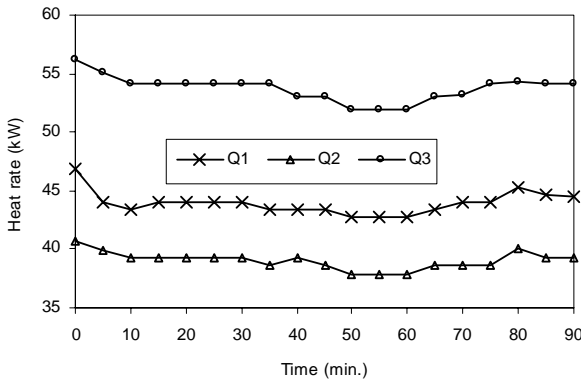


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นในห้องอบและ

ระยะเวลาที่น้อย

จากรูปที่ 3 จะพบว่าอัตราส่วนความชื้นในห้องอบโฝมจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นค่อยๆลดลง โดยมีค่าเฉลี่ย 0.0177 kg/kg_{air} และได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบโฝมและค่าความชื้น คือ

$$w = \frac{0.01744 + 0.01623t}{1 + 0.88973t + 0.00056t^2} \cdot r^2 = 0.8991 \quad (16)$$

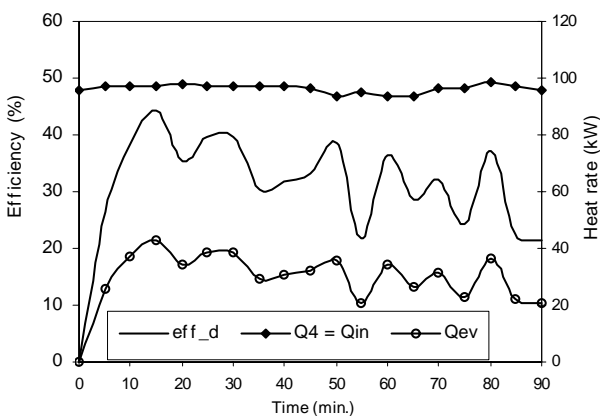


รูปที่ 4 แสดงอัตราความร้อนที่ออกจากเครื่องปรับอากาศทั้ง 3 เครื่องตามช่วงเวลาที่ย่อ

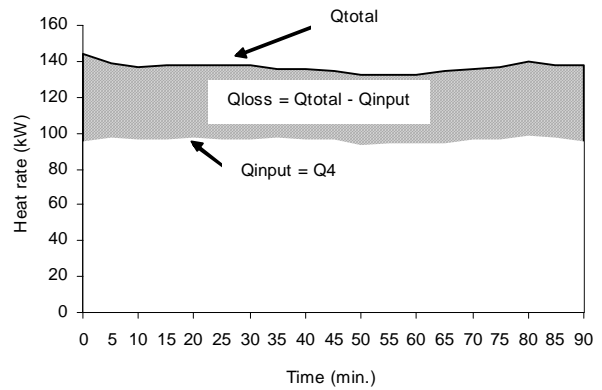
จากรูปที่ 4 แสดงค่าอัตราความร้อนหรือพลังความร้อนของอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องปรับอากาศทั้งสามเครื่องตามช่วงเวลาของการอบและการใช้ kW recorder บันทึกการใช้กำลังไฟฟ้าทั้งสามเครื่อง พบว่าอัตราความร้อนที่ระบายออกมาจากเครื่องปรับอากาศมีค่าประมาณ 73% ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้

จากรูปที่ 5 และสมการที่ 13, 14 และ 15 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่ทำให้ไอน้ำในโฝมระเหยกับอัตราความร้อนที่เข้าห้องอบโฝม ตามช่วงเวลาต่างๆ ทำให้ได้ประสิทธิภาพของการอบโฝมตามช่วงเวลาต่างๆ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 30.6%

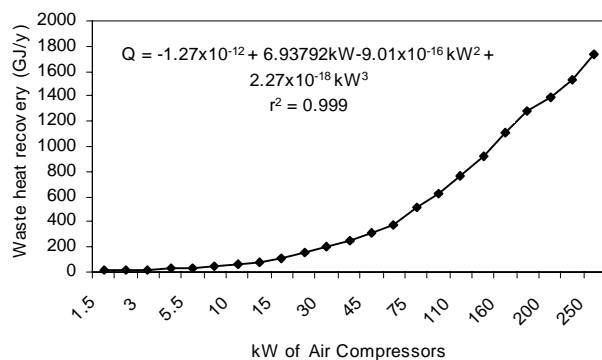
จากรูปที่ 6 แสดงค่าอัตราความร้อนหรือพลังความร้อนที่ออกจากเครื่องปรับอากาศทั้งสามเครื่อง ถูกส่งเข้าห้องอบโฝมโดยผ่านท่อแต่มีความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างเครื่องปรับอากาศและห้องอบโฝม สามารถคิดเป็นพลังความร้อนสูญเสียเฉลี่ยคือ 29.6% ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การรั่วของอากาศร้อนระหว่างทางและการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อส่งอากาศร้อน เป็นต้น



