

การศึกษาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของขาน้อยในเตาเผาแบบสเปรดเดอร์สโตคเกอร์ ในอุตสาหกรรมน้ำตาล

A study of incomplete combustion of bagasse in spreader stoker furnace in sugarcane industry

สิริพันธ์ ขุมทรัพย์¹, ฉัตรชัย เบญจปิยะพร², จุฬารัตน์ เบญจปิยะพร³, สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์⁴
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 E-mail: chaben@kku.ac.th²

S. Koomsap¹, C. Benjapiyaporn², J. Benjapiyaporn³, S. Theerakulpisut⁴
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University
Tel: 0-43202845 Fax: 0-43202849 E-mail: chaben@kku.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเผาไหม้ของขาน้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาแบบสเปรดเดอร์สโตคเกอร์ในโรงงานน้ำตาล และวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้ขาน้อยเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยการเก็บตัวอย่างเถ้าถ่านขาน้อยบริเวณ หน้าสโตคเกอร์ ได้ดรัม และได้อุปกรณ์ดักฝุ่น ตำแหน่งละ 4 จุด ของหม้อไอน้ำขนาด 250 ตันต่อชั่วโมง ที่กำลังผลิตไอน้ำ 230 ตันต่อชั่วโมง ความดันไอน้ำ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดลองพบว่า ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากเถ้าถ่านบริเวณทางออกใต้ อุปกรณ์ดักฝุ่น โดยมีความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบสูงสุดประมาณ 0.63 % (on NCV) ที่ปริมาณอากาศ 137 % การเพิ่มปริมาณอากาศมีผลทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดได้ดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำกลับลดลงจาก 86.9 % (on NCV) ที่ปริมาณอากาศ 142.4 % และเหลือ 85.82 % (on NCV) ที่ปริมาณอากาศ 166.5 % ดังนั้นปริมาณอากาศที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 137-148 % โดยใช้พัดลมขนาด 6,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์โดยการคำนวณพบว่า การลดความชื้นในเชื้อเพลิงขาน้อย สามารถลดความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซร้อนทั้งทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ จากการอบแห้งขาน้อยที่ความชื้น 51.2 % ลงเหลือ 40 % ก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 20,100 ตันต่อปี และสามารถประหยัดได้ 50,020 ตันต่อปี หากลดความชื้นลงจนเชื้อเพลิงแห้ง (0 %)

Abstract

The purpose of this research is to study and analyze causes of incomplete combustion in spreader stoker furnace used

in sugarcane industry. Refuse samples were collected from three different locations within a 250 ton/hr boiler of a sugarcane factory in Khon Kaen. The samples were analyzed for unburned fuel to determine heat loss due to incomplete combustion. It was found that the refuse collected from the location under the dust collector was the highest in unburned fuel. The total unburned fuel was 0.63 % (on NCV) which was well below the design value of 2 % at 137 % of excess air ratio. It was also found that an increase in primary air volume can improve combustion efficiency. However, the boiler efficiency decreased from 86.9 % (on NCV) at 142.4 % of excess air ratio to 85.82 % (on NCV) at 166.5 % of excess air ratio. Therefore, the excess air ratio at 137-148 % by using 6,800 m³/min of fan capacity is optimum for this boiler.

