

การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล

Torrefaction of Pelletizing Fuel from Solid Waste of Sugar Industry

นราธร มหรรทสันพงษ์ (Narathorn Mahantadsanapong)¹* ดร.ยูวรัตน์ เงินเย็น (Dr.Yuvarat Ngernyen)**

(Received: December 20, 2018; Revised: March 21, 2019; Accepted: March 27, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ซึ่งเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยกากหม้อกรองจะถูกอัดเม็ดให้เป็นรูปทรงกระบอก ที่ความดัน 30 บาร์ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1.25 เซนติเมตร จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 200–350°C เป็นเวลา 0.5–2 ชั่วโมง พบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์ ความหนาแน่นของเม็ด ความหนาแน่นรวม และความสามารถในการรับแรงกดอัดมีค่าลดลง แต่ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตอนไม่ได้ทอริแฟคชัน เนื่องจากภายหลังการทอริแฟคชัน ตัวอย่างมีปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิในการทอริแฟคชันมีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ มากกว่าเวลาในการทอริแฟคชัน โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์จากกากหม้อกรองมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 16–30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์จากงานวิจัยอื่น ๆ ดังนั้น กากหม้อกรองจึงมีศักยภาพสูงในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด และกระบวนการให้ความร้อนเป็นกระบวนการที่สามารถนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล

ABSTRACT

This research aimed to study the torrefaction of pelletizing fuel from filter cake as solid residue in sugar industry. To obtain the cylindrical fuel pellets (1 cm in diameter and 1.25 cm in length), the filter cake was compressed at 30 bar and then torrefied at 200–350°C for 0.5–2 hr. With the rise of torrefaction temperature and time, our characterization results showed that the product yield, pellet density, bulk density and compressive strength decreased, whereas the heating value noticeably increased due to the fact that the torrefied pellet provides higher carbon content that act as energy source than the non-torrefied one. However, by investigating all properties of torrefied pellet when the torrefaction temperature and time changed, the effect of temperature showed a greatly significant parameter than time. The heating values of torrefied pellet was 16–30 MJ/kg, which is consistent to others reported in the literatures. Therefore, filter cake has shown a great potential as raw material for production of fuel pellets and this thermal process can also be applied to produce higher quality fuel derived from sugar industry.

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงอัดเม็ด กากหม้อกรอง ทอริแฟคชัน

Keywords: Pelletizing fuel, Filter cake, Torrefaction

¹ Correspondent author: Narathorn.m@kkumail.com

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยและใช้ประโยชน์จากอ้อยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมที่สำคัญนั้น คือ อุตสาหกรรมน้ำตาล และจากกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น จะมีของเสียเกิดขึ้น ได้แก่ ขานอ้อย (bagasse) กากน้ำตาล (molasses) และกากตะกอน หรือ กากหม้อกรอง (filter cake) โดยขานอ้อยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง กากน้ำตาลถูกนำไปใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ ส่วนกากหม้อกรองถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน

กากหม้อกรอง คือ กากตะกอนที่แยกออกจากน้ำอ้อยในขั้นตอนการทำน้ำอ้อยให้สะอาด (clarification) โดยการกรองผ่านหม้อกรองสูญญากาศ (vacuum rotary filter) มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งจากกระบวนการผลิตน้ำตาล จะได้กากหม้อกรอง 3–9% ของน้ำหนักอ้อย [1] โดยในปี 2559 มีอ้อยเข้าหีบทั่วประเทศ 50.06 ล้านตัน ดังนั้น จะมีกากหม้อกรองจากการผลิตน้ำตาลอย่างน้อยปีละ 1.5–4.5 ล้านตัน [2] กากหม้อกรองมีส่วนผสมของขานอ้อย ปูนขาว ดินโคลน และน้ำตาล โดยการที่กากหม้อกรองมีขานอ้อยเป็นส่วนผสมหนึ่ง ซึ่งขานอ้อยเป็นวัสดุชีวมวลที่สามารถให้พลังงานความร้อนได้ โดยมีค่าความร้อนประมาณ 9,500 kJ/kg [3] ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำกากหม้อกรองไปใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิง นอกเหนือจากการนำไปเป็นปุ๋ย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากหม้อกรอง

