แนวคิดในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์สำหรับหม้อไอน้ำที่มีอยู่เดิมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
A Concept Design of Economizer for Installed boiler of Palm Oil Milling Factory

ฐานิตย์ เมธิยานนท์[1]* และ ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์[1]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
*ติดต่อ: thanid_m@yahoo.com, 02-988-3655 ต่อ 3106, 02-988-3666

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์เพื่อใช้อุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าสู่หม้อไอน้ำเดิมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่ง โดยหม้อไอน้ำเดิมนี้ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบตะกรับ ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 240°C ความดัน 20 bar พิกัดการผลิตไอน้ำที่ 20 ตันต่อชั่วโมง การออกแบบอีโคโนไมเซอร์ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำเดิมที่ใช้งานตามสภาวะปกติเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นต่อการออกแบบทั้งข้อมูลในด้านการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อน ในการคำนวณถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ ของหม้อไอน้ำเดิม (ผนังท่อน้ำ ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และชุดกลุ่มท่อ) และอีโคโนไมเซอร์ได้ใช้วิธีผลต่างเฉลี่ยเชิงล็อกการิทึม (LMTD) ซึ่งต้องทำการลองผิดลองถูก (Trial & error) ผลการเก็บข้อมูลและคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) ของผนังท่อน้ำ ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งและชุดกลุ่มท่อเวียนน้ำมีค่า 56.21, 62.60 และ 36.36 W/m^2-K ตามลำดับ ส่วนอีโคโนไมเซอร์ที่ถูกออกแบบพบว่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม คือ 70 m^2 ซึ่งสามารถอุ่นน้ำป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 130°C และเพิ่มอัตราการผลิตไอน้ำได้ 8% โดยคิดเป็นความร้อนที่ถูกนำกลับมาใช้ 1,185 kW นอกจากนี้ยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นสุทธิ 2,280 kWh ต่อวัน ส่วนอุณหภูมิไอเสียลดลงเหลือ 315 °C

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน; ปาล์มน้ำมัน; หม้อไอน้ำ; อีโคโนไมเซอร์

Abstract

This paper presents a concept design of economizer for pre-heating water before feeding into an installed boiler of a palm oil milling factory. A fixed-grate fired boiler with a capacity of 20 ton/h (superheated steam at 20 bar and 240°C) was taken into this study. The design methodology of economizer started with the experiment of the installed-boiler at normal operating condition to keep the combustion and heat transfer data necessary for calculation. A logarithm mean temperature difference method (LMTD) coupled with a trial & errors procedure were employed to calculate heat transfer at various heat transfer areas of the boiler (water wall, superheater, and boiler bank). The experimental and calculation results showed that the overall heat transfer coefficients (U_o) of water wall, superheater, and boiler bank were 56.21, 62.60 and 36.36 W/m^2-K, respectively. The designed economizer was found to be optimal at the size of 70 m^2 which can preheat feedwater to 130°C, and also increase steam generation by 8%. The recovery heat of 1,185 kW can be evaluated. Moreover, the increment of net electricity generation of 2,280 kWh per day was estimated while the flue gas temperature was reduced to 315 °C.

Keywords: Boiler; Economizer; Heat transfer; Oil palm

1.บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่งนอกจากข้าวและยางพารา โดยอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศไทยเกิดขึ้นมาเป็นระยะเวลานานกว่า 50 ปี ซึ่งอยู่ในรูปแบบของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้กระบวนการสกัดแบบเปียกโดยใช้ไอน้ำจากหม้อไอน้ำมาทำการนึ่งผลปาล์มทั้งทะลายก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแยกและย่อยผลปาล์มเพื่อหีบเป็นน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ในที่สุด ดังนั้น ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบเปียกนี้ถือว่าหม้อไอน้ำเป็นต้นกำลังที่มีความสำคัญมากซึ่งเชื้อเพลิงที่ป้อนให้แก่หม้อไอน้ำของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ เศษวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตต่างๆ คือ เส้นใยผลปาล์ม กะลาปาล์มและทะลายปาล์มเปล่า อย่างไรก็ตาม หม้อไอน้ำในยุคแรกของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่ได้ติดตั้งไว้นั้นอาจไม่ได้พิจารณาถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานเท่าที่ควร เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นไม่มีต้นทุนในการจัดหา โดยสังเกตได้จากการที่หม้อไอน้ำเดิมไม่ได้ถูกออกแบบให้มีอุปกรณ์นำพลังงานกลับมาใช้จำพวกอีโคโนไมเซอร์และเครื่องอุ่นอากาศจึงทำให้อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ปล่อยทิ้งสู่ปล่องมีค่าสูงในระดับปานกลางคือ 370-400°C