In addition, an analysis by theoretical calculation revealed that bagasse drying can decrease flue gas losses, resulting in bagasse savings, ranging from 20,100 tons/year to 50,020 tons/year for this sugarcane factory.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าและวิจัย เกี่ยวกับการนำทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือใช้มาเป็นเชื้อเพลิงทดแทน โรงงานน้ำตาลเป็นหนึ่งในสถานประกอบการที่นำขาน้อยซึ่งแต่เดิมเป็นสิ่งที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงาน และพลังงานความร้อนใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ขาน้อยที่เหลือหลังช่วงที่บอสนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำของโรงงาน เพื่อละลายน้ำตาลเพิ่มหรือใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อขายให้แก่การไฟฟ้านอกฤดูหีบอ้อย ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง ทำเครื่องตกแต่ง และอื่นๆอีกมากมาย จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันชานอ้อยเป็นวัตถุดิบที่มีค่า สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาร่วมกับโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียงจำกัด จังหวัดขอนแก่น เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้ชานอ้อยเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และหาแนวทางลดค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงในส่วนที่ไม่เผาไหม้ ซึ่งได้รับการตรวจวิเคราะห์โดยบริษัทผู้ผลิตหม้อไอน้ำที่ใช้ในการศึกษาว่ามีค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงในส่วนที่ไม่เผาไหม้สูงถึง 4.4 % เทียบเท่ากับการสูญเสียเชื้อเพลิงชานอ้อยประมาณ 4.4 ตันต่อชั่วโมง หรือ 12,672 ตันในหนึ่งฤดูกาลหีบอ้อย (ประมาณ 4 เดือน) ที่อัตราการผลิตได้น้ำ 230 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็นเงินประมาณ 3,800,000 บาท จากราคาขายชานอ้อยประมาณ 300 บาทต่อตัน โดยค่าของการออกแบบความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงในส่วนที่ไม่เผาไหม้ ถูกกำหนดไว้ไม่เกิน 2 %

2. ทฤษฎีและการคำนวณ

การคำนวณหาความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ที่เปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อวิเคราะห์การเผาไหม้ของชานอ้อย ซึ่งมีลักษณะเป็นเชื้อเพลิงแข็ง และหาสาเหตุที่ทำให้ชานอ้อยเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั้น ประกอบด้วย

2.1 ความชื้นในชานอ้อย

ความชื้นในชานอ้อยบอกถึง มวลของน้ำที่มีอยู่ในชานอ้อยเทียบกับมวลของชานอ้อยเปียก ตามมาตรฐานความชื้นของ ASTM-D-3173-73 [1]

2.2 อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

ปริมาณอากาศตามทฤษฎี(Theoretical Air) คือปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง [2] ในทางปฏิบัติอากาศที่ใช้ตามทฤษฎีมีก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ การแก้ปัญหาดังกล่าวคือ ต้องใช้ปริมาณอากาศมากกว่าเดิมให้เกินพอสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

2.3 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

ในกรณีของโรงงานที่ทำการศึกษาครั้งนี้ได้คำนวณหาตัวแปรจากปริมาณชานอ้อยที่เข้าสู่โรงงานลบด้วยปริมาณชานอ้อยคงเหลือในที่เก็บและชานอ้อยที่จำหน่ายออกจากโรงงานเมื่อสิ้นสุดฤดูหีบอ้อยเทียบกับปริมาณการผลิตไอน้ำในฤดูหีบ ซึ่งได้ค่าตัวแปรนี้ประมาณ 2.35 ดังนั้นจะสามารถหาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$\text{Fuel consumption, } \dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{m}_{\text{steam}}}{\text{Factor}} \times 1000 \quad (1)$$

เมื่อ

Factor คือ สัดส่วนปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

2.4 อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านต่อเชื้อเพลิง

เถ้าถ่านในที่นี้หมายถึง เศษที่เหลือหลังการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ประกอบด้วยสิ่งเจือปนที่มากับเชื้อเพลิงซึ่งบางส่วนอาจหลอมละลายแล้วจับตัวเป็นก้อนเมื่อเย็นลงถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สูงพอ และมีบางส่วนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ อาจอยู่ในรูปของผงคาร์บอน แท่งคาร์บอน หรือเชื้อเพลิงแข็ง อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านต่อเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Refuse Mass Fraction, } R = \frac{\dot{m}_{\text{refuse}}}{\dot{m}_{\text{fuel}}} \quad (2)$$

2.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง คือปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์(Complete Combustion) ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอน เมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมาเพิ่ม ค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะปรับค่าเป็นค่าความร้อนสูงสุด (Gross Calorific Value, GCV บางครั้งเรียก Higher Calorific Value หรือ Higher Heating Value) แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความของเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ (Net Calorific Value, NCV บางครั้งเรียก Lower Calorific Value) [3]

