

บทที่ 5

แนวทางการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ของการอบขนอ้อยขั้นต้น (Pre-drying)

จากการศึกษาประสิทธิภาพ พฤติกรรมการปรับความเร็วรอบระบบลำเลียงฝุ่นขนอ้อย ลักษณะการอบของเตาอบแห้งขนอ้อยขั้นต้น (Pre-dryer) จึงสามารถสรุปแนวทางหรือมาตรการในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบแห้ง ไว้ 2 ข้อ ดังนี้

5.1 การหุ้มฉนวนกันความร้อนที่เตาเผาเก่า (Old furnace)

ฉนวนกันความร้อนโดยทั่วไปหมายถึง วัตถุหรือวัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านใด ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุใดๆ หรือการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ระหว่างวัตถุสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นมี 3 วิธี โดยอาจเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายๆวิธีพร้อมกันได้แก่

(1) การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) คือ การส่งถ่ายพลังงานความร้อนโดยที่มีตัวกลางเป็นตัวนำความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะผ่านสารตัวกลางทางด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยส่งผ่านความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่องกัน การนำความร้อนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในสารตัวกลางที่เป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านสารตัวกลางแบบนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law)

(2) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน และการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนจึงมักมักเกิดขึ้นในบรรยากาศและมหาสมุทร รวมทั้งภายในโลก และดวงอาทิตย์

(3) การแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยมีต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -273°C หรือ 0 K (เคลวิน) ย่อมมีการแผ่รังสี วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น

คุณสมบัติของฉนวนความร้อนที่ดีฉนวนความร้อนจะต้องเลือกใช้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์กับงาน และตามชนิดของฉนวน ดังนี้

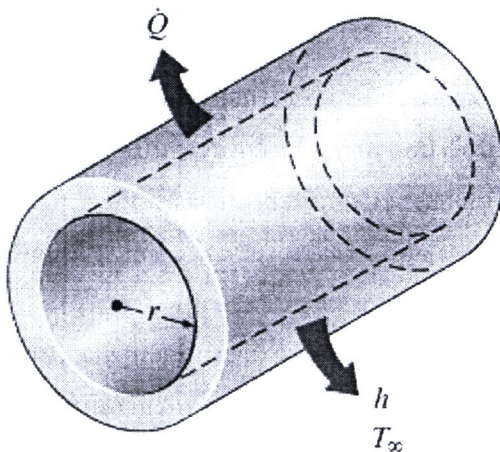
- ควรมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อย
- มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำ
- มีความคงทนต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดี

- ง. มีอัตราการดูดซับความชื้นต่ำ
- จ. สามารถต้านการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะทางเคมี
- ฉ. มีความคงตัวสูง เปลี่ยนรูปได้ยาก
- ช. มีความทนต่อการติดไฟได้ดี
- ซ. ใช้กับระดับอุณหภูมิที่กว้าง
- ณ. ติดตั้งเพื่อใช้งานได้สะดวก
- ญ. มีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการป้องกันการสูญเสียความร้อนของเตาเผาเก่าซึ่งทำหน้าที่เหมือนท่อนำไอเสียร้อนไปใช้ในการอบแห้งขนอ้อย โดยจะพิจารณาการนำความร้อนของเตาเผาเก่า ดังนี้

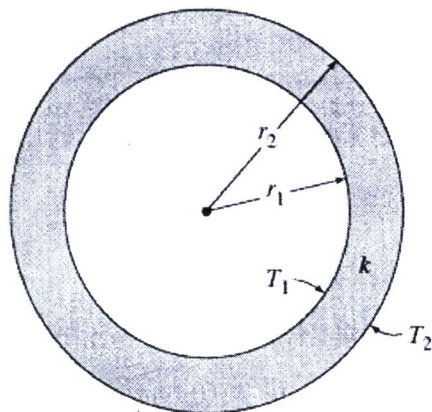
5.1.1 การนำความร้อนภายในทรงกระบอก (Heat Conduction in Cylinders) [29]

เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.1 เป็นการนำความร้อนของท่อน้ำร้อนจะเป็นแบบคงที่ และความร้อนจากน้ำร้อนจะเกิดการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศโดยผ่านผนังของท่ออย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาจากรูปท่อที่มีความหนาไม่มาก และมีพื้นที่กั้นของไหล 2 ชนิดระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ และมีความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันของไหล 2 ชนิด การกระจายอุณหภูมิจะเป็นไปในแนวรัศมีของท่อ จากนั้นการกระจายอุณหภูมิระหว่างของไหลในท่อและนอกท่อจะเกิดการคงที่ จากนั้นการถ่ายเทความร้อนอยู่ในสภาวะคงที่ สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อนั้นสามารถใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคงที่ กรณี 1 มิติ (Steady and One Direction Heat Transfer) ซึ่งการกระจายอุณหภูมิภายในผิวท่อจะเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีเท่านั้น หรือการกระจายอุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันกับรัศมีเท่านั้น ($T = T(r)$)



ภาพที่ 5.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นของท่อน้ำร้อน โดยความร้อนจะเกิดการถ่ายเทสู่อากาศภายนอกในแนวรัศมี และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ 1 มิติ

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบคงที่นั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผิวท่อนั้นจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง และจะไม่ขึ้นอยู่กัเวลา นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนจากของไหลให้กับท่อ จะเท่ากับอัตรา การสูญเสียความร้อนของท่อให้กับสิ่งแวดล้อม หรือจะกล่าวได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทรงกระบอก นั้นจะมีค่าคงที่ ($\dot{Q}_{cond,cylinder} = Const$)



ภาพที่ 5.2 ท่อทรงกระบอกยาวที่มีรัศมีภายนอก r_2 และภายใน r_1 อุณหภูมิผิวด้านใน T_1 และด้านนอก T_2

เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.2 ท่อทรงกระบอกที่มีความยาวมีรัศมีภายในและภายนอกเป็น r_1 และ r_2 ความยาว L ค่าการนำความร้อนของท่อทรงกระบอก k อุณหภูมิผิวของท่อด้านในและด้านนอก T_1 และ T_2 ตามลำดับ สำหรับการนำความร้อนที่เกิดขึ้นแบบ 1 มิติ ผ่านท่อทรงกระบอก จากนั้นใช้สมการการนำความร้อน ของฟูเรียร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อทรงกระบอกดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{cond,cylindrical} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (5.1)$$

โดยพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อทรงกระบอกคือ $A = 2\pi rL$ จากนั้นอินทิเกรตสมการ ที่ (5.1) โดยกำหนดให้อินทิเกรตจาก $r = r_1$ ถึง $r = r_2$ และ $T(r_1) = T_1$ และ $T(r_2) = T_2$ ดังนั้น

$$\int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} dr = - \int_{T=T_1}^{T_2} k dT \quad (5.2)$$

จากนั้นแทนค่า $A = 2\pi rL$ ในสมการที่ (5.2) และอินทิเกรตจะได้สมการเพื่อหาอัตราการ ถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอกดังนี้

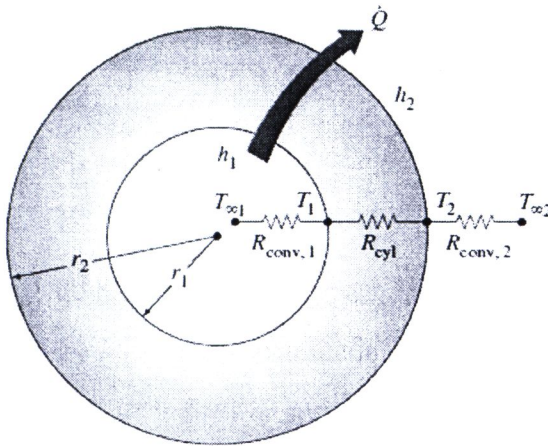
$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (5.3)$$

