ภาสกร ตังกานนท์
ผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ
โครงการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน
ของภาคอุตสาหกรรมไทยอย่างยั่งยืน, JETRO

การตรวจวัดหม้อย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

การพิจารณาโดยใช้หลักการสมดุลทางความร้อน ทำให้รู้ว่ามีจุดใดที่ใช้พลังงานความร้อนมากที่สุด และสูญเสียในจุดใดมากที่สุด ซึ่งจะได้นำไปวางแผนการปรับปรุงให้เกิดประสิทธิภาพ และการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

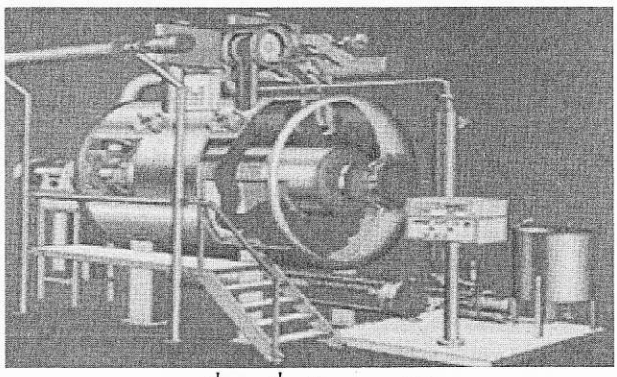
ในอุตสาหกรรมสิ่งทอทุกวันนี้ โรงงานฟอกย้อมถือว่าเป็นธุรกิจหนึ่งที่ใช้พลังงานความร้อนเป็นจำนวนมากกว่าธุรกิจอื่นๆ ในกลุ่มเดียวกัน เช่น โรงปั่นด้าย, โรงทอผ้า, โรงพิมพ์ผ้า ฯลฯ ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้ความร้อนจากไอน้ำในปริมาณมากของโรงงานฟอกย้อม ก็คือ เครื่องย้อมนั่นเอง

เครื่องย้อมสำหรับโรงงานฟอกย้อมมีอยู่หลายแบบให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม แต่ในบทความนี้จะยกตัวอย่างของหม้อย้อมแบบ JET เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจวัดและวินิจฉัยการใช้พลังงานสำหรับหม้อย้อม ซึ่งหากเข้าใจแล้วจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อย้อมแบบอื่น หรือกระบวนการผลิตแบบอื่นได้ไม่ยากนัก และนำไปสู่การวางมาตรการหาทางลดการใช้พลังงานความร้อนที่จ่ายให้หม้อย้อม หรือการพยายามนำความร้อนที่สูญเสียไปกลับคืนมาให้มากที่สุด เป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของโรงงานลง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงวิธีการทำงานของเครื่องย้อมแบบ JET และตัวอย่างกระบวนการที่นำมาใช้ในการคำนวณ จึงขออธิบายโครงสร้างของเครื่องย้อมแบบ JET และวิธีการทำงานให้เข้าใจกันก่อน ดังต่อไปนี้

เครื่องย้อมแบบ JET

ในบทความนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องย้อมแบบ JET (รูปที่ 1) เพื่อเป็นตัวอย่าง โดยเครื่องแบบ JET



รูปที่ 1 เครื่องย้อมแบบ JET

ผ้าที่จะป้อนเข้าเครื่องจะอยู่ในรูป Rope form เป็นการย้อมแบบผ้าเคลื่อนที่และน้ำเคลื่อนที่ เครื่องย้อมแบบ JET จะอยู่ภายใต้แรงดัน ดังนั้นจึงสามารถย้อมที่อุณหภูมิสูงได้ ดังแสดงการทำงานในรูปที่ 2 และ 3

ผ้าที่จะย้อม จะนำปลายผ้าทั้งสองด้าน (หัวและปลายผ้า) มาต่อเข้าด้วยกัน และถูกดึงเข้าไปในหม้อย้อมโดยใช้เครื่องกว้าน (Winch) ที่อยู่ด้านบน โดยผ้ามีการเคลื่อนอย่างต่อเนื่องภายในเครื่องย้อม เมื่อผ้าวิ่งผ่านเครื่องกว้านไปแล้ว ก็จะไปตกอยู่ในอ่างย้อม (Chamber) ที่มีน้ำย้อม (น้ำ + เคมี + สีย้อม) ท่วมกองผ้าอยู่ แล้วถูกดึงขึ้นไปครบรอบ ซึ่งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