อย่างไรก็ตาม หากนำกากหม้อกรองมาใช้โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป อาจเกิดปัญหาเนื่องจากตัวอย่างไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้ออกมาไม่สม่ำเสมอ นอกจากนั้น รูปร่างของตัวอย่างที่แตกต่างกัน ทำให้การขนย้ายกระทำได้น้อย ส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาการขนส่งเป็นอย่างมาก ซึ่งจากปัญหาดังที่กล่าวมา สามารถแก้ไขได้โดยการอัด (densification) ตัวอย่าง ให้เป็นเม็ดหรือเป็นแท่ง โดยการอัดจะมีทั้งการใช้ตัวประสาน (binder) และไม่ใช่ตัวประสาน ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเพิ่มค่าความร้อนให้กับตัวอย่างได้โดยกระบวนการที่เรียกว่า ทอริแฟคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับตัวอย่างด้วยอุณหภูมิต่ำ กล่าวคือ อยู่ในช่วง 200–300°C ในสภาวะบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งในกระบวนการทอริแฟคชันนั้น น้ำจะถูกนำออกจากโครงสร้างของวัสดุ และเกิดการสูญเสียสารระเหย ทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และมีความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการทอริแฟคชัน โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการทำทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ซึ่งการอัดเม็ดจะไม่ใช้ตัวประสาน เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้



ภาพที่ 1 กากหม้อกรองจากโรงงานผลิตน้ำตาลแห่งหนึ่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัย

วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาการทอรีแฟลชันกากหม้อกรองอัดเม็ดต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเชื้อเพลิง

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบและการอัดเม็ด

กากหม้อกรองได้จากโรงงานผลิตน้ำตาลแห่งหนึ่ง โดยวัตถุดิบเริ่มต้นมีความชื้นสูงถึงประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ดังนั้น ก่อนนำมาใช้เตรียมเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด จะนำมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำหนักของวัตถุดิบมีค่าคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างมาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh (ขนาดตะแกรง 850 ไมโครเมตร)

การอัดเม็ดกากหม้อกรองทำโดยนำตัวอย่างที่บดเป็นผงและร่อนแล้ว มาป้อนใส่บล็อกที่ใช้ในการอัดเม็ดจนเต็มช่อง ซึ่งมีช่องสำหรับใส่ตัวอย่างทั้งหมด 25 ช่อง ในแต่ละช่องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร จากนั้นทำการอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่ความดัน 30 บาร์ โดยใช้มือโยกคันโยกเพื่อให้ได้ความดันตามที่ต้องการ โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเม็ดเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนดไว้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง มีค่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หรือ 0.6 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 12 มิลลิเมตร หรือ 1.2 เซนติเมตร ส่วนความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง ร้างมาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร หรือ 0.315 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 40 มิลลิเมตร หรือ 4 เซนติเมตร ทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง [4] โดยภาพที่ 2 แสดงบล็อกสำหรับอัดเม็ดและเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 2 บล็อกสำหรับอัดเม็ดและเครื่องอัดไฮดรอลิก

2. การทอรีแฟลชัน

ทำโดยชั่งตัวอย่างที่อัดเม็ดแล้วประมาณ 30 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) ทำจากเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร นำเครื่องปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงแบบแนวดิ่ง จากนั้นให้ความร้อนด้วยอัตรา $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการทำทอรีแฟลชัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ได้จากกราฟการสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบ โดยจะได้ค่าถึงรายละเอียดในผลการวิจัยต่อไป โดยเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟลชัน คือ 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง เมื่อทำการทอรีแฟลชันตามอุณหภูมิและ

เวลาที่ต้องการแล้ว นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก ทำการบันทึกน้ำหนัก เพื่อนำไปหารร้อยละผลได้ (yield) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ตามสมการที่ (1)

$$\text{Yield (\%)} = \frac{w_f}{w_i} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ w_i คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนทำการทอรีแฟคชั่น และ w_f คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังทำการทอรีแฟคชั่น

3. การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้

สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเชื้อเพลิงของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เตรียมได้ทั้งที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นและไม่ผ่านการทอรีแฟคชั่น ประกอบไปด้วย (1) การสลายตัวทางความร้อน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มา กำหนดอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นต่อไป ทำโดยการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 700°C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA, TGA-50, SHIMADZA) โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C/min (2) การสังเกตลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยตาเปล่า โดยสังเกตว่าลักษณะของเม็ดแน่นหรือไม่ หรือ มีส่วนที่แตกหักหรือไม่ รวมถึงสังเกตสีของเม็ดเชื้อเพลิง (3) การหาค่าความร้อน ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (bomb calorimeter, GALLENKAMP) (4) การหาค่าความหนาแน่นของเม็ด (pellet density) หรือ ค่าความหนาแน่นจริง (true density) ทำโดยวัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเวอร์เนียคิเจอร์ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงด้วยเครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง โดยทำการทดลองทั้งหมด 25 เม็ด ตามจำนวนเม็ดที่ได้จากการอัด 1 ครั้ง คำนวณความหนาแน่นของเม็ดตามสมการ ความหนาแน่นของเม็ด = น้ำหนักของเม็ด/ปริมาตรของเม็ด (5) การหาค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ทำได้โดยการนำตัวอย่างบรรจุลงในกล่องขนาด 10×10×10 เซนติเมตร หรือมีปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างที่บรรจุได้ทั้งหมดไปชั่งน้ำหนัก ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วคำนวณความหนาแน่นรวมตามสมการ ความหนาแน่นรวม = น้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมดที่บรรจุลงในกล่อง/1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (6) การหาค่าประกอบแบบประมาณ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย เถ้า และความชื้น โดยการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ใช้มาตรฐาน EN 14774-1: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าและปริมาณสารระเหยใช้ตัวอย่างที่หาปริมาณความชื้นแล้วตามมาตรฐาน EN 14775: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of ash content และ EN 15148:2009 Solid biofuels. Determination of the content of volatile matter ตามลำดับ จะได้ค่าในฐานมวลแห้ง (dry basis) ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบอื่น ๆ นั่นคือ คาร์บอนคงตัว = 100 – ร้อยละปริมาณเถ้า – ร้อยละปริมาณสารระเหย และ (7) การหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัด (compressive strength) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM C 39-96 โดยหาความความคงทนต่อการรับแรงอัดของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ทั้งในแนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal)

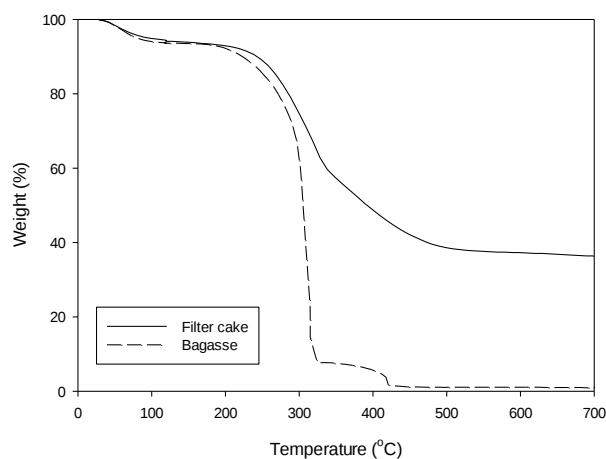
ผลการวิจัย

1. การสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบเพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่น

ภาพที่ 3 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากหม้อกรอง (filter cake) เปรียบเทียบกับขานอ้อย (bagasse) ที่ได้จากโรงงานเดียวกัน พบว่า กราฟการสลายตัวของวัสดุทั้งสองมีการลดลงของน้ำหนัก 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 120°C โดยน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมินี้ คือ ความชื้นที่สามารถอยู่ในตัวอย่างภายหลังจากทำให้วัตถุดิบเริ่มต้นจากโรงงานแห้งแล้ว โดยจะเห็นได้ว่ากากหม้อกรองสามารถลดความชื้นจากบรรยากาศเข้ามาในโครงสร้างประมาณร้อยละ 5

โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นค่าความชื้นที่น้อยมาก ดังนั้น กากหม้อกรองจึงเป็นวัตถุดิบที่ดีที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องทำการลดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน (นอกเหนือจากการต้องลดความชื้นเมื่อได้วัตถุดิบมาจากโรงงาน) ทำให้เกิดความสะดวกต่อผู้ใช้งาน

การลดลงของน้ำหนักในช่วงที่ 2 คือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 500°C โดยน้ำหนักของตัวอย่างจะลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สารระเหยต่าง ๆ เกิดการสลายตัว โดยระเหยออกไปจากโครงสร้างเหลือเพียงแต่องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงาน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟกซ์คือช่วงอุณหภูมินี้ นอกจากนั้น ยังจะเห็นได้ว่ากากหม้อกรองมีองค์ประกอบไม่เหมือนกับขานอ้อย โดยการสลายตัวของวัสดุทั้งสองจะเริ่มแตกต่างกันที่อุณหภูมิประมาณ 200°C และจะแตกต่างกันอย่างมากที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300°C เป็นต้นไป ซึ่งกราฟการสลายตัวของขานอ้อยจะเหมือนกับกราฟการสลายตัวของวัสดุชีวมวลชนิดอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ดังนั้น กราฟการสลายตัวนี้จึงยืนยันว่ากากหม้อกรองไม่ได้มีองค์ประกอบเฉพาะขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเท่านั้น แต่ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ อีกด้วย



ภาพที่ 3 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากหม้อกรอง (filter cake) และขานอ้อย (bagasse)

2. สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เตรียมได้

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ ที่ได้ข้อมูลว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟกซ์คือช่วงอุณหภูมิ 200–500°C ดังนั้น จึงทำการทอรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350°C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่า ภายหลังจากทำทอรีแฟกซ์แล้ว เม็ดตัวอย่างมีสีเข้มขึ้น โดยการทำทอรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 200°C สีเข้มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยจะสังเกตด้วยตาเปล่าได้ว่า เม็ดตัวอย่างมีสีเข้มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อใช้อุณหภูมิในการทอรีแฟกซ์ 300°C ขึ้นไป โดยการทำทอรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 350°C ได้ตัวอย่างลักษณะคล้ายถ่าน ดังแสดงในภาพที่ 4 อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิการทอรีแฟกซ์เดียวกัน การเพิ่มเวลาไม่ได้ทำให้สีของตัวอย่างมีความแตกต่างกัน จึงไม่ได้แสดงรูปในบทความนี้ โดยที่ทุกอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟกซ์ จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีลักษณะแน่น ไม่แตกหัก



ภาพที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของกากหม้อกรองอัดเม็ดที่ก่อนการทอริแฟกชันและหลังการทอริแฟกชัน
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 แสดงร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายหลังการทำทอริแฟกชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิในการทำทอริแฟกชันเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการทอริแฟกชันจาก 0.5 ชั่วโมง ไปเป็น 2 ชั่วโมง ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าลดลง แต่เป็นการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ที่เวลาในการทอริแฟกชันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอริแฟกชันสูงขึ้นจากจาก 200°C ไปเป็น 350°C ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ทำให้สารระเหยในตัวอย่างสามารถสลายตัวได้มากขึ้น เหลือเป็นองค์ประกอบคาร์บอนมากขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stelte, Nielsen, Hansen, Dahl., Shang and Sanadi [5] ที่เตรียมเม็ดเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากฟางข้าวสาลี โดยทำการทอริแฟกชันที่อุณหภูมิ 150 200 250 และ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการทอริแฟกชันที่อุณหภูมิ 150°C ร้อยละผลได้ของเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าลดลงจากการไม่ทำทอริแฟกชันเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอริแฟกชันสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าลดลง โดยลดลงเป็นอย่างมากที่อุณหภูมิ 300°C นอกจากนั้น ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao et al. [6] ที่พบว่า การทอริแฟกชันเม็ดเชื้อเพลิงทำให้ได้ร้อยละผลได้ลดลง หรือ เกิดการสูญเสียน้ำหนัก