จากนั้นจัดรูปสมการที่ (5.3) ใหม่ จะได้

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cyl}} \quad (5.4)$$

$$\text{โดยที่ } R_{cyl} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (5.5)$$

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบคงที่ 1 มิติ ของท่อทรงกระบอกที่มีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวท่อด้านในและด้านนอก โดยที่ของเหลวด้านในและด้านนอกมีอุณหภูมิ $T_{\alpha 1}$ และ $T_{\alpha 2}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในและด้านนอกต่อคือ h_1 และ h_2 ดังแสดงในรูปที่ 3 วงจรการต้านทานความร้อนในกรณีดังกล่าวจะประกอบไปด้วยการนำความร้อน และการพาความร้อน 2 ด้าน เป็นแบบอนุกรม ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงที่สามารถหาได้จากสมการดังนี้



$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cyl} + R_{conv,2}$$

ภาพที่ 5.3 วงจรความต้านทานความร้อนของท่อทรงกระบอกมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ภายในและนอกท่อทรงกระบอก

$$\dot{Q} = \frac{T_{\alpha 1} - T_{\alpha 2}}{R_{total}} \quad (5.6)$$

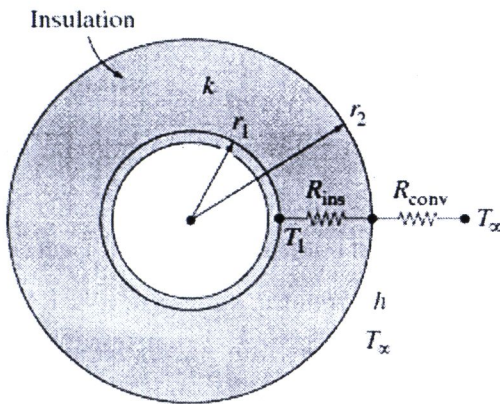
$$\text{โดยที่ } R_{total} = R_{conv,1} + R_{cyl} + R_{conv,2} \quad (5.7)$$

$$R_{total} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} \quad (5.8)$$

5.1.2 รัศมีวิกฤติของฉนวนกันความร้อน (Critical Radius of Insulation)

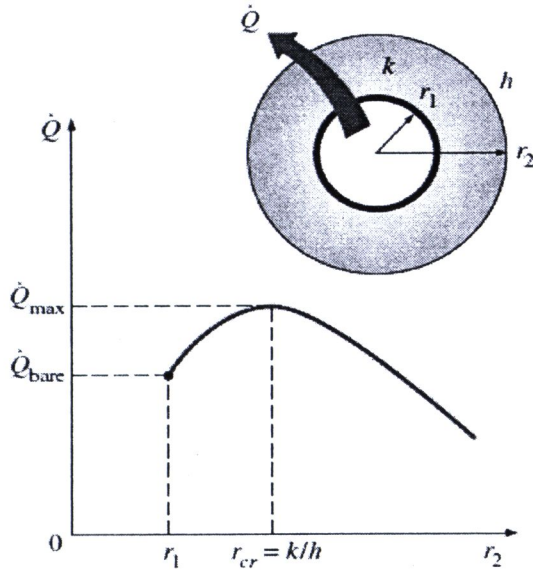
เมื่อพิจารณาท่อทรงกระบอกที่มีรัศมีด้านนอกเท่ากับ r_1 และมีอุณหภูมิที่ผิวท่อเท่ากับ T_1 ภาพที่

5.4 และท่อทรงกระบอกมีการหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยที่ฉนวนมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ k และมีรัศมีด้านนอกเท่ากับ r_2 และมีการสูญเสียความร้อนจากท่อทรงกระบอกให้กับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเท่ากับ T_∞ และมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ h ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อหุ้มฉนวนสู่สิ่งแวดล้อมสามารถหาได้จากสมการดังนี้



ภาพที่ 5.4 ท่อทรงกระบอกที่มีการหุ้มฉนวน และบริเวณผิวด้านนอกฉนวนจะเกิดการพาความร้อนและจะมีวงจรความต้านทานความร้อนเกิดขึ้น

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{ins} + R_{conv}} \quad (5.9)$$



ภาพที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในฉนวน ในแนวรัศมีของท่อทรงกระบอก

$$\text{โดยที่} \quad R_{ins} = \frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi k L} \quad (5.10)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h(2\pi r_2 L)} \quad (5.11)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (5.10) และ (5.11) ลงในสมการ (5.9) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่บรรยากาศภายนอกสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\alpha}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k} + \frac{1}{h(2\pi r_2 L)}} \quad (5.12)$$

การเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศของท่อทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิ T_1 และมีการหุ้มฉนวนด้านนอก ซึ่งจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์กับรัศมีของฉนวนดังภาพที่ 5.5

จากภาพที่ 5.5 พบว่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ($\dot{Q}_{max}$) จะเกิดขึ้นเมื่อฉนวนมีรัศมีเท่ากับรัศมีวิกฤติของฉนวนกันความร้อน (Critical Radius of Insulation, $r_{critical, cylinder}$) ซึ่งรัศมีวิกฤติของการหุ้มฉนวนนั้นสามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (5.12) เทียบกับรัศมี r_2 เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ 5.13

$$\frac{d\dot{Q}}{dr_2} = \frac{T_1 - T_\alpha}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h(2\pi r_2 L)}} = 0 \tag{5.13}$$

จากสมการที่ (5.13) นั้นจะทำให้ได้ค่ารัศมีวิกฤติของการหุ้มฉนวนดังสมการต่อไปนี้

$$r_{critical_cylinder} = \frac{k}{h} \tag{5.14}$$

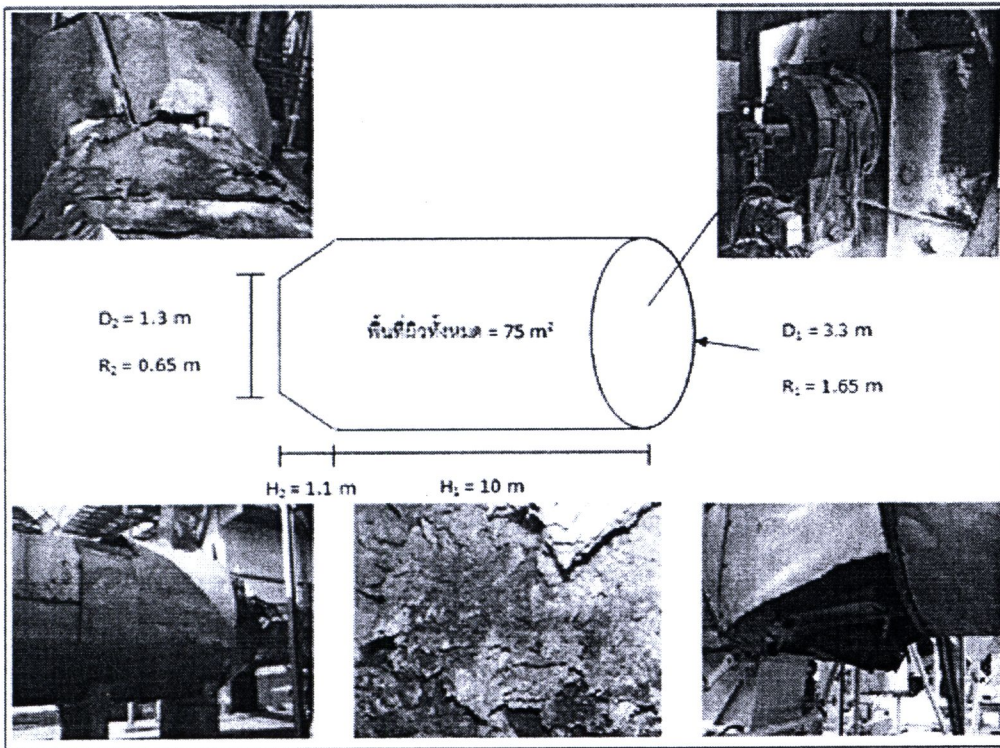
เมื่อ รัศมี $r_i < r_{cri}$ อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังทรงกระบอกจะมีลักษณะเพิ่มขึ้น และเมื่อ