ในสภาวการณ์ปัจจุบันที่ราคาเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตต่างๆ จำพวกชีวมวลมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นจากนโยบายการสนับสนุนของภาครัฐในการให้เงินส่วนเพิ่มในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลจึงทำให้โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหันมาให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพื่อให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิง โดยจะสามารถนำเชื้อเพลิงที่เหลือนี้ไปสร้างผลกำไรด้วยการขายออกไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรมอื่นๆ การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เพื่ออุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำเดิมที่มีอยู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้รับความนิยมมากกว่าการติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศเพราะคุ้มค่าต่อการลงทุนที่ดีกว่า [1] ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนหนึ่งได้มีการศึกษาถึงการนำความร้อนทิ้งเวียนกลับมาใช้ทั้งในลักษณะของลมร้อนจากกระบวนการคั่วกาแฟ [2] การนำความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำมาใช้โดยการออกแบบอีโคโนไมเซอร์รูปแบบใหม่สำหรับโรงงานผลิตนมพาสเจอไรซ์ [3] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงตัวแปรพื้นฐานในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์สำหรับหม้อไอน้ำ คือ ระยะห่างของท่อในแนวต่างๆ อีกด้วย [4-5] อย่างไรก็ตาม ในด้านของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มยังไม่มีปรากฏงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอีโคโนไมเซอร์สำหรับหม้อไอน้ำเดิมที่มีอยู่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดของการออกแบบอีโคโนไมเซอร์สำหรับหม้อไอน้ำเดิมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยนำข้อมูลจริงในการใช้งานมาทำการคำนวณออกแบบให้เหมาะสมกับหม้อไอน้ำ

2.ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาข้อมูลการทำงานจริงของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งทางภาคใต้ ซึ่งเป็นหม้อไอน้ำแบบตะกรับนิ่ง (Fixed grate) โดยมีข้อมูลพิกัดการทำงานของระบบดังนี้

1. กำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด 1.2 MW (กังหันความดันต้าน)
2. อัตราการผลิตไอน้ำสูงสุด 20 Ton/h
3. ความดันหม้อไอน้ำ 20 bar
4. อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 240°C
5. ความดันไอน้ำทางออกกังหัน 4 bar (ใช้ในกระบวนการนึ่งผลปาล์ม)
6. อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ปล่อง 370°C
7. เชื้อเพลิงที่ใช้ ใยผลปาล์ม:กะลาปาล์ม 80:20 โดยน้ำหนัก
8. อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ 80°C
9. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (A) ส่วนต่างๆ ในหม้อไอน้ำ (จากข้อมูลจำเพาะของหม้อไอน้ำ)
   - ผนังท่อน้ำ (water wall) = 196 m^2
   - ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheater) = 25 m^2
   - ชุดกลุ่มท่อ (boiler bank) = 409 m^2

2.2 แนวทางในการออกแบบ

จากหลักการทางวิชาการนั้นการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อเวียนพลังงานในแก๊สไอเสียกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะทำสามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ภายใต้การทำงานที่สภาวะเดิม ในขณะที่หากพิจารณาอีกด้านหนึ่งการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราการผลิตไอน้ำ หรืออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้จากความต้องการของโรงงานที่อยากเพิ่มกำลังการผลิต

ไฟฟ้า ดังนั้น การศึกษานี้จะมุ่งพิจารณาถึงผลกระทบของการหาขนาดอีโคโนไมเซอร์ที่เหมาะสมกับข้อกำหนดต่างๆ ของโรงงาน โดยจะพยายามยึดถือการทำงานของอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมเป็นสำคัญ คือ พัดลมดูดไอเสีย (induced draft fan) ทั้งนี้ เพื่อให้การออกแบบสอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลต่างๆ จากการทำงานจริงของหม้อไอน้ำของโรงงานมาประกอบการคำนวณดังนี้

1. อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ไหลผ่านพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ
2. ความดันภายในหม้อไอน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ
3. อัตราการผลิตไอน้ำจริง ซึ่งวัดจากปริมาณน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ
4. อัตราการไหลของอากาศ เชื้อเพลิงและองค์ประกอบแก๊สไอเสียเพื่อหาปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้จริงในการเผาไหม้
5. องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เพื่อหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
6. กำลังงานไฟฟ้าของพัดลมส่งอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิ รวมไปถึงพัดลมดูดไอเสีย

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสี่ส่วนที่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันดังนี้

1. การคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟซึ่งต้องมีข้อมูลประกอบคือ องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกิน และปริมาณความร้อนสูญเสียในกระบวนการเผาไหม้

2. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ชุดผนังท่อน้ำ (water wall) ชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheater) และชุดกลุ่มท่อ (boiler bank) ดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 1 ได้ใช้วิธีผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อคการิทึม (LMTD) ร่วมกับสมการอนุรักษ์พลังงาน [7] ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$Q = mc_p\Delta T \quad \text{หรือ} \quad Q = m\Delta h \qquad (1)$$

$$Q = U_o A_o \Delta T_{lm} F \qquad (2)$$

3. การคำนวณความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์ใช้สมการที่ (3) [7]

$$\Delta P_{HEX} = \frac{2f' G_{max}^2 N}{\rho}\left(\mu_w/\mu_b\right)^{0.14} \qquad (3)$$