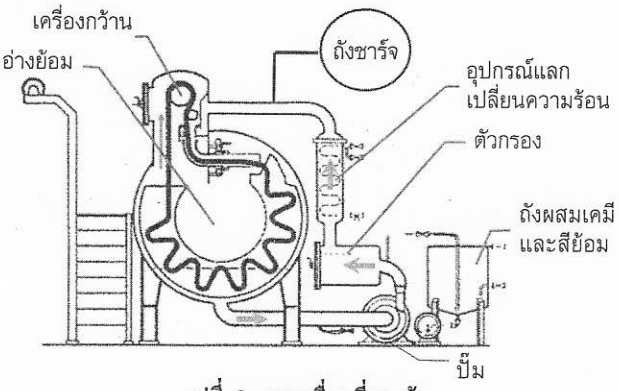
ส่วนน้ำย้อม จะเริ่มจากกระบวนการเตรียมน้ำร้อนไว้ในถังชาร์จ (Charge tank) แล้วปล่อยเข้าไปภายในหม้อย้อมตาม

ภาสกร ตังกานนท์. "การตรวจวัดหม้อย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน". **เทคนิคเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหการ.** 26, 303 (ก.ค. 2552) 91-96.

รอบเวลาการผลิตที่กำหนด โดยเคมีและสีย้อมจากอีกถังหนึ่ง (Side tank) จะถูกเติมเข้าไปในหม้อย้อม (วิธีการป้อนสีและเคมีเข้าระบบอาจจะใช้วิธีอื่นก็ได้) เพื่อผสมกับน้ำร้อน กลายเป็นน้ำย้อมอยู่ในอ่างย้อม โดยมีปั๊มเมน (Main pump) ที่อยู่ใต้อ่างทำหน้าที่ดูดน้ำย้อมไปที่ชุดกรอง (Filter) เพื่อกรองเอาเศษผ้าที่อาจจะทำให้เกิดการอุดตันออก จากนั้นนำน้ำย้อมไปเพิ่มอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) (หรือในบางกรรมวิธี จะมีการลดอุณหภูมิลง ด้วยการใส่น้ำเย็นเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแทนไอน้ำ) จากนั้นน้ำย้อมก็จะกลับเข้าสู่หม้อย้อมอีกครั้ง เป็นวงรอบเช่นนี้เรื่อยไป

กระบวนการย้อม

จากรูปที่ 2 และ 3 สามารถอธิบายการทำงานของกระบวนการย้อมได้ดังนี้



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของผ้า และการหมุนเวียนของน้ำย้อมในกระบวนการ

1. โหลดผ้าเข้าหม้อย้อม

2. เตรียมน้ำย้อม น้ำและเคมีจะถูกผสมเข้าด้วยกัน และนำไปอุ่นให้ร้อนด้วยไอน้ำในถังชาร์จ จนกระทั่งได้อุณหภูมิ 80 °C แล้วจึงส่งเข้าหม้อย้อมต่อไป

3. เพิ่มอุณหภูมิในหม้อย้อม หลังจากที่น้ำและเคมีจากถังชาร์จถูกส่งเข้ามาในหม้อย้อม (โดยมีการโหลดผ้าเข้ามาไว้ในหม้อย้อมแล้ว) จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิหม้อย้อมอย่างคงที่ประมาณ 1.5 °C ต่อนาที และในระหว่างนี้จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเคมีกับผ้า โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 30 นาที