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการอบ อัตราความร้อนที่ทำให้ไอน้ำระเหยและที่เข้าห้องอบโฝมตามเวลาที่ย่อ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่ออกจากเครื่องปรับอากาศรวมและที่เข้าห้องอบโฝมตามระยะเวลาที่ย่อ

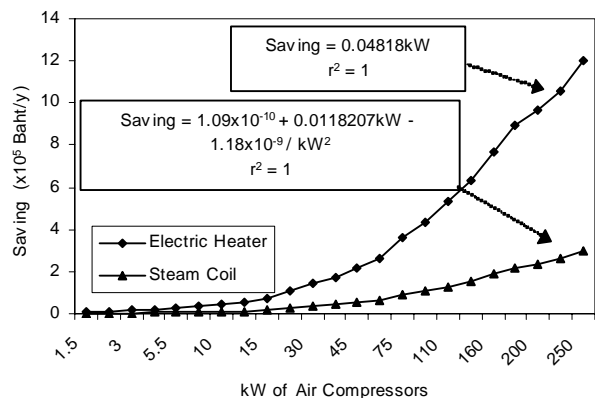


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟารวมของเครื่องปรับอากาศกับการนำพลังงานความร้อนทั้งหมดกลับมาใช้ใหม่

จากรูปที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนทั้งจากเครื่องปรับอากาศ เพื่อใช้ในการอบโฝมและกำลังไฟฟารวมที่ใช้ของเครื่องปรับอากาศ ถ้าในกรณีที่มีเครื่องปรับอากาศขนาด 50 kW จำนวน 4 เครื่องสามารถมูลค่าเงินที่สามารถประหยัดได้ที่กำลังไฟฟารวม 200 kW โดยรูปนี้ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปรับอากาศทั้งสามและนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องปรับอากาศขนาดอื่นๆ คือ

$$Q = -1.27 \times 10^{-12} + 6.93792 \text{ kW} - 9.01 \times 10^{-16} \text{ kW}^2 + 2.27 \times 10^{-18} \text{ kW}^3, \quad r^2 = 0.999 \quad (17)$$

โดยมีข้อมูลการใช้งานคือโรงงานทำงาน 2,640 h/y ค่าอัตราความร้อนที่นำกลับมาใช้โฝมที่วิเคราะห์ได้คือ 73% ของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องปรับอากาศใช้และไม่คิดค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ารวมของเครื่องอัดอากาศที่ใช้กับมูลค่าเงินที่สามารถประหยัดได้

รูปที่ 8 ต่อเนื่องจากรูปที่ 7 คือ มูลค่าเงินที่สามารถประหยัดได้ตามขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศรวมทั้งมีการนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ โดยการเปรียบเทียบกับ 2 กรณีคือ

1. กรณีที่โรงงานก่อนปรับปรุงใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า แล้วเปลี่ยนมาใช้ความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศ จากสมการที่ 7 และ 8 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Saving} = 0.04818\text{kW}, r^2 = 1 \quad (17)$$

โดยมีข้อมูลของโรงงานคืออัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยจากบิลค่าไฟฟ้าย้อนหลัง 12 เดือนคือ 2.5 Baht/kWh และสมมติให้ประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ไฟฟ้าคือ 100%

2. กรณีที่โรงงานก่อนปรับปรุงใช้คอยล์ไอน้ำ แล้วเปลี่ยนมาใช้ความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศ จากสมการที่ 12 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Saving} = 1.09 \times 10^{-10} + 0.0118207\text{kW} - \frac{1.18 \times 10^{-9}}{\text{kW}^2}, r^2 = 1 \quad (18)$$

โดยมีข้อมูลของโรงงานคือหม้อไอน้ำใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง ค่าความร้อนต่ำของถ่านหินบิทูมินัสคือ 24 MJ/kg มีราคา 2.02 Baht/kg ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ 76% และประสิทธิภาพของคอยล์ไอน้ำคือ 65%

5. สรุปผลการวิจัย

การใช้เครื่องอัดอากาศของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยจำนวนมากไม่มีการนำความร้อนที่กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งการนำความร้อนที่กลับมาใช้นั้นนอกจากจะนำมาใช้ในการอบแล้ว สามารถนำมาใช้งานอื่นๆ เช่นการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ การป้อนอากาศร้อนเข้าห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำหรือเตาเผา และการทำน้ำอุ่นในโรงงาน เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละโรงงาน ในทางปฏิบัติการนำความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศมาใช้เป็นเรื่องไม่ยากและลงทุนต่ำ แต่ควรระวังเรื่องความดันลดของท่อส่งอากาศร้อน เพราะจะส่งผลเสียต่อการระบายความร้อนของเครื่องได้ จึงต้องมีการติดตั้งพัดลมช่วยเสริม นอกจากนี้สามารถนำความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศมาใช้ร่วมกับระบบที่มีอยู่เดิมได้ โดยให้ระบบเดิมเป็นระบบสำรองหรือเสริมในช่วงเวลาที่พลังงานความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศไม่เพียงพอ

