

การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติในการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อย เพื่อประหยัดพลังงาน

สิทธิพร สมทรัพย์¹⁾ และ รัชพล สันติวรการ^{*2)}

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการศึกษาหาประสิทธิภาพการอบแห้งชานอ้อยและศึกษาหาแนวทางลดการใช้เชื้อเพลิงของระบบอบแห้งชานอ้อยโดยได้ดำเนินการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติในการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อยก่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ จากนั้นทำการตรวจวัดความชื้นของชานอ้อยและปริมาณการใช้ฝุ่นชานอ้อยและคำนวณหาประสิทธิภาพและผลการประหยัดพลังงานของระบบ จากการศึกษาพบว่า เมื่อปรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อย (y) ให้เหมาะสมกับความชื้นของชานอ้อย (x) ตามความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น $y = 35.70x - 1005$ จะทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบอบแห้งชานอ้อยเพิ่มขึ้น 8.09 % จากเดิม 45.61 % เป็น 53.70 % คิดเป็นปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้ 1,589.32 MJ/h ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 93.77 kg/h คิดเป็น ร้อยละ 15.29 % ของปริมาณการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด เมื่อราคาฝุ่นชานอ้อยเท่ากับ 0.3 บาท/กิโลกรัม และต้นทุนในการพัฒนาระบบอัตโนมัติ 60,000 บาท จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ 202,543.2 บาท/ปี โดยมีระยะเวลาคืนทุน 0.3 ปี

คำสำคัญ: การอบแห้งชานอ้อย ประสิทธิภาพการอบแห้ง ฝุ่นชานอ้อย ความชื้นชานอ้อย

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 อีเมล: ultimate_2525@hotmail.com

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 อีเมล: ratchaphon@kku.ac.th

^{*} Corresponding Author

The Development of Automatic Control System to Adjust a Cycle Speed of a Bagasse Dust Conveyor System for Energy Saving

Sittiporn Somsap¹⁾ and Ratchaphon Suntivarakon^{*2)}

Abstract

This article presents a study to determine the efficiency of bagasse drying process and to find a way to reduce a fuel consumption of drying process by developing an automatic control system to adjust a cycle speed of a bagasse dust conveyor system. The automatic control system was developed and installed in conveyor system and the cycle speed was adjusted to a suitable humidity of the bagasse. Then, the bagasse moisture content and volume of bagasse dust consumption were measured, and the efficiency of drying and energy saving were calculated. From the study, the result shows that the suitable relation between the cycle speed of the bagasse dust conveyor (y) and the bagasse moisture content (x) was linear equations as $y = 35.70x - 1005$. By using this equation to control and adjust the cycle speed varying with the humidity of the bagasse, the total efficiency of bagasse drying was increased by 8.09 % from 45.61% to 53.70%. This system can save the energy consumption about 1,589.32 MJ/h or 93.77 kg/h, which is 15.29 % of the total fuel consumption. If the price of bagasse dust is 0.3 baht/kg and the investment cost is 60,000 bath, this system can save the cost of energy 202,543.2 baht/year and the payback period will be 0.3 year.

Keywords: Bagasse Drying Process, Drying Efficiency, Bagasse Dust, Bagasse Moisture Content

¹⁾ Graduate Student, Department of Energy Engineering, Khon kaen University, Khon kaen 40000,
Email: ultimate_2525@hotmail.com

^{* 2)} Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Khon kaen University, Khon kaen 40000,
E-mail: ratchaphon@kku.ac.th

^{*} Corresponding Author

1. บทนำ

ปัจจุบันโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยมีขาน้อยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลเหลืออยู่เป็นปริมาณมาก ส่วนใหญ่จะใช้ขาน้อยเป็นเชื้อเพลิงต้มหม้อไอน้ำ (Barroso et al., 2003 และ Kilicaslan et al., 1999) เพื่อผลิตไอน้ำไปใช้ในการแปรรูปน้ำตาลและผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงาน แต่มีโรงงานน้ำตาลบางแห่งเล็งเห็นประโยชน์ในการใช้ขาน้อยเพื่อผลิตแผ่นไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดซึ่งเป็นวัสดุทดแทนไม้ที่ใช้เฉพาะงาน อาทิเช่น ใช้ทำบอร์ดประกาศต่างๆ ใช้ทำผนังกันห้องชั่วคราว ใช้กรุภายในงานเฟอร์นิเจอร์ ใช้กรุเป็นผนังฉนวน ฯลฯ ขาน้อยที่จะนำมาผลิตบอร์ดจะต้องผ่านการอบแห้งขาน้อยขั้นต้น (Pre-drying) โดยทำการอบความชื้นของขาน้อยเริ่มต้นจาก 80% ให้เหลือ 50% ก่อนที่จะนำไปอบให้เหลือเพียง 2 % ในขั้นตอนอบแห้งหลัก (Main-drying) ต่อไปขาน้อยที่ผ่านการอบแล้วจะถูกส่งไปผสมกับกาวและนำไปทำเป็นแผ่น (Forming) แผ่นไม้ที่ได้จะถูกส่งเข้าไปในเครื่องอัดร้อนเพื่อทำการอัดเพิ่มความแข็งแรงด้วยระบบไฮดรอลิกส์ แผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ผ่านการอัดร้อนจะถูกนำไปคลายความร้อนและปรับสภาพของแผ่นไม้ ก่อนที่จะนำไปตัดขนาดและขัดผิวแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดต่อไป ด้วยสาเหตุที่ขาน้อยมีความชื้นค่อนข้างสูงนี้เองทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการลดความชื้นขาน้อยขั้นต้น (Pre-drying) เป็นจำนวนมาก โรงงานผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดจึงมีแนวคิดที่จะนำฝุ่นขาน้อยเหลือทิ้งจากการผลิตแผ่นไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดที่มีอยู่เป็นปริมาณมากมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จึงได้ทำการพัฒนาเตาเผาชีวมวลจากขาน้อย (Furnace) มาผลิตไถ่ก๊าซร้อนเพื่อใช้ในเตาอบแห้งขาน้อยขั้นต้น (Pre-dryer) ทดแทนการใช้ไอน้ำในการอบแห้งจากหม้อไอน้ำของโรงงานน้ำตาลในช่วงฤดูเก็บขาน้อย (นรินพร, 2537) และทดแทนการใช้ไถ่ร้อนจากเครื่องฟน