2.6 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สำคัญ ซึ่งพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทให้แก่ของไหลเย็น (เช่น น้ำหรือน้ำผสมไอน้ำ) สิ่งที่ต้องการจากกระบวนการนี้คือ การทำให้ของไหลเหล่านี้มีเอนทัลปีเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติจริงนั้น พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานทั้งหมดของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์โดยเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก เพราะต้องใช้เวลาอย่างมากและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ไม่สามารถถ่ายเทให้แก่ของไหลเย็นได้ทั้งหมด เนื่องจากเกิดการสูญเสียให้แก่ส่วนอื่นๆด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของของไหลต่อปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิงที่ให้แก่มหม้อไอน้ำ กรณีไอน้ำในก๊าซร้อนทั้งไม่เกิดการกลั่นตัวก่อนออกจากหม้อไอน้ำสามารถแทนด้วยสมการ [4]

$$\eta_B = \frac{\dot{m}_{\text{steam}}(h_2 - h_1)}{\dot{m}_{\text{fuel}} \text{NCV}_{\text{fuel}}} \quad (3)$$

หรือ

$$\eta_B = 100 - \%HL_{\text{total}} \quad (4)$$

โดยความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นประกอบด้วย

1) เปอร์เซนต์ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้โดย

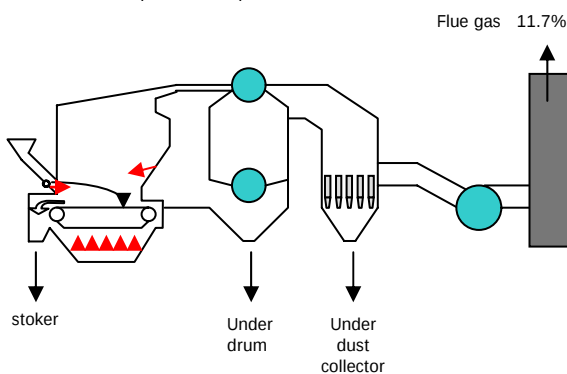
$$\% \text{Heat loss due to unburned fuel} = \frac{HV_{\text{refuse}}}{\text{NCV}_{\text{fuel}}} \times R \times 100 \quad (5)$$

- เปอร์เซ็นต์ความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซร้อนทิ้ง [5]
- เปอร์เซ็นต์ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ [5]
- เปอร์เซ็นต์ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนที่พื้นผิว [5]

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ทำการตรวจวัดการสูญเสียความร้อนจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ จากการใช้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จากการใช้พัดลมป้อนอากาศขนาด 6,800 m³/min ซึ่งเป็นขนาดของพัดลมที่ถูกกำหนดตามการออกแบบใช้ และจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จากการใช้พัดลมป้อนอากาศขนาด 6,800 m³/min ร่วมกับการใช้พัดลมป้อนอากาศขนาด 700 m³/min ตามคำแนะนำจากผู้ผลิตหม้อไอน้ำ หลังจากผู้ผลิตหม้อไอน้ำได้ทำการตรวจพบ ค่าความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงในส่วนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์สูงกว่าค่าตามการออกแบบ สำหรับหม้อไอน้ำ ชนิดท่อน้ำ model N-7700, Bi-Drum type natural water circulation lower drum supported for expound upwards การป้อนเชื้อเพลิงใช้ระบบสโตเกอร์แบบกระจาย (Spreader Stoker) การควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบอัตโนมัติ ที่ปริมาณการผลิตไอน้ำ 230 ton/hr ความดันไอน้ำ 30 kg/cm² โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

