



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก Performance Comparison of a Vertical Kiln and Feasibility Study of Using Cassava Rhizome Charcoal for Smith Forging Process

นพฤทธิ์ พรหมลึง¹, บุญโชค พอตาสง¹, รณศักดิ์ วิวัฒน์ปรีชาพันธ์¹, วิชาญ ใจสุข², จักรชัย ชินโคตร³, พูลทวี ศรพรหม³,
วัชรินทร์ เขียวไกร³, พิศมาส หวังดี^{3*}

Noppalith Promlung¹, Boonchock Potasang¹, Ronnasak Wiwatpreechanon¹, Wichan Jaisuk²,
Jakrachai Chinnakotr³, Pooltawee Sornprom³, Watcharin Kiaokrai³, Phisamas Hwangdee^{3*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48000

²Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48000

³วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48150

²Sisongkhram Industrial Technology College, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48150

³สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร, คณะเกษตรและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48000

³Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture and Technology, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48000

*Corresponding author: Tel.: +66-6-3737-3788, E-mail: samas_dee@npu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาและศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก เพื่อนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปทดแทนการใช้ถ่านไม้ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้ ค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังเฉลี่ยที่ได้จากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบตั้ง (พพ.) 2) เตาเผาถ่านแบบไ้คว้น 3) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้านบน อยู่ระหว่าง 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹ และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาด้านบนให้อัตราการผลิตถ่าน เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านมากที่สุด เมื่อนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังไปใช้ทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก พบว่า ถ่านเหง้ามันสำปะหลังสามารถเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงสุด 961.44 °C ให้อัตราการเผาไหม้ 11.14 kg h⁻¹ มีความสามารถในการเผาเหล็กได้ 0.63 kg_(iron) kg⁻¹_(coal) และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง 2.80 Baht kg⁻¹ สรุปได้ว่า ถ่านเหง้ามันสำปะหลังไม่สามารถให้ความร้อนถึงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปได้ แต่ผลการศึกษาโดยรวมชี้ให้เห็นแนวทางการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ต้นทุนการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งถ่านเหง้ามันสำปะหลังยังมีศักยภาพสามารถนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้มในครัวเรือนได้ ตลอดจนนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ หรือนำไปใช้ในรูปไบโอชาร์ปรับปรุงดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำได้

คำสำคัญ: การตีเหล็ก, เหง้ามันสำปะหลัง, ถ่านเหง้ามันสำปะหลัง, ถังเผาถ่าน 200 ลิตร

Abstract

The present research aimed to compare the efficiency and feasibility of using a vertical kiln with cassava rhizome charcoal in the blacksmithing process; cassava rhizome charcoal was tested as fuel in the process of burning steel for forging, substituting the use of vegetal charcoal. The results are as follows. Average heating values of cassava rhizome charcoal obtained from all 3 charcoal drum kilns viz. 1) 200 L vertical drum kiln (DEDE) 2) 200 L pyrolysis vertical drum kiln 3) 200 L open top lid drum kiln were between 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹; all the values were not significantly different. Open-top lid drum kiln exhibited highest production rate of charcoal, percentage charcoal yield and kiln efficiency. When cassava rhizome charcoal was used to replace charcoal in the blacksmithing process, it was found that cassava rhizome charcoal could burn steel for forging at a maximum temperature of 961.44 °C, burning rate of 11.14 kg h⁻¹ and burning ability of 0.63 kg_(iron) kg⁻¹_(coal). The cost of producing cassava

Received: March 23, 2023

Revised: October 27, 2023

Accepted: October 27, 2023

Available online: March 16, 2024

rhizome charcoal was 2.80 Baht kg⁻¹. It can be concluded that the cassava rhizome charcoal under the study was unable to yield the optimum temperature for burning steel for forging. However, the overall study results reveal the cassava rhizome charcoal production methods and cost of cassava rhizome charcoal production. The cassava rhizome charcoal still exhibits potential to be used as cooking charcoal in households. It can also be produced into pelleted fuel or can be used in the form of biochar to improve soils with low fertility.