รัศมี $r_i = r_{cri}$ จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังทรงกระบอกจะมีค่าสูงสุด ($\dot{Q}_{max}$) และในกรณี $r_i > r_{cri}$ อัตราการถ่ายเทความร้อนของถังทรงกระบอกจะมีค่าลดลงตามลำดับดังภาพที่ 5.5

5.1.3 การหาขนาดความหนาของฉนวนหุ้ม

วิธีการลดความสูญเสียความร้อนที่เตาเผาเก่าที่เหมาะสมที่สุด คือ การต่อท่อตรงจาก Cyclone ไปส่วนที่ไซ้อบแห้งชานอ้อยโดยตรงเนื่องจากเตาเผาเก่า (Old furnace) ไม่ได้ใช้งานแล้ว แต่ทางโรงงานต้องการรักษาไว้ใช้งานในกรณีที่ฝุ่นชานอ้อยไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จึงทำการแก้ไขโดยการหุ้มฉนวน

ขณะนี้โรงงานใช้ฉนวน SSG ของตราช้าง รุ่น HTIG3375 เป็นใยแก้ว ความหนาแน่น 38 kg/m³ ความหนา 50 mm และหุ้มชั้นนอกด้วยด้วยอะลูมิเนียม ใช้งานมาแล้ว 15 ปี ทำให้อะลูมิเนียมบางส่วนชำรุด และตัวใยแก้วมีลักษณะเปื่อยยุ่ย เมื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิวที่บริเวณหนาฉนวน (ภาคผนวก-ค.) พบว่าใกล้เคียงกับส่วนที่ยังไม่หุ้มฉนวนจึงคาดว่าฉนวนน่าจะหมดสภาพการใช้งานแล้ว และต้องการให้หุ้มฉนวนปิดบริเวณส่วนที่ยังไม่มีการหุ้ม ดังภาพที่ 5.6 เตาเผาเก่าก่อนการหุ้มฉนวน



ภาพที่ 5.6 เตาเผาเก่าก่อนการหุ้มฉนวน

$$\text{พื้นที่ผิวทั้งหมด } A = \pi(r_1)^2 + 2\pi h_1 + \frac{1}{3} \left(h_2 \left(\pi(r_1 + r_2) \left(\sqrt{(h_2)^2 + (r_1 - r_2)^2} \right) \right) \right) \quad (5.15)$$

เนื่องจากเตาเผาเก่ามีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกดังนั้นจึงพิจารณาหาค่าความหนาของฉนวนหุ้มตามหลักสมการของสูตรการถ่ายเทความร้อนแบบทรงกระบอก จึงกำหนดสมมติฐานดังนี้

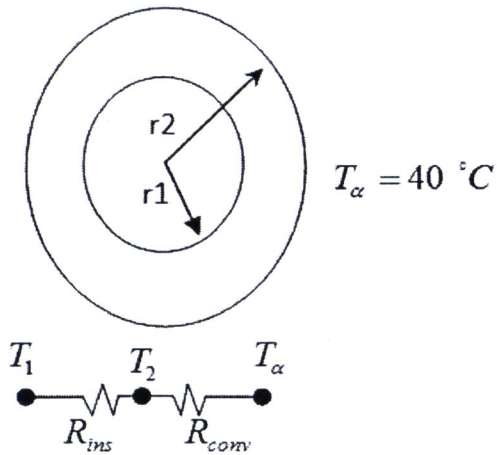
- ก. เป็นการนำความร้อนใน 1 มิติพิกัดทรงกระบอกในแนวรัศมี ภายใต้สภาวะคงตัว
- ข. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านนอกท่อก๊าซร้อนเป็นแบบการพาความร้อนแบบอิสระร่วมกับการแผ่รังสี

ค. สภาพค่านำความร้อนมีค่าคงที่

ง. ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในตัวกลาง

จ. กำหนดให้หลังจากหุ้มฉนวนแล้วอุณหภูมิพื้นผิวเป็น 60 °C

เมื่อนำข้อมูลจากการตรวจวัดเมื่อ วันที่ 10 เมษายน 2553 เวลา 14.00 น. ที่ความเร็วรอบอินเวอร์เตอร์ 2500 รอบ พบว่ามีอุณหภูมิภายในเตาเผาเก่าเท่ากับ 330.60 °C อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตาเผาเก่าเท่ากับ 218.40 °C อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 40 °C (ภาคผนวก-ค.) สามารถเขียนเป็นลักษณะของวงจรด้านทานความร้อนได้ดังภาพที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 ลักษณะของวงจรต้านทานความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของทองก๊าซร้อนสามารถหาได้จาก

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_\alpha}{R_{total}} = \frac{T_1 - T_\alpha}{R_{ins} + R_{conv}} \quad (5.16)$$

หรือ

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{ins}} = \frac{T_2 - T_\alpha}{R_{conv}} \quad (5.17)$$

การแผ่รังสีความร้อน

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \sigma A (T_2^4 - T_\alpha^4) \quad (5.18)$$

โดยพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จาก

$$A = 2\pi r_2 L \quad (5.19)$$

ค่าคงที่ Stefan Bozman มีค่าเท่ากับ

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

การพาความร้อนแบบอิสระ

$$\text{Reyleigh number } R_{aD} = \frac{g\beta(T_2 - T_\alpha)D^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr} \quad (5.20)$$

$$\text{Nusselt number } N_U = \left(0.6 + \frac{0.387(R_{aD})^{1/6}}{\left(1 + (0.559/\text{Pr})^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (5.21)$$

$$\text{Heat transfer coefficient } h = \frac{k}{D} \cdot N_u \quad (5.22)$$

$$\text{โดยที่ } D = 2r_2 \quad (5.23)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาอิสระสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \frac{k}{2r_2} \cdot N_U A (T_2 - T_\alpha) \quad (5.24)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของท่อจึงมีค่าเท่ากับ

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_2^4 - T_\alpha^4) + \frac{k}{2r_2} \cdot N_U \cdot A (T_2 - T_\alpha) \quad (5.25)$$

จากนั้นแทนสมการที่ 4 ในสมการที่ 10

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \varepsilon \sigma (2\pi r_2 L) (T_2^4 - T_\alpha^4) + \frac{k}{2r_2} \cdot N_U \cdot (2\pi r_2 L) (T_2 - T_\alpha) \\ \dot{Q} &= \varepsilon \sigma (2\pi r_2 L) (T_2^4 - T_\alpha^4) + k \cdot N_U \cdot (\pi L) (T_2 - T_\alpha) \end{aligned} \quad (5.26)$$

สมการที่ 5.26 เป็นสมการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของท่อก๊าซร้อนเมื่อทำการหุ้ม

