



เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อยสำหรับเตาถ่านในครัวเรือน

BIOMASS PELLETS FROM SUGARCANE FILTER CAKE AND BAGASSE
FOR HOUSEHOLD CHARCOAL STOVE

จิตรา รุกิจการพานิช^{1*} และ จิรโรจน์ โสภณอรุณรัตน์²

¹รองศาสตราจารย์, ²นิสิตปริญญาโท

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-mail: jittra.r@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากส่วนผสมของกากหม้อกรองและกากอ้อยซึ่งเป็นของเสียเพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับเตาถ่านในครัวเรือน วิธีการวิจัยเริ่มจากนำกากหม้อกรองมาผสมกับกากอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทดลองใช้เป็นพลังงานในการต้มน้ำเดือดกับเตาในครัวเรือน (Water Boiling Test, WBT) ผลการวิจัยพบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ที่ความชื้น 10% ให้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 189 ± 3.17 กรัมต่อน้ำ 1,000 ml ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ $14.04 \pm 0.22\%$ ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดเท่ากับ 15.94 ± 0.14 นาที อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.71 ± 0.01 kg/h อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 0.19 ± 0.01 ทั้งนี้เทียบเท่ากับกำลังไฟเท่ากับ $2,547 \pm 54.21$ วัตต์

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน; เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด; กากอ้อย; กากหม้อกรอง

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the optimal proportion of biomass pellet fuel from a mixture of sugarcane filter cake and bagasse, which is a waste of energy for a household charcoal stove. The research methodology was mixing the filter cake with bagasse at various proportions and then extruded it into 10 mm diameter biomass fuel pellets and then use it as energy for boiling water on a household charcoal stove (Water Boiling Test, WBT). The results showed that the proportion of filter cake 20% at 10% humidity gave the most suitable properties with the fuel consumption was 189 ± 3.17 g/1,000 ml of water, the thermal efficiency was $14.04 \pm 0.22\%$, the boiling time of the boiling water was 15.94 ± 0.14 minutes, burning fuel consumption rate 0.71 ± 0.01 kg/h, specific fuel consumption 0.19 ± 0.01 which was equivalent to the firepower of $2,547 \pm 54.21$ W.

KEYWORDS: Renewable energy; Biomass pellets; Bagasse; Sugarcane filter cake

Jittra Rukijkanpanich^{1*} and Jiraroj Sophonarunrat²

¹Associate Professor, ²Graduate student

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

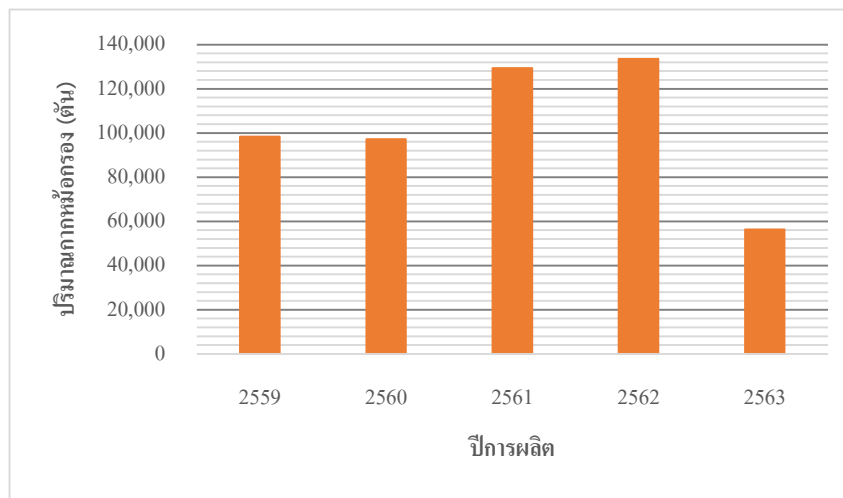
1. บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำตาลจากอ้อยเป็นอุตสาหกรรมเศรษฐกิจของไทย ซึ่งในปีพ.ศ. 2563 มีปริมาณการผลิตถึง 75 ล้านตัน [1] กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ เป็นการแปรรูปอ้อยให้เป็นน้ำตาลทรายดิบเพื่อใช้ในการส่งออกหรือเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลทรายขาวเพื่อใช้บริโภคนั้น มีของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจำพวกกากอ้อย (sugarcane bagasse) ซึ่งใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิง เช่นการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีของเสียจากกากหม้อกรอง (sugarcane filter cake) คิดเป็นปริมาณ 3-4% ของปริมาณอ้อยทั้งหมด [2] ที่ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ต้องมีการวางกองในที่โล่งแจ้ง ดังรูปที่ 1 และต้องการขนส่งเพื่อไปกำจัด ทำให้ส่งผลกระทบต่อปัญหาสภาพแวดล้อม จากข้อมูลการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาระหว่างปีพ.ศ. 2558 ถึง 2562 มีปริมาณกากหม้อกรองเฉลี่ยปีละ 100,000 ตันต่อปี ดังรูปที่ 2 ทั้งนี้มีการนำกากหม้อกรองไปเป็นสารบำรุงดินหรือแปรรูปเป็นปุ๋ยอินทรีย์อยู่บ้าง แต่เมื่อพิจารณาถึงส่วนประกอบของกากหม้อกรองพบว่ามีลิกโนเซลลูโลสคิดเป็น 15-30% ของน้ำหนักกากหม้อกรอง [3, 4] ซึ่งมีคุณสมบัติการติดไฟเช่นเดียวกับกากอ้อย จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำกากหม้อกรองมาเป็นเชื้อเพลิง

จากการสำรวจงานวิจัยในประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาว่ากากหม้อกรอง ที่ความชื้น 5.33% ให้ค่าความร้อน 11.71 MJ/kg และปริมาณเถ้า 35.67% [5] ซึ่งถือว่ายังเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพที่ต่ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาสัดส่วนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากส่วนผสมของกากหม้อกรองซึ่งเป็นของเสียกับกากอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับเตาถ่าน โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีข้อดีด้านการขนส่งและจัดเก็บที่สะดวก อีกทั้งมีประโยชน์ต่อการควบคุมระบบการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำเพราะเชื้อเพลิงมีขนาดมาตรฐาน มีน้ำหนักแน่นอน ซึ่งในอนาคตอาจจะสามารถขยายผลไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในวงกว้างต่อไป จึงคาดว่าจะสามารถช่วยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงและมีแนวโน้มส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศที่มีนโยบายใช้ขยะเป็นพลังงาน (Waste-to-energy) [6] นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีความสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศไทย พ.ศ. 2560-2564 ที่กำหนดกลยุทธ์ส่งเสริมการผลิตพลังงานทดแทนและอุตสาหกรรมชีวภาพจากอ้อยและน้ำตาลทราย [7]