Keywords: Smith forging process, Cassava rhizome, Cassava rhizome coal, 200 l drum kiln

1 บทนำ

วิธีการทำเครื่องมือจากโลหะกลุ่มเหล็กในสมัยโบราณ ประกอบด้วยการตีขึ้นรูปในขณะที่เหล็กยังร้อน (Hot working) กรรมวิธีการตีเหล็กทำได้โดย การนำเหล็กมาเผาในเตาให้ร้อนแดง ก่อน แล้วจึงนำมาตีด้วยพะเนินبيب และรีดด้วยเหล็กให้มีการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการ หากเหล็กเย็นตัวลง ต้องนำกลับมาเผาให้ความร้อนแดงใหม่อีกครั้งก่อนนำมาตีซ้ำอีก ทำสลับกันแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงนำมาทำกรรมวิธีในขั้นตอนสุดท้าย คือ “การชุบ” ขั้นตอนนี้โดยการนำเครื่องมือเหล็กมาเผาให้ร้อนแดงอีกครั้งก่อนนำไปจุ่มแชลงในน้ำเย็นทันที การทำเช่นนี้ทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นหลักการทางโลหวิทยา ที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ให้มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น (สุริยา, มปป) ชาวตำบลนาถ่อน อำเภอลำดวน จังหวัดสุรินทร์ มีการดำเนินชีวิตโดยยึดภูมิปัญญาไทย ผลิตอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น มีด พร้า ขวาน จอบ เสียม เคียวและอุปกรณ์การเกษตรอื่น ๆ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือน ตามคำกล่าวที่ว่า “เสร็จจากหนานา ผู้หญิงทอผ้า ผู้ชายตีเหล็ก” ทำให้เกิดเป็นอาชีพ เป็นอุตสาหกรรมในระดับครัวเรือนและกลายเป็นวิสาหกิจขนาดเล็กในปัจจุบัน โดยได้มีการพัฒนาวิธีการมีการใช้เครื่องทุ่นแรงช่วยในการผลิต เช่น การใช้เครื่องตีเหล็ก (Pneumatic Power Hammer) นำเข้าจากต่างประเทศ ทดแทนการใช้แรงงานคนตีด้วยค้อน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ประหยัดเวลาการทำงาน ทำให้ต้องมีการทำลายทรัพยากรป่าไม้ เพื่อที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านไม้ใช้ในขั้นตอนการเผาเหล็กให้ร้อน และในขั้นการเผาชุบแข็งในปริมาณมาก ตรงกันข้ามกับปริมาณป่าไม้ ถ่าน และฟืน หาได้ยากและมีราคาแพงขึ้น ในพื้นที่ตำบลนาถ่อนมีผู้ประกอบการตีเหล็กหลายราย มีจำนวนเครื่องตีเหล็ก (Pneumatic Power Hammer) จำนวน 40 เครื่อง ในแต่ละเดือนจะต้องใช้วัตถุดิบเหล็กแท่ง 40 Tons month⁻¹ คิดเป็นมูลค่า 1,000,000 Baht month⁻¹ (คิดที่ราคา 25 Baht kg⁻¹) ในขณะที่ต้องใช้ถ่านไม้ 125 kg ต่อเหล็กแท่ง 100 kg ในหนึ่งเดือนมีความต้องการใช้ถ่านไม้ทั้งหมด 50 Tons month⁻¹ (พิศมาส และคณะ 2558) ต้องมีการตัดไม้ทำลายป่าจำนวน 155 Tons (firewood) month⁻¹ คิดจากเปอร์เซ็นต์ถ่านที่ได้ต่อไม้ดิบที่ใช้ 32.20% (ประลอง, 2540) เพื่อผลิตเป็นถ่านในการตีเหล็กของ