ฉนวนแล้ว

ตัวแปรที่ใช้แทนค่า

รัศมีเตาเผาเก่าที่ต้องการหุ้มฉนวน

$$r_1 = 1.65 \text{ m.}$$

ค่าการนำความร้อนของฉนวน

$$k = 0.032 \text{ W / m.K}$$

อุณหภูมิผิวเตาเผาเก่าที่ต้องการหุ้ม

$$T_1 = 218 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

อุณหภูมิผิวฉนวนด้านนอกที่ต้องการ

$$T_2 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ความยาวท่อที่ต้องการหุ้ม

$$L = 11 \text{ m.}$$

อุณหภูมิอากาศบรรยากาศ

$$T_{\alpha} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ค่าคงที่ Stefan bozman

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

ค่า Emissivity ของผิวฉนวนด้านนอก

$$\epsilon = 0.5$$

ค่า Prandtl number

$$Pr = 0.7268$$

Kinematic Viscosity

$$\nu = 1.798 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

หาค่า Reyleigh number โดยใช้สมการที่ 5.20

$$R_{aD} = \frac{g\beta(T_2 - T_{\alpha})D^3}{\nu^2} \cdot Pr$$

แทนค่า $D = 2r_2$

$$\beta = \frac{1}{(273 + T_f)}$$

และอุณหภูมิที่ใช้หาค่าสมบัติของอากาศสามารถหาได้จาก

$$T_f = \frac{T_2 + T_{\alpha}}{2}$$

หาค่า Reyleigh number โดยใช้สมการที่ 5.20

$$R_{aD} = \frac{(9.81)(0.00309)(60 - 40)(2r_2)^3}{(0.00001798)^2} \cdot (0.7228) = 1.084 \times 10^{10} (r_2^3) \quad (5.27)$$

หาค่า Nusselt number โดยใช้สมการที่ 5.21

$$N_U = \left(0.6 + \frac{0.387 \left((1.084 \times 10^{10}) (r_2^3) \right)^{1/6}}{\left(1 + (0.559 / 0.7268)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2$$

$$N_U = \left(0.6 + \frac{18.206 (r_2^{1/2})}{1.2} \right)^2$$

$$N_U = (0.6 + 15.15 r_2^{1/2})^2 \quad (5.28)$$

จากนั้นจัดรูปสมการที่ 5.28 ใหม่จะได้เป็นจะได้เป็นสมการที่ 5.29

$$N_U = (0.36 + 18.6 r_2^{1/2} + 229.522 r_2) \quad (5.29)$$

จากเงื่อนไขการคำนวณกำหนดให้อุณหภูมิผิวฉนวนด้านนอก (T_2) เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการคำนวณจะใช้วิธี ซึ่งจะเริ่มจากการกำหนดความหนาฉนวนขึ้นมาจากนั้นนำไปแทนค่าในสมการ 5.26 และ 5.29 โดยใช้โปรแกรม EES (Engineering Equation Solution)

ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม ($\dot{Q}$) ของท่อก๊าซร้อนที่มีการหุ้มฉนวน โดยลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกำหนดให้เป็นการพาความร้อนแบบอิสระร่วมกับการแผ่รังสี (สมการที่ 5.26) จากนั้นจึงสามารถคำนวณอุณหภูมิของฉนวนด้านนอกได้เปรียบเทียบกับ กระทั่งได้ค่า r_2 ที่ทำให้อุณหภูมิฉนวนด้านนอก (T_2) มีค่าเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิฉนวนด้านนอก (T_2) สามารถหาได้จากสมการที่ 5.17 ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{ins}}$$

$$T_2 = T_1 - \dot{Q} R_{ins} \quad (5.30)$$

ตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาความหนาของฉนวนที่เหมาะสมโดยวิธี Trial and error

r2 (m)	Q (W)	R1 (m)	t (m)	Rinsu	T2
1.68	422.6	1.65	0	0	218
1.69	9156	1.65	0.01	0.00268472	193.4187
1.7	9209	1.65	0.02	0.005353602	168.6986825
1.71	9261	1.65	0.03	0.00800683	143.8487517
1.72	9314	1.65	0.04	0.010644587	118.8563202
1.73	9366	1.65	0.05	0.013267052	93.74078832
1.74	9419	1.65	0.06	0.015874403	68.47900021
1.7441	9424	1.65	0.0641	0.016939088	58.36603679
1.75	9471	1.65	0.07	0.018466811	43.10082961

จากตารางที่ 5.1 พบว่าความหนาของฉนวนที่เหมาะสมและทำให้อุณหภูมิฉนวนด้านนอกมีค่าเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นั้นความหนามีค่าเท่ากับ 0.0641 เมตร(6.41 เซนติเมตร) ซึ่งจะทำให้ได้อุณหภูมิเท่ากับ 58.3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากฉนวนใยแก้ว ความหนาแน่น 38 kg/m³ มีขนาดผลิตหนา 50 mm. และ 75 mm ดังนั้นจึงเลือกใช้ฉนวนใยแก้ว ของ SSG ของตราช้าง รุ่น HTIG3375 ค่าสภาพการนำความร้อน 0.032 W/m.K ความหนาแน่น 38 kg/m³ ความหนา 75 mm. ขนาดแผ่นละ 4x8 ฟุต หรือ 2.97 m²

5.1.4 การคำนวณหาความร้อนที่สูญเสียเมื่อไม่หุ้มฉนวน [24]

$$Q_b = \pi \times 10^{-3} \times d \times h \times (T_s - T_a)$$
 (5.31)

$$h = h_c + h_r$$
 (5.32)

$$h_c = (7.592 \times (\frac{T_s - T_a}{d})^{0.25})$$
 (5.33)

$$h_r = (\frac{5.669}{T_s - T_a}) \times \varepsilon \times [(\frac{T_s + 273}{100})^4 - (\frac{T_a + 273}{100})^4]$$
 (5.34)

โดยที่

Q_b = ความร้อนสูญเสียจากท่อเปลือย หน่วย w/m

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน หน่วย w/m/k



- d = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ หน่วย mm
 T_s = อุณหภูมิผิวท่อหน่วย °C
 T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมหน่วย °C
 ε = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (แผ่นเหล็กกริดเหนียว 0.56)

5.1.3 การคำนวณความร้อนที่สูญเสียเมื่อหุ้มฉนวน [24]

$$Q_{Inst} = \pi \times 10^{-3} \times d_2 \times U \times (T_s - T_a) \quad (5.35)$$

$$U = \frac{1}{RS + (\frac{1}{h})} \quad (5.36)$$

$$h = h_c + h_r \quad (5.37)$$

$$h_c = 7.592 \times \left(\frac{T_2 - T_a}{d_2} \right)^{0.25} \quad (5.38)$$

$$h_f = \frac{5.669}{T_2 - T_a} \times \varepsilon \times \left[\left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (5.39)$$

$$RS = \frac{d_2}{2000} \times \frac{1}{k} \times \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (5.40)$$

โดยที่

- Q_{Inst} = ความร้อนสูญเสียที่สูญเสียผ่านฉนวน หน่วย w/m
 d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของเมื่อหุ้มฉนวนแล้วใน หน่วย mm
 t_2 = อุณหภูมิผิวของฉนวน ในการคำนวณรอบแรกใช้ สมการที่ 5.3 และ 5.4 เมื่อหุ้มฉนวน 75 mm
 K = ค่า Conductivity ของฉนวน หน่วย w/m²/K

$$\text{ความร้อนที่ประหยัดได้ต่อความยาว} \quad Q_{save} = Q_b - Q_{Inst} \quad (5.41)$$

$$\text{ความร้อนที่ประหยัดได้ทั้งหมด} \quad Q_{save2} = Q_{save} \times L \quad (5.42)$$