โดย G_{max} = อัตราการไหลเชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่น้อยสุด

N = จำนวนแถวที่วางขวางการไหล

μ_b = ค่าเฉลี่ยความหนืดของกระแสอิสระ

μ_W = ค่าเฉลี่ยความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิผิว

ρ = ความหนาแน่นของของไหลที่เงื่อนไขการไหลอิสระ

4. ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด (f') ของการจัดวางท่อแบบสลับ (Staggered tube) หาได้จากสมการ (4) [7]

$$f' = \left(0.25 + \frac{0.118}{\left[(S_n - d)/d\right]^{1.08}}\right) \times Re_{max}^{0.16} \qquad (4)$$

5. การคำนวณกำลังงานของพัดลมที่ใช้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ใช้สมการที่ (5)

$$\Delta Power = \frac{\Delta P_{HEX} \times \dot{V}_{gas}}{\eta_{blower}} = \frac{\Delta P_{HEX} \times \dot{m}_{gas}/\rho_{gas}}{\eta_{blower}} \qquad (5)$$

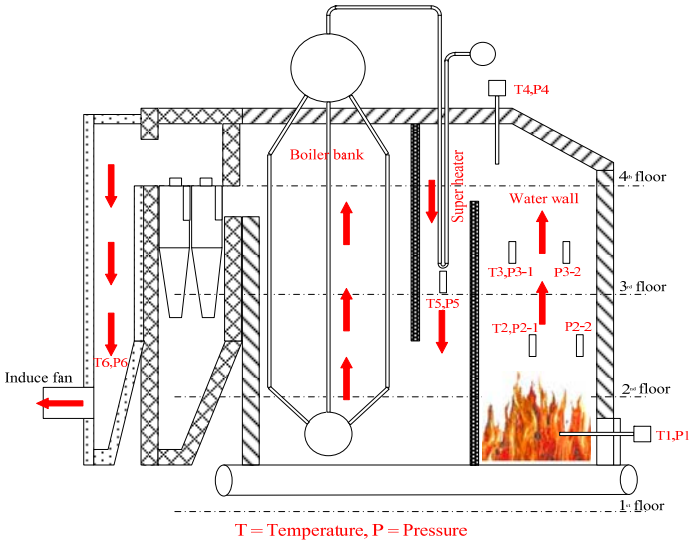
6. การคำนวณหากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันไอน้ำ หาโดยใช้สมการที่ (6)

$$Power_{elect} = \dot{m}_{steam}(h_{sup} \quad h_{exit,s}) \times \eta_{turbine} \qquad (6)$$

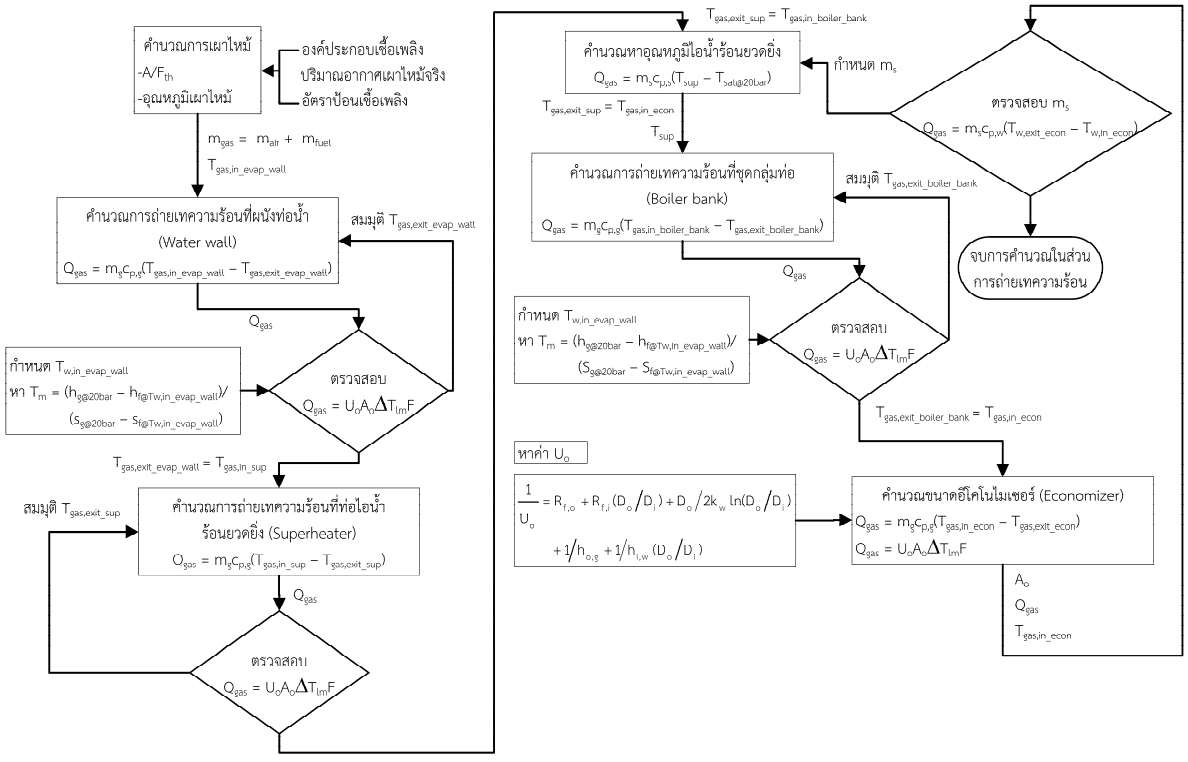
โดย $\eta_{turbine}$ คือ ค่าประสิทธิภาพของกังหันไอน้ำ (%) ซึ่งหาได้จากข้อมูลจำเพาะของกังหันที่ทำการศึกษา