ตำบลนาถ่อน แต่จากการสำรวจข้อมูลปัจจุบัน พบว่าผู้ประกอบการหลายรายหยุดกิจการ ผู้ประกอบการที่มีศักยภาพบางรายเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากถ่านไม้เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ซึ่งมีต้นทุนแรกเริ่มที่สูง ทำให้ยังมีผู้ประกอบการรายเล็กซึ่งมีจำนวนมากกว่า ยังต้องใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันมีผู้ประกอบการที่ยังใช้เครื่อง Pneumatic Power Hammer และยังใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง จำนวน 12 เครื่อง ใช้วัตถุดิบเหล็กแท่ง 21.6 Tons month⁻¹ คงต้องการใช้ถ่านในเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป 27 Tons month⁻¹ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องแสวงหาและพัฒนาการใช้พลังงานจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ จากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร แหล่งพลังงานที่จะช่วยลดการใช้พลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยมีพืชมากมายหลายชนิดที่เป็นชีวมวลนำมาใช้เป็นพลังงานได้ เช่น แกลบ ฟางข้าว ใบอ้อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน กะลามะพร้าว เศษไม้ เหง้ามันสำปะหลังฯ (รุ่งโรจน์และคณะ, 2553) เหง้ามันสำปะหลังเป็นเศษเหลือทิ้งจากการจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ผลิต ปี 2563/64 มีพื้นที่เก็บเกี่ยว 9,000,000 Rai ได้ผลผลิต 28,000,000 Tons (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2565)

มันสำปะหลังมีปริมาณเหง้า 0.29 Tons Rai⁻¹ สัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังสดต่อหัวมันสำปะหลังสด (Crop Residual Ratio, CRR) มีค่าประมาณ 0.12 หรือ 12% ของหัวมันสำปะหลังสด เหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงาน ดังแสดงใน table 1 เป็นเชื้อเพลิงในเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (วีรชัยและคณะ, 2553) และยังสามารถนำมาเผาให้เป็นถ่าน (Tippayawong et al., 2017) และเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านอัดแท่งได้ (Sen et al., 2016; จุฑามาศ, 2547) แต่ในบางพื้นที่ เหง้ามันสำปะหลังยังไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์และยังก่อให้เกิดภาระที่ต้องทำลายหรือกำจัดทิ้งแบบเผาในแปลงที่โล่งซึ่งเป็นสาเหตุของโลกร้อนและฝุ่นควัน PM 2.5 (นิกรานและคณะ, 2564) ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าการรวบรวมและการขนส่งนั้นมีต้นทุนสูง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญดังกล่าว และมีความสนใจนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานความร้อนในกระบวนการเผาเหล็ก ตีเหล็กและเผาอบชุบแข็ง ทดแทนการใช้ถ่านไม้เพื่อลดการตัดไม้ทำลายป่า ทำลายสิ่งแวดล้อม และช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตร

Table 1 Comparison of physical properties, proximate analysis values and calorific values between cassava rhizome charcoal and wood charcoal.

Property	Wood charcoal ¹	cassava rhizome charcoal ²	cassava rhizome charcoal ³
Bulk density; g cm ⁻³	-	0.162	-
Moisture; % w.b.	0.76	7.23	-
Fixed carbon; %	61.23	32.90	23.13
Ash; %	1.15	13.48	4.95
Volatile; %	36.86	46.39	71.92
HHV; cal g ⁻¹	7,069	5,269	4,309

¹Sayakoummane and Ussawarujikulchai, 2009; ²Sen et al., 2016; ³Nakason et al., 2019

2 อุปกรณ์และวิธีการ

เหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ PKM จากแหล่งปลูกตำบลอู่หม้า อำเภอรอดูพนม จังหวัดนครพนม อายุเก็บเกี่ยวที่ 11 month ที่ระดับความชื้นเหง้ามันสำปะหลังก่อนเผาในเตาเผาถ่านเฉลี่ย $32.82 \pm 2.23\%$ w.b. ความหนาแน่นเฉลี่ย 206.14 ± 19.95 kg m⁻³

2.1 การศึกษาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านที่นำมาทำการศึกษาคือเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร 3 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบเตาเผาถ่านทั้งสามแบบนี้เป็นเตาเผาที่มีขนาดเล็ก สร้างง่าย ราคาถูก (Sangsuk et al., 2020) เหมาะสำหรับผู้มีทุนทรัพย์น้อย สามารถย้ายไปยังแหล่งที่มีวัตถุดิบได้ง่าย ได้แก่ 1) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบตั้ง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) 2) เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตรหุ้มฉนวน(ระบบไฟโรไลซิส) และ 3) เตาเผาถ่านแบบ 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาบาน

2.1.1 เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบตั้ง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)

คุณลักษณะ เป็นเตาเผาถ่านที่ผลิตจากถังขนาด 200 ลิตร ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง เส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ความสูง 60 cm คิดเป็นความจุ 0.150 m^3 (150.35 L) ดังแสดงใน Figure 1



Figure 1 A 200 litre vertical drum kiln (DEDE).