รูปที่ 1 พื้นที่วางกองกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 2 ปริมาณกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษาในปีการผลิต 2559 ถึง 2563

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากหม้อกรองและกากอ้อย

กากหม้อกรอง เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงาน ส่วนกากอ้อยเป็นวัสดุที่มีเส้นใยจากธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย พลังงานความร้อนของกากอ้อย 1 ตันเทียบเท่ากับน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล [8] ดังรูปที่ 3 ส่วนกากหม้อกรอง เป็นของเสียจากการกรองโคลนในขั้นตอนทำน้ำอ้อยให้ใส ซึ่งมีองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ เช่น แคลเซียม และฟอสฟอรัส ถูกตกตะกอนออกในขั้นตอนการทำให้ใส องค์ประกอบของกากหม้อกรองและกากอ้อยแสดงดังตารางที่ 1 โดยปริมาณเส้นใยของกากหม้อกรองมีประมาณ 15-30% ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่ากากอ้อยประมาณหนึ่งในสามเท่า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของกากหม้อกรองและกากอ้อย

องค์ประกอบ (Dry basis)	กากหม้อกรอง [9]	กากอ้อย [10]
เส้นใย (Fiber)	15-30%	83-93%
เถ้า (Ash)	9-20%	1-4%
น้ำตาล (Sugar)	1-15%	1-3%
ไขดิบและไขมัน (Crude wax and fats)	4-14%	< 1%
โปรตีนรวม (Crude protein)	5-15%	-
แร่ธาตุ (Mineral)	6-18.5%	-

2.2 การทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test, WBT)

การทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด [11] เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษาคุณลักษณะของเชื้อเพลิงและเตาแต่ละชนิดด้วยการจำลองปรุงอาหารจากการต้มน้ำจนเดือด โดยให้การระเหยของน้ำเป็นไปโดยอิสระไม่ปิดฝาภาชนะที่ทดสอบ ตัวแปรที่นิยมในการเปรียบเทียบ

ได้แก่ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ระยะเวลาที่ต้มน้ำเดือด อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และกำลังไฟ [12] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้กับเตาในครัวเรือน

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Burning Fuel Consumption Rate, FCR) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด คือ ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ต่อระยะเวลาการใช้งานของเตาชีวมวล หน่วยเป็น kg/h ดังสมการที่ 1

$$FCR = \frac{M_m}{t} \quad (1)$$

M_m คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg) t คือ ระยะเวลาการใช้งานเตาชีวมวล (h)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Heat Efficiency, η) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด คือ ประสิทธิภาพในการแปรรูปเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าเปรียบเทียบเชื้อเพลิงแต่ละชนิดได้ หน่วยเป็น % ดังสมการที่ 2

$$\eta = \frac{M_{wi}C_p(T_b - T_i) + M_{we}H_l}{M_m H_m} \times 100 \quad (2)$$

M_{wi} คือ น้ำหนักน้ำก่อนต้ม (kg)

M_{we} คือ น้ำหนักของน้ำที่หายไป (kg)

M_m คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (MJ/kg °C)

T_b คือ อุณหภูมิของน้ำเดือด (°C)

H_m คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

T_i คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม (°C)

H_l คือ ความร้อนแฝงของน้ำ (MJ/kg)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption, SFC) คือ สัดส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการต้มน้ำเดือด ซึ่งเปรียบเทียบกันโดยน้ำหนัก ดังสมการที่ 3

$$SFC = \frac{M_m}{M_{wi}} \quad (3)$$

กำลังไฟ (Firepower, P) คือ อัตราพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลที่ใช้งานต่อหน่วยเวลา หน่วยเป็น วัตต์ (W) ดังสมการที่ 4

$$P = \frac{M_m \times H_m}{60 t} \quad (4)$$

3. วัสดุ เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 กากหม้อกรองและกากอ้อย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อย ดังรูปที่ 3 เมื่อนำกากหม้อกรองไปทดสอบหาค่าความร้อนและองค์ประกอบโดยประมาณ ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่ากากหม้อกรองมีค่าความร้อน 5.22 MJ/kg และปริมาณเถ้าที่สูง 51.70% จึงเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำ เมื่อเทียบกับกากอ้อยซึ่งมีค่าความร้อน 8.62 MJ/kg และปริมาณเถ้า 2.12% ดังนั้นจึงได้ผสมกากหม้อกรองและกากอ้อยที่สัดส่วนต่าง ๆ เพื่อทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ดังรูปที่ 4 ซึ่งที่สัดส่วนผสมต่างๆ จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm และมีความยาว 21 mm ใกล้เคียงกันโดยประมาณ



ก) กากหม้อกรอง



ข) กากอ้อย

รูปที่ 3 ของเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลกรณศึกษาในจังหวัดสระบุรี

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงกากหม้อกรองอัดเม็ดกับกากอ้อยของโรงงานกรณศึกษา

คุณลักษณะของเชื้อเพลิง	วิธีวิเคราะห์	กากหม้อกรอง	กากอ้อย
ค่าความร้อน (heating value)	ASTM D5865 [13]	5.22 MJ/kg	8.62 MJ/kg
ความชื้น (moisture)	ASTM D3172-3175 [14],[15],[16],[17]	17.75%	52.82%
สารระเหย (volatile matter)		26.74%	39.01%
ปริมาณเถ้า (ash)		51.70%	2.12%
คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)		3.81%	6.05%



รูปที่ 4 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มาจากส่วนผสมของกากหม้อกรอง

3.2 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบวงแหวน

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบวงแหวน ดังรูปที่ 5 ซึ่งมีกำลังการผลิต 500-2,000 kg/h ส่วนของวงแหวนอัดมีรูภายในเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 110 kW ภายในประกอบไปด้วยหัวอัดวงแหวนแนวตั้งและลูกกลิ้งที่อยู่ด้านในใช้แรงอัดกับหัวอัดวงแหวน (Ring die) จึงมีความได้เปรียบด้านกำลังการผลิต และความคงทนของเครื่องจักรมากกว่าเครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ



ก) เครื่องอัดเม็ดแบบวงแหวนทั้งชุด

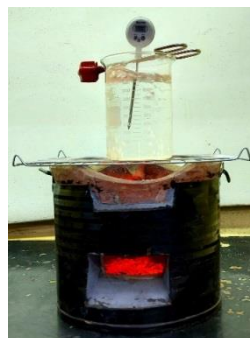
ข) หัวอัดวงแหวน

รูปที่ 5 เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบวงแหวน

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1) ทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อย เริ่มจากการผสมกากหม้อกรองและกากอ้อยที่สัดส่วนกากหม้อกรอง ตั้งแต่ 0% ถึง 100% ที่ความชื้น 10% และ 15% จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบวงแหวน ประเมินต้นทุนการผลิต เพื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ค่าความร้อนและปริมาณเถ้า

2) ทำการทดสอบ WBT กับเตาถ่านในครัวเรือน ดังรูปที่ 6 แล้ววัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทำให้น้ำเดือด ระยะเวลาต้มน้ำเดือด อุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม อุณหภูมิของน้ำตอนเดือด และมวลของน้ำที่หายไป ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วทำการคำนวณหาดัชนีชี้วัดคุณสมบัติเชื้อเพลิงได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ



รูปที่ 6 การทดสอบ WBT โดยใช้เตาถ่านในครัวเรือน

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากตารางที่ 2 ได้แสดงค่าความร้อนของกากอ้อยเป็น 8.62 MJ/kg ที่ค่าความชื้น 52.82% และค่าความร้อนของกากหม้อกรองเป็น 5.22 MJ/kg ที่ค่าความชื้น 17.75% นั้น แต่เมื่อทำการลดความชื้นของกากหม้อกรองและกากอ้อยเหลือเพียง 10% และ 15% แล้วนำมาผสมกันก่อนการอัดเม็ด จึงทำให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงขึ้นดังแสดงผลในตารางที่ 3 เช่น ที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าความร้อนสูงขึ้นเป็น 13.15 MJ/kg

นอกจากนี้ยังพบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10% ไม่สามารถอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวน เพราะส่วนผสมยังคงติดอยู่ในชุดลูกกลิ้งหัวอัดจนกระทั่งไฟฟ้าในระบบการอัดสูงเกินกว่าภาระไฟฟ้าของมอเตอร์ เป็นผลให้มอเตอร์ของเครื่องหยุดทำงาน ซึ่งอาจเป็นเพราะสัดส่วนดังกล่าวมีกากอ้อยในสัดส่วนที่สูง (90% ถึง 100%) ซึ่งกากอ้อยมีองค์ประกอบของเซลลูโลสสูงประมาณ 33.4% [18], [19], [20] หากต้องทำการบดละเอียดให้กากอ้อยมีขนาดเล็กลงก่อนทำการอัดเม็ดจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ไม่คุ้มค่า นอกจากนี้กากหม้อกรองมีองค์ประกอบของเซลลูโลสประมาณ 8.9% ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูง จึงเหมาะสมที่จะนำกากหม้อกรองมาใช้เป็นตัวประสานและขึ้นรูปได้ดีกว่ากากอ้อย [9]

4.1 ผลการทดสอบค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ที่ความชื้น 10% และ 15% เป็นสัดส่วนที่มีค่าความร้อนและปริมาณเถ้าใกล้เคียงกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) [21] โดยพบว่าปริมาณเถ้าเป็น 14.67 % และ 14.72% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่ มอก. 2772-2560 กำหนดไว้ 18%

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% พบว่ามีค่าความร้อนเป็น 13.15 MJ/kg และ 12.26 MJ/kg ที่ความชื้น 10% และ 15% ตามลำดับ ค่าความร้อนดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มอก. ไม่มากนัก (มอก. 2772-2560 กำหนดไว้ที่ 14.5 MJ/kg) มีความเป็นไปได้สูงที่สัดส่วนกากหม้อกรองต่ำกว่า 20% เล็กน้อย เช่นที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 15% จะได้ค่าความร้อนที่สามารถผ่านเกณฑ์ มอก.

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดกากหม้อกรองที่สัดส่วนต่าง ๆ

รายละเอียด	มอก. 2772-2560		สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10%								
	ชั้นคุณภาพที่ 1	ชั้นคุณภาพที่ 2	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ค่าความร้อน (MJ/kg)	≥ 14.5	≥ 14.5	13.15	12.34	11.53	10.73	9.92	9.11	8.31	7.50	6.69
ปริมาณเถ้า (%)	≤ 10	≤ 18	14.67	19.30	23.93	28.55	33.18	37.80	42.43	47.06	51.68
รายละเอียด	มอก. 2772-2560		สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15%								
	ชั้นคุณภาพที่ 1	ชั้นคุณภาพที่ 2	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ค่าความร้อน (MJ/kg)	≥ 14.5	≥ 14.5	12.26	11.52	10.78	10.05	9.31	8.57	7.84	7.10	6.37
ปริมาณเถ้า (%)	≤ 10	≤ 18	14.72	19.07	23.41	27.76	32.10	36.44	40.79	45.13	49.48

4.2 ปริมาณการใช้และต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดกับการใช้งานเตาในครัวเรือน

จากการศึกษาปริมาณของเชื้อเพลิงและต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้ในการต้มน้ำเดือด 1,000 ml ด้วยเตาในครัวเรือน ดังรูปที่ 7 จะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 189 ± 3.17 กรัม ต่อน้ำ 1,000 ml

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ จะพบว่าที่ปริมาณสัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 30%, และ 40% (ที่ความชื้น 10%) และที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% (ความชื้น 15%) จะมีต้นทุนที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.22 ถึง 0.23 บาท ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสามารถเลือกใช้กากหม้อกรองทั้งสี่แบบทดแทนกันได้