ทั้งนี้ ในการคำนวณออกแบบอีโคโนไมเซอร์นั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่ออุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่จะไหลเข้าสู่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนถัดไป ประกอบกับในการคำนวณออกแบบจะต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial & error) ซึ่งไม่เหมาะกับการคำนวณด้วยมือ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เขียนโปรแกรมช่วยคำนวณ ซึ่งมีอัลกอริทึมในการคำนวณพอสังเขปดังรูปที่ 2 [6] นอกจากนี้ จากสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในส่วนของพื้นผิวแลกเปลี่ยน

ความร้อนทั้ง ชุดผนังท่อน้ำ (water wall) ชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheater) และชุดกลุ่มท่อ (boiler bank) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เดิมของหม้อไอน้ำที่จะติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ จำเป็นต้องรู้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) ของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งต้องทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลที่สภาวะการทำงานจริงของหม้อไอน้ำ ดังเสนอในหัวข้อต่อไป



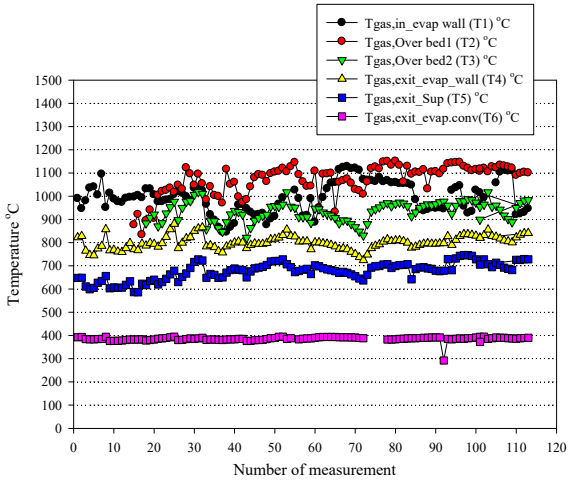
รูปที่ 1 ไดอะแกรมแสดงจุดวัดอุณหภูมิ (T) และความดัน (P) ในหม้อไอน้ำที่ทำการทดลอง



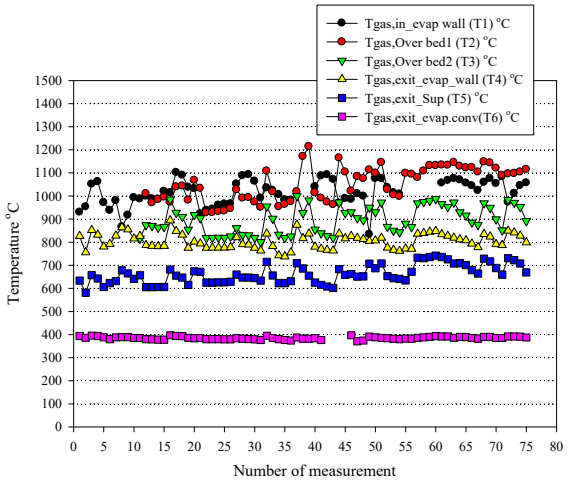
รูปที่ 2 อัลกอริทึมในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำ

3. การทดลองเก็บข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำ

ข้อมูลการทำงานจริงของหม้อไอน้ำที่ต้องทราบประกอบด้วย อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการผลิตไอน้ำ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และความดันตกคร่อมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ โดยที่อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้นี้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่า U_o ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ



(ก) เปิดพัดลม Primary air



(ข) ปิดพัดลม Primary air

รูปที่ 3 ผลการวัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ขณะการทำงานของหม้อไอน้ำ

รูปที่ 3 แสดงข้อมูลอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อไอน้ำทั้งกรณีที่เปิดพัดลมจ่ายอากาศปฐมภูมิ (รูปที่ 3(ก)) และไม่เปิดพัดลมอากาศปฐมภูมิ (รูปที่ 3(ข)) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิสูงบริเวณเหนือเบดเชื้อเพลิงเพราะเกิดการเผาไหม้ของสารระเหยกับอากาศทุติยภูมิในบริเวณดังกล่าว ทั้งนี้ ข้อมูลสรุปที่ได้จากการวัดและคำนวณจากข้อมูลการทำงานจริงของหม้อไอน้ำเดิมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