- การเก็บตัวอย่างชานอ้อย
- ตรวจวิเคราะห์ส่วนประกอบธาตุ
- หาค่าความชื้นของชานอ้อยโดยทำการทดลองตามมาตรฐานความชื้นของ ASTM-D-3173-73 [1]
- หาค่าความร้อนของชานอ้อยโดย ทำการทดลองตามวิธีทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตามมาตรฐานASTM standards D2015
- เก็บตัวอย่างเถ้าถ่านบริเวณ หนาสโตเกอร์ ไตดรีม และอุปกรณ์ดักฝุ่น จากการใช้ปริมาณอากาศทั้ง 2 กรณี โดยแต่ละพื้นที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง 4 จุด รวมทั้งสิ้น 12 จุดดัง รูปที่1 ในส่วนของทางออกก๊าซไอเสียกำหนดให้มีปริมาณเถ้าถ่านเท่ากับ 11.7 % ของเถ้าถ่านทั้งหมดตามการออกแบบ และมีค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่าน เท่ากับค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านบริเวณใต้อุปกรณ์ดักฝุ่น



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการจัดเก็บตัวอย่าง

- ตรวจวิเคราะห์แก๊สไอเสียโดยใช้เครื่อง Gas Analyser (TESTO 350)
- หาค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านโดย ทำการทดลองตามวิธีทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตามมาตรฐานASTM standards D2015 [1]

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการเก็บข้อมูลขณะทำการเก็บตัวอย่างเถ้าถ่าน

จากการกำหนดอัตราการผลิตไอน้ำที่ใช้ในการศึกษาที่ 230 ton/hr โดยการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งชานอ้อยที่ทำการศึกษามีความชื้นตรวจวัดได้ 51.2% นั้น สำหรับกรณีการใช้พัดลมป้อนอากาศขนาด 6,800 m³/min จะมีอัตราการผลิตไอน้ำจริงอยู่ที่ 228 ton/hr คิดเป็น 91% ของอัตราการผลิตสูงสุดตามการออกแบบจากการใช้ชานอ้อย 97 ton/hr มีปริมาณเถ้าถ่านออกมาทั้งสิ้น 2.516 ton/hr คิดเป็น 2.6 % ของน้ำหนักเชื้อเพลิงเปียกที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งมากกว่าค่าตามการออกแบบ โดยพบที่คัสคอลเลคเตอร์มากที่สุด ซึ่งสูงถึง 80% ของปริมาณเถ้าถ่านทั้งหมด เมื่อทำการเพิ่มขนาดพัดลมเป็น 7,500 m³/min จะมีอัตราการผลิตไอน้ำจริงอยู่ที่ 226 ton/hr คิดเป็น 90% ของอัตราการผลิตสูงสุดตามการออกแบบ จากการใช้ชานอ้อย 96 ton/hr การเพิ่มปริมาณอากาศมีผลทำให้ปริมาณเถ้าถ่านตามจุดวัดต่าง ๆ ลดลง ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านทั้งหมดลดลงเหลือ 1.942 ton/hr คิดเป็น 2.0 % ของน้ำหนักเชื้อเพลิงเปียกที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งเท่ากับค่าตามการออกแบบ แสดงค่าในตารางที่ 1

อย่างไรก็ตามปริมาณของเถ้าถ่านที่จัดเก็บเพียงอย่างเดียว ยังมิใช่ตัวบ่งชี้ว่ามีปริมาณการสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ว่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากลักษณะเชื้อเพลิงคงเหลือในเถ้าถ่าน(รูปที่ 2) และปริมาณสิ่งเจือปน แต่ละตำแหน่งที่จัดเก็บมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านแต่ละตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดโดยใช้ บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) มาคำนวณร่วมกับปริมาณของเถ้าถ่านแต่ละตำแหน่งที่จัดเก็บได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงผลการเก็บข้อมูลขณะทำการเก็บตัวอย่างเถ้าถ่าน

ข้อมูล	ค่าตามการออกแบบ		ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลขณะเก็บตัวอย่างเถ้าถ่าน			
ขนาดของพัดลมป้อนอากาศ (m ³ /min)	6,800		6,800		7,500	
หน่วย	ton/hr	%	ton/hr	%	ton/hr	%
อัตราการผลิตไอน้ำ	250	100	228	91	226	90
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	114	100	97	85	96	84
สัดส่วนปริมาณเถ้าถ่านต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	-	2.0	-	2.6	-	2.0
ปริมาณเถ้าถ่าน						
- หนาสโตเกอร์	0.216	9	0.040	2	0.036	2
- ไตดรีม	0.354	15	0.160	6	0.209	10
- ใต้อุปกรณ์ดักฝุ่น	1.497	64	2.022	80	1.470	76
- ปล่องปล่อยไอเสีย	0.276	12	0.294	12	0.227	12
- รวม	2.343	100	2.516	100	1.942	100

