

การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว

Thermal Efficiency Improvement of Coconut Sugar Simmering Stove

ศุภชัย วาสนานนท์ (Supachai Wasananon)*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว ด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก และปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน ผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนที่ 1 ในการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว เป็นการหาค่าอัตราการไหลของอากาศหลักที่เหมาะสมของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.28 kg/s ทำได้โดยการปิดระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลัก ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวมีค่า $28.65 \pm 0.78\%$

ขั้นตอนที่ 2 ในการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว เป็นการหาค่าอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนที่เหมาะสมของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวมีค่าเท่ากับ 17.79×10^{-3} kg/s หรือเท่ากับ 6.35% ของอัตราการไหลของอากาศหลัก ซึ่งส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวมีค่าเป็น $35.59 \pm 1.10\%$

คำสำคัญ: การปรับปรุง, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, เตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering and Industrial Technology

Silpakorn University., wasananon@gmail.com, 0813442155

Abstract

This study aimed to improve the thermal efficiency of a traditional coconut sugar simmering stove by a method of adjusting the flow rate of the main air and the circulating exhaust gas flow rate. Findings were as follows:

The first step toward thermal efficiency improvement of the coconut sugar simmering stove was determining the flow rate of the appropriate main air of the coconut sugar simmering stove used in the experiment as 0.28 kg /s. By shutdown increasing the flow rate of the main air. As a result, the thermal efficiency of the coconut sugar simmering stove was $28.65 \pm 0.78\%$.

The second step toward thermal efficiency improvement of the coconut sugar simmering stove was to find the circulating exhaust gas flow rate appropriate of the coconut sugar simmering stove as 17.79×10^{-3} kg/s or 6.35% of the flow rate of the main air. As a result, the thermal efficiency of the coconut sugar simmering stove was $35.59 \pm 1.10\%$.

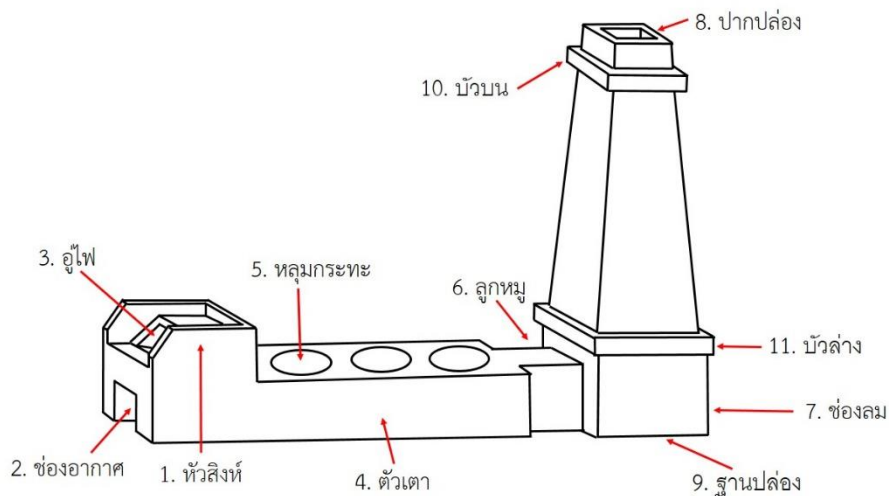
Keywords: Improvement, Thermal Efficiency, Coconut Sugar Cooking Stove

บทนำ

น้ำตาลเป็นส่วนสำคัญของอาหารมนุษย์ และเป็นแหล่งให้พลังงานของโลก จากรายงานขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติหรือ FAO ค่าเฉลี่ยของการบริโภคน้ำตาลต่อคนคือ 24 กิโลกรัมต่อปีต่อคน เทียบเท่ากับพลังงานกว่า 260 แคลอรีต่อวันในปี 1990 แม้จะมีการเพิ่มขึ้นของประชากรมนุษย์การบริโภคน้ำตาลที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 25.1 กิโลกรัม (55 ปอนด์) ต่อคนต่อปีในปี 2015 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018) โดยธุรกิจการผลิตน้ำตาลในโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรจำนวนมาก ในแต่ละปีเครื่องจักรเหล่านี้ต้องเปิดใช้ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 120 วันติดต่อกัน โรงงานจำเป็นต้องมีกระบวนการซ่อมบำรุงรักษาเพื่อไม่ให้เครื่องจักรและอุปกรณ์ หรืออะไหล่ของเครื่องจักรเกิดการชำรุดเสียหายในระหว่างที่โรงงานเดินเครื่องจักรเพื่อผลิตน้ำตาล (สุจิตรา อุดลย์เกษม, อภิรัตน์ สุวรรณเพชร, นิชาภัทร ผ่องใส และอรรณณ เขาวลิต, 2558: 89-101) ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำตาลพบได้ทั่วไปในเนื้อเยื่อของพืช แต่อ้อยและชูการ์บีตจะพบน้ำตาลในปริมาณความเข้มข้นเพียงพอที่จะสกัดออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามประเทศไทยสามารถผลิตน้ำตาลจากพืชอื่นนอกเหนือจากอ้อย และชูการ์บีต ได้แก่ น้ำตาลโตนด และน้ำตาลมะพร้าว ซึ่งการทำน้ำตาลโตนดหรือที่ชาวบ้านเรียกว่า น้ำผึ้งโตนด มีกระบวนการทำคือ การเคี่ยวน้ำตาลสดเป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง เมื่อน้ำระเหยออกไปบางส่วนแล้วจะได้น้ำผึ้งมีสีน้ำตาลแดง หากทำการเคี่ยวน้ำผึ้งต่อไปจนแห้งเป็นดั่งเม็ก็จะสามารถทำเป็นน้ำตาลปึก หรือหยอดลงในแว่นใบตาลเป็นรูปกลมก็กลายเป็นน้ำตาลแว่น (ดลฤดี วาสนานนท์, พันโท, 2551: 26-28) ส่วนการเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวเป็นภูมิปัญญาชาวบ้านอย่างหนึ่งของประเทศไทยที่มีความสำคัญ และทำสืบต่อกันมาเป็นระยะเวลายาวนานตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยา ซึ่งปัจจุบันผลิตภัณฑ์พื้นบ้านที่มาจากภูมิปัญญาท้องถิ่น เริ่มหายไปและผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มาจากภาคอุตสาหกรรมหรือโรงงานผลิตขนาดใหญ่มาแทนที่ และที่เห็น