วิธีการใช้งาน

- 1) เรียงเหง้ามันสำปะหลังที่ต้องการเผาเป็นถ่านลงในเตาให้เต็ม แล้วปิดฝาและใช้ดินเหนียวปิดรอยรั่ว
- 2) เตรียมไม้ฟืนเชื้อเพลิง จุดไฟบริเวณหน้าเตาปล่อยให้ไอความร้อนสะสมในเตาเพื่อไล่ความชื้นจากเหง้ามันสำปะหลังจนกระทั่งเตาติดจึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงบริเวณหน้าเตา
- 3) ปล่อยให้เกิดการเผาไหม้ภายในเตาจนกระทั่ง ไม่มีควันออกที่ปล่อง จึงทำการปิดปล่องแล้วทิ้งไว้ให้ถ่านดับและเย็นลงค่อยทำการเปิดเตาเก็บถ่าน

2.1.2 เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน(ระบบไฟโรไลซิส)

คุณลักษณะเป็นเตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน (ระบบไฟโรไลซิส) ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องควัน 14 cm ความสูง 84.5 cm คิดเป็นความจุ 0.199 m^3 (198.75 L) ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 A 200 litre pyrolysis vertical drum kiln.

วิธีการใช้งาน

- 1) ทำการเรียงเหง้ามันสำปะหลังที่ต้องการเผาให้เป็นถ่านลงไปให้เต็มเตาจึงปิดฝาให้สนิท
- 2) ทำการเตรียมเชื้อเพลิง ในที่นี้จะใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิง จุดไฟให้ความร้อนที่ด้านล่างของถัง เพื่ออบแห้งเหง้า

มันสำปะหลัง โดยที่เหง้ามันสำปะหลังในถังจะไม่ได้สัมผัสเปลวไฟ และไม่เกิดการลุกไหม้

3) เมื่ออุณหภูมิในเตาสูงมากพอ ประมาณ 400-800°C สารระเหยที่อยู่ในเหง้ามันสำปะหลังจะปลดปล่อยออกมาทางรูปล่อยระบายก๊าซ กลายเป็นเชื้อเพลิงลุกไหม้ได้เอง โดยไม่ต้องใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิงอีก

4) ปล่อยให้เกิดการลุกไหม้ของก๊าซต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีการปลดปล่อยก๊าซที่อยู่ในเหง้ามันสำปะหลังอีก แสดงว่าเหง้ามันสำปะหลังที่อยู่ในเตากลายเป็นถ่านหมดแล้ว ปล่อยให้ดับเอง และรอให้เตาเย็นลง จึงทำการเปิดเตาเพื่อเก็บถ่าน

2.1.3 เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาบาน

คุณลักษณะ เป็นเตาเผาถ่านที่ไม่ต้องมีการดัดแปลงใด ๆ ใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร แบบมีฝาปิด ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ความสูง 84.5 cm คิดเป็นความจุ 0.212 m³ (211.75 L) ดังแสดงใน Figure 3



Figure 3 A 200 litre open top lid drum kiln.

วิธีการใช้งาน

1) ทำการจุดไฟที่ด้านล่างของถัง แล้วค่อยๆ เติมเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อเกิดการติดไฟดีแล้ว

2) ทำการเติมเหง้ามันสำปะหลังที่จะเผาเป็นถ่านเรื่อยๆ จนเต็มถัง

3) เมื่อไฟลุกไหม้เหง้ามันสำปะหลังที่ด้านล่างกันถัง จะทำให้เกิดการยุบตัวของเหง้ามันสำปะหลัง สามารถที่จะเติมเหง้ามันสำปะหลังลงไปได้อีกตามต้องการ หรือเมื่อไฟลุกไหม้เหง้ามันสำปะหลังจนกลายเป็นถ่านแล้วให้ทำการปิดฝาดังไม่ให้อากาศเข้าได้เพื่อดับไฟ