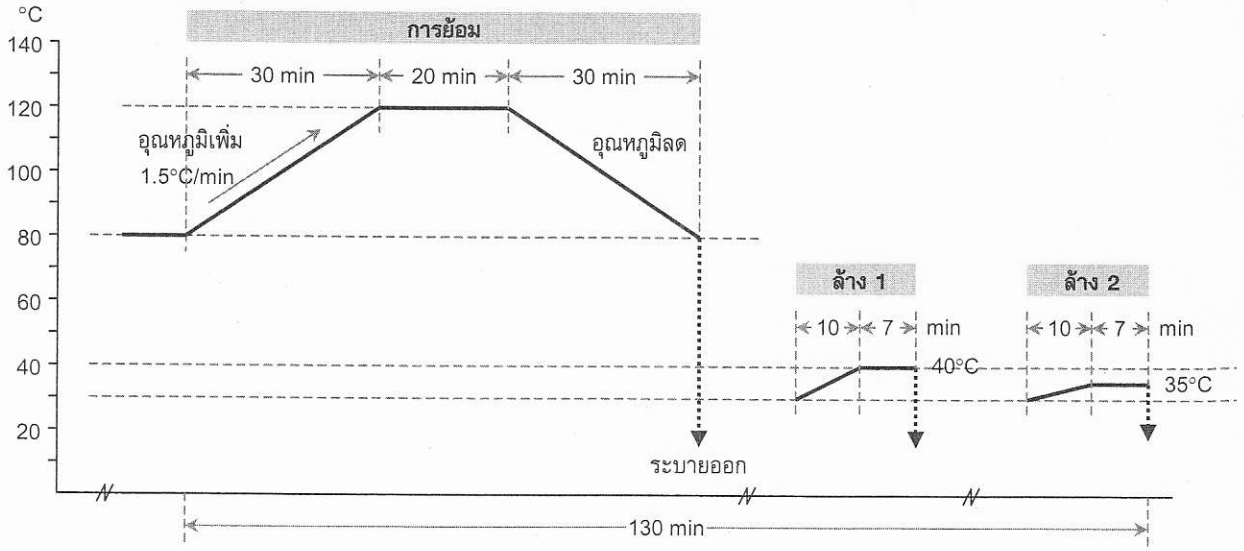
4. รักษาอุณหภูมิและความดันให้คงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 120 °C แล้ว จะรักษาอุณหภูมิและความดันให้คงที่ไว้ตลอด 20 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำย้อมกับผ้าได้เต็มที่

5. ลดอุณหภูมิ เป็นการค่อยๆ ลดอุณหภูมิและความดันในหม้อย้อมลงอย่างคงที่ โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 30 นาที

6. ปล่อยน้ำทิ้ง เมื่อลดอุณหภูมิได้ 80 °C แล้ว จะปล่อยน้ำทิ้งไปที่กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

7. การล้างน้ำแรก เพื่อการชะล้างเคมีที่ยังคงตกค้าง โดยจะใช้น้ำโรงงาน (Fresh water) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 30 °C ซึ่งจากความร้อนที่ยังตกค้างอยู่บนผ้า จะทำให้น้ำล้างมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยประมาณเป็น 40 °C โดยจะคงน้ำล้างนี้ไว้นาน 7 นาที แล้วปล่อยทิ้งเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

8. การล้างน้ำที่สอง เพื่อการชะล้างเคมีที่ยังคงตกค้างอยู่เป็นครั้งสุดท้าย โดยใช้น้ำโรงงานที่มีอุณหภูมิประมาณ



รูปที่ 3 เวลาและอุณหภูมิในกระบวนการควบคุมการย้อม

30 °C ซึ่งจากความร้อนที่ยังตกค้างอยู่บนผ้า จะทำให้น้ำล้างมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยประมาณเป็น 35 °C โดยจะคงน้ำล้างนี้ไว้นาน 7 นาที แล้วปล่อยทิ้งเข้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

ข้อมูลและแนวทางการตรวจวัด

ในการหาจุดสมดุลทางความร้อน (Heat balance) ของหม้อย้อม เพื่อนำไปพิจารณาและดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงาน สามารถแยกพิจารณาในสองแนวทาง คือ 1. พลังงานความร้อนที่ปล่อยออก (Energy output) 2. ปริมาณความร้อนทิ้งออกภายนอกระบบ (ต่อหม้อย้อม ต่อรอบ) โดยจะได้แสดงรายละเอียดในแต่ละแนวทางต่อไป

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบและอุปกรณ์ และสภาวะต่างๆ ของกระบวนการย้อม มีดังต่อไปนี้