ตารางที่ 1 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (โดยน้ำหนัก) ภายหลังการทำทอริแฟกชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C) และเวลา (ชั่วโมง)	0.5	1	1.5	2
200	96.58	96.10	95.18	94.74
250	94.80	93.88	91.86	91.14
300	67.02	59.20	57.39	54.18
350	52.21	51.36	51.28	50.57

เมื่อทำการทอริแฟกชันกากหม้อกรองอัดเม็ด พบว่า ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากตอนไม่ได้ทำทอริแฟกชัน ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟกชัน ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มเวลาในการทอริแฟกชันจาก 0.5 ไปเป็น 2 ชั่วโมง สำหรับทุกอุณหภูมิ ทำให้ตัวอย่างมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเพิ่มอุณหภูมิในการทอริแฟกชันจาก 200 ไปเป็น 350°C จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งการทอริแฟกชันทำให้น้ำถูกนำออกจากโครงสร้างของวัสดุ นอกจากนั้น ความร้อนยังทำให้เฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชานอ้อยที่มีอยู่ในกากหม้อกรองเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมินี้ (เฮมิเซลลูโลสสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 250–320°C ส่วนเซลลูโลสสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 370–420°C [7]) ทำให้ตัวอย่างมีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองก่อนการทอริแฟกชันมีค่าความร้อน 13,954 kJ/kg ภายหลังการทอริแฟกชันมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 16,552–29,959 kJ/kg ซึ่งตามมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด กำหนดไว้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเกรดธรรมดา มีค่าไม่น้อยกว่า 14,600 kJ/kg ส่วนเกรดคุณภาพสูงมีค่าไม่น้อยกว่า 16,700 kJ/kg [4] ดังนั้น กากหม้อกรองอัดเม็ดจึงมีค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stelte, Nielsen, Hansen, Dahl, Shang and Sanadi [5] ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ โดยค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงจากฟางสาละมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อใช้อุณหภูมิในการทอรีแฟคชัน 150 และ 200°C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันสูงขึ้น ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมากที่อุณหภูมิ 300°C ประมาณ 40% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทอรีแฟคชัน นอกจากนี้ การทอรีแฟคชันตัวอย่างอัดเม็ดแล้วได้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Manouchehrinejad and Mani [8] และ Cao et al. [6]

ตารางที่ 2 ค่าความร้อน ความหนาแน่นของเม็ด และความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรองอัดเม็ดก่อนและหลังการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความหนาแน่นของเม็ด (g/cm ³)	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)
ก่อนการทอรีแฟคชัน	13,954	0.72	0.30
ทอรีแฟคชัน 200°C			
0.5 ชั่วโมง	16,552	0.71	0.29
1 ชั่วโมง	16,697	0.70	0.30
1.5 ชั่วโมง	16,723	0.69	0.29
2 ชั่วโมง	16,809	0.69	0.29
ทอรีแฟคชัน 250°C			
0.5 ชั่วโมง	21,689	0.71	0.28
1 ชั่วโมง	22,110	0.69	0.28
1.5 ชั่วโมง	22,246	0.69	0.27
2 ชั่วโมง	22,583	0.67	0.28
ทอรีแฟคชัน 300°C			
0.5 ชั่วโมง	22,338	0.52	0.17
1 ชั่วโมง	22,351	0.51	0.17
1.5 ชั่วโมง	22,421	0.51	0.17
2 ชั่วโมง	22,642	0.49	0.18
ทอรีแฟคชัน 350°C			
0.5 ชั่วโมง	27,226	0.43	0.15
1 ชั่วโมง	28,793	0.42	0.14
1.5 ชั่วโมง	29,524	0.42	0.15
2 ชั่วโมง	29,959	0.41	0.14