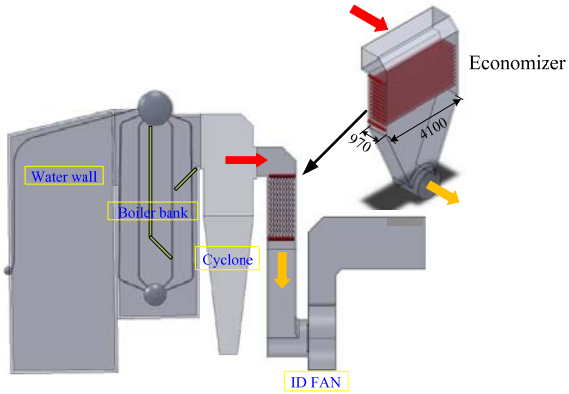
ตารางที่ 1 ข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำในสภาวะการทำงานจากการทดลอง

ตัวแปร (หน่วย)	ปริมาณ
อุณหภูมิแก๊สเข้าผนังท่อน้ำ (T_{gas,in_evap_wall}), T_1 (°C)	994
อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้เหนือเบด 1 ($T_{gas,over_bed,1}$), T_2 (°C)	1069
อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้เหนือเบด 2 ($T_{gas,over_bed,2}$), T_3 (°C)	932
อุณหภูมิแก๊สออกจากผนังท่อน้ำ ($T_{gas,exit_evap_wall}$), T_4 (°C)	800
อุณหภูมิแก๊สออกจากชุดไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ($T_{gas,exit_sup}$), T_5 (°C)	678
อุณหภูมิแก๊สออกจากชุดกลุ่มท่อ ($T_{gas,exit_evap_conv}$), T_6 (°C)	384
อัตราส่วนอากาศ (A/F_{act}) (kg_{da}/kg_{fuel})	11.38
อากาศส่วนเกิน (EA), (%)	170
ความเข้มข้น O_2 ในไอเสีย (%)	12
อัตราการผลิตไอน้ำ (ton/h)	18.72
อุณหภูมิน้ำป้อน (T_{w,in_evap_wall}), (°C)	80
ความดันตกคร่อมคงเหลือของพัดลมด้านดูดไอเสีย (ID fan) จากการวัดกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ (Pa)	300
กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ($P_{ower,elect}$) (kW)	683
จากการคำนวณค่า U_o ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ ($W/m^2.K$)	
- ชุดผนังท่อน้ำ (water wall)	56.21
- ชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheater)	62.60
- ชุดกลุ่มท่อ (boiler bank)	36.36

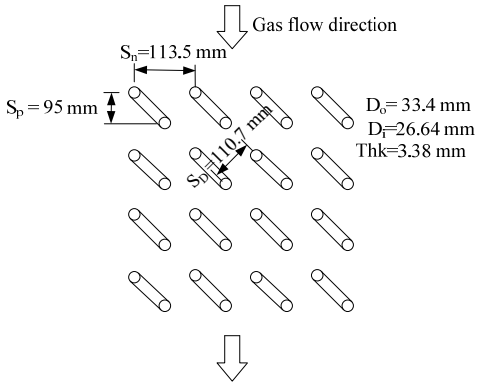
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำยังสามารถเพิ่มขึ้นได้ (พิกัด 20 ton/h) ซึ่งจะส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้นหากทำการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เข้ากับหม้อไอน้ำลูกนี้ (โดยใช้เชื้อเพลิงเท่าเดิม) ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตไอน้ำยั้งส่งผลให้ประสิทธิภาพของกังหันไอน้ำ (η_T) เพิ่มขึ้นเช่นกัน จึงเป็นผลดีต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าอีกทางหนึ่งด้วย