ชัดเจนคือน้ำตาลจากต้นตาล และน้ำตาลจากมะพร้าว เนื่องจากการใช้น้ำตาลทรายมาแทนที่ (พีรเดช ทองอำไพ, 2018) และในปัจจุบันอุตสาหกรรมภายในครัวเรือนสำหรับการทำน้ำตาลมะพร้าวมีจำนวนลดลง โดยมีสาเหตุจากหลากหลายปัจจัย เช่น การเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวใช้เวลานาน การเก็บวัสดุที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ รวมถึงความชำนาญในการทำน้ำตาลมะพร้าว เป็นต้น (วันทวรรณ โมรากุล, ศุภสิทธิ์ กันพางาม และเอกลักษณ์ ดุริยางค์, 2550: 14) นอกจากนี้ปัจจัยเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเป็นสาเหตุที่สำคัญอีกประเด็นหนึ่ง เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นตามกลไกเศรษฐกิจ หรือคุณภาพเตาที่ลดลง ฉะนั้นเตาเคี้ยวน้ำตาลจึงเป็นอุปกรณ์สำคัญในการใช้ต้มหรือเคี้ยวน้ำตาลใส เพื่อกำจัดน้ำออกไปจากน้ำตาลใสให้เหลือแต่น้ำตาล ลักษณะของเตาจะต้องทนต่อความร้อนช่วยในการลุกไหม้ให้ความร้อนสูง และประหยัดเชื้อเพลิง (เจนณรงค์ นาดัน, ญัฐฉมิ อรุณเชนทร์ และ วีระพงษ์ เหมืองห้า, 2553: 20) ซึ่งนับแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนารูปร่างเตาเคี้ยวน้ำตาลไปแล้วทั้งสิ้น 5 รุ่น เมื่อพิจารณาช่วงเวลาของการพัฒนาเตาเคี้ยวน้ำตาล (เตาตาล) จะเป็นดังนี้ เตาตาลรุ่นที่ 1 ประมาณก่อน พ.ศ. 2400 – 2450 เตาตาลรุ่นที่ 2 ประมาณก่อน พ.ศ. 2450 – 2500 เตาตาลรุ่นที่ 3 ประมาณก่อน พ.ศ. 2500 – 2520 เตาตาลรุ่นที่ 4 ประมาณก่อน พ.ศ. 2520 – 2535 และเตาตาลรุ่นที่ 5 ประมาณก่อน พ.ศ. 2535 – ปัจจุบัน (วีระ เทพภรณ์, 2548: 84; ขนิษฐา ทิมไธ้, 2547: 79) ซึ่งส่วนประกอบของเตาเคี้ยวน้ำตาลที่มีใช้อย่างทั่วไปมีดังนี้ (รูปที่ 1)

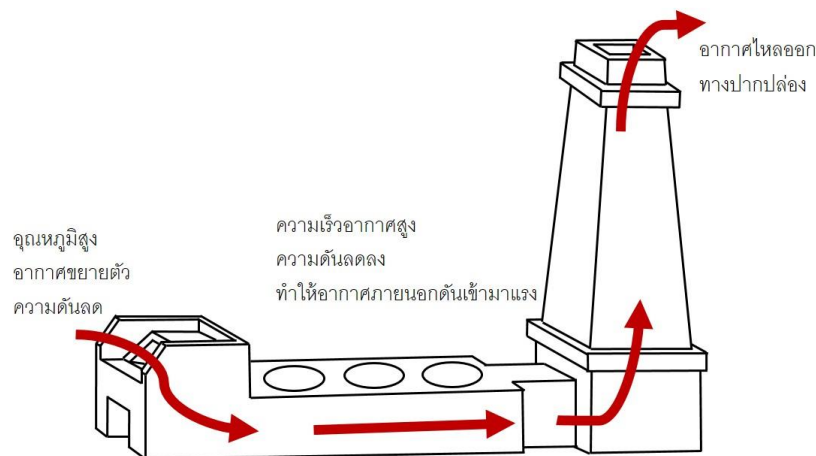
1. หัวสิงห์ เป็นส่วนหัวที่สำคัญเป็นช่องทางให้อากาศเข้า จุดเชื้อเพลิง และเป็นที่อยู่ของตะแกรง
2. ช่องอากาศ เป็นส่วนของช่องทางอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเป็นที่รองรับขี้เถ้า
3. อุ๊ไฟ อยู่บริเวณด้านบนของตะแกรง ไว้สำหรับใส่เชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
4. ตัวเตา เป็นที่วางกระทะแต่ละหลุม ซึ่งจะมีได้ตั้งแต่ 2 ถึง 5 กระทะและเป็นที่ให้เปลวไฟเข้าสู่กระทะ
5. หลุมกระทะ ใช้เป็นที่ตั้งกระทะเคี้ยวน้ำตาล และเป็นส่วนที่ช่วยในการปิดหลุมทางเดินของไฟ ช่วยให้ไฟเดินได้ดีเมื่อวางกระทะบนหลุมกระทะแล้วต้องมีอากาศเข้าไปได้
6. ลูกหมู ซึ่งเชื่อมต่อกระทะสุดท้ายและปล่อง ส่วนนี้จะมีขนาดกว้างและสูงเท่ากับตัวเตา หน้าที่ของลูกหมูคือ ทำให้เปลวไฟมีอุณหภูมิและความเร็วลดลง เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความเร็วและอุณหภูมิจะลดลงตามความยาวของตัวเตา ซึ่งป้องกันการกระแทกกับตัวปล่องและตัวเตาได้
7. ช่องลม อยู่ด้านหลังของฐานปล่อง ช่วยปรับความดันเพื่อลดความดันจากปล่อง
8. ปากปล่อง ช่วยระบายความดันของเปลวไฟจากเตาไฟ
9. ฐานปล่อง เป็นฐานที่ตั้งของปล่อง
10. บัวบน เพื่อความสวยงาม
11. บัวล่าง ภายในจะเป็นส่วนที่เป็นฐานของปล่อง ภายนอกจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความสวยงาม



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเตาเคี่ยวน้ำตาลที่มีใช้อย่างทั่วไป

หลักการทำงานของเตาเคี่ยวน้ำตาล ต้องอาศัยหลักการของเคมีและฟิสิกส์ เพราะเป็นการเคลื่อนที่ของอากาศ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการและหลักการของช่างผู้ก่อสร้างที่ไม่ใช้คำศัพท์ทางวิชาการแต่จะมีการนำมาวิเคราะห์แปลเป็นหลักการทางวิทยาศาสตร์ และใช้คำศัพท์ให้เหมาะสมกับการอธิบายทางวิทยาศาสตร์ ก็คือกระทะต้องออกแบบให้มีการเดินทางของเปลวไฟไปได้ทั่วถึงทุกกระทะ การที่น้ำตาลจะเดือดได้ต้องมีเปลวไฟของกระทะที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงมีการออกแบบให้มีวงกระทะเป็นตัวบังคับไปมาถึงกระทะ โดยการทำให้ตัวเตามีกระทะหรือวงกระทะทำให้เปลวไฟมาอยู่ในบริเวณนี้และถึงกระทะมากที่สุด ตัวบังคับให้เปลวไฟสามารถเดินทางได้ตลอดตัวเตา คือความเหมาะสมของตัวเตาเช่น ความกว้างของตัวเตา ระยะห่างระหว่างกระทะ ความโค้ง และความเรียบภายในของตัวเตาก็มีผลต่อการเดินทางของเปลวไฟ ความแรงของเปลวไฟก็ขึ้นอยู่กับขนาดของปล่อง เพราะยังมีความสูงและขนาดที่ใหญ่ขึ้น ก็จะมีแรงผลักดันอากาศออกสู่ปากปล่องและดูดอากาศจากปากเตาเข้ามาเผาไหม้กับเชื้อเพลิงภายในเตาได้เร็วขึ้นและมากขึ้น ส่วนของเตาทุกส่วนจะมีผลต่อการทำงาน เช่น อุโมงค์ไฟที่ปากเตาจะต้องสามารถดูดอากาศได้เพียงพอกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและต้านกับการคายโอเสียของปล่อง ช่องใส่เชื้อเพลิงก็ต้องมีขนาดและความยาวให้เหมาะสมกับการเผาไหม้ ในช่องทางเดินของเปลวไฟคือ วงกระทะแต่ละวงกระทะเป็นตัวกักให้เปลวไฟมาลงกระทะและเปลวไฟที่เหลือก็จะผ่านช่องระหว่างกระทะไปสู่กระทะลูกถัดไป แน่นอนว่ากระทะลูกที่หนึ่งหรือกระทะหน้าย่อมได้รับความร้อนมากที่สุด กระทะลูกสุดท้ายจะไม่ได้รับเปลวไฟ เพราะเปลวไฟจะสามารถเดินทางไปถึงครึ่งปล่อง ลูกหมูเชื่อมต่อกับกระทะลูกสุดท้ายและปล่องมีขนาดความกว้าง และความสูงเท่ากับตัวเตา หน้าที่ของลูกหมู คือ การทำให้เปลวไฟมีอุณหภูมิและความเร็วลดลง เพราะเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิจะลดลงตามความยาวของระยะทาง ฉะนั้นจึงเป็นตัวช่วยทำให้ปล่องสีกหรือน้อยลง เนื่องจากการผ่อนแรงและอุณหภูมิของเปลวไฟทำให้ปล่องมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น สอดคล้องกับหลักการของเบอร์นูลลี (วิทิต วรรณเลิศลักษณ์, 2560; Eastlake, 2002: 166-173) ที่ว่า “ถ้าของไหลมีความเร็วสูงขึ้นความดันของของไหลจะลดลง” จากหลักการนี้อธิบายการทำงานของเตาตาลได้ดังนี้ เมื่อไฟที่หัวสิงห์จะทำให้อุณหภูมิสูง อากาศขยายตัว ความดันลดลง อากาศร้อนจะไหลไปทางปากปล่อง ทำให้เปลวไฟไหล

จากบริเวณหัวสิงห์มายังบริเวณตัวเตาบริเวณตัวเตาจะมีปริมาณลดลง เนื่องจากจะใช้ชี้ไถ่ยาวไว้จึงทำให้ตัวเตามีพื้นที่แคบลง ปริมาณของตัวเตาจากหัวสิงห์จึงลดลงมา เมื่อปริมาณลดลงความเร็วมวลอากาศสูงขึ้นความดันยิ่งลดลง อากาศจากภายนอกจึงดันเข้ามาแรงมากยิ่งขึ้น ดันให้อากาศไหลออกไปทางปากปล่องได้ดียิ่งขึ้น ลูกหมูจึงเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดความเร็ว ความแรง ความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร เพื่อป้องกันการกระแทกกับตัวปล่องและเตา (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 หลักการของเบอร์นูลลีกับเตาเคียวน้ำตาล

แนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีหลายวิธีการ เช่น การหุ้มฉนวนที่มีความต้านทานความร้อนมากขึ้น การออกแบบใหม่เพื่อคุณสมบัติที่ดีขึ้น การเปลี่ยนวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น การนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ การปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังเช่นการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้นึ่งก้อนเชื้อเห็ดโดยใช้ฉนวนความร้อนจากเศษวัสดุในธรรมชาติเหลือทิ้งในท้องถิ่น ผลการทดลองพบว่า ฉนวนที่ได้จากก้านกล้วยสามารถทนต่ออุณหภูมิที่ผิวตู้นึ่งก้อนเชื้อเห็ดมากกว่าฉนวนที่ได้จากขานอ้อยและผักตบชวา และเมื่อคำนวณหาความสามารถลดการสูญเสียความร้อนที่ผิวของฉนวนจากก้านกล้วยได้เท่ากับ 10.735 kW (อภิชาติ สุขโขทัย, 2556: 145) สำหรับการศึกษาเรื่องการปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประยุกต์ใช้ในครัวเรือน ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะมุมเงย (β) ของรูแก๊สไหลออก และลักษณะการออกแบบรูแก๊สไหลออก (port) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยมุม β ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะแปรผันตามขนาดของหัวเตา การเจาะรูแก๊สไหลออกให้ถี่ในแนว center line เดียวกัน และมีพื้นที่รูรวม (port area) ให้ใกล้เคียงกับหัวเตาดั้งเดิมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้มาก (ภาณุวัฒน์ บุญโยประการ, 2543: 31-32) ส่วนการวิจัยเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาต้มเกลือ: กรณีศึกษา อ.บ่อเกลือ จ.น่าน ผลการวิจัยพบว่า การบุนวนกันความร้อน (ฉนวนเคลือบดำ) ที่ทำได้ง่ายในพื้นที่และมีราคาต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ทำการปรับปรุงมีค่าสูงขึ้น ตัวเตาก่อด้วยอิฐมอญทำให้แข็งแรงและทนทานมากขึ้น เมื่อติดตั้งปล่องดูดอากาศทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงขึ้นและยังช่วยลดปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในโรงต้มเกลือ (ยุธนา ศรีอุดม และเอกณัฐ กระจ่างธิมพร,

2554: 92-101) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการศึกษาผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยมีผลการศึกษากว่า การใช้งานเตาในรูปแบบการบังคับการป้อนอากาศเข้าสู่เตาจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาที่ปล่อยให้มีการไหลเวียนอากาศเข้าสู่เตาแบบธรรมชาติ ซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 16.58 และ 14.51 ตามลำดับ (กันยาพร ไชยวงศ์, ณัฐพล วิชาญ, อาริยะ แสนทวีสุข, จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และธัญศิรินทร์ จันทร์หอม, 2559: 37-42) โดยแนวทางหนึ่งที่มีความนิยมและได้รับการยอมรับว่า สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อน และสามารถลดการปล่อยมลพิษได้เป็นอย่างดี ได้แก่ การเก็บกู้ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat recovery) ซึ่งก็คือ การนำความร้อนที่สูญเสียไป เช่น ความร้อนที่เสียไปกับไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยในการใช้ประโยชน์จากความร้อนของไอเสียนี้มีด้วยกัน 2 ลักษณะ ดังนี้ (Monte, Padoano and Pozzetto, 2003: 1033-1044; Mukherjee, Astha, Howarth and Mcniell, 2017: 321-328)

1. การนำเฉพาะความร้อนกลับมาไหลเวียนในระบบ คือ การนำความร้อนทิ้งที่เสียไปกับไอเสียกลับมาใช้งานใหม่นั้น สามารถทำได้โดยการใช้งานอุปกรณ์เก็บกู้ความร้อนทิ้ง ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั่นก็คือ เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อน จากไอเสียร้อนไปให้สารอื่นๆ ที่ต้องการ เช่น การนำความร้อนไปอุ่นเชื้อเพลิง อุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ได้ ทั้งนี้ในการเก็บกู้ความร้อนนั้น มี 2 แบบ คือ การใช้เครื่องเก็บกู้ความร้อน (Recuperator) และการนำไอเสียกลับมาไหลเวียนใหม่แบบเหนี่ยวนำ (Regenerator) (Popov, Svistunov, Garyaev, Serikov and Temyrkanova, 2017: 44-51; Cheng, Zhang and Jiao, 2017: 646-655)

2. การนำมวลและความร้อนกลับมาไหลเวียนในระบบ (Flue gas recirculation) เป็นการไหลเวียนไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในลักษณะต่างๆ โดยมีรูปแบบการไหลเวียนที่แตกต่างกันไป ว่านำไอเสียมาจากบริเวณใด เช่น นำไอเสียมาจาก ไอเสียที่เพิ่งออกจากห้องเผาไหม้ ไอเสียที่ผ่านเครื่องเก็บกู้ความร้อนแล้ว ไอเสียที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เป็นต้น และบริเวณที่นำไอเสียนั้นกลับ เช่น นำไอเสียไปผสมกับอากาศสำหรับเผาไหม้ก่อน นำไอเสียกลับสู่ห้องเผาไหม้โดยตรง เป็นต้น ทั้งนี้ ยังมีวิธีการนำไอเสียกลับมาไหลเวียนที่แตกต่างกันไปด้วย เช่น ใช้พัดลมผลักเอาไอเสียให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Force draft) ใช้พัดลมเหนี่ยวนำไอเสีย (Induce draft) ใช้หัวฉีดเพื่อเหนี่ยวนำให้ไอเสียไหล (Ejector) ใช้การไหลตามธรรมชาติ (Natural draft) เป็นต้น โดยวิธีที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถช่วยให้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และ ลดการปล่อยมลพิษ ได้ทั้งสิ้น แต่อาจให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ที่ทำการปรับปรุง (Gamrat, Poraj, Bodys, Smolka and Adamczy, 2016: 430-437)