ภายหลังการทำทอริแฟลช ความหนาแน่นของเม็ดมีค่าลดลง เนื่องจากการทอริแฟลชเกิดการสูญเสีย น้ำหนักไปกับน้ำและสารระเหยที่สลายตัวไประหว่างกระบวนการ ดังนั้น จากสูตรการหาความหนาแน่นของเม็ดที่ว่า น้ำหนักของเม็ดหารด้วยปริมาตรของเม็ด เมื่อการทอริแฟลชไม่ได้ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเม็ด เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของเม็ดจึงเท่าเดิม เมื่อน้ำหนักของเม็ดลดลง ความหนาแน่นของเม็ดจึงลดลง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในการทอริแฟลช ความหนาแน่นของเม็ดจะลดลงค่อนข้างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ตัวอย่างสูญเสีย น้ำหนักมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการทอริแฟลช ความหนาแน่นของเม็ดจะลดลงเพียงเล็กน้อย ดัง แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ยังแสดงค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงภายหลังการทำทอริแฟลชเปรียบเทียบกับก่อนการ ทำทอริแฟลช พบว่า ภายหลังการทำทอริแฟลชค่าความหนาแน่นรวมมีค่าลดต่ำลง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ระหว่าง กระบวนการทอริแฟลช เกิดการสูญเสียน้ำหนักไปกับน้ำและสารระเหย ทำให้น้ำหนักของเม็ดลดต่ำลง แต่ปริมาตร ของเม็ดเท่าเดิม เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเม็ดไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น เมื่อบรรจุเม็ดเชื้อเพลิงลง ในกล่องปริมาตร จึงสามารถบรรจุได้จำนวนเม็ดเท่า ๆ เดิม แต่น้ำหนักรวมของเม็ดตัวอย่างเบาขึ้น ค่าความหนาแน่น รวมจึงน้อยลง โดยที่อุณหภูมิในการทอริแฟลช 200–250°C ค่าความหนาแน่นรวมลดลงเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิใน การทอริแฟลชเพิ่มสูงขึ้นเป็น 300–350°C ค่าความหนาแน่นรวมลดลงค่อนข้างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้ สูญเสียน้ำหนักมากขึ้น ส่วนเวลาในการทอริแฟลชไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวม

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดเชื้อเพลิงทอริไฟด์เปรียบเทียบกับก่อนทำการทอริแฟลช พบว่าภายหลังการทำทอริแฟลช ค่าความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ ความร้อนทำให้เกิดการ สลายตัวของเฮมิเซลลูโลสใน โครงสร้างของขานอ้อยที่เป็นส่วนประกอบของกากหม้อกรอง เป็นการทำลายหมู่ –OH ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ การดูดความชื้นกลับจึงต่ำ โดยอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟลชไม่มีผลต่อค่า ความชื้น ซึ่งผลการทดลองที่ว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์มีค่าความชื้นต่ำกว่าเชื้อเพลิงก่อนการทอริแฟลช สอดคล้องกับ งานวิจัยของ Stelte et al. [9] Stelte, Nielsen, Hansen, Dahl., Shang and Sanadi [5] และ Manouchehrinejad and Mani [8]

ภายหลังจากการทำทอริแฟลช เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Stelte et al. [9] Stelte, Nielsen, Hansen, Dahl., Shang and Sanadi [5] Cao et al. [6] และ Manouchehrinejad and Mani [8] นอกจากนี้ เม็ดเชื้อเพลิงทอริไฟด์ยังมีสารระเหยลดต่ำลง โดยเมื่ออุณหภูมิในการทอริแฟลชเพิ่มสูงขึ้น ค่าสารระเหยของตัวอย่างมี ค่าลดต่ำลง เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้สารระเหยสามารถสลายตัวออกไปจากโครงสร้างมากขึ้น โดยผลการ ทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Manouchehrinejad and Mani [8] และ Cao et al. [6]) อย่างไรก็ตาม เวลาในการ ทอริแฟลชไม่มีผลต่อปริมาณสารระเหยเช่นกัน