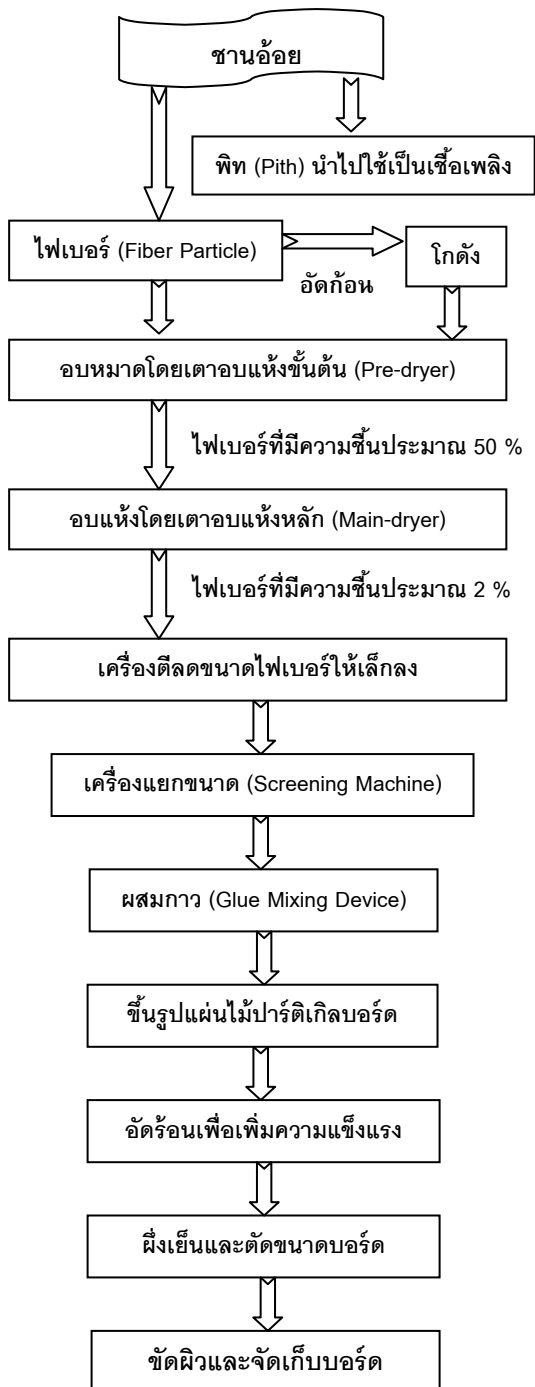
ไฟ นอกฤดูหีบบ่อยทำให้สามารถช่วยประหยัดเชื้อเพลิง
ฟอสซิลในการผลิตได้

ถึงแม้ว่าปัจจุบันได้มีการใช้เตาเผาชีวมวลจากฝุ่น
 ชานอ้อย (Furnace) มาเป็นแหล่งผลิตก๊าซร้อนเพื่อใช้ใน
 การอบแห้งแต่ทางบริษัทก็ยังไม่เคยตรวจวัดและหา
 ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวล และการปรับความเร็ว
 รอบของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยเข้าเตาเผาแต่
 ยังคงอาศัยประสบการณ์ของพนักงานในการกำหนดค่า
 ความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่ใช้ในการอบแห้งทั้งยังมี
 เวลาการปรับที่ไม่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถควบคุมเตาเผา
 ชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace) ให้ผลิตก๊าซร้อนได้ตาม
 ต้องการจึงทำให้ในบางครั้งมีปริมาณความร้อนไม่เพียงพอ
 หรือเกินความจำเป็นจึงเป็นสาเหตุทำให้ความชื้นของชาน
 อ้อยหลังอบไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้สูญเสียเชื้อเพลิง
 ในการอบแห้งชานอ้อยเป็นจำนวนมาก อีกทั้งที่ผ่านมา
 ทางบริษัทไม่ได้มีการตรวจวัดประสิทธิภาพของเตาอบ
 (รุ่นเตว้น, 2546 และ สิริพันธ์, 2547) และไม่ทราบ
 ความสัมพันธ์ของปริมาณเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยกับ
 ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งทำให้ไม่สามารถ
 กำหนดแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบได้
 อย่างเป็นระบบและชัดเจน ตลอดจนไม่ทราบปริมาณการ
 ใช้ฝุ่นชานอ้อยที่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถนำฝุ่นชานอ้อย
 มาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น
 เพื่อให้ทราบวิธีการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
 ของเตาอบและทราบแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ
 ที่เหมาะสมสำหรับลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง
 ชานอ้อยขั้นต้น (Pre-drying) คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิจัย
 โครงการนี้ขึ้น

2. กระบวนการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

2.1 ขั้นตอนการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

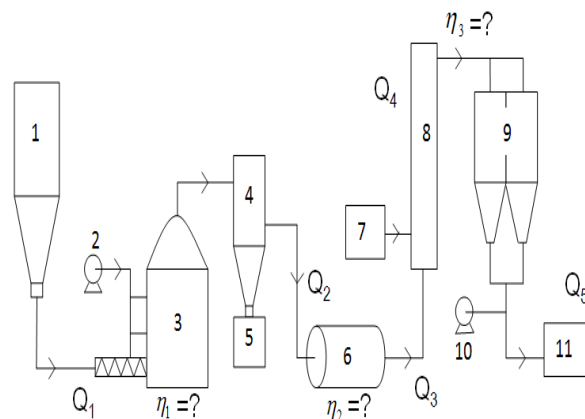
ขั้นตอนการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดมีรายละเอียดแสดงตามรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

2.2 กระบวนการอบแห้งชานอ้อยขั้นต้น (Pre-drying)