แม้ว่าในปัจจุบันมีการเลือกใช้งานระบบการนำไอเสียกลับมาไหลเวียนใหม่มากขึ้นในอุตสาหกรรม เช่น หม้อไอน้ำ เตาเผาขยะ เตาฟลูอิดไดซ์เบด กระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนต่างๆ เป็นต้น แต่ยังไม่มีการกำหนดรูปแบบที่ตายตัวของระบบนี้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม แต่อย่างไรก็ตาม การนำไอเสียกลับมาไหลเวียนในระบบนั้นก็ได้รับการพิสูจน์ในหลายกรณีศึกษาแล้วว่า สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน และลดการปล่อยมลพิษในกระบวนการสันดาปได้ (Gamrat, Poraj, Bodys, Smolka and Adamczy, 2016: 433) ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคียวน้ำตาลมะพร้าว โดยการนำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์เพื่อปรับปรุงอุปกรณ์ชิ้นสำคัญในการเคียวน้ำตาลมะพร้าวให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งถือเป็นก้าว

แรกในการอนุรักษ์และพัฒนาองค์ความรู้ภูมิปัญญาชาวบ้านอย่างหนึ่งของประเทศไทยให้คงอยู่สืบไป โดยการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว ด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก และปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน

วิธีการศึกษา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว มีดังนี้

1. เตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวที่มีใช้อย่างทั่วไป ชนิด 5 กระทะ ณ บ้านสุขเกษม 28 หมู่ 2 ตำบลท่าคา อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสงคราม

2. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data Logger DL2200/220V AC
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. คลิปแอมป์ (Digital power clamp meter: Model F09)
5. พัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว

วิธีการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว

1. นำเชื้อเพลิงใส่ในกระสอบแล้วทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงทุกครั้งทีใส่ในเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว
2. วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำตาลใสก่อนเทลงกระทะโดยใช้เครื่อง Data Logger บันทึกข้อมูลทุก 10 นาที

3. ชั่งน้ำหนักน้ำตาลใส และน้ำตาลทรายก่อนเทลงกระทะทุกครั้ง
4. ทำการวัดอุณหภูมิการเดือดของน้ำตาลมะพร้าวก่อนตักลงจากกระทะทุกครั้ง แล้วทำการบันทึกข้อมูลทุกครั้ง

5. ชั่งน้ำหนักน้ำตาลมะพร้าวที่ยกลงจากกระทะทุกครั้ง
6. เก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวเพื่อนำมาทดสอบหาค่าความร้อน
7. วัดพลังงานไฟฟ้าจาก Blower โดยใช้คลิปแอมป์ (Digital power clamp meter)
8. นำข้อมูลที่เก็บได้ไปแทนในสมการ เพื่อหาประสิทธิภาพของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวทุกครั้งซ้ำโม่ง โดยสมการการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว หาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\text{พลังงานที่ได้รับประโยชน์จากเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว}}{\text{พลังงานที่ให้กับเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{m_c c_{p,c} (T_e - T_{i,c}) + m_s c_{p,s} (T_e - T_{i,s}) + m_{i, \text{evap}} h_l}{m_f h_f + E_{\text{elec}}} \quad (2)$$

โดยที่ $c_{p,c}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำตาลสด (Coconut syrup) (kJ/kg · K)

$c_{p,s}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำตาลทราย (Sugar) (1.244 kJ/kg · K)

E_{elec} คือ Electric blower (kW)

h_f คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) (HHV)

h_l คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ 373 K และ 10^5 Pa (kJ/kg)

m_c คือ มวลของน้ำตาลสด (Coconut syrup) (kg)

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

$m_{i, \text{evap}}$ คือ มวลของไอน้ำที่ระเหย (kg) หาจาก $[(m_c + m_s) - m_p]$

m_p คือ มวลของน้ำตาลมะพร้าว (Palm sugar) (kg)

m_s คือ มวลของน้ำตาลทราย (Sugar) (kg)

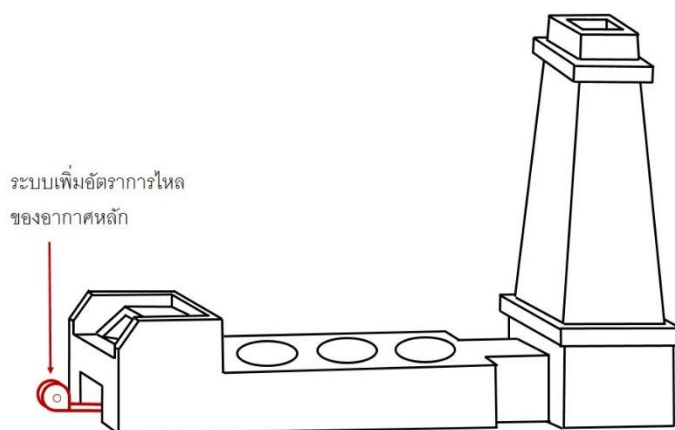
T_e คือ อุณหภูมิของการเดือด (K)

$T_{i,c}$ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำตาลสด (K)

$T_{i,s}$ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำตาลทราย (K)

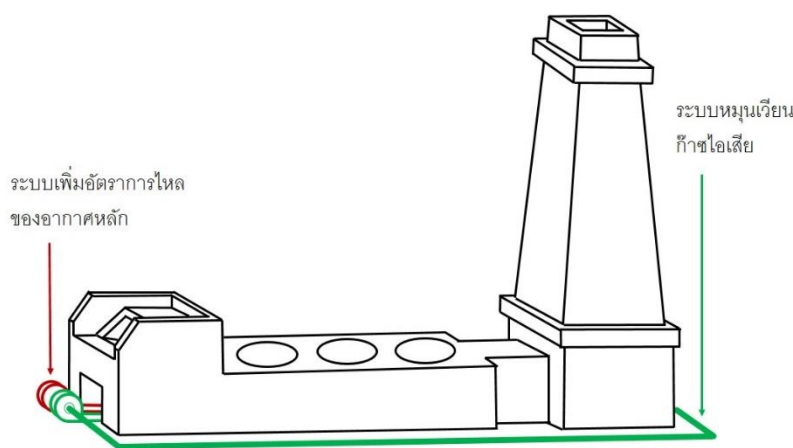
วิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวมี 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก โดยการติดตั้งพัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ทำการเป่าลมเข้าสู่ช่องอากาศของเตา ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อเพิ่มอากาศส่วนเกินของการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ให้มากที่สุด และค่อย ๆ ปรับลดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ด้วยการปรับลดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายโดยพัดลมให้มีปริมาณการจ่ายลดลงจนกระทั่งปิดพัดลม โดยทั้งนี้ยังคงมีอัตราการไหลอากาศธรรมชาติตามปกติ ทำการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยพิจารณาถึงกรณีที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่เตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ทำการทดลองสามารถทำได้