1. วัตถุดิบและอุปกรณ์

- วัตถุดิบในการย้อม คือ ผ้าฝ้าย (Cotton) มีมวล (m) = 480 kg, ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) = 1.30 kJ/kg
- วัสดุหม้อย้อมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel-SUS) มีค่า c_p = 0.46 kJ/kg
- น้ำที่ใช้ในกระบวนการ คือ สำหรับเตรียมน้ำย้อม 4,500 ลิตร, ล้างครั้งแรก 2,700 ลิตร, ล้างครั้งที่สอง 1,800 ลิตร
- ถังชาร์จ (Charge tank), m = 550 kg
- หม้อย้อม, m = 1,200 kg
- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, m = 50 kg
- ท่อไอน้ำมีการหุ้มฉนวนไว้แล้ว

2. สภาวะต่างๆ ในกระบวนการ

- อุณหภูมิผิวหม้อย้อม 120 °C (ภายใต้ความดันปกติ)
- อุณหภูมิน้ำเสียที่ทิ้งจากการย้อม 80 °C (น้ำทิ้งครั้งแรกของกระบวนการ)
- ความดันไอน้ำ 7 บาร์
- คุณภาพไอน้ำ (Dryness of steam) = 0.98
- อุณหภูมิน้ำดี 30 °C
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 30 °C

กรณีพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออก

พลังงานความร้อนในกระบวนการย้อมที่ถูกปล่อยออกหรือความร้อนเอาต์พุตในส่วนต่างๆ ของระบบ มีดังนี้

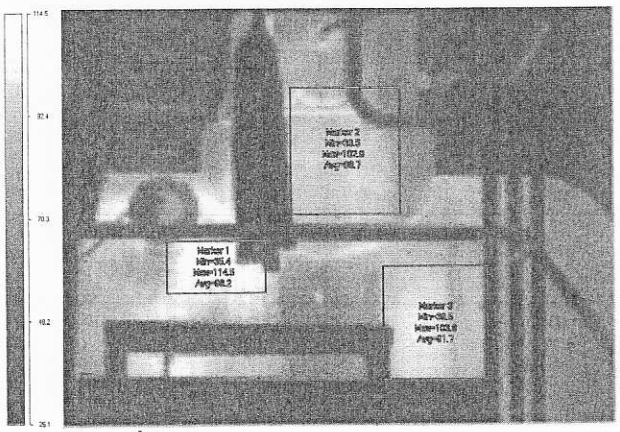
1. ความร้อนของผ้า
2. ความร้อนสูญเสียที่ผิวของหม้อย้อมและอุปกรณ์อื่นๆ
3. ความร้อนที่ไปกับน้ำทิ้ง (Hot waste water)
4. ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต (Condensate)
5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

จากรูปที่ 4 ถึง 5 เป็นภาพถ่ายทางความร้อนของหม้อย้อม และบริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ทราบถึงการสูญเสียความร้อนที่จุดต่างๆ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาพลังงานสูญเสียของหม้อย้อมได้ โดยมีตัวอย่างการวิเคราะห์ดังนี้

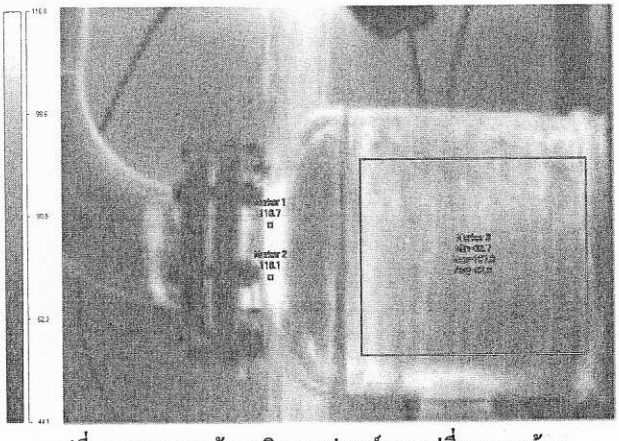
1. สภาวะของไอน้ำ

- เอ็นทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวแห้ง (Dry saturate steam); h" = 2,767.5 kJ/kg
- เอ็นทาลปีของน้ำอิ่มตัว (Saturated water); h' = 720.9 kJ/kg
- เอ็นทาลปีของไอน้ำอิ่มตัว (Saturate steam); h = 2,726.5 kJ/kg, h = h'(h" – h')
- ความร้อนแฝงของไอน้ำ (Latent heat of steam); γ = h – h' = 2,005.6 kJ/kg