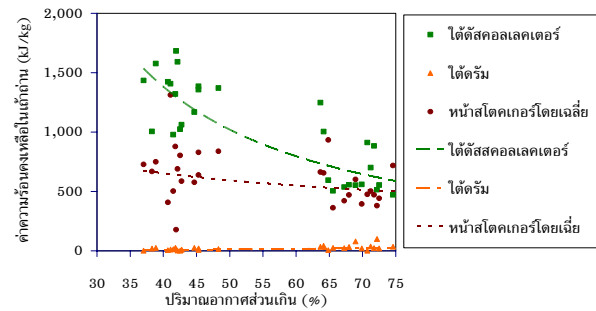
4.2 ค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่าน

จากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) วัดค่าความร้อนคงเหลือใน 1 kg ของตัวอย่างเถ้าถ่าน จากบริเวณหน้าสโตเกอร์ ไตดรีม และไต้ฝุ่นนกตักฝุ่นนั้น พบว่าปริมาณเชื้อเพลิงที่คงเหลือ ในเถ้าถ่านบริเวณไต้ฝุ่นนกตักฝุ่น มีประมาณ 4 % โดยน้ำหนัก ในเถ้าถ่านบริเวณหน้าสโตเกอร์มี ประมาณ 3 % โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านที่ไตดรีมนั้น มีปริมาณเชื้อเพลิงคงเหลือในเถ้าถ่านน้อยมาก (ใกล้ 0 % โดยน้ำหนัก) สำหรับเชื้อเพลิงคงเหลือในเถ้าถ่านบริเวณหน้าสโตเกอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นชานอ้อยแห้ง (รูปที่ 2a) นั้น จากการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงในรูปของชานอ้อยแห้งไม่มีสิ่งเจือปน (dry ash free basis) จะมีค่าความร้อนประมาณ 18,378 kJ/kg (ค่าความร้อนของตัวอย่างเชื้อเพลิงชานอ้อยเปียกที่ใช้ในงานวิจัย มีค่าความร้อนต่ำ (NCV) ประมาณ 6,726 kJ/kg ส่วนเถ้าถ่านเชื้อเพลิงคงเหลือในเถ้าถ่านบริเวณไตดรีม และไต้ฝุ่นนกตักฝุ่น (รูปที่ 2b และ 2c) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งและผงคาร์บอนนั้น จะมีค่าความร้อนประมาณ 32,778 kJ/kg [2] จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านที่ไต้ฝุ่นนกตักฝุ่นนั้นมีค่าสูงส่งรองลงมา คือ ที่หน้าสโตเกอร์ และไตดรีม ตามลำดับ