รูปที่ 3 การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนขั้นตอนที่ 1 (การปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก)

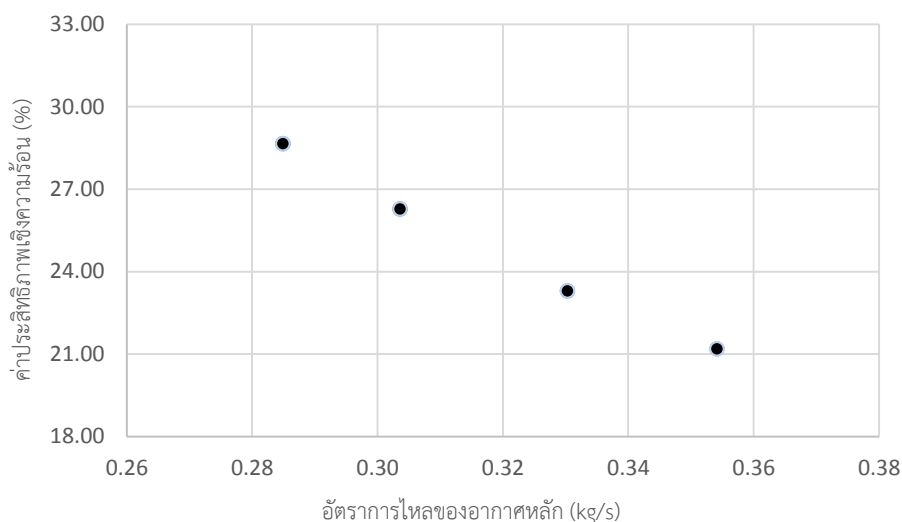
ขั้นตอนที่ 2 ด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน โดยการพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่เตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ใช้ในการทดลองที่ผ่านการปรับปรุงขั้นที่ 1 สามารถทำได้ จึงจะทำการกำหนดค่าอัตราการไหลของลมเสริมจากพัดลมตามค่านั้น แล้วจึงนำไปดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งก็คือ การติดตั้งระบบหมุนเวียนก๊าซไอเสียเพิ่มเติมเข้าไป โดยการนำไอเสียจากช่องลมที่อยู่หลังฐานปล่องกลับมาหมุนเวียนเข้าที่ช่องอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4 ดำเนินการปรับอัตราการไหลของระบบหมุนเวียนก๊าซไอเสียจากมากที่สุดและลดลงจนกระทั่งปิดพัดลม โดยยังคงมีอัตราการไหลของอากาศธรรมชาติและระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลักอยู่ ทำการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยพิจารณาถึงกรณีที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่เตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ทำการทดลองสามารถทำได้



รูปที่ 4 การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนขั้นตอนที่ 2 (ติดตั้งระบบหมุนเวียนก๊าซไอเสีย)

ผลการศึกษา

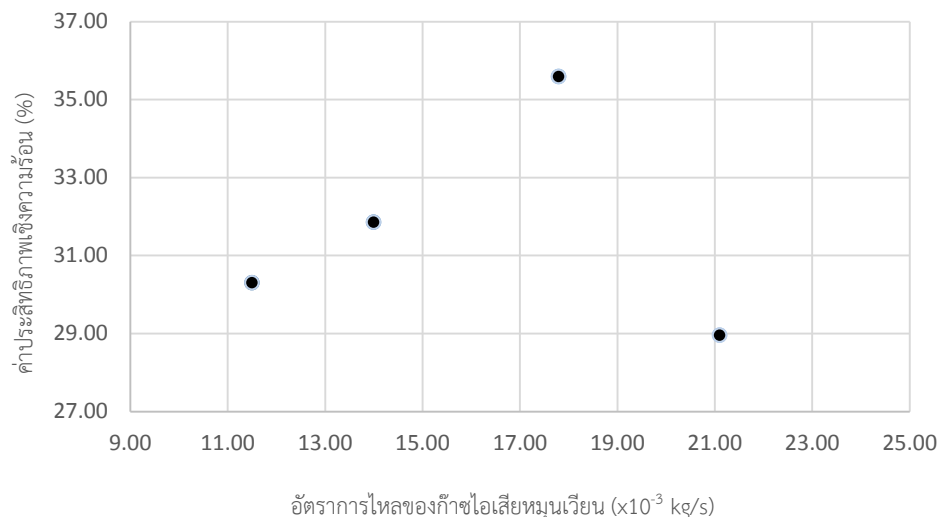
1. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก เมื่อปรับลดอัตราการไหลของระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลักลง พบว่าส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศหลักมีค่าเท่ากับ 0.35 ± 0.01 kg/s, 0.33 ± 0.01 kg/s, 0.30 ± 0.01 kg/s และ 0.28 ± 0.01 kg/s โดยจากอัตราการไหลของอากาศหลักที่ลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ $21.19 \pm 1.04\%$, $23.29 \pm 1.03\%$, $26.27 \pm 1.29\%$ และ $28.65 \pm 0.78\%$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า เตามีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ $28.65 \pm 0.78\%$ ที่อัตราการไหลของอากาศหลักเท่ากับ 0.28 ± 0.01 kg/s ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อทำการปิดระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลัก หรืออีกความหมายหนึ่งคือมีเพียงการไหลของอากาศตามธรรมชาติเท่านั้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราการไหลของอากาศหลักแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราการไหลของอากาศหลัก

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน ผลจากการปรับปรุงในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งก็คือกรณีที่ทำการปิดระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลัก หรือก็คือเหลือเพียงการไหลของอากาศตามธรรมชาติเท่านั้น นำมาสู่ขั้นตอนที่ 2 การติดตั้งระบบหมุนเวียนก๊าซไอเสีย โดยใช้พัดลมในการดูดไอเสียออกจากบริเวณฐานปล่องกลับมาเป่าเข้าที่บริเวณช่องลมใหม่อีกครั้ง โดยทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนที่กรณีต่าง ๆ กันทั้งสิ้น 4 กรณี ตั้งแต่ค่าสูงสุดที่พัดลมที่ทำการติดตั้งสามารถทำได้ จนถึงค่าต่ำสุดที่สามารถปรับตั้งได้ โดยมีค่าอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนเท่ากับ 11.49×10^{-3} kg/s, 14.04×10^{-3} kg/s, 17.79×10^{-3} kg/s และ 21.07×10^{-3} kg/s ซึ่งคิดเป็น 4.10%, 5.01%, 6.35% และ 7.52% ของอัตราการไหลของอากาศหลัก (0.28 kg/s) ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งถึงระดับหนึ่ง และเริ่มลดลง โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ $30.30 \pm 0.70\%$, $31.85 \pm 0.83\%$, $35.59 \pm 1.10\%$ และ

28.95±0.86% ตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนเท่ากับ 6.35% ของอัตราการไหลของอากาศหลัก จะส่งผลให้เตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 35.59±1.10% กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน

สรุปผลและเสนอแนะ

สรุปผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของอากาศหลัก มีดังนี้

ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวในขั้นตอนที่ 1 (หาค่าอัตราการไหลของอากาศหลักที่เหมาะสม) พบว่า อัตราการไหลของอากาศหลักที่เหมาะสมของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.28 kg/s ทำได้โดยการปิดระบบเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหลัก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวที่ใช้ในการทดลองมีค่า 28.65±0.78%

สรุปผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวด้วยวิธีการปรับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียน

ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวในขั้นตอนที่ 2 (หาค่าอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนที่เหมาะสม) ด้วยการทดลองหาค่าอัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนที่เหมาะสมต่อเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวพบว่า อัตราการไหลของก๊าซไอเสียหมุนเวียนที่เหมาะสมของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าวเท่ากับ 17.79×10^{-3} kg/s หรือเท่ากับ 6.35% ของอัตราการไหลของอากาศหลัก โดยช่วยให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 35.59±1.10%

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากไม่สามารถปรับปรุงตัวเตาได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเจ้าของเตา ทำให้ไม่สามารถวัดค่าบางค่าได้ เช่น การวัดส่วนประกอบของไอเสียที่บริเวณปากปล่อง อีกทั้งในการปรับปรุงขั้นตอนที่ 1 สามารถทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อีก หากปรับลดอัตราการไหลของอากาศได้มากขึ้นโดยติดตั้ง Damper ที่ปล่องไอเสีย
2. การวัดความเร็วลมควรมีการวัดหลายจุดบนหน้าตัด ตามแนวทางของ Brookhaven national laboratory safety & health services division (2018) เพื่อจะได้ความเร็วลมที่มีค่าที่สามารถเชื่อถือได้ แต่ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัด คือ ลักษณะของปากปล่องของเตาเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าวมีลักษณะเป็นรูปกากบาท จึงทำการวัดความเร็วลมที่ตรงกลางเพียงจุดเดียว

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- Adulkasem, S., Suwanapech, A., Phongsai, N. and Chaowalit, O. (2015). “tonbæp rabop kân khuāpkhum læ chatkân khruāngchak læ ‘alai khruāngchak : kōrānī suksā rōngngān phalit namtān”. [System Prototype of Control and Management Machine and Spare Part: A case study of Sugar Manufacturing Plant] Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University 2, 2 (July–December): 89-101.
- สุจิตรา อุดลย์เกษม, อภิรัตน์ สุวรรณเพ็ชร, นิชาภัทร ผ่องใส และอรรณพ เชาวลิต. (2558). “ต้นแบบระบบการควบคุมและจัดการเครื่องจักรและอะไหล่เครื่องจักร: กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำตาล”. Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University 2, 2 (กรกฎาคม–ธันวาคม): 89-101.
- Bunayoprakan, P. (2000). “kân prapprung huā taokæt hung tom phūā phoēm prasitthiphāp choēng khwām rōk læ prayuk chai nai khruārūān”. [Improvement of Cooking Gas Burner for Higher Thermal Efficiency and Household Application] Master of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- ภานุวัฒน์ บุญโยประการ. (2543). “การปรับปรุงหัวเตาแก๊สหุงต้ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประยุกต์ใช้ในครัวเรือน”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Chaiwong, K., Wichan, N., Saenthawisuk, A., Thawongnamyingsakun, J. and Junhom, T. (2016). “phon khōng ‘ākāt pōk tō prasitthiphāp choēng khwām rōk khōng tao thān chīwaphāp chāk watsadu lūa thing thāngkân kaset”. [Effect of Inlet Air Flow on Thermal Efficiency of Bio-Char Stove from Agricultural Waste] RMUTL Engineering Journal 1: 37-42.
- กันยาพร ไชยวงศ์, ณัฐพล วิชาญ, อาริยะ แสนทวีสุข, จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และธัญติภรณ์ จันทร์หอม. (2559). “ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร”. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 1: 37-42.
- Morakun, W., Kanphangam, S. and Duriyang, A. (2007). “kân ‘op hæng namtān maphrāo dōi chai khruāng ‘op hæng bæp pam khwām rōk”. [Dried Coconut Using A Heat Pump Dryers] Bachelor of Engineering, Silpakorn University.
- วันทวรรณ โมรากุล, ศุภสิทธิ์ กันพางาม และเอกลักษณ์ ดุริยางค์. (2550). “การอบแห้งน้ำตาลมะพร้าวโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน”. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Natan, J., Urukachen, N. and Muangha, W. (2010). “kân ‘op hæng namtān maphrāo dōi chai khruāng ‘op hæng bæp pam khwām rōk”. [Guidelines for The Study on Efficiency of Coconut Sugar Cooking Stove] Bachelor of Engineering, Silpakorn University.