4. รูปแบบและผลการคำนวณอีโคโนไมเซอร์

4.1 รูปแบบของอีโคโนไมเซอร์



(ก) ตำแหน่งการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์



(ข) ลักษณะการจัดวางกลุ่มท่อของอีโคโนไมเซอร์

รูปที่ 4 ภาพสเกตซ์ของตำแหน่งการติดตั้งและลักษณะการจัดวางกลุ่มท่ออีโคโนไมเซอร์

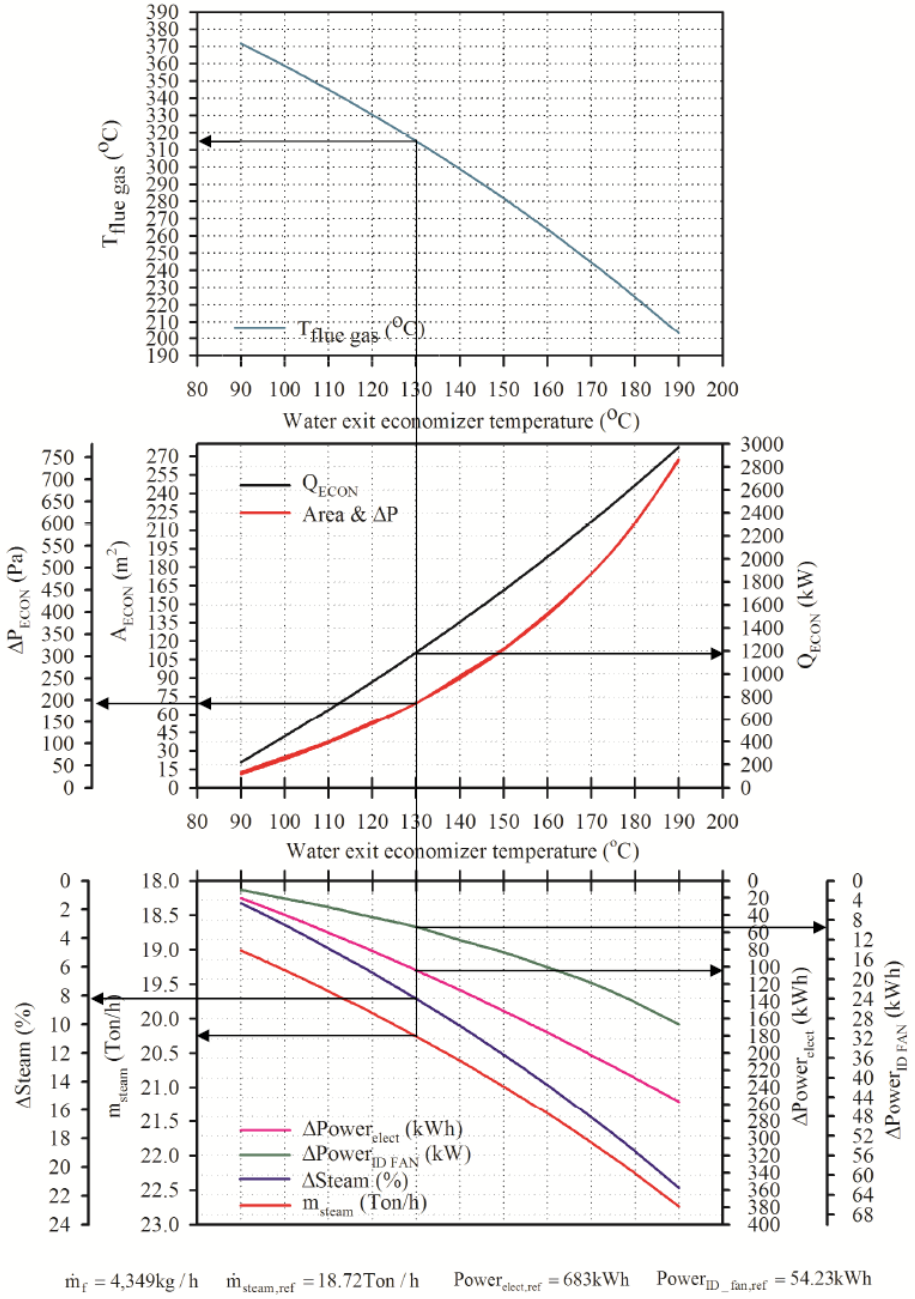
แนวคิดของการออกแบบอีโคโนไมเซอร์เพื่อใช้กับหม้อไอน้ำเดิมที่มีอยู่คือ สามารถติดตั้งได้กับท่อทางออกของไอเสียถัดจากชุดไซโคลน ซึ่งมีขนาดช่องแก๊สเป็นเงื่อนไขในการกำหนดขนาดความกว้างและความยาวของชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนดังภาพสเกตซ์ดังรูปที่ 4(ก) ลักษณะการจัดวางชุดอีโคโนไมเซอร์ขวางทิศทางการไหลของแก๊สไอเสีย และมีการจัดวางกลุ่มท่อแบบสลับฟันปลา (staggered arrangement) โดยมีขนาดของท่อและระยะการจัดวางกลุ่มท่อดังรูปที่ 4(ข) สำหรับสมบัติของท่อที่ใช้ในการออกแบบคือใช้ท่อไร้ตะเข็บ sch 40

4.2 ผลการคำนวณและการเลือกขนาดอีโคโนไมเซอร์

จากการคำนวณออกแบบอีโคโนไมเซอร์เพื่อหาขนาดหรือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (A) และความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์ตลอดจนผลกระทบต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (หรืออุณหภูมิทางออกของอีโคโนไมเซอร์) ตั้งแต่อุณหภูมิ 80°C (อุณหภูมิที่ใช้อยู่ปัจจุบัน) ไปจนถึงอุณหภูมิ 190°C