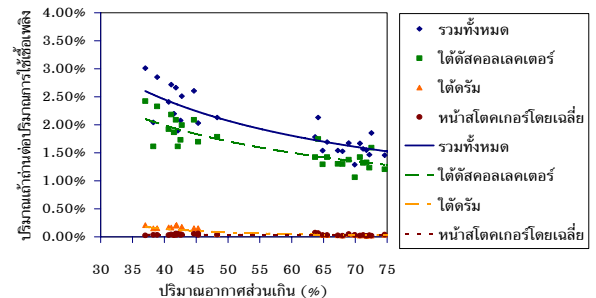
จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ มีผลอย่างมากสำหรับค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านที่ลดลง บริเวณไต้ฝุ่นนกตักฝุ่น และจากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของค่าความร้อนคงเหลือดังกล่าวนี้ มีผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณเถ้าถ่าน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของปริมาณเถ้าถ่านต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง เถ้าถ่านที่ไตดรีมและไต้ฝุ่นนกตักฝุ่นนั้น จะมีขนาดเล็กและเบาเพียงพอที่มันจะสามารถลอยออกจากห้องเผาไหม้ ตามทิศทางการไหลของแก๊สไอเสียได้ การเพิ่มปริมาณอากาศ มีผลทำให้ความเร็วของของไหลบริเวณทางออกห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย[6] ซึ่งหมายถึงอาจมีความเป็นไปได้ที่จะมีเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์ หลุดออกไปจากห้องเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นตามแรงบังคับนี้ แต่ปริมาณ และค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านที่ได้จากการทดลอง ของเถ้าถ่านที่ออกจากห้องเผาไหม้กลับลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มปริมาณอากาศ นอกจากจะเพิ่มความเร็วที่ทางออกห้องเผาไหม้แล้วยังเพิ่มความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ด้วย ซึ่งความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดี ปฏิกริยาการเผาไหม้เกิดได้ดีและรวดเร็วขึ้น



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างเถ้าถ่าน (a) หน้าสโตเกอร์ (b) ไตดรีม (c) ไต้ฝุ่นนกตักฝุ่น



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่านกับปริมาณอากาศ



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาณเถ้าถ่านต่อปริมาณเชื้อเพลิงทั้งหมดกับปริมาณอากาศ

4.3 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้

สำหรับความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบนั้น ในการออกแบบโดยผู้ผลิตหม้อไอน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้สามารถเกิดการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ได้ไม่เกิน 2 % (on NCV) จากการตรวจวิเคราะห์โดยผู้ผลิตอย่างคร่าวๆ ในปี ค.ศ. 2000 ก่อนมีการดำเนินงานวิจัยนี้ พบความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบประมาณ 4.4 % (on NCV) จากการใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้เดิมที่ 142 % แต่จากการดำเนินงานวิจัยนี้ ที่สภาวะการเดินเครื่องหม้อไอน้ำเช่นเดียวกับการตรวจวัดโดยผู้ผลิตหม้อไอน้ำ แต่ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า มีค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบสูงสุดประมาณ 0.63 % (on NCV) และมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 0.43 % (on NCV) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการตรวจวัดโดยผู้ผลิตหม้อไอน้ำมาก และค่าดังกล่าวยังคงอยู่ในเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดไว้ข้างต้น จากการใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้เดิมที่ 142%

อย่างไรก็ตามผลจากการปรับปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้ สามารถนำมาวิเคราะห์แนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลง ของค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบได้ จากการพิจารณาค่าสูงสุดตามเกณฑ์การออกแบบสำหรับการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ไม่เกิน 2 % (on NCV) นั้น พบว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณอากาศจริงไม่ต่ำกว่า 120 % ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งค่าความร้อนสูญเสียที่ 2 % นี้จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 0.6 % จากปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นจาก 20 % จนถึง 37 % โดยประมาณ หลังจากนั้น การลดลงของค่าความร้อนสูญเสียในส่วนนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆเมื่อปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5 สามารถหา

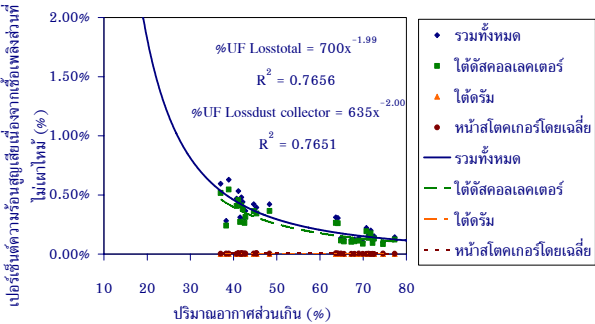
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบกับปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ดังสมการ

%UF Loss_{total} = 700x^{-1.99} (6)

เมื่อ

%UF Loss_{total} คือ เปอร์เซนต์ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ของเตาถ่านทั้งระบบ (on NCV)

x คือ ปริมาณอากาศส่วนเกิน (%)