จากรูปที่ 2 ฝุ่นชานอ้อยที่อยู่ในไซโล (1) จะถูกป้อนเข้าเตาด้วยระบบสกรูขนถ่าย (Screw conveyor) โดยมีเครื่องเป่า (2) เป่าป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยและอากาศให้ไหลหมุนวนตามเข็มนาฬิกาเข้าไปภายในเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (3) ตัวเตาเผาได้ถูกสร้างขึ้นเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 m. สูง 2.2 m ภายในเตาก่อด้วยอิฐและซีเมนต์ทนความร้อน เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จะผลิตก๊าซร้อนไหลเข้าสู่ไซโคลน (4) เพื่อทำการแยกขี้เถ้าออกจากไอร้อน โดยขี้เถ้าจะตกลงไปยังถังเก็บขี้เถ้า (5) เพื่อรอการโกยไปทิ้งต่อไป จากนั้นไอร้อนจะไหลผ่านเตาเผาเก่า (6) ซึ่งเดิมเป็นเตาเผาที่ใช้ฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงและถูกยกเลิกไปเมื่อนำเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (3) มาใช้ จากนั้นไอร้อนจะเข้าสู่ห้องอบชานอ้อย (8) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับชานอ้อยที่ออกมาจากถังเก็บชานอ้อย (7) จากนั้นก๊าซไอร้อนและชานอ้อยจะไหลไปสู่อีกไซโคลน (9) เพื่อทำการแยกเอาชานอ้อยที่ผ่านการอบหมาดแล้วไปเก็บยังกระบวนการอบแห้งชานอ้อยหลัก (Main drying) (11) โดยมีเครื่องดูดลม (10) สร้างแรงดูดให้ชานอ้อยผสมกับไอร้อนและทำหน้าที่แยกไอร้อนทิ้งออกจากชานอ้อยหลังอบ



รูปที่ 2 กระบวนการอบแห้งชานอ้อยขั้นต้น (Pre-drying)

ประกอบไปด้วย 1 Silo; 2 Blower; 3 Furnace; 4 Cyclone; 5 Ash collector; 6 Old furnace; 7 Bagasse bin; 8 Drying chamber; 9 Cyclone; 10 Blower; 11 Main drying

3. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด

3.1.1 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสด้วยอินฟราเรด (Infrared thermometer) มีช่วงการวัด (Measuring Range) : -35 ถึง +950 °C

3.1.2 เครื่องเทอร์โมคัปเปิลแบบไทป์เค (Thermocouple probe type k) หัววัดไทป์เคที่ใช้มีช่วงของการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ คือ ไม่เกิน 700 °C

3.1.3 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer) ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิ -40 ถึง +600 °C ± 0.5 % ของค่าที่อ่านได้ และช่วงของการวัดก๊าซออกซิเจน 0 ถึง 21 % Vol.

3.1.4 เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิของไม้แบบเข็มเจาะ (Wood moisture meter) ที่มีช่วงวัดความชื้น 6 - 99.9 % และช่วงของการวัดอุณหภูมิ -35 ถึง 80 °C

3.1.5 เครื่องวิเคราะห์ความชื้นแบบอบ (Moisture meter) ที่มีอุณหภูมิในการอบ 130 °C รุ่น MA30 ของบริษัท Sartorius

3.1.6 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) รุ่น testo 417 มีช่วงการวัดความเร็วลม +0.3 ถึง +20 m/s

3.2 วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลการดำเนินงานในปัจจุบันเพื่อนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพรวมของเตาอบแห้งขั้นต้น (Pre-dryer) โดยจะแบ่งเป็นการหาประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace), การหาประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนของเตาเผาเก่า (Old Furnace) และการหาประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้ง (Drying process) เพื่อนำไปกำหนดแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งขั้นต้น ซึ่งได้กำหนดจุดที่จะทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ไว้ดังนี้

3.2.1 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลของเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace) ดังต่อไปนี้

1. หาค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อย (LHV)
2. ตรวจวัดอัตราการหมุนของระบบสกรูขนถ่าย (Screw conveyor) เพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อย

เข้าเตา

3. ตรวจวัดอุณหภูมิของเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยและอากาศที่เข้าเตาเผา

3.2.2 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลของเตาเผาเก่า (Old Furnace) ดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ไอก๊าซร้อนก่อนเข้าเตาเผาเก่า
2. ตรวจวัดอุณหภูมิไอก๊าซร้อนภายในท่อก่อนเข้าเตาเผาเก่า
3. ตรวจวัดพื้นที่ผิวของเตาเก่า
4. วิเคราะห์ไอก๊าซร้อนก่อนเข้าสู่การอบ
5. ตรวจวัดอุณหภูมิไอก๊าซร้อนภายในท่อก่อนเข้าสู่การอบแห้งขั้นต้น

3.2.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลของห้องอบ (Drying chamber) ดังต่อไปนี้

1. ตรวจวัดปริมาณชานอ้อยก่อนและหลังการอบ
2. ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นของชานอ้อยก่อนและหลังการอบ

3. ตรวจวัดอุณหภูมิไอก๊าซร้อนปล่อยออกและความเร็วลมออก เมื่อดำเนินการตรวจวัดแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพก่อนการปรับปรุง จากนั้นดำเนินการพัฒนาระบบอัตโนมัติควบคุมระบบลำเลียงเชื้อเพลิง โดยให้สามารถควบคุมความเร็วรอบที่เหมาะสมกับความชื้นของชานอ้อยได้ จากนั้นทำการตรวจวัดและวิเคราะห์หาประสิทธิภาพหลังการปรับปรุงเพื่อเปรียบเทียบสรุปต่อไป

4. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 2 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการอบแห้งขั้นต้นนี้จะใช้หลักการหาสมดุลพลังงานความร้อนโดยประสิทธิภาพรวมของเตาอบแห้งขั้นต้น (Pre-dryer) สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{pre-dryer} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (1)$$

โดยที่

η_1 = ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากฝุ่นชานอ้อย

η_2 = ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนของเตาเก่า

η_3 = ประสิทธิภาพทางความร้อนของช่วงการอบแห้ง

4.1 การหาประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากฝุ่น
ขาน้อย สามารถหาได้โดยการนำความร้อนออกที่จะ
นำไปใช้ประโยชน์หารด้วยความร้อนเข้าสู่ระบบ ดังสมการ

$$\eta_1 = \frac{Q_2}{Q_1} \times 100 \quad (2)$$

โดยความร้อนเข้าสู่ระบบ (Q_1) จะมีเพียงความ
ร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเนื่องจากระบบการป้อน
ไม่มีการเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิงและอากาศเข้าเตาจึงทำให้
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงและอากาศเป็นศูนย์ (กรม
พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง
พลังงาน, 2551) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Q_1 = F_h H_L \quad (3)$$