สำหรับปริมาณคาร์บอนคงตัวในเม็ดเชื้อเพลิงทอริไฟด์ พบว่า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการทำทอริแฟลช สอดคล้องกับงานวิจัยของ Manouchehrinejad and Mani [8] และ Cao et al. [6] เนื่องจากกระบวนการทอริแฟลชทำให้ สารระเหยออกไปจากโครงสร้าง เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นคาร์บอน ซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงาน ดังนั้น เมื่อเชื้อเพลิงทอริไฟด์ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น จึงมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิในการทอริแฟลช 350°C มีปริมาณ คาร์บอนคงตัวสูงที่สุด จึงมีค่าความร้อนสูงที่สุดเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังทอริแฟลคชัน

อุณหภูมิ (°C) และเวลา (ชั่วโมง)	ความชื้น หลังการอบไล่ออกจากวัตถุดิบ เริ่มต้น	คาร์บอนคงตัว	สารระเหย	เถ้า
		ฐานมวลแห้ง (dry basis)		
ก่อนการทอริแฟลคชัน	2.95	11.81	50.11	38.08
ทอริแฟลคชัน 200°C				
0.5 ชั่วโมง	1.04	12.91	48.42	38.67
1 ชั่วโมง	1.04	14.24	47.08	38.68
1.5 ชั่วโมง	1.03	13.75	47.25	39.00
2 ชั่วโมง	1.06	13.45	47.11	39.44
ทอริแฟลคชัน 250°C				
0.5 ชั่วโมง	1.09	12.99	48.27	38.74
1 ชั่วโมง	1.06	12.28	47.88	39.84
1.5 ชั่วโมง	1.15	14.48	46.74	38.78
2 ชั่วโมง	1.08	14.84	46.57	38.59
ทอริแฟลคชัน 300°C				
0.5 ชั่วโมง	1.05	21.53	39.09	39.33
1 ชั่วโมง	1.03	22.49	38.62	38.89
1.5 ชั่วโมง	1.07	22.48	37.69	39.83
2 ชั่วโมง	1.05	22.32	38.18	39.50
ทอริแฟลคชัน 350°C				
0.5 ชั่วโมง	1.16	29.91	31.76	38.33
1 ชั่วโมง	1.12	29.22	31.67	39.11
1.5 ชั่วโมง	1.07	30.01	31.53	38.46
2 ชั่วโมง	1.13	29.61	31.24	39.15

เมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ทำการทอริแฟลคชันที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง ไปทดสอบการรับแรงอัด (เหตุผลที่เลือกตัวอย่าง 2 ตัวนี้ เนื่องจากที่อุณหภูมิในการทอริแฟลคชันนี้ ให้เม็ดความร้อนที่มีค่าความร้อนสูง โดยเวลาในการทอริแฟลคชันมีผลต่อค่าความร้อนน้อย ดังนั้น จึงเลือกที่เวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานกว่าการใช้เวลานานขึ้น) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า เม็ดเชื้อเพลิงภายหลังการทำทอริแฟลคชันมีความสามารถในการรับแรงอัดน้อยลงทั้งในแนวตั้งและแนวนอน เนื่องจากการทำทอริแฟลคชันทำให้ตัวอย่างมีความเปราะ จึงรับแรงอัดได้น้อยลง โดยเมื่อเวลาในการทอริแฟลคชันเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถรับแรงกดอัดทั้งในแนวตั้งและแนวนอนลดต่ำลง นั่นคือ ตัวอย่างมีความเปราะเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stelte, Nielsen, Hansen, Dahl., Shang and Sanadi [5] ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยพบว่าเชื้อเพลิงทอริไฟด์จากฟางข้าวสาลีสามารถรับแรงอัดได้น้อยลงเมื่อเทียบกับตอนไม่ได้ทอริไฟด์ นอกจากนี้ ภายหลังจากทอริแฟลคชัน

ตัวอย่างอัดเม็ดแล้วค่าความต้านทานแรงกดอัดมีค่าลดลง ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Manouchehrinejad and Mani [8] และ Stelte et al. [9]