2. การถ่ายโอนความร้อนของกระบวนการ โดยการพิจารณาเฉพาะพลังงานความร้อนต่อหม้อย้อม 1 ลูก ต่อ 1 รอบการย้อม ซึ่งแบ่งเป็นสามส่วนใหญ่ๆ คือ 1. ความร้อนของหม้อย้อม 2. ความร้อนที่ให้กับผลิตภัณฑ์ (ซึ่งก็คือ ผ้าฝ้าย)



รูปที่ 4 ภาพความร้อนของหม้อย้อมขณะทำงาน



รูปที่ 5 ภาพความร้อนบริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3. ความร้อนที่ให้กับน้ำในกระบวนการ โดยอาศัยสมการพื้นฐานการถ่ายโอนความร้อน คือ

$Q = mc\Delta T$

Q = พลังงานความร้อนที่จ่ายให้วัตถุ

m = มวลของวัตถุ

c = ความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุ (หรือ c_p ในกรณีแรงดันคงที่ หรือ c_v ในกรณีปริมาตรคงที่)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิ

1. ความร้อนของหม้อย้อม (Heat of vessel) รวมทั้งถังชาร์จ, หม้อย้อม, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

- ความร้อนถังชาร์จ (m = 550 kg, c_p = 0.46)

  = 550 × 0.46 × (80 - 40) = 10,120 kJ
- ความร้อนหม้อย้อมและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (m = 1,250 kg, c_p = 0.46)

  = 1,250 × 0.46 × (120 – 80) = 23,000 kJ
- ความร้อนของหม้อย้อมรวม

  = 10,120 + 23,000 = 33,120 kJ

2. ความร้อนของผ้าฝ้าย (Heat of product) (m = 480 kg, c_p = 1.30)

= 480 × 1.30 × (120 – 40) = 49,920 kJ

3. ความร้อนที่ให้กับน้ำย้อม (Heat of dyeing liquid) โดยค่าความจุความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric het capacity; VHC) ของน้ำ = 4.186 kJ/kg.K)

- น้ำสำหรับฟอกย้อม (Bleaching) 4,500 ลิตร

  = 4,500 × 4.186 × (120 – 40) = 1,506,960 kJ
- น้ำสำหรับการล้างครั้งแรก 2,700 ลิตร

  = 2,700 × 4.186 × (40 – 30) = 113,022 kJ
- น้ำสำหรับการล้างครั้งที่สอง 1,800 ลิตร

  = 1,800 × 4.186 × (35 – 30) = 37,634 kJ
- รวมความร้อนที่ให้กับน้ำย้อมและในกระบวนการ

  = 1,506,960 + 113,022 + 37,634 = 1,657,616 kJ

4. ความร้อนสูญเสียที่ผิวของหม้อย้อม โดยตั้งสมมุติฐานว่า ภาวะแวดล้อมในการทำงานไม่มีลมพัด ดังนั้นความร้อนที่สูญเสียจึงเกิดขึ้นจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยสามารถคำนวณหาการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ที่พื้นผิวของอุปกรณ์ ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

- ความร้อนสูญเสียจากการพาตามธรรมชาติ

  $q_1 = \alpha \times (t - b)^{1.25} \times 4.186$
- ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี

$$q_2 = 4.88 \times \varepsilon \times \left[\left(\frac{t + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{b + 273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

- ปริมาณความร้อนสูญเสียรวม; $Q = q_1 + q_2$ (kJ/m^{2}h)

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์ของพื้นผิว; เพดาน = 2.8, ผนังด้านข้าง = 2.2, พื้น = 1.5, วัตถุทรงกระบอก = 2.0

T = อุณหภูมิพื้นผิว (°C)

b = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)

ε = การแผ่รังสีของพื้นผิว โดย ε ของ Stainless steel-SUS = 0.35 และแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum foil) = 0.30

สำหรับข้อมูลชนิดของพื้นผิว ขนาดพื้นผิว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

1. ขณะอุณหภูมิเพิ่ม (ให้ความร้อน)

(ก) ความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อน เมื่อ α = 2.0

$q_{1\ \text{ถังชาร์จ}} = 2.0 \times (60 - 30)^{1.25} \times 4.186 = 587$ kJ/m^{2}h