ทั้งนี้ ผลการคำนวณบางตัวได้ถูกนำเสนอในรูปของความเปลี่ยนแปลงซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำงานจริงในสภาวะเดิมซึ่งผลลัพธ์จะนำเสนอในรูปของกราฟความสัมพันธ์เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ดังรูปที่ 5 โดยตัวแปรแต่ละตัวมีความหมายดังนี้

- $T_{flue\ gas}$ คือ อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ออกจากชุดอีโคโนไมเซอร์ปล่อยทิ้งที่ปล่องไอเสีย (°C)
- ΔP_{ECON} คือ ความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์ (Pa)
- A_{ECON} คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนชุดอีโคโนไมเซอร์ (m^2)
- Q_{ECON} คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทที่ชุดอีโคโนไมเซอร์ (kW)
- m_{steam} คือ อัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ (Ton/h)
- Δsteam คือ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตไอน้ำเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทำงานเดิมที่ 18.72 Ton/h (%)
- $\Delta Power_{elect}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่กังหันสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทำงานเดิมที่ 683 kWh (kWh)
- $\Delta Power_{ID\ FAN}$คือ กำลังไฟฟ้าที่พัดลมด้านดูด (ID fan) จะใช้เพิ่มขึ้นหลังจากติดตั้งชุดอีโคโนไมเซอร์เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทำงานเดิมที่ 54.23 kWh (kWh)



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ตามอุณหภูมิน้ำทางออกอีโคโนไมเซอร์

5. วิจารณ์ผลการคำนวณ

จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ตามอุณหภูมิน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการอุ่นน้ำป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะต้องมีการดึงความร้อนจากแก๊สไอเสียที่ชุดอีโคโนไมเซอร์ (Q_{ECON}) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของชุดอีโคโนไมเซอร์ (A_{ECON}) เพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่จะมีผลกระทบเชิงลบคือความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์ (ΔP_{ECON}) เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ การดึงความร้อนจากแก๊สไอเสียมาอุ่นน้ำป้อนมากขึ้นทำให้อุณหภูมิแก๊สไอเสีย ($T_{flue\ gas}$) ที่ปล่อง

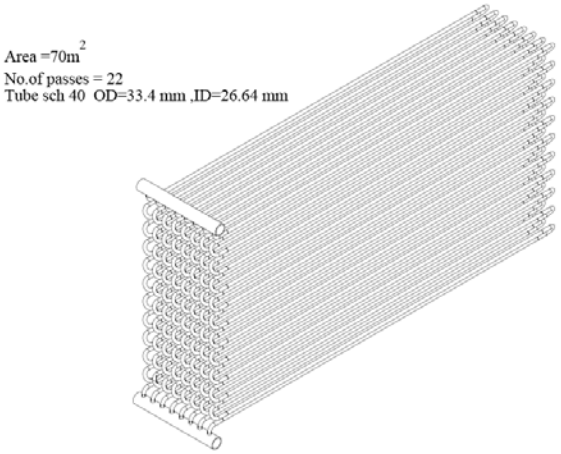
ไอเสียลดต่ำลง นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ยังส่งผลให้อัตราการผลิตไอน้ำ (m_{steam}) และกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เมื่อเทียบกับสภาวะเดิม ($\Delta Power_{elect}$) เพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ของพัดลมด้านดูดที่เทียบกับสภาวะเดิม ($\Delta Power_{ID\ FAN}$) จำเป็นต้องใช้มากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการพิจารณาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาเป็นกำลังไฟฟ้าสุทธิ ($\Delta Power_{NET} = \Delta Power_{elect} - \Delta Power_{ID\ FAN}$)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเลือกอุณหภูมิน้ำป้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่เหมาะสมกับข้อจำกัดในทุกด้าน คือ ขีดจำกัดในการรองรับอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำเดิมซึ่งมีพิกัดที่ 20 ton/h และความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์ที่ต้องไม่มากเกินกว่าความสามารถที่พัดลมด้านดูดตัวเดิมยังสามารถรองรับได้ (300 Pa) พบว่าอุณหภูมิน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่เหมาะสมในการศึกษานี้คือ 130°C โดยค่าของตัวแปรต่างๆ ที่อุณหภูมิน้ำขาออกอีโคโนไมเซอร์ที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 และมีรูปแบบของอีโคโนไมเซอร์ที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 6

ตารางที่ 2 สรุปผลการคำนวณที่สภาวะอุณหภูมิน้ำป้อนที่เหมาะสม (130 องศาเซลเซียส)

ตัวแปร (หน่วย)	ปริมาณ
Q_{ECON} (kW)	1,185
A_{ECON} (m^2)	70
m_{steam} (ton/h)	20.25 (เพิ่มขึ้น 8%)
$\Delta Power_{elect}$ (kW)	104
$\Delta Power_{ID\ FAN}$ (kW)	9.4
$\Delta Power_{NET}$ (kW)	94.6 (2,280 kWh/day)
ΔP_{ECON} (Pa)	193
$T_{flue\ gas}$ (°C)	315