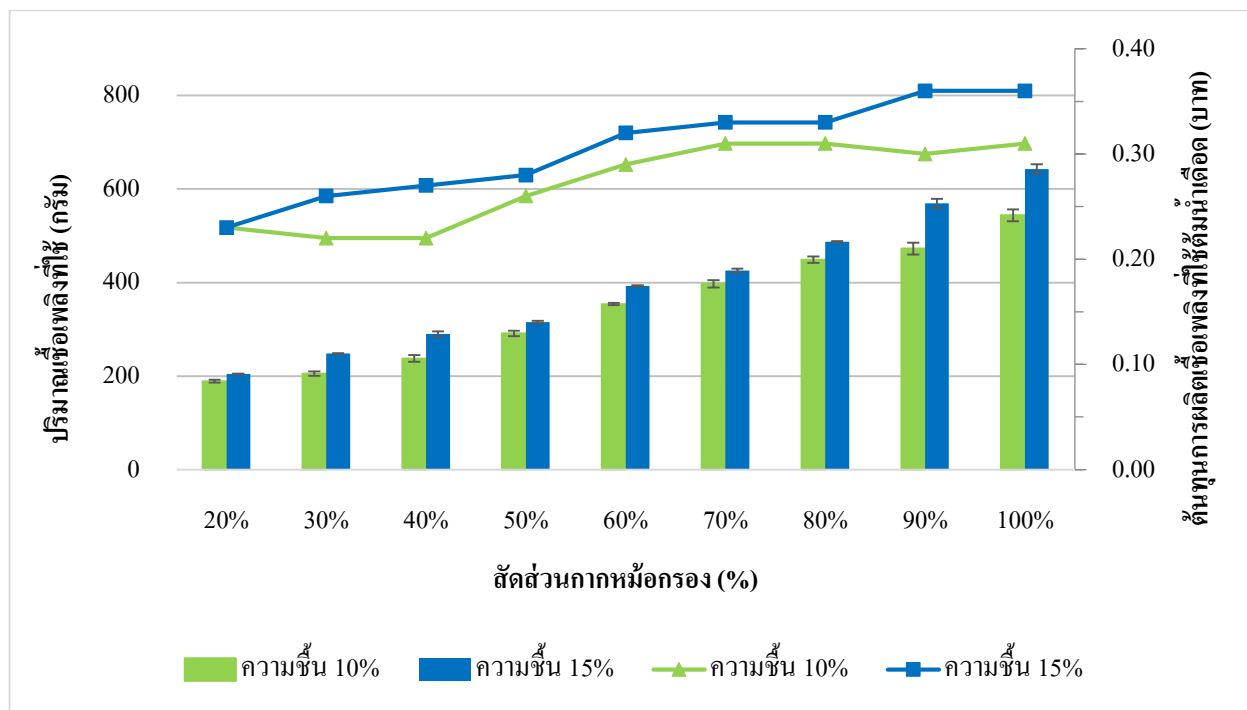
จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเชื้อเพลิงกับสัดส่วนกากหม้อกรองแสดงได้ในรูปที่ 8 ซึ่งได้จากสมการที่ 5 และ 6 โดยปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จะแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้น

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำเดือด (ความชื้น 10\%)} = 73.91 + 4.583 F_1 \quad (5)$$

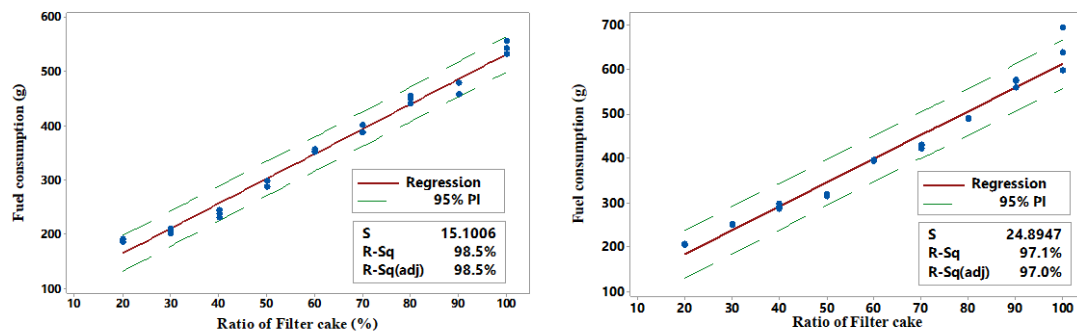
$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำเดือด (ความชื้น 15\%)} = 75.10 + 5.371 F_2 \quad (6)$$

เมื่อ F_1 คือ สัดส่วนกากหม้อกรองที่ความชื้น 10% (%)

F_2 คือ สัดส่วนกากหม้อกรองที่ความชื้น 15% (%)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้กับสัดส่วนกากหม้อกรอง



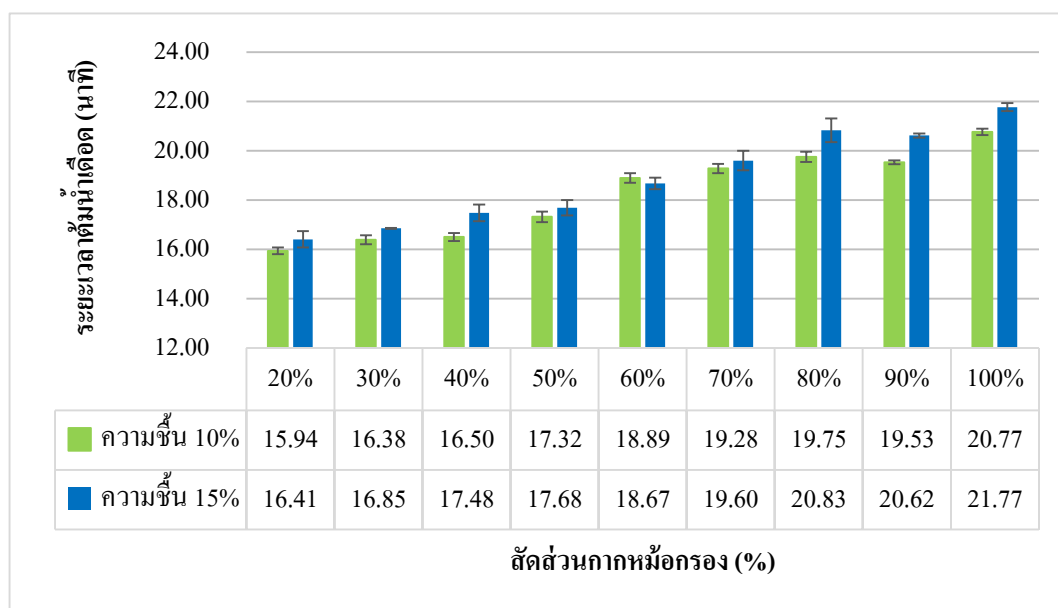
ก) ความชื้น 10%
ข) ความชื้น 15%
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของปริมาณเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้

4.3 ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด (Boiling time)