$q_{1\ \text{อื่นๆ}} = 2.0 \times (100 - 30)^{1.25} \times 4.186 = 1,695$ kJ/m^{2}h

(ข) ความร้อนสูญเสียโดยการแผ่รังสี เมื่อ ε = 0.35

$$q_{2\ \text{ถังชาร์จ}} = 4.88 \times 0.35 \times \left[\left(\frac{60 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{30 + 273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

$= 1.708 \times (123 - 84) \times 4.186 = 279$ kJ/m^{2}h

$$q_{2\ \text{อื่นๆ}} = 4.88 \times 0.35 \times \left[\left(\frac{100 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{30 + 273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

$= 1.708 \times (194 - 84) \times 4.186 = 786$ kJ/m^{2}h

(ค) ความร้อนสูญเสียรวมขณะอุณหภูมิเพิ่ม

$Q_{\text{ถังชาร์จ}} = 587 + 279 = 866$ kJ/m^{2}h

$Q_{\text{อื่นๆ}} = 1,695 + 786 = 2,481$ kJ/m^{2}h

2. ขณะที่มีการย้อม (Dyeing)

(ก) ความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อน เมื่อ α = 2.0

$q_{1\ \text{ถังชาร์จ}} = 2.0 \times (194 - 84)^{1.25} \times 4.186$

$= 1,113$ kJ/m^{2}h

ตารางที่ 1 อุณหภูมิพื้นผิวขณะที่มีการทำความร้อน

ชนิดพื้นผิว	พื้นที่ผิว (m^2)	รวม (m^2)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าเฉลี่ย (°C)
ถังชาร์จ	14.14	15.62	40-80	60
ท่อของถังชาร์จ	1.48			
หม้อย้อม - ช่วงเครื่องกว้าน	2.86	35.91	80-120	100
ตัวหม้อย้อม	26.4		80-120	100
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	1.26		80-120	100
ท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	0.16		80-120	100
ท่อ	5.23		80-120	100

ตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อรอบ

ช่วงการทำงาน	ชนิดพื้นผิว	พื้นที่ผิว (m^2)	ความร้อนสูญเสีย (kJ/m^2h)	ชั่วโมง/รอบ	ความร้อนสูญเสียต่อรอบ (kJ)
อุณหภูมิเพิ่ม	ถังชาร์จ	15.62	866	1.0	13,527
	ส่วนอื่นๆ ที่เหลือ	35.91	2,481	0.5	44,546
ขณะย้อม	ถังชาร์จ	15.62	1,621	0.3	7,596
	ส่วนอื่นๆ ที่เหลือ	35.91	3,249	0.3	35,001
อุณหภูมิลด	ส่วนทรงกระบอก	35.91	2,784	0.5	49,987
				รวม	**150,657**

$q_{1\ อื่นๆ} = 2.0 \times (194 - 84)^{1.25} \times 4.186$

$= 2,321\ kJ/m^2h$

(ข) ความร้อนสูญเสียโดยการแผ่รังสี เมื่อ $\varepsilon = 0.35$

$$q_{2\ ถังชาร์จ} = 4.88 \times 0.35 \times \left[\left(\frac{80+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{30+273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

$= 1.708 \times (155 - 84) \times 4.186 = 508\ kJ/m^2h$

$$q_{2\ อื่นๆ} = 4.88 \times 0.35 \times \left[\left(\frac{120+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{30+273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

$= 1.708 \times (239 - 84) \times 4.186 = 1,108\ kJ/m^2h$

(ค) ความร้อนสูญเสียรวมขณะย้อม

$Q_{ถังชาร์จ} = 1,113 + 508 = 1,621\ kJ/m^2h$

$Q_{อื่นๆ} = 2,321 + 1,108 = 3,249\ kJ/m^2h$

3. ขณะอุณหภูมิลด สำหรับส่วนอื่นๆ ที่เหลือ โดยเฉลี่ยค่าอุณหภูมิ = (120 + 80) / 2 = 100

- ความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อน เมื่อ $\alpha = 2.0$

$q_1 = 2.0 \times (100 - 30)^{1.25} \times 4.186 = 1,695\ kJ/m^2h$

- ความร้อนสูญเสียโดยการแผ่รังสี เมื่อ $\varepsilon = 0.3$

$$q_2 = 4.88 \times 0.35 \times \left[\left(\frac{100+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{30+273}{100}\right)^4\right] \times 4.186$$