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ทั้งระบบกับปริมาณอากาศ

4.4 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

ค่าความร้อนสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ขณะทำการเดินเครื่องหม้อไอน้ำนั้น สามารถหาได้จากการตรวจวัดก๊าซร้อนทั้งบริเวณทางออกหม้อไอน้ำ ผลจากการตรวจวัดก๊าซไอเสียแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณอากาศจะมีผลทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดได้ดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำกลับลดลงจาก 86.9 % (on NCV) เหลือ 85.81 % (on NCV) เนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่ออกไปพร้อมกับก๊าซร้อนทั้งนั้นจะเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ ที่ลดลง

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการตรวจวัดก๊าซร้อนทั้ง พบว่า ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ ความร้อนสูญเสียที่ออกไปพร้อมกับก๊าซร้อนทั้ง และเมื่อพิจารณาตัวแปรตามสมการการคำนวณค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซร้อนทั้ง พบว่า หากสามารถลดความชื้นลงได้ จะมีผลทำให้ค่าความร้อนสูญเสียที่ออกไปพร้อมกับก๊าซร้อนทั้งนั้นลดลงด้วย

5. การวิเคราะห์แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพและผลตอบแทนจากการอบแห้งเชื้อเพลิงชานอ้อย

การวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ และผลตอบแทนจากการอบแห้งชานอ้อยสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยการคำนวณหา ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงรายได้ที่เพิ่มขึ้นจากชานอ้อยที่ประหยัดได้ ตาม

การลดปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงชานอ้อย จากเดิมที่ 51.2 % โดยน้ำหนัก ลงเหลือ 40 % 20 % และ 0 % โดยน้ำหนัก

จากผลการวิเคราะห์พบว่า การลดความชื้นของเชื้อเพลิงชานอ้อยจาก 51.2 % ลงเหลือ 40 % จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 20,100 ตันต่อปี หรือประมาณ 7.19 % เทียบจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อยก่อนการปรับปรุงที่ 97.00 ตันต่อชั่วโมง ผลการคำนวณการประหยัดเชื้อเพลิงดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับ ผลการวิเคราะห์ของ อนันต์ จันทร์ศราญ ในปี พ.ศ. 2542 [7] ซึ่งได้ทำการคำนวณอัตราการประหยัดชานอ้อย จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในชานอ้อยจากเดิมที่ 51 % ลดเหลือ 40 % พบว่า สามารถสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 20,361 ตันต่อปี หรือประมาณ 7.23 % เทียบจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อยก่อนการปรับปรุงที่ 97.82 ตันต่อชั่วโมง

ชานอ้อยที่สามารถประหยัดได้เหล่านี้ สามารถทำให้มีรายได้เพิ่มขึ้นโดย 1) นำไปเป็นเชื้อเพลิงในการละลายน้ำตาลดิบเพิ่ม เป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำตาล โดยการแปรรูปน้ำตาลทรายดิบ ให้เป็นน้ำตาลทรายขาว ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าราคาขายน้ำตาลทรายดิบถึง 1,000 บาทต่อตัน 2) นำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในขณะที่ทำการละลายน้ำตาลเพิ่มจากเชื้อเพลิงชานอ้อยที่สามารถประหยัดได้นั้น พลังงานบางส่วนจะสามารถนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้ แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและผลตอบแทน จากการอบแห้งเชื้อเพลิงชานอ้อย