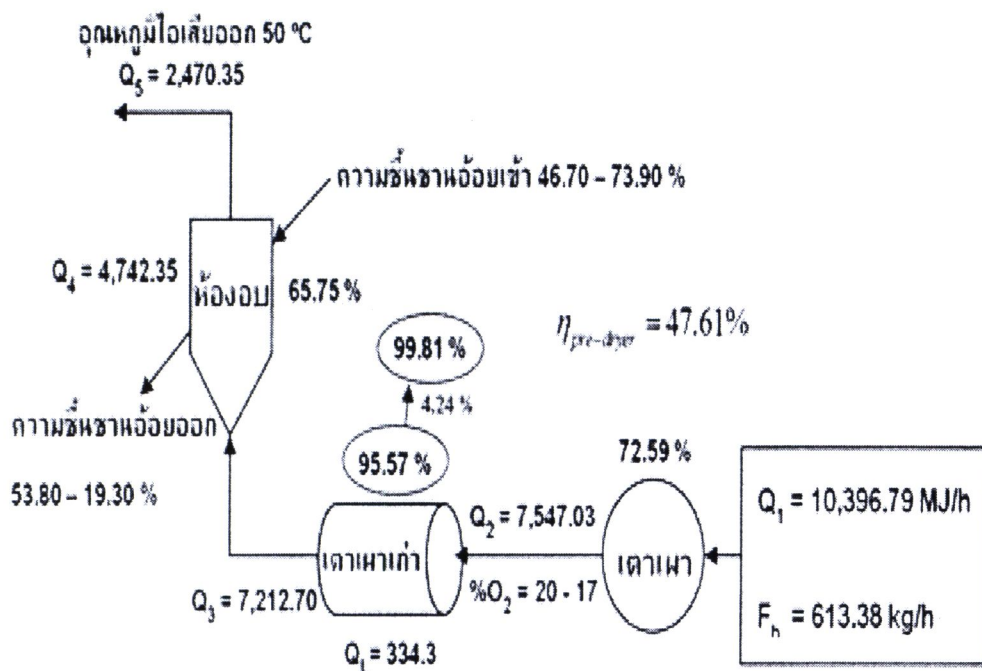
$$\text{ความร้อนที่ประหยัดได้ใน 1 ปี} \quad Q_{save3} = \frac{Q_{save2} \times 24 \times 6 \times 4 \times 10}{277.7778} \quad (5.43)$$

$$\text{ค่าความร้อนค่าของฝุ่นซานอ้อย} \quad 1 \text{ kg} = 16.95 \text{ MJ/kg}$$

ปริมาณฝุ่นซ่านอ้อยที่ประหยัดได้ $Q_{save4} = \frac{Q_{save3}}{16.95}$ กิโลกรัมต่อปี (5.44)

มูลค่าที่ประหยัดได้ $Q_{save5} = Q_{save4} \times 0.3$ บาท/ปี (5.45)

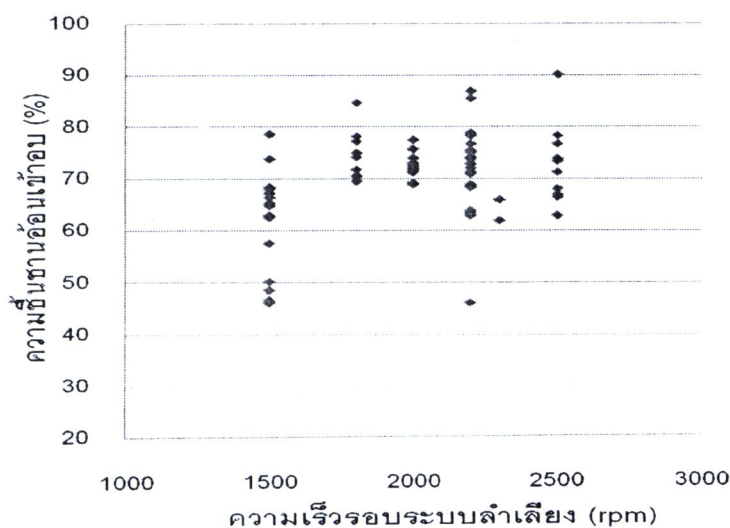
จากภาคผนวก-ข สามารถคาดการณ์ผลประหยัดที่จะเกิดขึ้นจากการหุ้มฉนวนเตาเผาเก่า จากประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยการส่งผ่านความร้อนของเตาเผาเก่าหลังหุ้มฉนวนเป็น 99.81 % จากเดิม 99.57 % ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 4.24 % เมื่อมีปริมาณความร้อนก๊าซไอเสียเข้าเฉลี่ย 7,547.03 MJ/h คิดเป็นปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้เฉลี่ย 320 MJ/h หรือ 18.88 kg/h คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิงเข้า 3 % เมื่อมีเชื้อเพลิงเข้าเฉลี่ย 613.38 kg/h (ราคาฝุ่นซ่านอ้อย 0.3 บาท/กิโลกรัม และค่าความร้อนต่ำของซ่านอ้อย 16.95 MJ/kg.) คิดเป็นมูลค่าประหยัดต่อปี 40,780.8 บาท (เวลาการทำงาน 7,200 ชั่วโมงต่อปี) ระยะเวลาคืนทุน 1.19 ปี (คำนวณ 32,402 บาท)



ภาพที่ 5.8 ภาพสมดุลพลังงานจากการคาดการณ์ผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการหุ้มฉนวน

5.2 การพัฒนาระบบอัตโนมัติในการปรับรอบความเร็วของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อยตามปริมาณความชื้นของชานอ้อยก่อนอบ

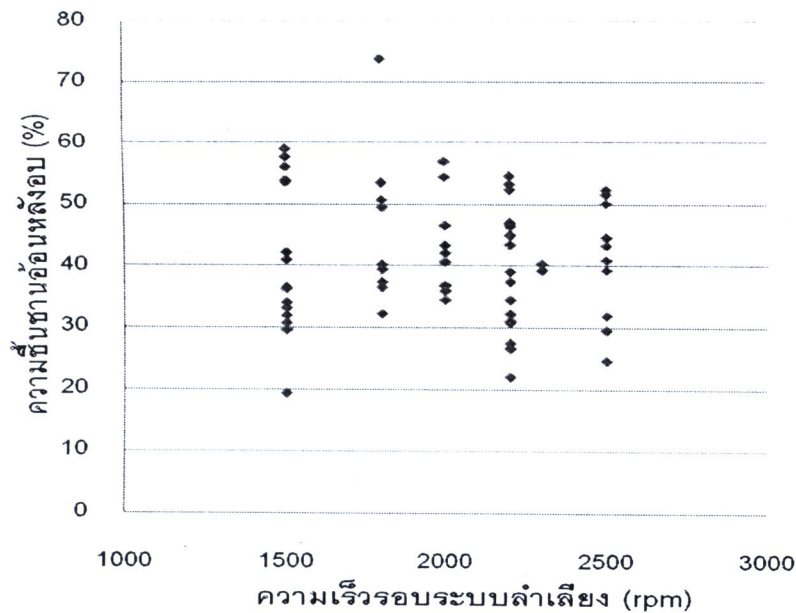
เมื่อนำข้อมูลที่เก็บในช่วงวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึงวันที่ 10 เมษายน 2553 มาวิเคราะห์พฤติกรรม การปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยเข้าเตาเผาพบว่า พบว่าพนักงานยังอาศัยประสบการณ์ในการกำหนดค่าความเร็วรอบของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับค่าความชื้นเข้าของชานอ้อยก่อนอบ อีกทั้งยังใช้เวลาการปรับที่ไม่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถควบคุมเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace) ให้ผลิตก๊าซไอเสียที่จะไปให้ในช่วงการอบแห้งจึงทำให้ในบางครั้งมีปริมาณความร้อนไม่เพียงพอหรือเกินความจำเป็น เป็นสาเหตุให้ความชื้นของชานอ้อยหลังอบไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้สูญเสียเชื้อเพลิงในการอบแห้งชานอ้อยเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟพบความสัมพันธ์ (ภาคผนวก) ดังภาพ



ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบระบบลำเลียงกับความชื้นชานอ้อยก่อนอบ

จากภาพที่ 5.9 จะพบว่า การปรับรอบของระบบลำเลียงมีความไม่แน่นอนและไม่เหมาะสมกับการอบแห้งชานอ้อย เช่น ที่ความชื้นของชานอ้อย 80 % (Moisture content) มีการปรับความเร็วรอบระบบลำเลียงตั้งแต่ 1,500 ถึง 2,300 rpm. ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการใช้เชื้อเพลิงเกินความจำเป็นและไม่เหมาะสมกับภาระความร้อนที่ต้องใช้ในการอบแห้งชานอ้อย

จากภาพที่ 5.10 จะพบว่า ที่ความเร็วรอบระบบลำเลียงค่าหนึ่งจะมีความชื้นของชานอ้อยหลังอบอยู่ระหว่าง 20 ถึง 70 % ซึ่งในขั้นตอนการอบแห้งขั้นต้นนี้จะต้องการความชื้นของชานอ้อยหลังอบ 50 % ก่อนที่จะนำไปอบให้เหลือเพียง 2 % ในขั้นตอนอบแห้งหลัก (Main-drying) เพื่อนำไปผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดต่อไป ดังนั้นเพื่อให้มีการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับการอบแห้งชานอ้อยจึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของระบบลำเลียงกับความชื้นของชานอ้อยก่อนอบ



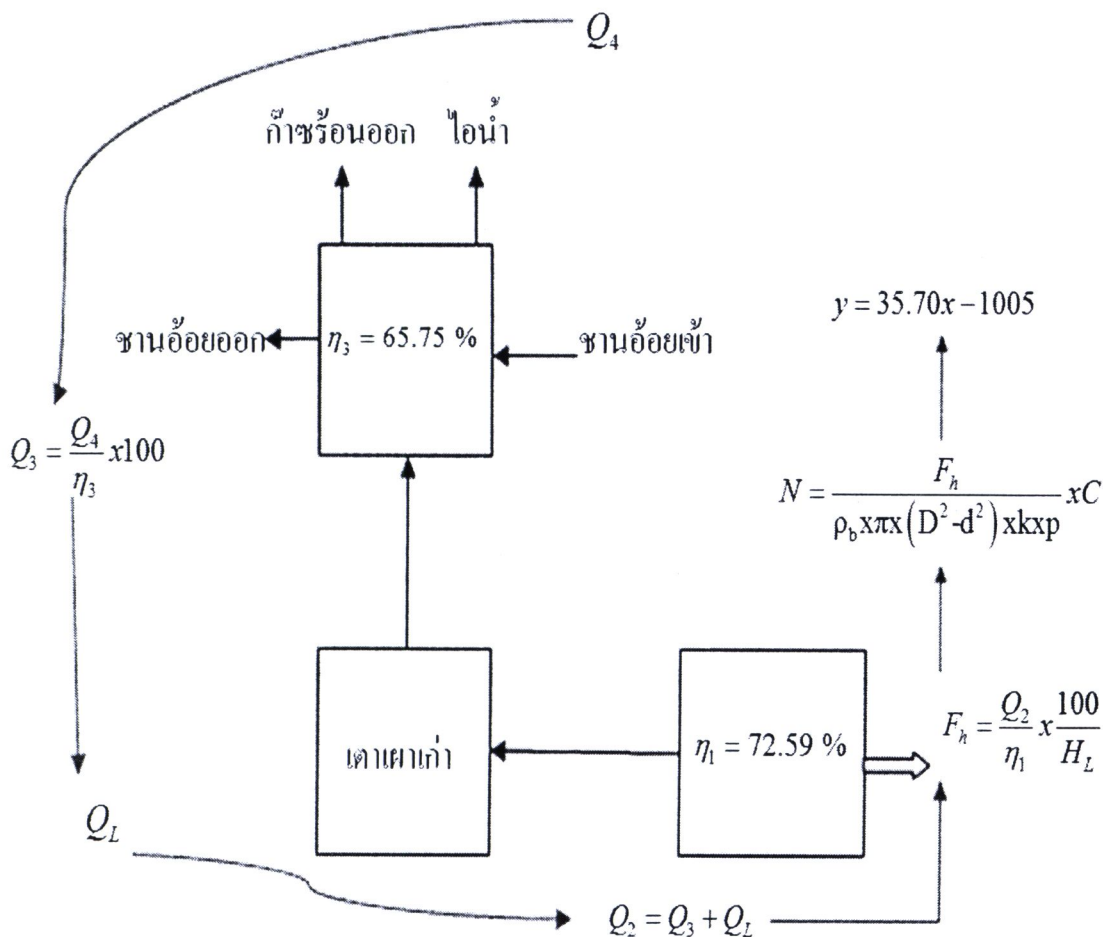
ภาพที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบระบบลำเลียงกับความชื้นชานอ้อยหลังอบ

5.2.1 การคำนวณหาความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับความชื้นของชานอ้อยก่อนอบ

ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับความชื้นชานอ้อยเข้าอบจึงได้กำหนดสมมุติฐานไว้ ดังนี้

- ก. ค่าความชื้นเข้าตั้งแต่ 95 – 55 % Moisture content และให้ค่าความชื้นออกเท่ากับ 50 % (กำหนดโดยโรงงานต้องการให้ชานอ้อยหลังอบด้วยกระบวนการ pre-drying มีความชื้นออก 50 %)
- ข. จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลวันที่ 9-10 เมษายน 2553 พบว่า $\eta_1 = 72.59 \%$ และ $\eta_3 = 65.75 \%$
- ค. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 35 °C

ซึ่งมีขั้นตอนในการพิจารณาหาความเร็วรอบระบบลำเลียงที่เหมาะสม ตามแนวทางของการสมดุลพลังงาน ดังนี้



ภาพที่ 5.11 การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับความชื้นชานอ้อยเข้าอบ

1. คำนวณค่าความร้อนที่ต้องการก่อนเข้าช่วงของการอบจริง (Q_3) จากสมการ ดังนี้

$$Q_3 = \frac{Q_4}{\eta_3} \times 100 \quad (5.46)$$

โดยที่

Q_4 = ค่าความร้อนที่ต้องการในการอบแห้งชานอ้อย

η_3 = ประสิทธิภาพทางความร้อนของช่วงการอบแห้ง

2. การคำนวณค่าความร้อนออกของก๊าซร้อนจริงที่ผลิตจากเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace) (Q_2) จะต้องนำค่าความสูญเสียความร้อนในช่องของเตาเผาเดิมที่ทำหน้าที่เสมือนท่อนำความร้อน มาบวกกับค่าความร้อนที่ต้องการก่อนเข้าช่วงของการอบจริง ซึ่งจะได้

$$Q_2 = Q_3 + Q_L \quad (5.47)$$

3. คำนวณค่าปริมาณงานเข้าจริง (F_h) จากค่าความร้อนไอเสียออกจากเตา (Q_2) หาด้วยประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากงานเข้า (Furnace) และค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงฟืนงานเข้า (H_L) ซึ่งจะได้

$$F_h = \frac{Q_2}{\eta_1} \times \frac{100}{H_L} \quad (5.48)$$

โดยที่

η_1 = ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากงานเข้า

H_L = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงฟืนงานเข้ามีค่าเท่ากับ 16.95 MJ/kg

4. การหาความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมหาได้จากสูตรการขนส่งด้วยสกรู ซึ่งจะได้

$$N = \frac{F_h}{\rho_b \times \pi \times (D^2 - d^2) \times k \times p} \times C \quad (5.49)$$

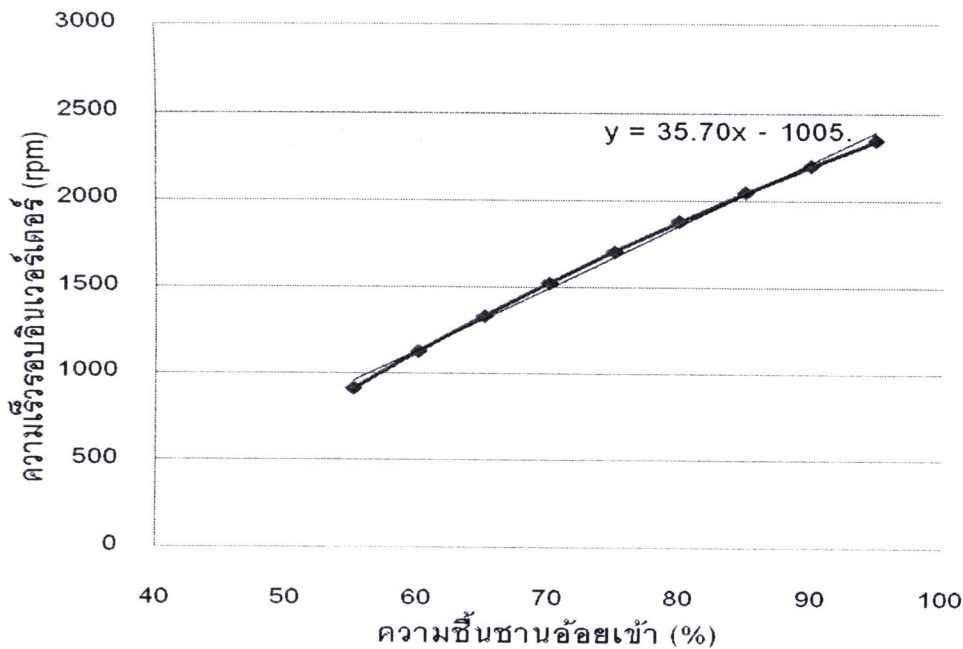
โดยที่ C คือ ค่าคงที่ในการแปลงความเร็วรอบระบบลำเลียงมาเป็นปริมาณกิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6.06 เมื่อนำค่าของความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่คำนวณได้มาเขียนกราฟกับความชื้นงานเข้าช่วง 95 – 55 % จะได้ความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (5.50) และภาพที่ 5.12

$$y = 35.70x - 1005 \quad (5.50)$$

โดยที่

x คือ ความชื้นของงานเข้าก่อนการอบ

y คือ ความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมในการป้อนเชื้อเพลิงฟืนงานเข้า



ภาพที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อยกับความชื้นก่อนอบของชานอ้อยจากการคำนวณ

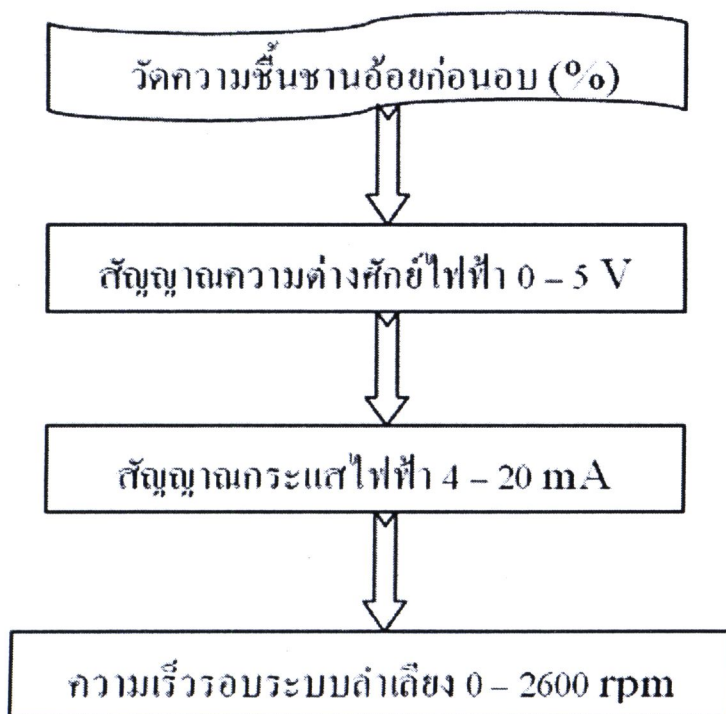
5.2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลประหยัด

การพิจารณาผลประหยัดจากการนำสมการการปรับรอบของระบบลำเลียงตามปริมาณความชื้นก่อนอบของข้อมูลวันที่ 2 เมษายน 2553 เวลา 14.00 น. พบว่า มีความชื้นชานอ้อยเข้าอบ 72.1 % ชานอ้อยหลังอบ 52.4 % มีการปรับความเร็วรอบระบบลำเลียง เท่ากับ 2,200 rpm. (743.49 kg/hr) ซึ่งถ้าพิจารณาจากการคำนวณตามสมการความสัมพันธ์ของปริมาณเชื้อเพลิง (ความเร็วรอบของระบบลำเลียง) กับความชื้นจะพบว่าใช้ความเร็วรอบของระบบลำเลียงเพียง 1,568.97 (534.65 kg/hr) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงมีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็นซึ่ง เมื่อคิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่สูญเสียจะเท่ากับ 208.84 kg/hr

ดังนั้นเพื่อให้มีการปรับรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเข้า จึงควรใช้ระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยในการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงเพื่อช่วยในการลดความสูญเสียเนื่องจากการปรับรอบระบบลำเลียงแบบ Manual

5.2.3 การพัฒนาระบบอัตโนมัติในการปรับรอบความเร็วของระบบลำเลียง

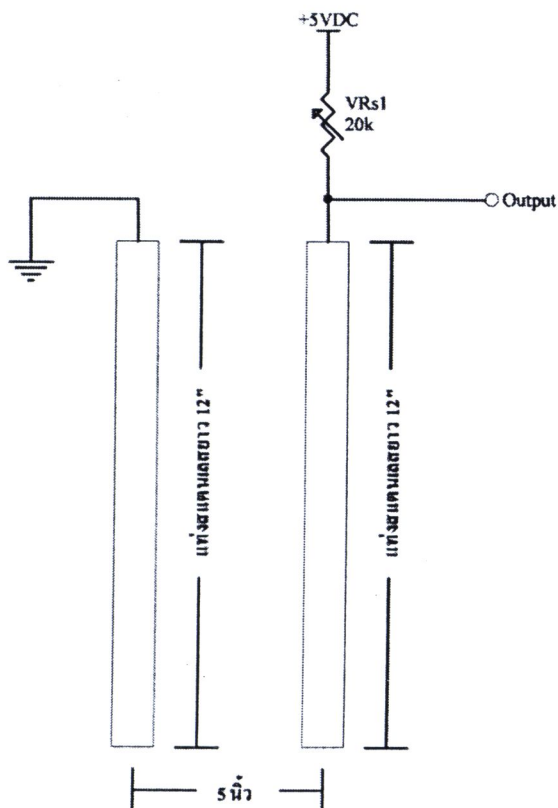
แนวคิดการทำงานของระบบอัตโนมัติประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความชื้นของชานอ้อยก่อนอบและแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ขนาด 0-5 v. และกระแสไฟฟ้า 4-20 mA. ก่อนส่งสัญญาณไปควบคุมระบบลำเลียงเพื่อปรับความเร็วรอบของการป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยตั้งแต่ 0 – 2600 รอบ/นาที ดังภาพที่ 5.13