ทั้งนี้ เหตุผลที่เลือกอุณหภูมิน้ำป้อนที่ 130°C เป็นจุดที่เหมาะสมคือ 1) อัตราการผลิตไอน้ำที่ 20.25 ton/h มีค่าใกล้เคียงกับพิกัดของหม้อไอน้ำเดิมที่ 20 ton/h และ 2) ความดันตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์มีค่า 193 Pa ซึ่งพัดลมด้านดูดตัวเดิมยังสามารถรองรับภาระที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ แต่อาจต้องเพิ่มขนาดมอเตอร์ให้ใหญ่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ลักษณะของชุดอีโคโนไมเซอร์ที่ออกแบบไว้

6. สรุปผลการศึกษา

จากแนวคิดในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์เพื่ออุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำเดิมของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิแก๊สไอเสียปล่อยทิ้งที่สูงถึง 384°C โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตไอน้ำและกำลังไฟฟ้าให้เพิ่มสูงขึ้น ผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์กับหม้อไอน้ำเดิมนั้นต้องการข้อมูลจากสภาวะการทำงานจริงของหม้อไอน้ำเพื่อใช้ประกอบการออกแบบ โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่างๆ ในหม้อไอน้ำ ทั้งนี้ผลการคำนวณพบว่าอุณหภูมิน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ 130°C มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งต้องใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 70 m^2 โดยจะสามารถผลิตไอน้ำได้เพิ่มขึ้น 8% และผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นสุทธิถึง 94.6 kWh (2,280 kWh/day) ในขณะที่พัดลมด้านดูดยังสามารถใช้ตัวเดิมได้ โดยอาจจะต้องเปลี่ยนขนาดมอเตอร์ให้ใหญ่ขึ้น ส่วนอุณหภูมิแก๊สไอเสียสามารถปล่อยทิ้งที่อุณหภูมิลดต่ำลงเหลือ 315°C

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเครือข่ายโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (iTAP) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ธนกร ณ พัทลุง (2009), ข้อพิจารณาศักยภาพความร้อนทิ้งสำหรับติดตั้ง Economizer, Technology Promotion, Vol.23, February-March, หน้า 34-39.

[2] Michele, D.M., Elio, P. and Dario, P. (2003). Waste heat recovery in a coffee roasting plant, Applied *Thermal Engineering*, vol. 23, February 2003, pp. 1033 – 1044.

[3] Sathit, N., Paisan, K. and Iqbal, M.M. (2013). A newly design economizer to improve waste heat recovery: A case study in a pasteurized milk plant, Applied *Thermal Engineering*, vol. 60, July 2013, pp. 188 – 199

[4] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ และ จารุวัตร เจริญสุข (2553). ศึกษาถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี

[5] ธีระพล ชัยธัมมาวุธ และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด (2556). การศึกษาอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่เหมาะสมที่สุดสำหรับหม้อไอน้ำชีวมวลโดยการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนและเครื่องอุ่นอากาศ, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

[6] ฐานิตย์ เมธิยานนท์ ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และ สราวุฒิ สังวรกาญจน์ (2553). *รายงานสรุปโครงการ เรื่อง การออกแบบเชิงหลักการของอีโคโนไมเซอร์ และเครื่องอุ่นอากาศสำหรับเครื่องผลิตไอน้ำแบบขั้นบันไดเพื่อนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า*. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

[7] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, (1996), Fundamental of Heat and Mass Transfer 4th ed, John Wiley & Sons.

สัญลักษณ์

A, A_o = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนภายนอก, m^2

c_p = ค่าความร้อนจำเพาะ, kJ/kg.K

d = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m

F = ตัวประกอบปรับแก้, -

f' = ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด

G = อัตราการไหลเชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่, kg/m^2-s

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2.K

= เอนทัลปีของไอน้ำ, kJ/kg

m = อัตราการไหลเชิมวล, kg/s

N = จำนวนแถวที่วางขวางการไหล

P = ความดัน, Pa

Power = กำลังงาน, kW

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, kW

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์

T = อุณหภูมิ, °C

U_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/m^2.K

อักษรกรีก

Δ = ความแตกต่าง

μ_b = ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิกระแสอิสระ

μ_W = ค่าเฉลี่ยความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิผิว

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

ตัวกำกับล่าง

ECON = อีโคโนไมเซอร์

elect = กระแสไฟฟ้า

flue gas = = แก๊สไอเสียปล่อยทิ้ง

g, gas = แก๊สไอเสีย

gas,in_evap_wall = แก๊สทางเข้าผนังท่อน้ำ

gas,exit_evap_wall = แก๊สทางออกผนังท่อน้ำ

gas,exit_sup = แก๊สทางออกชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

gas,exit_evap_conv = แก๊สทางออกชุดกลุ่มท่อ

w,in_evap_wall = น้ำทางเข้าผนังท่อน้ำ

ID FAN = พัดลมด้านดูด

NET = สุทธิ

max = ค่าสูงสุด

s, steam = ไอน้ำ