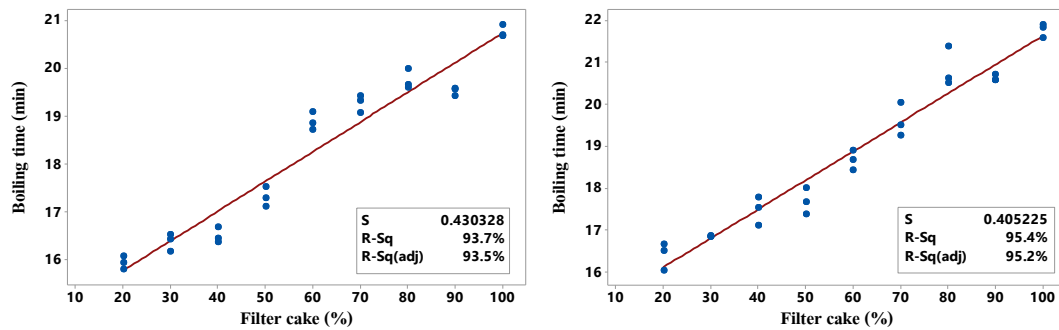
ผลการศึกษาเรื่องระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9 ซึ่งจะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จึงมีระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดเฉลี่ยน้อยที่สุดเป็น 15.94 ± 0.14 นาที จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 10 ดังสมการที่ 7 และ 8

$$\text{ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด (ความชื้น 10\%)} = 14.54 + 6.201 \times 10^{-2} F_1 \quad (7)$$

$$\text{ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด (ความชื้น 15\%)} = 14.74 + 6.895 \times 10^{-2} F_2 \quad (8)$$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาต้มน้ำเดือดกับสัดส่วนกากหม้อกรอง



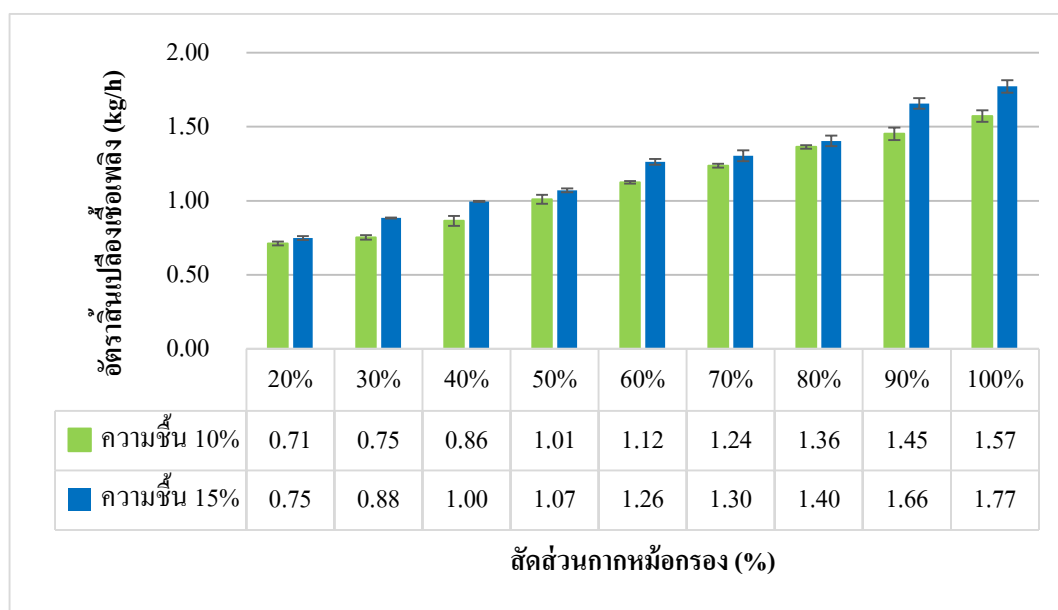
ก) ความชื้น 10% ข) ความชื้น 15%
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด

4.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Burning fuel consumption rate)

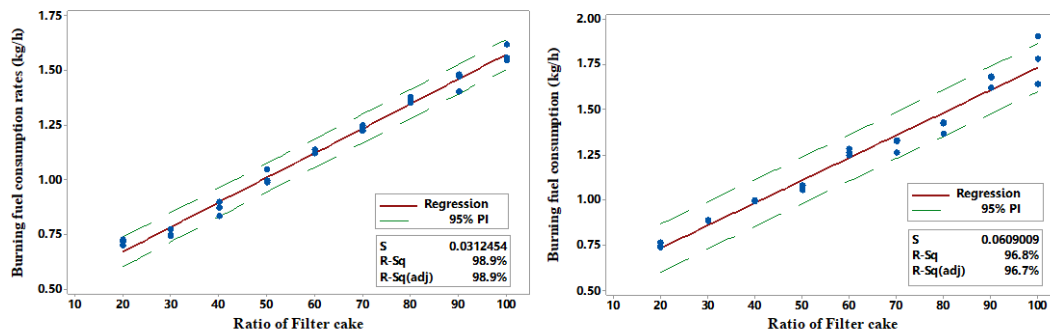
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 11 เพราะเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าความร้อนลดลง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยที่สุดที่ 0.71 ± 0.01 kg/h จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 12 ซึ่งได้จากสมการที่ 9 และ 10

$$\text{อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ความชื้น 10\%)} = 0.44 + 0.01 F_1 \quad (9)$$

$$\text{อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ความชื้น 15\%)} = 0.49 + 0.01 F_2 \quad (10)$$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงกับสัดส่วนกากหม้อกรอง



ก) ความชื้น 10%

ข) ความชื้น 15%

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

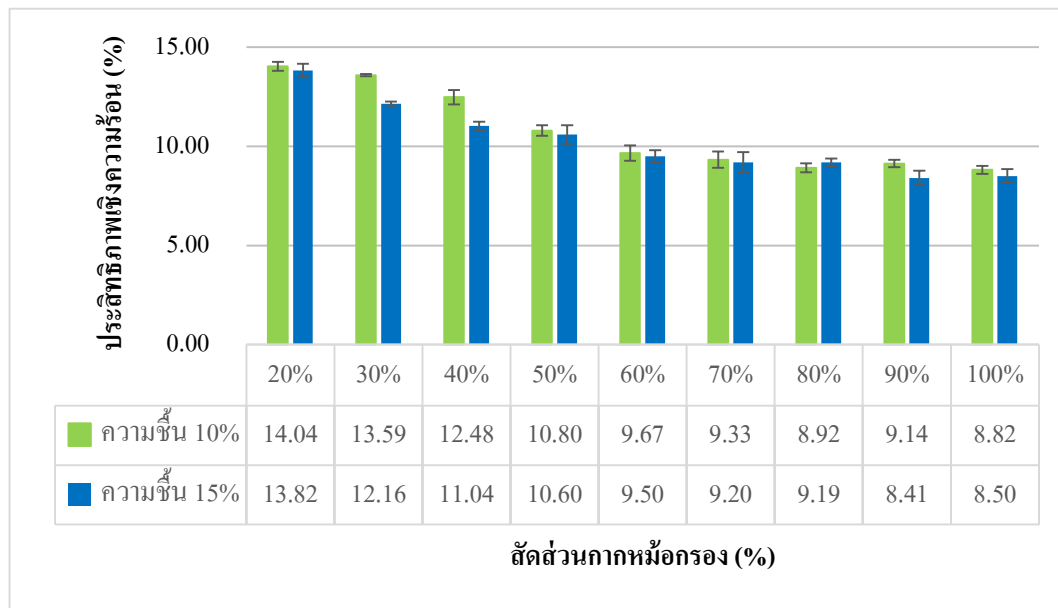
4.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

จากการศึกษาการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่ลดลง ดังรูปที่ 13 จากการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regressions) แสดงได้ในรูปที่ 14 ได้จากสมการที่ 11 และ 12 อธิบายได้ว่ากากอ้อยมีปริมาณเถ้าที่ต่ำกว่ากากหม้อกรองจึงจุดติดไฟได้ง่ายและคุมอัตราการเผาไหม้ได้ดีกว่า อีกทั้งการสูญเสียความร้อนระหว่างการเผาไหม้น้อยกว่ากากหม้อกรอง [22] , [23] โดยที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด $14.04 \pm 0.22\%$

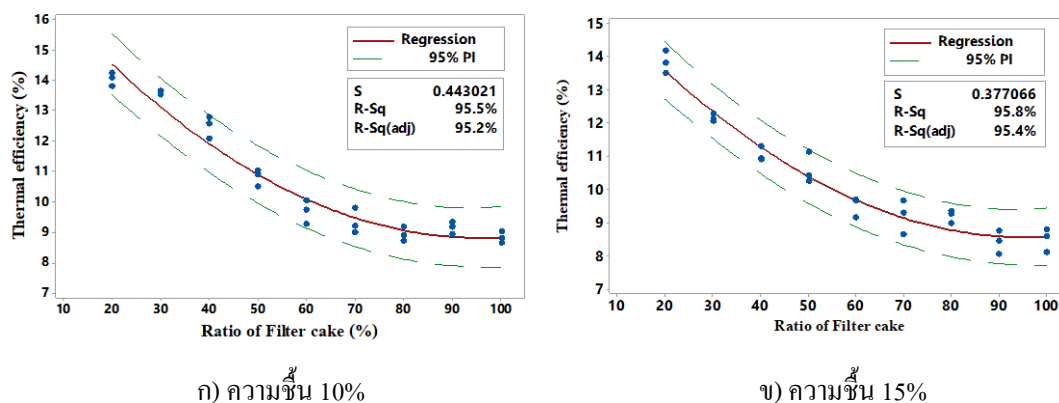
เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4 โดยพบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงซังข้าวโพดประมาณเท่าตัว มีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทางมะพร้าว แต่น้อยกว่าเชื้อเพลิงอีกสองประเภทที่เหลือ

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 10\%)} = 16.57 - 16.71 \times 10^{-2} F_1 + 8.725 \times 10^{-4} F_1^2 \quad (11)$$

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 15\%)} = 18.23 - 19.74 \times 10^{-2} F_2 + 10.29 \times 10^{-4} F_2^2 \quad (12)$$



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น

ชนิดของเชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิง (%)
เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10%	14.04
เชื้อเพลิงกะลากาแฟ [24]	19.41
เชื้อเพลิงเมล็ดมะพร้าว [24]	16.23
เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทางมะพร้าว [25]	13.40
เชื้อเพลิงขี้ข้าวโพด [24]	7.88

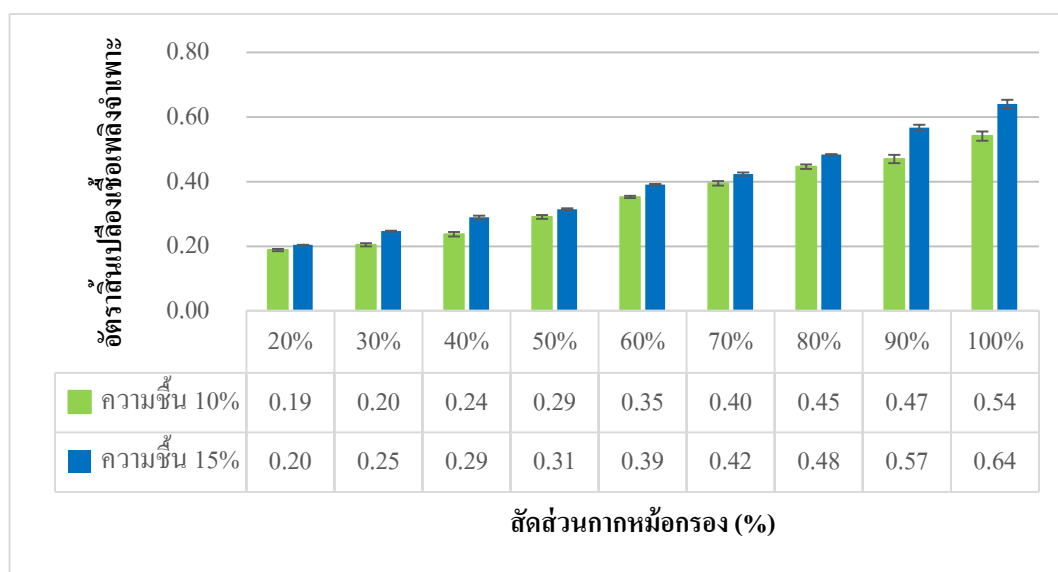
4.6 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption)

ผลการศึกษาเรื่องอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เทียบระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับปริมาณน้ำที่ใช้ทดสอบ พบว่าแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 15 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 16 ได้จากสมการที่ 13 และ 14 จะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ในการทดสอบค้ำน้ำ 1,000 ml มีปริมาณการใช้น้อยที่สุด จึงส่งผลให้มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะน้อยที่สุด 0.19 ± 0.01 สอดคล้องกับปริมาณดังกล่าว