จากการวิจัยในครั้งนี้พบว่าถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นจะทำให้ได้อากาศร้อนไหลเข้าห้องอบเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะในช่วงเวลาบ่าย แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบโพลีเมอร์ไม่ควรเกิน 65 °C และเวลาที่ใช้ไม่ควรนานเกิน 90 นาที เพราะจะทำให้โพลีเมอร์เสียรูปทรง โรงงานแห่งนี้ปรับปรุงจากการใช้คอยล์ไอน้ำมาเป็นพลังงานความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 154,200 Baht/y โดยที่อัตราการอบโพลีเมอร์เท่าเดิม สำหรับการลงทุนและการบำรุงรักษาถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบเดิมคือ ลงทุนเพียงค่าท่อและค่าพัดลมประมาณ 30,000 Baht มีจุดคุ้มทุนประมาณ 2.4 month แต่อย่างไรก็ตามระบบมีความร้อนสูญเสียสูงถึง 29.6% ถ้าสามารถลดการสูญเสียพลังงานความร้อนระหว่างเครื่องอัดอากาศและห้องอบโพลีเมอร์ได้ จะทำให้ได้พลังงานที่กลับมาใช้มากขึ้นและสามารถคาดการณ์ผลที่จะสามารถประหยัดได้ประมาณ 219,000 Baht/y ดังรูปที่ 8 นอกจากนี้ระบบการนำความร้อนทั้งจากเครื่องอัดอากาศมาใช้ในการอบยังมีข้อเสียคือ โดยปกติแล้วเครื่องอัด

อากาศจะมีการตั้งความดันต่ำและความดันสูงสำหรับการเดินเครื่องและหยุดเครื่องโดยอัตโนมัติ จะทำให้พลังงานความร้อนที่นำมาใช้อาจไม่คงที่ แต่ในกรณีของโรงงานที่วิจัยนี้มีการใช้อากาศอัดสำหรับกระบวนการผลิตคงที่และมีถึงเก็บอากาศขนาดเล็ก จึงทำให้เครื่องอัดอากาศเดินเครื่องค่อนข้างสม่ำเสมอ

6. เอกสารอ้างอิง

1. ฉัตรชัย ปรารภณา, "เครื่องอัดลมแบบสกรู", บริษัทเอ็มแอนด์อี จำกัด, 2534.
2. สมชาติ โสภณธนะฤทธิ์, "การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
3. Robert Goldstick, Albert Thumann, CEM, PE., "Principles of Waste Heat Recovery," The Fairmont Press, Inc., 1943.
4. John J. Mcketta, "Heat Transfer Design Methods," The University of Texas at Austin., 1992.

7. สัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อส่งอากาศร้อน (m ²)
C _e	คือ ค่าไฟฟ้า (Baht)
C _{pa}	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg °C)
E _e	คือ พลังงานไฟฟ้า (kWh)
h _{fg}	คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
P	คือ ค่ากำลังไฟฟ้า (kW)
Pr _e	คือ ราคาค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย (Baht/kWh)
Q	คือ อัตราความร้อน (kW)
Q _{ev}	คือ อัตราความร้อนที่ทำให้ไอน้ำระเหย (kW)
Q _f	คือ อัตราความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (kW)
Q _i	คือ อัตราความร้อนที่เข้าห้องอบโพลีเมอร์ (kW)
Q _{Loss}	คือ อัตราความร้อนสูญเสีย (kW)
Q _n	คือ อัตราความร้อนที่จุด 1,2,3,...,n (kW)
Q _s	คือ อัตราความร้อนที่ได้จากไอน้ำ (kW)
t	คือ เวลา (min)
T _{amb}	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าของเครื่องอัดอากาศ (°C)
T _n	คือ อุณหภูมิที่จุด n =1,2,3,... (°C)
v	คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)
w _i	คือ อัตราส่วนความชื้นที่เข้าห้องอบโพลีเมอร์ (kg/kg _{air})
w _o	คือ อัตราส่วนความชื้นที่ออกจากห้องอบโพลีเมอร์ (kg/kg _{air})
m _a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
ρ _a	คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
m _f	คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/s)
η _b	คือ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (%)
η _{eh}	คือ ประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (%)
η _{sc}	คือ ประสิทธิภาพของคอยล์ไอน้ำ (%)
η _d	คือ ประสิทธิภาพของการอบ (%)