- เจนณรงค์ นาดัน, ณัฐวุฒิ อรุณจันทร์ และวีระพงษ์ เหมือนห้า. (2553). “แนวทางการศึกษาประสิทธิภาพเตาเคี่ยวน้ำตาลมะพร้าว”. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Siudom, Y. and Krachangthimaphon, A. (2011). “kān prapprung prasitthiphāp choēng khwām rōk khoṅg tao tom klūā : koṛanī suksā ‘amphoe boḥklūā chāngwat Nān”. [Thermal Efficiency Improvement of Salt Producing Stove: Case Study of Amphoe Bo Kluea, Nan Province] RMUTP Research Journal 5, 2 (September): 92-101.
- ยุธนา ศรีอุดม และเอกณัฐ กระจำจิมภาพร. (2554). “การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาต้มเกลือ: กรณีศึกษา อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน”. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 5, 2 (กันยายน): 92-101.
- Sukkhothai, A. (2013). “kān prapprung prasitthiphāp choēng khwām rōk khoṅg tūnū ngok ‘on chūā het doī chai chanūān khwām rōk chāk sēt watsadu nai thammachāt lūā thing nai thoṅgthin”. [Thermal Efficiency Improvement of Steamed Mushroom Cabinet by Using Thermal Insulation from Local Natural Waste Meterials] Master of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- อภิชาติ สุขโขทัย. (2556). “การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้นึ่งก้อนเชื้อเห็ดโดยใช้ฉนวนความร้อนจากเศษวัสดุในธรรมชาติเหลือทิ้งในท้องถิ่น”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Thepphakon, W. (2005). namtān maphrāo khwām wān chāk phūmpanyā Thai. [Coconut Sugar Sweetness of Thai Wisdom] Bangkok: Aksoncharoenthat.
- วีระ เทพกรณ์. (2548). น้ำตาลมะพร้าว ความหวานจากภูมิปัญญาไทย. กรุงเทพฯ: อักษรเจริญทัศน์.
- Thimto, K. (2004). kānphalit namtān maphrāo ploṭi sān phit tambon bāng khrok ‘amphoe bān lāēm chāngwat phet burī. [Production of organic coconut sugar, Tambon Bangkhla, Amphoe Ban laem Phetchaburi Province] Phetchaburi: Phetchaburi Rajabhat University.
- ชนิษฐา ทิมใต้. (2547). การผลิตน้ำตาลมะพร้าวปลอดสารพิษ ตำบลบางครก อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. เพชรบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- Thongamphai, P. (2018). namtān maphrāo wān yāng mīwang [Sugar Coconut Sweet Hope] Accessed September 29. Available from <http://www.komchadluek.net/news/agricultural/233190>.
- พีรเดช ทองอำไพ. (2018). น้ำตาลมะพร้าว หวานอย่างมีหวัง. เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน. เข้าถึงได้จาก <http://www.komchadluek.net/news/agricultural/233190>.

- Wanletlak, W. (2017). khwāmru̐ kiēokap khōṅlai. [Fluid Knowledge] Accessed June 13. Available from <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7268-fluid>.
- วีฑิต วรรณเลิศลักษณ์. (2560). ความรู้เกี่ยวกับของไหล. เข้าถึงเมื่อ 13 มิถุนายน. เข้าถึงได้จาก <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7268-fluid>.
- Wasananon, D., Lt.Col. (2008). “rūāṅ ‘oṭ tan wān lin”. [Sugar Cane & Sugar Palm] Veterinary & Remount Department Journal 25, 2 (July–December): 26-28.
- ดลฤดี วาสนานนท์, พันโท. (2551). “เรื่องอ้อยตาลหวานลิ้น”. วารสารการสัตว 25, 2 (กรกฎาคม–ธันวาคม): 26-28.

ภาษาต่างประเทศ

Eastlake, C.N. (2002). “An Aerodynamicist’s View of Lift, Bernoulli, and Newton”. THE PHYSICS TEACHER 40: 166-173.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). World agriculture: towards 2015/2030. Accessed September 29. Available from <http://www.fao.org/docrep/004/y3557e/y3557e00.htm#TopOfPage>.

Monte, M.D., Padoano, E. and Pozzetto, D. (2003). “Waste heat recovery in a coffee roasting plant”. Applied Thermal Engineering 23: 1033-1044.

Mukherjee, S., Asthana, A., Howarth, M. and Mcniell, R. (2017). “Waste heat recovery from industrial baking ovens”. Energy Procedia 123: 321-328.

Popov, S.K., Svistunov, I.N., Garyaev, A.B., Serikov, E.A. and Temyrkanova, E.K. (2017). “The use of thermochemical recuperation in an industrial plant”. Energy 127: 44-51.

Cheng, Q., Zhang, X. and Jiao, S. (2017). “Influence of concentration difference between dilute cells and regenerate cells on the performance of electrodialysis regenerator”. Energy 140: 646-655.

Gamrat, S., Poraj, J., Bodys, J., Smolka, J. and Adamczyk W. (2016). “Influence of external flue gas recirculation on gas combustion in a coke oven heating system”. Fuel Processing Technology 152: 430-437.

Brookhaven national laboratory safety & health services division. (2018). Environmental and Climate Sciences Department. Accessed February 17. Available from <https://www.bnl.gov/envsci/envtech/>.