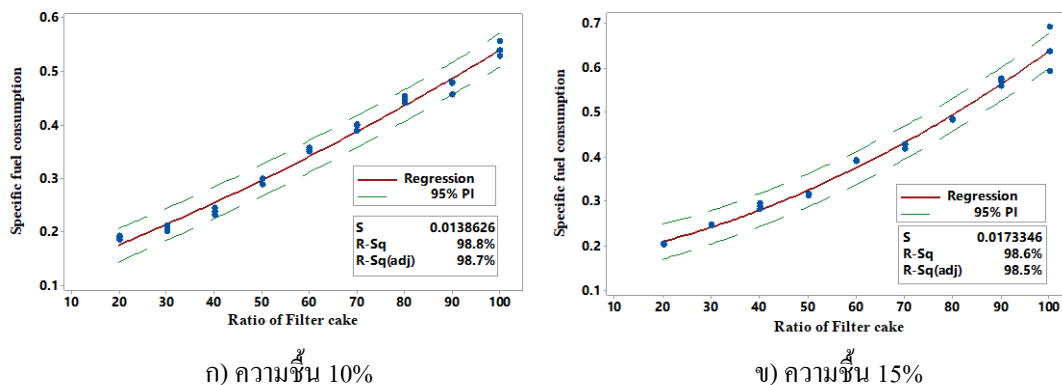
เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นดังตารางที่ 5 จะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของน้อยกว่าเชื้อเพลิงจากเศษกิ่งไม้ ดังนั้นจึงใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการค้ำน้ำน้อยกว่า ในขณะที่มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงกว่าเชื้อเพลิงผสมเศษชีเลื้อยกับ ไม้มะฮอกกานีจึงแปลความหมายได้ว่าใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการค้ำน้ำมากกว่า

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (ความชื้น 10\%)} = 0.11 + 0.01 F_1 + 1.1 \times 10^{-5} F_1^2 \quad (13)$$

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (ความชื้น 15\%)} = 0.16 + 0.01 F_2 + 3 \times 10^{-5} F_2^2 \quad (14)$$



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับสัดส่วนกากหม้อกรอง



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น

ชนิดของเชื้อเพลิง	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ
เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10%	0.19
เชื้อเพลิงจากเศษกิ่งไม้ [26]	0.23
เชื้อเพลิงผสมเศษขี้เลื่อยกับไม้มะฮอกกานี [12]	0.12

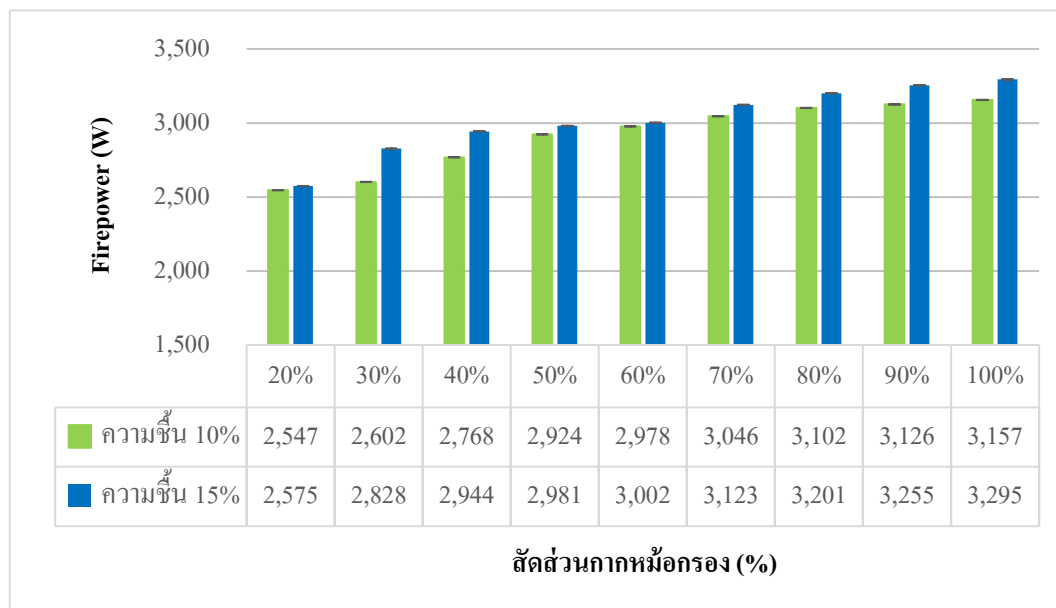
หมายเหตุ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ไม่มีหน่วย เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เทียบระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับปริมาณน้ำที่ใช้ทดสอบ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)

4.7 กำลังไฟ (Firepower)

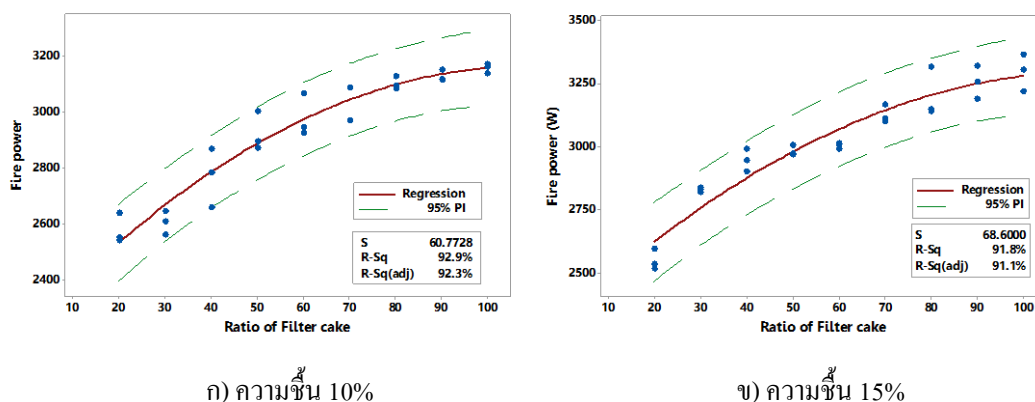
ผลการศึกษา กำลังไฟ ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่เตาชีวมวลใช้ต่อหน่วยเวลา ซึ่งพบว่าค่ากำลังไฟแปรตามสัดส่วนกากหม้อกรองที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 17 จากการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression) ดังรูปที่ 18 ซึ่งจากสมการที่ 15 และ 16 สามารถอธิบายได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด จึงส่งผลให้มีค่ากำลังไฟค่าที่สูงสุดที่ $2,547 \pm 54.21$ วัตต์ ค่ากำลังไฟนี้ค่ายิ่งดี

$$\text{กำลังไฟ (ความชื้น 10\%)} = 2215 + 17.46 F_1 - 0.08 F_1^2 \quad (15)$$

$$\text{กำลังไฟ (ความชื้น 15\%)} = 2310 + 17.09 F_2 - 0.07 F_2^2 \quad (16)$$



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์กำลังไฟกับสัดส่วนกากหม้อกรอง