ภาพที่ 5.13 ขั้นตอนการทำงานของระบบอัตโนมัติ

(1) การออกแบบหัวโพรบวัดความขึ้นของชานอ้อย

ลักษณะของหัวโพรบวัดความขึ้นในชานอ้อยเป็นแท่งสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 มิลลิเมตร ทั้ง 2 แท่งฝังลงไปในชานอ้อยในแนวตั้งลึกประมาณ 6 นิ้ว และระยะห่างระหว่างทั้ง 2 แท่ง ระยะห่าง 5 นิ้ว ทำงานโดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้า +5 V ปลอยจากปลายข้างหนึ่งของโพรบผ่านชานอ้อยที่ทำหน้าที่เสมือนตัวต้านทานไฟฟ้าซึ่งชานอ้อยมีความขึ้นมากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากชานอ้อยมีความขึ้นน้อยก็จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาก ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านชานอ้อยแล้วจะไหลไปสู่อุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความขึ้นหรือตู้ควบคุม เอาต์พุตที่ออกไปยังตู้ควบคุมนั้นเป็นแรงดันประมาณ 0-5 โวลต์ โดยอาศัยหลักการของ วงจรแบ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage Division Circuits or Voltage Divider) ดังภาพที่ 5.14

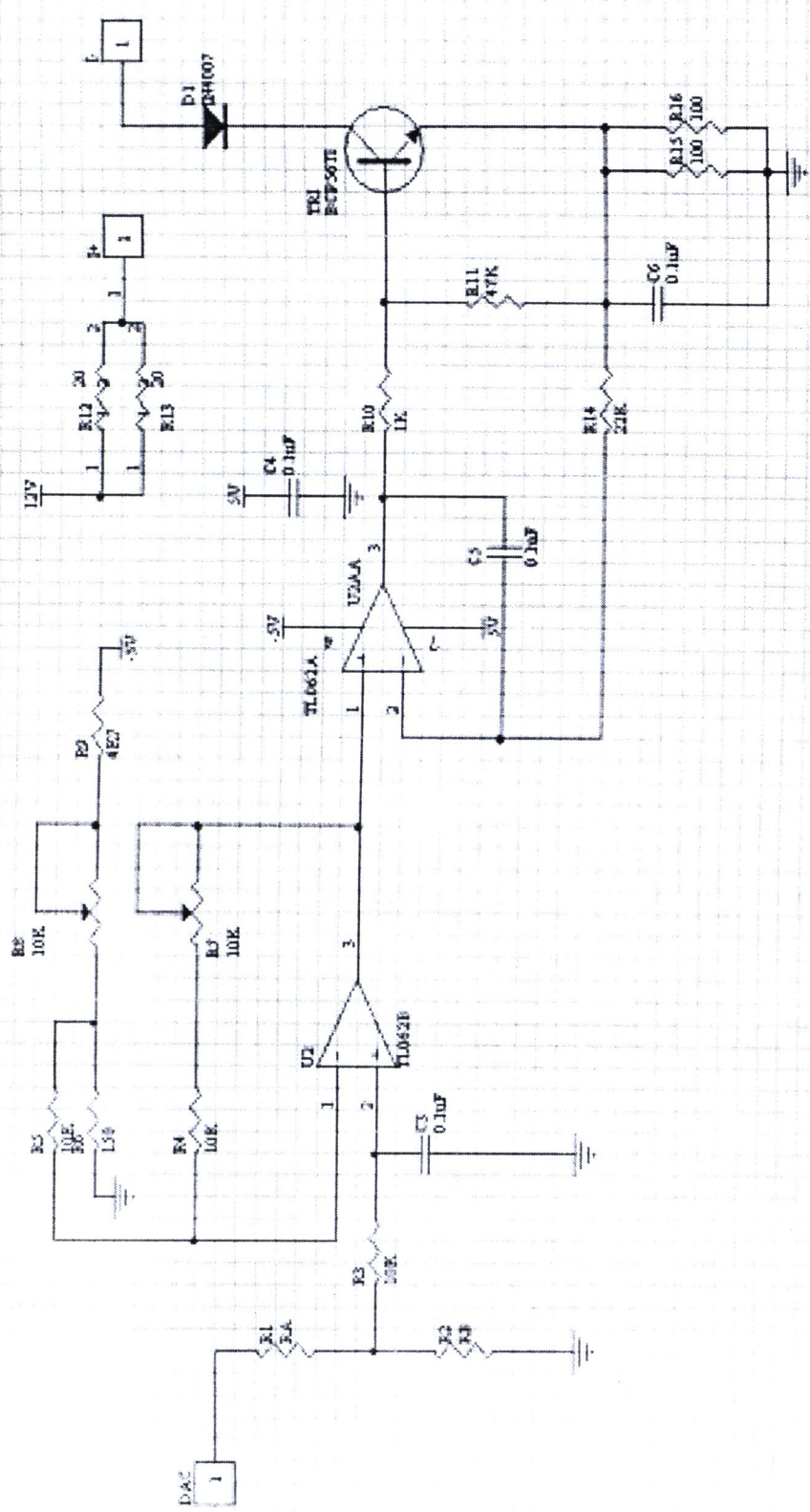


ภาพที่ 5.14 ลักษณะตัวตรวจวัดความชื้นในชานอ้อย [30]

(2) การออกแบบอุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความชื้น

อุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความชื้นจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้า 0-5 v ไปเป็น 4-20 mA เพราะว่าการที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าแบบโวลต์ในระยะไกลจะมีการสูญเสียเนื่องจากระยะทางทำให้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการส่งระยะไกลจึงต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบโวลต์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบกระแสก่อนส่งไปอินเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า 0-5 v. ไปเป็น 4-20 mA. จะใช้แหล่งจ่ายไฟ 3 แหล่ง +5V, -5V, 12 V ในส่วนของ I+ ถ้า Load ดึงกระแสไม่เยอะจะตัด 12 V ออกแล้วแทนด้วย +5 V ได้ ในวงจร R12-R13 จะช่วยป้องกันการจ่ายกระแสเกิน R8 จะปรับ Offset ที่ 4 mA ส่วน R7 เป็นตัวปรับ Gain ของ OPAMP, D1 จะเป็นตัวบังคับทิศทางของกระแสให้ไหลลง TR1 ผ่าน R15-R16 ลง GND ไป แล้วทำการปรับแต่งโดยจ่ายสัญญาณ 0 V จาก ADC หรือ Pot ก็ได้ที่ขั้ว DAC ใน schematic ปรับ R8 จนกระทั่งได้ I+ ประมาณ 4 mA จากนั้นจ่ายสัญญาณ 4-5 V ที่ขั้ว DAC ใน schematic ปรับ R7 (Gain) จนได้ I+ ประมาณ 20 mA อาจจะต้องทำการปรับ R7-R8 หลายครั้งถึงจะได้สัญญาณ 20 mA [31] ดังภาพที่ 5.15



ภาพที่ 5.15 วงจรแปลงสัญญาณ 0 - 5 v. to 4 - 20 mA. [31]