โดยที่

H_L = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

F_h = ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)

ปริมาณเชื้อเพลิงเข้า (F_h) หาจากสูตรการขน
ถ่ายวัสดุด้วยสกรู (พรชัย, 2546) จากระบบลำเลียงของ
ฝุ่นขาน้อย ดังสมการ

$$F_h = \rho_b \pi (D^2 - d^2) k p N \quad (4)$$

โดยที่

ρ_b = ความหนาแน่นฝุ่นขาน้อย 183 kg/m³

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู (m)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (m)

k = แפקเตอร์ความเต็มรวง เท่ากับ 0.03

p = ระยะพิตช์สกรู (m)

N = ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)

ความร้อนออกที่จะนำไปใช้ประโยชน์ คือ ความ
ร้อนของไอก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฝุ่นขาน
้อยภายในเตาอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณอากาศที่ใช้
ในการเผาไหม้จะต้องมีมากเกินพอที่จะทำให้เกิดการพา
ความร้อนไปใช้ประโยชน์ ซึ่งหาได้จาก

$$Q_2 = F_h G C p_g (T_g - T_{ref}) \quad (5)$$

โดยที่

G = ปริมาตรจำเพาะของไอเสียจริง (Nm³/kg)

$C p_g$ = ความร้อนจำเพาะของไอเสีย (kJ/Nm³.°C)

T_g = อุณหภูมิของไอเสีย (°C)

T_{ref} = อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)

4.2 การหาประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนของ
เตาเผาเก่า สามารถหาประสิทธิภาพได้โดยการนำความ
ร้อนออกที่จะนำไปใช้ในการอบหารด้วยความร้อนเข้าสู่
เตาเผาเก่า ดังสมการ

$$\eta_2 = \frac{Q_3}{Q_2} \times 100 \quad (6)$$

ปัจจุบันแผ่นอลูมิเนียมและฉนวนใยแก้วที่หุ้ม
เตาเผาเก่ามีการหุ้มชำรุดเสียหาย ซึ่งอาจเกิดจากการใช้
งานกลางแจ้งและฉนวนใยแก้วเสื่อมคุณภาพเนื่องจากมี
อายุการใช้งานถึง 15 ปี เมื่อนำเครื่องมือวัดไปทดสอบ
อุณหภูมิพื้นผิวของเตาเผาเก่า พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวของ
ส่วนที่หุ้มฉนวนและไม่หุ้มมีค่าใกล้เคียงกัน จึงพิจารณา
ความสูญเสียความร้อนของตัวเตาเผาเก่าทั้งหมดเป็น
ความสูญเสียความร้อนเนื่องจากไม่หุ้มฉนวน ฉะนั้นความ
ร้อนออกที่จะนำไปใช้ในการอบสามารถหาได้จากความ
ร้อนเข้าสู่เตาเผาด้วยค่าความร้อนที่สูญเสียเมื่อไม่หุ้ม
ฉนวน ดังสมการ

$$Q_3 = Q_2 - Q_L \quad (7)$$

โดยที่ Q_L คือ ค่าความร้อนที่สูญเสียเมื่อไม่หุ้มฉนวนของ
เตาเผาเก่า (สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนา
และส่งเสริมพลังงาน, 2535) ดังสมการ

$$Q_L = \pi d h (T_s - T_{ref}) \times 10^{-3} \quad (8)$$

$$h = h_c + h_r \quad (9)$$

$$h_c = 7.592 \left[\frac{T_s - T_{ref}}{d} \right]^{0.25} \quad (10)$$

$$h_f = (\varepsilon) \left(\frac{5.669}{T_s - T_{ref}} \right) \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ref} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

โดยที่

- Q_L = ความร้อนสูญเสียจากท่อเปลือย (w)
 h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (w/m.k)
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (mm)
 T_s = อุณหภูมิผิวท่อ (°C)
 ε = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี ในกรณีแผ่นเหล็กกริดเหนียว $\varepsilon = 0.56$

4.3 การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของช่วงการอบแห้ง สามารถหาประสิทธิภาพได้โดยการนำความร้อนออกที่จะนำไปใช้ประโยชน์หารด้วยความร้อนเข้าสู่ระบบดังสมการ

$$\eta_3 = \frac{Q_4}{Q_3} \times 100 \quad (12)$$

โดยที่ Q_4 คือ ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากชานอ้อย สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_4 = [(M_{dry} C_{pB} + M_w C_{pw}) \cdot (T_g - T_{ref})] + M_w L \quad (13)$$

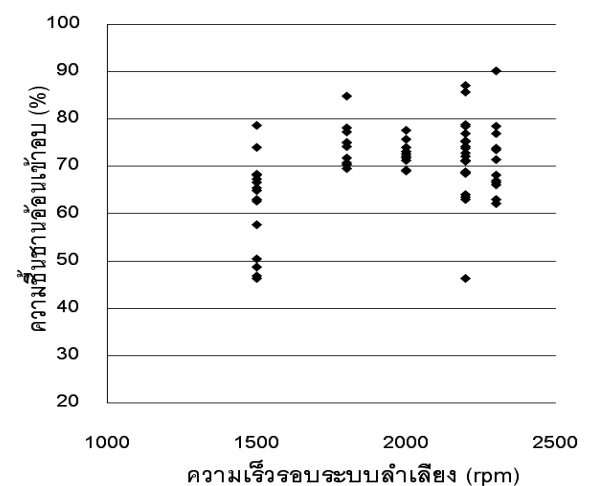
โดยที่

- M_w = น้ำหนักของน้ำที่ระเหยไป (kg)
 M_{dry} = น้ำหนักของชานอ้อยแห้ง (kg)
 C_{pw} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)
 C_{pB} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะชานอ้อย (kJ/kg °C)
 L = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
 T_g = อุณหภูมิของไอละเอียดที่ (°C)
 T_{ref} = อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของชานอ้อยและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อย