$= 1.708 \times (215 - 84) \times 4.186 = 781\ kJ/m^2h$

ตารางที่ 3 ความร้อนเอาต์พุต (ที่นำไปใช้งานต่อรอบ) โดยเทียบเป็นปริมาณไอน้ำ

ตำแหน่ง	ความร้อนเอาต์พุต (kJ)	ปริมาณไอน้ำ (kg)*
1. ความร้อนที่หม้อย้อม	33,120	16.5
2. ความร้อนของน้ำล้าง	150,696	75.1
3. ความร้อนของผ้า	49,920	24.9
4. ความร้อนที่ให้กับน้ำย้อม	1,657,616	826.5
5. ความร้อนสูญเสียที่ผิวของหม้อย้อม	150,657	75.1
รวมส่วนที่ใช้ในระบบ	**2,042,009**	**1,018.1**
6. ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต	627,353	
รวมทั้งหมด	**2,669,362**	

* ความร้อนแฝงของไอน้ำ = 2,005.6 kJ/kg
ดังนั้น ปริมาณไอน้ำ = ความร้อนเอาต์พุต / 2,005.6

- ความร้อนสูญเสียรวมขณะอุณหภูมิลด

$Q = 2,003 + 781 = 2,784\ kJ/m^2h$

4. รวมปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวต่อรอบ โดยได้จาก Q = พื้นที่ผิว × ความร้อนสูญเสียในแต่ละช่วงการทำงานและแต่ละอุปกรณ์ แล้วรวมกัน ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 150,657 kJ รายละเอียดการคำนวณดูได้จากตารางที่ 2

5. ความร้อนที่ได้จากการล้างน้ำ โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างที่มีอยู่สองครั้ง คือ 2,700 ลิตร และ 1,800 ลิตร

$q_1 = 2,700 \times 4.186 \times (40 - 30) = 113,022\ kJ$

$q_2 = 1,800 \times 4.186 \times (35 - 30) = 37,674\ kJ$

$Q = 113,022 + 37,674 = 150,696\ kJ$

6. ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต (Condensate) หาได้จากสมการ

- ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต

$= อัตราการใช้ไอน้ำ \times (h_{ไอน้ำอิ่มตัว} - h_{น้ำป้อน})$

- อัตราการใช้ไอน้ำ (Steam rate)

$$= \frac{ความร้อนเอาต์พุตรวม}{ความร้อนแฝงของไอน้ำ}$$

- ความร้อนรวมส่วนที่ใช้ในระบบ

= ความร้อนหม้อย้อม + ความร้อนน้ำล้าง + ความร้อนของผ้า + ความร้อนที่ให้น้ำย้อม + ความร้อนสูญเสียที่ผิวหม้อย้อม

$= 33,120 + 150,696 + 49,920 + 1,657,616 + 150,657$

$= 2,042,009\ kJ$

โดยความร้อนแฝงของไอน้ำ (Latent heat of steam) = 2,005.6 kJ/kg, เอ็นทาลปีของไอน้ำอิ่มตัว = 720.9, เอ็นทาลปีของน้ำป้อน = 104.7 ดังนั้น

- ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต

$= อัตราการใช้ไอน้ำ \times (h_{ไอน้ำอิ่มตัว} - h_{น้ำป้อน})$

$$= \frac{2,042,009}{2,005.6} \times (720.9 - 104.7)$$

ตารางที่ 4 ความร้อน และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของระบบ

ความร้อน	kJ/รอบ	%
อินพุต		
ไอน้ำ	2,669,255	100
เอาต์พุต		
1. ความร้อนทิ้งจากอุณหภูมิลดของหม้อย้อม	23,000	0.9
2. ความร้อนทิ้งจากอุณหภูมิลดของน้ำย้อมที่ใช้แล้ว (ลดลงจาก 120 °C เป็น 80 °C)	753,480	28.2
3. ความร้อนทิ้งในขณะที่น้ำทิ้งที่ยังร้อนอยู่ (ลดลงจาก 80 °C เป็น 30 °C)	941,850	35.3
4. ความร้อนสูญเสียที่ผิวหม้อย้อม	150,657	5.6
5. ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต	627,353	23.5
6. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	172,915	6.5