4) ทิ้งไว้จนกระทั่งเตาเย็น แล้วจึงทำการเปิดเตาเพื่อเก็บถ่าน โดยมีค่าชี้ผล ดังนี้ อัตราการผลิตถ่าน ผลผลิตถ่านและประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน ดังสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ อัตราการผลิตถ่าน (P_{char}); kg h⁻¹

$$P_{char} = M_{char} / P_{time} \quad (1)$$

ผลผลิตถ่าน (Y_{char}); % (Sangsuk et al., 2020; Homchat et al., 2012)

$$Y_{char} = (M_{char} / M_{feedstock}) \times 100 \quad (2)$$

ประสิทธิภาพเตาเผาถ่าน; η_{char} ; %

$$\eta_{char} = (M_{char} / (M_{feedstock} - M_{unburnt\ wood})) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ M_{char}	คือ	น้ำหนักถ่านที่ได้ (kg)
P_{time}	คือ	เวลาที่ใช้ในการเผาถ่าน (h)
$M_{feedstock}$	คือ	น้ำหนักวัสดุถ่านก่อนเผา (kg)
$M_{unburnt\ wood}$	คือ	น้ำหนักถ่าน เศษถ่าน และขี้เถ้า (kg)

2.2 การหาสมบัติความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังและถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

ค่าความร้อนของถ่าน (heating value) คือปริมาณพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิง บ่งชี้คุณภาพของเชื้อเพลิง (ปฐมศก, 2551; กิตติพงษ์, 2557; Carnaje et al., 2018) การวิเคราะห์ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM 3186-96 เป็นการเผาตัวอย่างที่ทราบค่าน้ำหนักที่แน่นอนใน bomb calorimeter ภายใต้ภาวะที่กำหนด การหาค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ PARR รุ่น 1341 โดยก่อนทำการทดสอบค่าความร้อนของถ่าน ผู้วิจัยได้ทำการ Standardization โดยการใช้ Benzoic Acid ซึ่งมีค่าความร้อนคงที่ เท่ากับ 6,318 cal g⁻¹ เพื่อหาค่าพลังงานลูกบอมบ์ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านตัวอย่าง ซึ่งจากการ Standardization พบว่า ค่าของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ PARR รุ่น 1341 ในขณะทำการศึกษามีค่าระหว่าง 2,394.24–2,523.88 ค่าเฉลี่ย 2,442.05 cal g⁻¹

วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้ คือ ต้องการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ได้มาจากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก(ถ่านตีเหล็ก) ซึ่งเป็นถ่านไม้เบญจพรรณที่ช่างตีเหล็กใช้ในปัจจุบัน

2.3 การศึกษาการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

2.3.1 การทดสอบอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ในปัจจุบัน

โดยการให้ช่างตีเหล็กปฏิบัติตามวิธีปกติในขั้นตอนการตีบ้อง (การตีตามจับและตียึด ปรับรูปทรงเหล็กให้ได้รูปทรงของมีดพริ้วตามต้องการ) ดังแสดงใน Figure 4

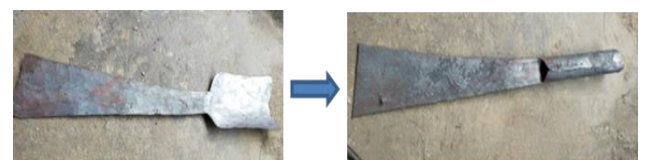


Figure 4 The knife handle forging.

ทำการบันทึกข้อมูลประกอบด้วยอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่าน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ทำการวัดที่เตาร่างเผาเหล็กดังแสดงใน Figure 5



Figure 5 The iron furnace for forging.

2.3.2 การศึกษาสมรรถนะถ่านหังามันสำปะหลังในการตีมีด

ทำการบันทึกข้อมูลโดยการให้ช่างตีเหล็กปฏิบัติตามวิธีปกติแต่ใช้ถ่านหังามันสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วยน้ำหนักถ่านที่ใช้ น้ำหนักเหล็กที่ใช้ เวลาที่ใช้ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ และคำนวณงานที่ทำได้ ดังสมการที่ 4 และ 5