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัดของกากหม้อกรองอัดเม็ดก่อนและหลังการทอรีแฟลชั่น

ตัวอย่าง	แนวตั้ง (kPa)	แนวนอน (kPa)
ก่อนการทอรีแฟลชั่น	22.67	21.73
หลังการทอรีแฟลชั่น		
350°C 0.5 ชั่วโมง	17.56	15.76
350°C 1 ชั่วโมง	15.36	12.80

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เมื่อทำการทอรีแฟลชั่นซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางพลังงาน โดยให้ความร้อนกับกากหม้อกรองอัดเม็ด พบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติทางพลังงานได้ โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์มีความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จาก 13,954 kJ/kg ไปเป็น 16,552–29,959 kJ/kg โดยสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงภายหลังการทอรีแฟลชั่นไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เม็ดยังคงแน่น ไม่แตกหัก เพียงแค่สีของเม็ดเข้มขึ้นเท่านั้น ส่วนสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของเม็ดและความหนาแน่นรวมมีค่าลดลงภายหลังการทอรีแฟลชั่น อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทอรีแฟลชั่นจะได้ตัวอย่างที่ประาจะขึ้น ให้ความต้านทานต่อแรงกดอัดมีค่าลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของกากหม้อกรองอัดเม็ดทอรีไฟด์กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์จากงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งทำการอัดเม็ดไม้แล้วทำการทอรีแฟลชั่น ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า กากหม้อกรองสามารถผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเทียบเท่ากับวัสดุชีวมวลประเภทไม้ ดังนั้น การนำกากหม้อกรองมาอัดเม็ดแล้วทำการทอรีไฟด์ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากหม้อกรองในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน

ตารางที่ 5 ค่าความร้อนของกากหม้อกรองอัดเม็ดทอรีไฟด์เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์จากงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (kJ/kg)	อ้างอิง
กากหม้อกรองอัดเม็ด	16,552–29,959	งานวิจัยนี้
ไม้อัดเม็ด	20,180–27,100	Manouchehrinejad and Mani [8]
ไม้สน	19,870–23,170	Cao et al. [6]
ไม้การบูร	18,900–22,350	Cao et al. [6]
ไม้สน Scots	20,420–24,340	Shang et al. [10]

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้



เอกสารอ้างอิง

1. Supoj D. Study on Potential and Efficiency of the Mixture of Briquettes from Sugar Industrial Sludge and Bagasse. [MSc thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2003. Thai
2. Office of the cane and sugar board. Annual report 2016. Bangkok: Thailand; 2016.
3. Sudhakar J, Vijay P. Control of Moisture Content in Bagasse by Using Bagasse Dryer. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2013; 4: 1331–1333.
4. Nara P. The Biomass Pellet Standardization Project to Develop as a Biomass Fuel for the Future. Bangkok: Thailand; 1998.
5. Stelte W, Nielsen NK, Hansen HO, Dahl J, Shang L, Sanadi AR. Reprint of: Pelletizing properties of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy*. 2013; 53: 105–112.
6. Cao L, Yuan X, Li H, Li C, Xiao Z, Jiang L, Huang B, Xiao Z, Chen X, Wang H, Zeng G. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresource Technology*. 2015; 185: 254–262.
7. Heidari A, Younesi H, Rashidi A, Ghoreyshi A. Adsorptive removal of CO₂ on highly microporous activated carbons prepared from *Eucalyptus camaldulensis* wood: Effect of chemical activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014; 45: 579–588.
8. Manouchehrinejad M, Mani S. Torrefaction after palletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass and Bioenergy*. 2018; 118: 93–104.
9. Stelte W, Clemons C, Holm JK, Sanadi AR, Ahrenfeldt J, Shang L, Henriksen UB. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*. 2011; 35: 4690–4698.
10. Shang L, Nielsen NPK, Dahl J, Stelte W, Ahrenfeldt J, Holm J K, Thomsen T, Henriksen UB. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*. 2012; 101: 23–28.