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของกำลังไฟ

5. สรุปผลการดำเนินงาน

เชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดของส่วนผสมระหว่างกากหม้อกรองและกากอ้อยที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% , 30%, และ 40% ที่ความชื้น 10% และสัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ที่ความชื้น 15% มีต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ 1,000 ml จนกระทั่งเดือด มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.22 ถึง 0.23 บาท และเมื่อพิจารณาด้านคุณภาพจากเกณฑ์ มอก. 2772-2560 แล้ว พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีคุณภาพใกล้เคียงมาตรฐานมากที่สุด โดยมีค่าความร้อน 13.15 MJ/kg และมีปริมาณเถ้า 14.67 % ในขณะที่เกณฑ์ มอก. 2772-2560 กำหนดค่าความร้อนไว้ที่ 14.5 MJ/kg และกำหนดค่าปริมาณเถ้าไว้ที่ต่ำกว่า 18% เมื่อทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำเดือดจะพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ใช้เชื้อเพลิงน้อย

ที่สุดเท่ากับ 189 ± 3.17 กรัม ต่อน้ำ 1,000 ml ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ $14.04 \pm 0.22\%$ ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดน้อยที่สุดเท่ากับ 15.94 ± 0.14 นาที อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.71 ± 0.01 kg/h อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 0.19 ± 0.01 และคิดเป็นกำลังไฟเท่ากับ $2,547 \pm 54.21$ W นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นจะพบว่ามีความสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิด เช่น เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทางมะพร้าว และเชื้อเพลิงซังข้าวโพด ถือได้ว่าแนวคิดผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองจึงเป็นทางเลือกสำคัญที่สามารถใช้จัดการปัญหาของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาลโดยสามารถนำของเสียมาเป็นพลังงาน และอาจพัฒนาต่อไปเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในอุตสาหกรรมอันเป็นส่งเสริมความมั่นคงทางพลังงานในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิศานต์ และ คุณพชร ขุนโษษฐ์ นักวิทยาศาสตร์ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. รายงานประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลทราย อุตการผลิต 2562/63. กรุงเทพมหานคร: สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม, 2563.
- [2] Campiteli, L. et al. The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having four different crop rotations practices in Brazil. *Cientific*, 2018, 46, pp. 42. DOI: 10.15361/1984-5529.2018v46n1p42-48.
- [3] Salmeia, K.A. et al. Flammability of cellulose-based fibers and the effect of structure of phosphorus compounds on their flame retardancy. *Polymers*, 2016, 8 (8), pp. 293. DOI: 10.3390/polym8080293.
- [4] George, P.A. et al. Residue from sugarcane juice filtration. *Waste Biomass Valor*, 2010, pp. 407-413. DOI: 10.1007/s12649-010-9046-2.
- [5] Pajampa, Kaattisak and Wongwuttanasatian, Tanakorn. Biomass pellets produced from filler cake as waste to energy in sugar industry. *International Conference on Future Environment and Energy*, Thailand, 2019, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/257/1/012021.
- [6] Bailis, R. et al. *The water boiling test*. Shell Foundation, 2007.
- [7] Office of the Cane and Sugar Board. *Annual report 2018*. Ministry of Industry, Thailand, 2018.
- [8] Encyclopedia Britannica. *Bagasse*. Encyclopedia Britannica, 2016. <https://www.britannica.com/technology/bagasse>. [10 April 2021]
- [9] Larsen, N.A. *Sugarcane filter press mud as a substrate for nursery hardening of tissue culture bananas*. Dissertation. University of Florida, USA, 2015.
- [10] Rein, P. *Cane Sugar Engineering*. 2nd ed. Bartens, 2016, pp. 219-266.
- [11] Katonkul, Watcharee. *Biomass pellets Natural energy*. Department of science service, Ministry of science and technology, Thailand, 2019.
- [12] Rajaseenivasan, T. et al. An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder. *Alexandria Engineering Journal*, 2016. DOI: 10.1016/j.aej.2016.07.009.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM D5865/D5865M-19 *Standard test method for gross calorific value of coal and coke*. West Conshohocken: USA, 2019. DOI: 10.1520/D5865_D5865M-19.

- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM D3172-13 *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. West Conshohocken: USA, 2013. DOI: 10.1520/D3172-13. DOI: 10.1520/D3173_D3173M-17A.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM D3173/D3173M-17a *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. West Conshohocken: USA, 2017. DOI: 10.1520/D3173_D3173M-17A.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM D3174-12(2018) e1 *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. West Conshohocken: USA, 2018. DOI: 10.1520/D3174-12R18E01.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM D3175-20 *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. West Conshohocken: USA, 2020. DOI: 10.1520/D3175-20.
- [18] Sun, J. X. et al. Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*, 2004, 84 (2), pp. 331-339. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.008.
- [19] Saelee, K. et al. Extraction and characterization of cellulose from sugarcane bagasse by using environmental friendly method. *The 26th annual meeting of the Thai society for biotechnology and international conference*. Thailand, 2014, pp. 162-168.
- [20] Danso, H. et al. Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks. *Construction and Building Materials*, 2015, 83, pp.314-319. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.039.
- [21] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด*. กรุงเทพมหานคร: มาตรฐานสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560.
- [22] Gil, M.V. et al. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (22), pp. 8859-8867. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.062.
- [23] Bhatt, M.S. Effect of ash on the efficiency and capacity of coal fired ~ thermal power plants. *The Journal of CPRI*, 2004, 1 (1), pp. 71-78.
- [24] Chaiwong, K. et al. Effect of inlet air flow on thermal efficiency of bio-char stove from agricultural waste *RMUTL Engineering Journal*, 2016, pp. 37-42.
- [25] Tantisattayakul, T. et al. Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf. *Thammasat Journal of Science and Technology*, 2015, 23 (3), pp. 418-431.
- [26] Obi, O.F. et al. Energy performance of biomass cookstoves using fuel briquettes. *Biofuels*, 2017, 11 (4), pp.1-11. DOI: 10.1080/17597269.2017.1374769