5.1 การปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงในปัจจุบัน

เมื่อนำข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 1 เมษายน 2553 ถึงวันที่ 10 เมษายน 2553 มาวิเคราะห์พฤติกรรมการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยเข้าเตาเผาพบว่า การป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยเข้าเตาเผาชีวมวล (Furnace) จะอาศัยประสบการณ์ของพนักงานในการกำหนดค่าความเร็วรอบของระบบลำเลียงกับค่าความชื้นเข้าของชานอ้อยก่อนอบ ดังรูป

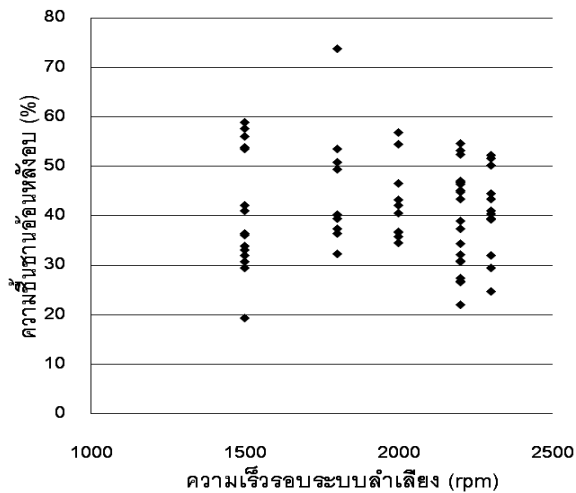


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบระบบลำเลียงกับความชื้นชานอ้อยก่อนอบ

จากรูปที่ 3 จะพบว่า การปรับรอบของระบบลำเลียงมีความไม่แน่นอนและไม่เหมาะสมกับการอบแห้งชานอ้อย เช่น ที่ความชื้นของชานอ้อย 80 % (Moisture content) มีการปรับความเร็วรอบระบบลำเลียงตั้งแต่ 1,500 ถึง 2,300 rpm. ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงเกินความจำเป็นและไม่เหมาะสมกับภาระความร้อนที่ต้องใช้ในการอบแห้งชานอ้อย

จากรูปที่ 4 จะพบว่า ที่ความเร็วรอบระบบลำเลียงค่าหนึ่งจะมีความชื้นของชานอ้อยหลังอบอยู่ระหว่าง 20 ถึง 70 % ซึ่งในขั้นตอนการอบแห้งขั้นต้นนี้จะต้องการความชื้นของชานอ้อยหลังอบ 50 % ก่อนที่จะนำไปอบให้เหลือเพียง 2 % ในขั้นตอนอบแห้งหลัก (Main-drying) เพื่อนำไปผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดต่อไป ดังนั้นเพื่อให้มีการ

ปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับการอบแห้งชานอ้อยจึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของระบบลำเลียงกับความชื้นของชานอ้อยก่อนอบ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบระบบลำเลียงกับความชื้นชานอ้อยหลังอบ

5.2 การคำนวณหาความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับความชื้นของชานอ้อยก่อนอบ

ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับความชื้นชานอ้อยเข้าอบ จึงได้กำหนดสมมุติฐานไว้ 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 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2.1 ขั้นตอนในการพิจารณาหาความเร็วรอบระบบลำเลียงที่เหมาะสม มีดังนี้

1. คำนวณหาค่าความร้อนที่ต้องการก่อนเข้าสู่ช่วงของการอบจริง (Q_3) จากสมการ ดังนี้

$$Q_3 = \frac{Q_4}{\eta_3} \times 100 \quad (14)$$

โดยที่

Q_4 = ค่าความร้อนที่ต้องการในการอบแห้งชานอ้อย

η_3 = ประสิทธิภาพทางความร้อนของช่วงการอบแห้ง

2. การคำนวณค่าความร้อนออกของก๊าซร้อนจริง

ที่ผลิตจากเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace)

(Q_2) จะต้องนำค่าความสูญเสียความร้อนในช่องของ

เตาเผาเดิมที่ทำหน้าที่เสมือนท่อนำความร้อนมาบวกกับ

ค่าความร้อนที่ต้องการก่อนเข้าสู่ช่วงของการอบจริง ซึ่งจะได้

$$Q_2 = Q_3 + Q_L \quad (15)$$

3. คำนวณค่าปริมาณชานอ้อยเข้าจริง (F_h)

จากค่าความร้อนไอเสียออกจากเตา (Q_2) หารด้วย

ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากชานอ้อย (Furnace)

และค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อย (H_L) ซึ่ง

จะได้

$$F_h = \frac{Q_2}{\eta_1} \times \frac{100}{H_L} \quad (16)$$

โดยที่

η_1 = ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากฝุ่นชานอ้อย

H_L = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยมีค่า

เท่ากับ 16.95 MJ/kg

4. การหาความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่

เหมาะสมหาได้จากสมการที่ (4) ซึ่งจะได้

$$N = \frac{F_h}{\pi \rho_b k p (D^2 - d^2)} \cdot C \quad (17)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่ในการแปลงความเร็วรอบ

ระบบลำเลียงมาเป็นปริมาณกิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ได้จาก

การตรวจวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6.06 เมื่อนำค่าของ

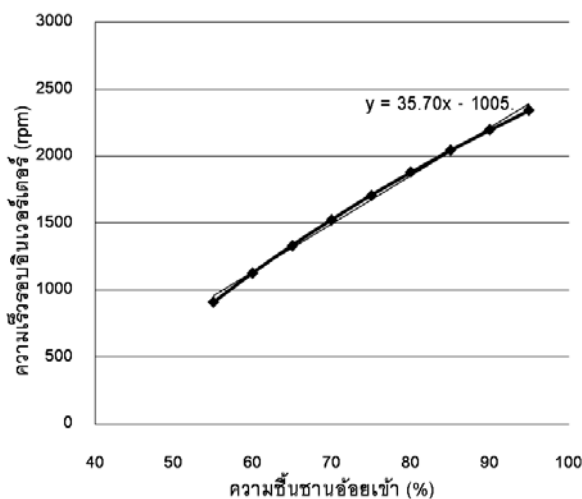
ความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่คำนวณได้มาเขียนกราฟ