ปริมาณความชื้นของชานอ้อย (%)	51.2	40	20	0
ค่าความร้อนต่ำของชานอ้อย (MJ/kg)	6.7	8.8	12.6	16.4
ความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซร้อนทั้ง (%on NCV)	12.0	10.5	9.2	8.5
ความร้อนสูญเสียรวม (%on NCV)	13.1	11.7	10.3	9.6
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (%on NCV)	86.9	88.3	89.7	90.4
อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงจากประสิทธิภาพหม้อไอน้ำที่เพิ่มขึ้น (ton/hr)	0.0	0.7	1.4	1.8
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ton/hr)	97.0	73.7	51.6	39.7
ปริมาณชานอ้อยสดที่ใช้ในการอบแห้ง (ton/hr)	97.0	90.7	84.7	81.4
อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงจากค่าความร้อนต่ำของชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น (ton/hr)	0.0	6.3	12.3	15.6
อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงรวม (ton/hr)	0.0	7.0	13.7	17.4
อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงในหนึ่งฤดูหีบอ้อย (4เดือน) (1,000ton)	0.0	20.1	39.5	50.0
ผลตอบแทน				
รายได้จากการจำหน่ายกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น (ล้านบาท/ปี)	0.0	4.7	9.3	11.8
รายได้จากการละลายน้ำตาลได้เพิ่มขึ้น (ล้านบาท/ปี)	0.0	15.5	30.4	38.5
รวมรายได้ที่เพิ่มขึ้น (ล้านบาท/ปี)	0.0	20.2	39.7	50.3

5. สรุป

ผลการวิจัยทั้งในด้านการตรวจวัดค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนที่ไม่เผาไหม้ และตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ แสดงให้เห็นว่าในการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้ปริมาณอากาศจากการใช้พัดลมขนาดเดิมที่ 6,800 m³/min นั้น มีความเหมาะสม และไม่มีความจำเป็นที่จะต้องหาสาเหตุที่ทำให้ชานอ้อยเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากค่าความร้อนสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อย และยังคงอยู่ในเกณฑ์ตามการออกแบบที่กำหนด

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและการประหยัดเชื้อเพลิง สามารถทำได้โดยการอบแห้งชานอ้อย ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการลดความชื้นในเชื้อเพลิงชานอ้อย จะสามารถลดความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซร้อนทิ้ง ทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ จากการอบแห้งชานอ้อยที่ความชื้น 51.2 % ลงเหลือ 40 % ก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 20,100 ตันต่อปี และสามารถประหยัดได้ 50,020 ตันต่อปี หากลดความชื้นลงจนเชื้อเพลิงแห้ง (0 %)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานน้ำตาลมิตรภูเวียงจำกัด จังหวัดขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกในการทดลองพร้อมทั้งให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและข้อมูลของหม้อไอน้ำที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณสถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Gas Analyser (TESTO 350) สำหรับงานวิจัยนี้

สัญลักษณ์

h_1	คือ เอนทาลปีของน้ำที่ทางเข้าหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
h_2	คือ เอนทาลปีของไอน้ำที่ทางออกหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
HV_{refuse}	คือ ค่าความร้อนคงเหลือในเถ้าถ่าน (kJ/kg-refuse)
$\dot{m}_{fuel}$	คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)
$\dot{m}_{refuse}$	คือ ปริมาณเถ้าถ่าน (kg/hr)
$\dot{m}_{steam}$	คือ อัตราการไหลของไอน้ำ (kg/hr)
NCV	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg-fuel)
R	คือ อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านต่อเชื้อเพลิง (kg/kg-fuel)
%HL _{total}	คือ เปอร์เซนต์ความร้อนสูญเสียทั้งหมด (% on NCV)
η_B	คือ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (% on NCV)

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Material(1983) "Annual book of ASTM standards. Philadelphai, Pa.
- [2] มนตรี พิรุณเกษตร. "เชื้อเพลิงและการเผาไหม้", เทอร์โมไดนามิกส์2. [ม.ป.ป.]
- [3] T. D. Eastop and D. R. Croft. "Combustion theory", Energy Efficiency for Engineers and Technologists. 1995, pp.28-38
- [4] T. D. Eastop and D. R. Croft. "Efficient combustion", Energy Efficiency for Engineers and Technologists. 1995, pp.77-94

[5] Japanese Standard Association. "Loading boiler-Heat balancing" Japanese Industrial Standard. 1993

[6] สัญชัย ราเพยพัต (2547). "การจำลองเชิงตัวเลขการไหลของอากาศในเตาเผาไหม้ชานอ้อย" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[7] อนันต์ จันทร์ศคราญ (2542). "การจัดการการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.