$= 1,018.1 \times (720.9 - 104.7)$

$= 627,353$ kJ

7. ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการย้อมทั้งหมด

- ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการย้อมทั้งหมด

$= \text{อัตราการใช้ไอน้ำ} \times (h_{\text{ไอน้ำอิ่มตัวเปียก}} - h_{\text{น้ำป้อน}})$

$= 1,018.1 \times (2,726.5 - 104.7)$

$= 2,669,255$ kJ/รอบ

กรณีความร้อนทิ้งออกภายนอก

1. จากอุณหภูมิลดของหม้อย้อม โดยอุณหภูมิลดลงจาก 120 °C เป็น 80 °C น้ำหนักหม้อย้อม 1,200 kg และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 50 kg วัสดุที่ใช้เป็นสเตนเลสสตีล-SUS ซึ่งมีค่า $c_p = 0.46$ kJ/kg

$Q = (1,200 + 50) \times (120 - 80) \times 0.46$

$= 23,000$ kJ

2. ความร้อนทิ้งออกจากการลดอุณหภูมิน้ำย้อมที่ใช้แล้ว จาก 120 °C เป็น 80 °C โดยน้ำที่ใช้ในกระบวนการมีสามกรณี คือ 4,500 ลิตร 2,700 ลิตร และ 1,800 ลิตร

$Q = 4,500 \times (120 - 80) \times 4.186$

$= 753,480$ kJ

3. อัตราการนำความร้อนกลับเข้าระบบ โดยนำความร้อนที่จะถูกทิ้งไปตามข้อ 1 และ 2 กลับคืนสู่ระบบโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ได้น้ำร้อนกลับคืน 45 °C

- อัตราน้ำร้อนกลับคืน (45 °C)

$$= \frac{23,000 + 753,480}{4.186 \times 45}$$

$= 4,122.1$ ลิตร

4. ความร้อนทิ้งออกจากน้ำทิ้งที่ยังร้อน จาก 80 °C ถึง 30 °C

- ความร้อนจากน้ำทิ้งร้อน

$= 4,500 \times (80 - 30) \times 4.186$

$= 941,850$ kJ

5. ความร้อนสูญเสียที่ผิวหม้อย้อม

1. อุณหภูมิผิวหม้อย้อมขณะอุณหภูมิเพิ่ม

$= (120 + 30) / 2 = 75$ °C

2. อุณหภูมิผิวหม้อย้อมขณะย้อม $= 120$ °C

3. อุณหภูมิผิวหม้อย้อมขณะอุณหภูมิลด

$= (120 + 80) / 2 = 100$ °C

4. ความร้อนสูญเสียต่อรอบ

= พื้นที่ผิวของหม้อย้อม × ความร้อนสูญเสียรวม × เวลาที่ใช้ใน 1 รอบ

6. ความร้อนที่ไปกับคอนเดนเสต โดยความร้อนแฝงของไอน้ำ = 2005.6 kJ/kg ดังนั้น

- อัตราการเกิดคอนเดนเสต

$$= \frac{2,042,009}{2005.6} = 1,018.1 \text{ kg/รอบ}$$

- ความร้อนจากคอนเดนเสต

$= 1,018.1$ kg $\times (720.9 - 104.7)$

$= 627,353$ kJ

สรุปผล

จากการพิจารณาโดยใช้หลักการสมดุลทางความร้อน ทำให้รู้ได้ว่ามีการใช้พลังงานความร้อนในจุดมากที่สุด และสูญเสียในจุดใดมากที่สุด ซึ่งเราจะนำไปวางแผนในเชิงการอนุรักษ์พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น หากพิจารณาพลังงานความร้อนทางเอาต์พุต จุดที่ใช้พลังงานความร้อนมากที่สุด คือ ความร้อนที่จ่ายให้กับน้ำย้อม หรือหากพิจารณาความร้อนทิ้งออกนอกระบบ จุดที่ปล่อยพลังงานความร้อนทิ้งออกไปมากที่สุดก็คือ น้ำทิ้งหลังการย้อมนั้นเอง

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงเป็นที่มาของมาตรการทำ Heat recovery ในระบบน้ำเสียของโรงย้อม ซึ่งหากมีโอกาสจะได้นำเสนอต่อไป