กับความชื้นชานอ้อยเข้าอบช่วง 95 – 55 % จะได้

ความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (18) และรูปที่ 5

$$y = 35.70x - 1005 \quad (18)$$

โดยที่ x คือ ความชื้นของชานอ้อยก่อนการอบ และ y คือ ความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมในการป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อย



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของระบบลำเลียงกับความชื้นก่อนอบของชานอ้อยจากการคำนวณ

5.2.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลประหยัด

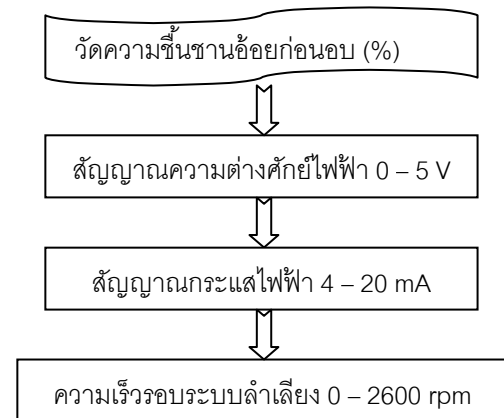
การพิจารณาผลประหยัดจากการนำผลการการปรับรอบของระบบลำเลียงตามปริมาณความชื้นก่อนอบของข้อมูลวันที่ 2 เมษายน 2553 เวลา 14.00 น. พบว่า มีความชื้นชานอ้อยเข้าอบ 72.1 % ชานอ้อยหลังอบ 52.4 % มีการปรับความเร็วรอบระบบลำเลียง เท่ากับ 2,200 rpm. (743.49 kg/h) ซึ่งถ้าพิจารณาจากการคำนวณตามสมการความสัมพันธ์ของปริมาณเชื้อเพลิง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

ดังนั้นเพื่อให้มีการปรับรอบของระบบลำเลียงที่เหมาะสมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเข้า จึงควรใช้ระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยในการปรับความเร็วรอบของระบบ

ลำเลียงเพื่อช่วยในการลดความสูญเสียเนื่องจากการปรับรอบระบบลำเลียงแบบ Manual

6. การพัฒนาระบบอัตโนมัติในการปรับรอบความเร็วของระบบลำเลียง

ในการพัฒนาระบบอัตโนมัติมีแนวคิดในการทำงาน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของระบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 6 การทำงานของระบบอัตโนมัติประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความชื้นของชานอ้อยก่อนอบและแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ขนาด 0-5 V และกระแสไฟฟ้า 4-20 mA. ก่อนส่งสัญญาณไปควบคุมระบบลำเลียงเพื่อปรับความเร็วรอบของการป้อนเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยตั้งแต่ 0 – 2600 รอบ/นาที

ลักษณะของหัวโพรบวัดความชื้น (ฐาปนพงศ์, 2549) ในชานอ้อยเป็นแท่งสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 มิลลิเมตร ทั้ง 2 แท่งฝังลงไปในชานอ้อยในแนวตั้งลึกประมาณ 6 นิ้ว และระยะห่างระหว่างทั้ง 2 แท่งระยะห่าง 5 นิ้ว ทำงานโดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้า +5 V ปลอยจากปลายข้างหนึ่งของโพรบผ่านชานอ้อยที่ทำหน้าที่เสมือนตัวต้านทานไฟฟ้าไปยังชานอ้อยมีความชื้นมากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ก็จะมีค่าน้อยแต่ถ้าหากชานอ้อยมีความชื้นน้อยก็จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาก ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านชานอ้อยแล้วจะไหลไปสู่อุปกรณ์ต่อเชื่อมวัดความชื้นหรือตู้ควบคุม ดังรูปที่ 7



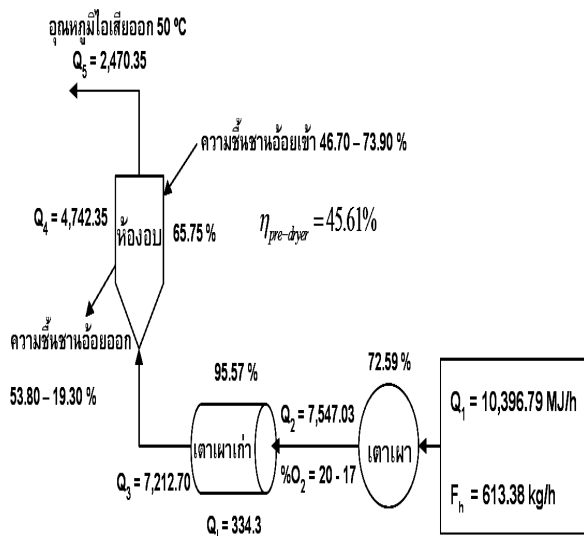
รูปที่ 7 (ก) หัวโพรบวัดความชื้นของขานอ้อยก่อนอบและ (ข) อุปกรณ์ต่อเชื่อมเครื่องวัดความชื้น

จากรูปที่ 7 หัวโพรบวัดความชื้นของขานอ้อยจะติดตั้งด้านข้างบริเวณข้างถังเก็บขานอ้อยก่อนเข้าสู่การอบ เพราะมีความเร็วในการส่งกากอ้อยที่ช้า เนื่องจากส่วนอื่น ๆ อาทิเช่น ส่วนสายพานลำเลียง ในกระบวนการลำเลียงวัตถุดิบมีการเคลื่อนตัวที่รวดเร็วและตลอดเวลา ทำให้ยากแก่การติดตั้งหัวโพรบวัดความชื้นอีกทั้งอาจจะทำให้หัววัดเกิดความเสียหายได้

6. ผลการศึกษาและทดสอบ

6.1 ประสิทธิภาพการอบแห้งก่อนปรับปรุง

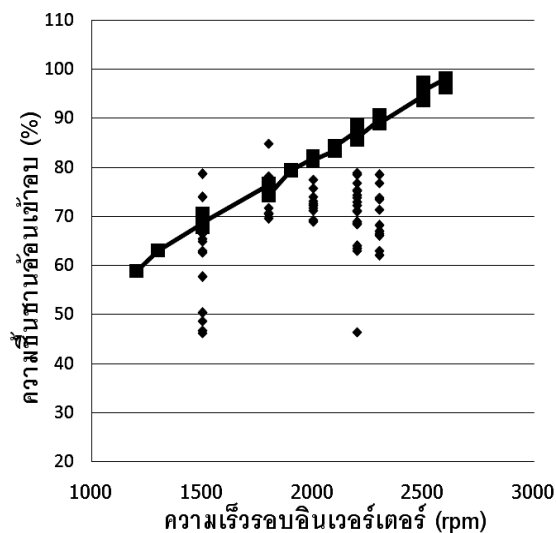
จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการควบคุมกระบวนการอบแห้งขานอ้อยขั้นต้น (Pre-drying) ในวันที่ 9-10 เมษายน 2553 (ตารางที่ 1) พบว่า $\eta_1 = 72.59\%$; $\eta_2 = 95.57\%$ และ $\eta_3 = 65.75\%$ คิดเป็น $\eta_{pre-dryer} = 45.61\%$ โดยมีภาพสมดุลพลังงานของระบบ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 สมดุลพลังงานของระบบก่อนการปรับปรุง

6.2 ผลการทดสอบระบบอัตโนมัติในการปรับรอบความเร็วของระบบลำเลียงตามปริมาณความชื้นของขานอ้อยก่อนอบ

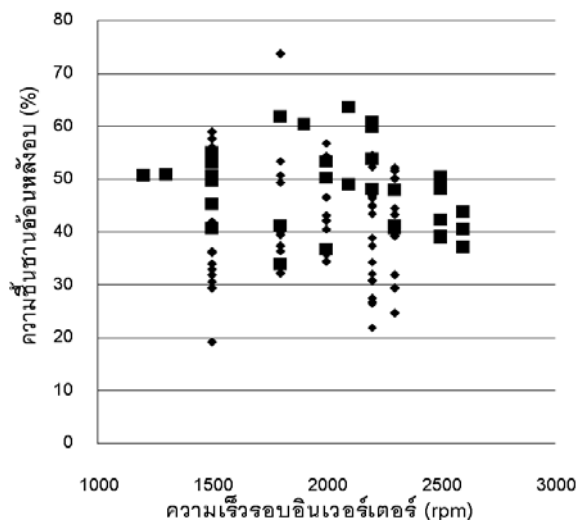
จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการควบคุมกระบวนการอบแห้งขานอ้อยขั้นต้น (Pre-drying) ในวันที่ 3,4,5,15 ตุลาคม 2553 พบว่า เมื่อดำเนินการทดสอบระบบอัตโนมัติที่ใช้ปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียง (Y) กับความสัมพันธ์ของความชื้นขานอ้อยก่อนการอบแห้ง (X) ตามสมการ $y = 35.70x - 1005$ จะได้ผลการทดสอบ แสดงดังรูป 9 และ 10



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบระบบลำเลียงกับความชื้นขานอ้อยเข้าอบก่อนและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 9 และ 10 เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบระบบลำเลียงกับความชื้นขานอ้อย โดยที่ จุดสีน้ำเงิน คือ ข้อมูลความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่ใช้ในการอบก่อนการปรับปรุง และจุดสีแดง คือ ข้อมูลความเร็วรอบของระบบลำเลียงที่ใช้ในการอบหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าหากปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงให้เหมาะสมกับความชื้นของขานอ้อยก่อนการอบแห้ง ตามความสัมพันธ์ $y = 35.70x - 1005$ จะสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 5.2.2 แล้ว และเมื่อพิจารณาความชื้นหลังอบ ณ. ความเร็วรอบต่างๆ จะพบว่ามีความชื้นของขานอ้อยผ่านการอบแล้ว จะมีค่าอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ที่ 50 %



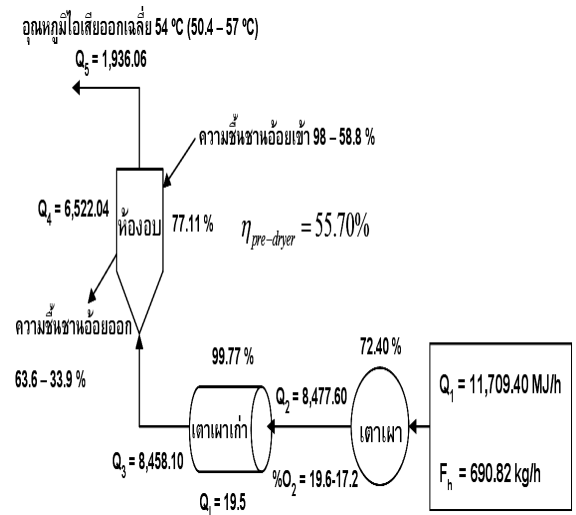
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของปริมาณเชื้อเพลิงกับความชื้นชานอ้อยเข้าอบ

จากรูปที่ 11 จะเห็นว่าการกระจายตัวของความชื้นชานอ้อยหลังอบส่วนใหญ่อยู่ในค่าความชื้นระหว่าง $50 \pm 5\%$ ซึ่งมีช่วงแคบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความชื้นชานอ้อยออกก่อนการปรับปรุงระบบที่มีค่าระหว่าง $20 - 70\%$

6.3 ประสิทธิภาพหลังการปรับปรุง

การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการควบคุมกระบวนการอบแห้งขั้นพื้นฐาน (pre-drying) ในวันที่ 3,4,5,15 ตุลาคม 2553 (ตารางที่ 1) พบว่า $\eta_1 = 72.40\%$; $\eta_2 = 99.77\%$ และ $\eta_3 = 77.11\%$ คิดเป็น $\eta_{pre-dryer} = 55.70\%$ แต่ประสิทธิภาพรวมของระบบหลังการปรับปรุงนี้ได้รวมประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการหุ้มฉนวน 2.00% (สิทธิพร และ รัชพล, 2554) ไว้ด้วย ฉะนั้นประสิทธิภาพรวมของระบบหลังการปรับปรุงที่เพิ่มขึ้นจากการพัฒนาระบบอัตโนมัติในการปรับความเร็วรอบของระบบลำเลียงฝุ่นชานอ้อยเท่ากับ 53.70% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 8.09% จากประสิทธิภาพเดิม เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุงวันที่ 9-10 เมษายน 2553 คิดเป็นปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้เฉลี่ย $1,589.32$

MJ/h หรือ 93.77 kg/h เมื่อราคาฝุ่นชานอ้อย 0.3 บาท/กิโลกรัม และเวลาการทำงาน $7,200$ ชั่วโมง/ปี คิดเป็นมูลค่าประหยัด $202,543.2$ บาท/ปี เมื่อต้นทุนในการพัฒนาระบบอัตโนมัติ $60,000$ บาท คิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 0.3 ปี โดยมีภาพสมดุลพลังงานของระบบ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สมดุลพลังงานหลังการปรับปรุง

7. สรุป

ประสิทธิภาพการอบแห้งชานอ้อยขั้นต้นสามารถหาได้จากหลักการสมดุลพลังงานจากการตรวจวัดข้อมูลการใช้พลังงานและจากการคำนวณหาประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งก่อนการปรับปรุง พบว่า $\eta_{pre-dryer} = 45.61\%$ เมื่อทำการทดลองใช้ระบบอัตโนมัติในการปรับรอบความเร็วของระบบลำเลียงตามปริมาณความชื้นของชานอ้อยก่อนอบตามสมการ $y = 35.70x - 1005$ พบว่า ประสิทธิภาพของระบบหลังการปรับปรุง $\eta_{pre-dryer} = 53.70\%$ เพิ่มขึ้นจากเดิม 8.09% คิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิงฝุ่นชานอ้อยที่ประหยัด 93.77 kg/h หรือคิดเป็นมูลค่าประหยัด $202,543.2$ บาท/ปี เมื่อต้นทุนในการติดตั้ง $60,000$ บาท จะมีระยะเวลาคืนทุน 0.3 ปี

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนในกระบวนการอบแห้งชานอ้อยเพื่อการประหยัพลังงาน

รายการ	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
1. อัตราการใช้เชื้อเพลิงฟืนชานอ้อยเฉลี่ย	613.38 kg/h	690.82 kg/h
2. ความร้อนเข้าสู่ระบบ (Q_1)	10,396.79 MJ/h	11,709.40 MJ/h
3. ปริมาณออกซิเจนในไอก๊าซร้อนออกจากเตาเผา	20 – 17 %	19.6 – 17.2 %
4. ความร้อนของไอก๊าซร้อนออก (Q_2)	7,547.03 MJ/h	8,477.60 MJ/h
5. ความร้อนสูญเสียเฉลี่ยที่เตาเผาเก่า (Q_L)	334.33 MJ/h	19.5 MJ/h
6. ความร้อนที่จะนำไปใช้ในการอบแห้ง (Q_3)	7,212.70 MJ/h	8,458.10 MJ/h
7. ความชื้นชานอ้อยเข้าอบ (%)	46.70 - 73.90	58.8 – 98
8. ความชื้นชานอ้อยหลังอบ (%)	19.30 – 53.80	33.9 – 63.6
9. ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากชานอ้อย (Q_4)	4,742.35 MJ/h	6,522.04 MJ/h
10. อุณหภูมิก๊าซร้อนปล่อยทิ้ง (T_g)	50 °C	50.4 – 57 °C
11. ความร้อนของก๊าซร้อนทิ้ง (Q_5)	2,470.35 MJ/h	1,936.06 MJ/h
12. ประสิทธิภาพของเตาเผาชีวมวลจากฟืนชานอ้อย (η_1)	72.59 %	72.40 %
13. ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนของเตาเก่า (η_2)	95.57 %	99.77 %
14. ประสิทธิภาพทางความร้อนของช่วงการอบแห้ง (η_3)	65.75 %	77.11 %
15. ประสิทธิภาพรวมของกระบวนการอบแห้งขั้นต้น ($\eta_{pre-dryer}$)	45.61 %	55.70 %

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุน สกว.-อุตสาหกรรม ประจำปี 2552 และขอขอบคุณ บริษัท พาเนลพลัส จำกัด และพนักงานทุกคน ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2551) คู่มือการตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบหม้อไอน้ำ เล่ม 3.

นรินพร ดงไม้สถิต. (2537) การอบแห้งชานอ้อยโดยใช้ก๊าซร้อนจากหม้อไอน้ำของโรงงานน้ำตาล. สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

รุ่งตะวัน วิวัฒนาศิริกุล และ คณะ. (2546) การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.

พรชัย จงจิตรไพศาล. (2546) สกรูขนถ่ายวัสดุ. รวมบทความจากวารสารขนถ่ายวัสดุ. บริษัทเอ็มแอนดี จำกัด. เล่มที่ 2, หน้า 283-296.

สิริพันธ์ ชุมทรัพย์. (2547) การศึกษาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของชานอ้อยในเตาเผาแบบสเปรตเตอร์สโคตเกอร์ในอุตสาหกรรมน้ำตาล. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลขอนแก่น. มหาวิทยาลัยขอนแก่น .

สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2535) คู่มือการตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานและการจัดทำเป้าหมายและแผนอนุรักษ์พลังงานของโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน.

- รูปนพวงศ บัวศรี และ คณะ. (2549) ระบบการให้น้ำอัตโนมัติ. สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
- พันธุ์ศักดิ์ มณีเกตุ. (2553) วงจรแปลงสัญญาณ 0-5 V to 4-20 mA. [ออนไลน์] [อ้างถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2553] จาก http://electrical.technicchan.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=212:-0-5-v-to-4-20-ma&catid=14:2009-10-29-03-11-20&Itemid=38.
- Barroso, J. Barrevas, F. Amareda, H. and Antonio Lozano. (2003) On the optimization of boiler efficiency using barasse as fuel. 82, 1451-1463
- Kilicaslan, I. Sarac, H.L. Ozdemir, E. and Ermis, K. (1999) Sugar cane as an alternative energy source for Turkey. 40, 1-11
- สิทธิพร สมทรัพย์ และ รัชพล สันติวรกร. (2554) การหุ้มนวนกันความร้อนในกระบวนการอบแห้งขาน้อยเพื่อประหยัดพลังงาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 วันที่ 3 – 5 พฤษภาคม 2554 ณ โรงแรม ภูเก็ตออร์คิด รีสอร์ท จังหวัดภูเก็ต.