อัตราการเผาไหม้ (Br); kg h^{-1}

$$\text{Br} = M_{\text{char}} / \text{Br}_{\text{time}} \quad (4)$$

งานที่ทำได้ (Coal Capacity); $\text{kg}_{(\text{iron})} \text{kg}_{(\text{coal})}^{-1}$

$$\text{Coal Capacity} = M_{\text{iron}} / M_{\text{char}} \quad (5)$$

เมื่อ M_{char}	คือ	น้ำหนักถ่านที่ใช้สุทธิ (kg)
Br_{time}	คือ	ระยะเวลาที่ไหม้หมด (h)
M_{iron}	คือ	น้ำหนักเหล็กวัตถุดิบ (kg)

2.4 การศึกษาต้นทุนการใช้ถ่านหังามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่าน ประกอบด้วย ค่าแรงงานเก็บรวบรวมหังามันสำปะหลังออกจากพื้นที่ ค่าขนส่งจากแปลงสู่เตาเผาถ่าน และค่าแปลงสภาพหังามันสำปะหลังเป็นถ่านหังามันสำปะหลัง

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเผาถ่านหังามันสำปะหลัง ดังแสดงใน Table 2 พบว่า เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวตั้ง (พพ.) เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถัง 200 ลิตรหุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) และเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน มีอัตราการผลิตถ่านเฉลี่ย $9.30 \text{ } 25.92$ และ 56.23 g min^{-1} ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านเฉลี่ย $9.27 \text{ } 14.48$ และ 27.39% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพของเตาเผาเฉลี่ย $10.08 \text{ } 15.31$ และ 27.67% ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน ที่ใช้ในการเผาถ่านหังามันสำปะหลัง มีอัตราการผลิตถ่านได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านและประสิทธิภาพของเตาเผาสูงกว่าเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวตั้ง (พพ.) และเตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถัง 200 ลิตรหุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) ซึ่งเป็นผลมาจากความจุที่มากกว่าและในช่วงเวลาการใช้งานเตาเผา ผู้ควบคุมจะสามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ได้ตลอดเวลา ช่วยลดอัตราการเกิดเถ้าหรือสันถ่าน (เผาไหม้ไม่หมด) และยังสามารถป้อนวัตถุดิบเพิ่มได้ตามต้องการจนกว่าได้ถ่านเต็มความจุของเตา และสำหรับเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้านมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน (Y_{char}) ใกล้เคียงกับรายงานการใช้เตาเผาแบบถ่านหังามัน 200 ลิตร เตาเผาถ่านไม้และถ่านไม้ไผ่ ตามแบบของ Tippayawong et al. (2010) ที่ $28\text{-}33\%$ และ Homchat et al. (2012) ได้รายงานผลการศึกษาการเผาถ่านหังามันสำปะหลังโดยใช้ถังเหล็กทรงกระบอกขนาดใกล้เคียงกันกับเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร ไว้ที่ $25\text{-}28\%$ ที่ความชื้นวัตถุดิบหังามันสำปะหลัง $11.22\% \text{ w.b.}$ และ 35.65% ที่ความชื้นวัตถุดิบหังามันสำปะหลัง $35.5\% \text{ w.b.}$ แต่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงต่อรอบการเผา $9.8\text{-}20 \text{ kg.}$ ต่อครั้ง และถึงแม้ว่าจะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านต่ำกว่าการใช้เตาเผาถ่านหังามันสำปะหลังระบบ Semi-continuous carbonization ที่รายงานไว้โดย Tippayawong et al. (2017) ที่ $33\text{-}35\%$ ที่ระยะ เวลาในการเผาถ่านใกล้เคียงกัน $1.5\text{-}4 \text{ h}$ แต่การเลือกใช้เตาเผาถ่านเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน เป็นเตาเผาที่มีขนาดเล็ก สร้างง่าย ราคาถูกเหมาะสมสำหรับผู้มีทุนทรัพย์น้อย สามารถย้ายไปยังแหล่งที่มีวัตถุดิบได้ง่าย

Table 2 Properties of charcoal obtained from different types of charcoal kilns.

Property	200 litre vertical drum kiln.(DEDE)	200 litre pyrolysis vertical drum kiln	200 litre open top lid drum kiln
Volume capacity (m^3)	0.150	0.199	0.212
Volume capacity (L)	150.35	198.75	211.75
Fuel type	Wood twig fragments	Used lube oil	Wood twig fragments (small quantity)
Weight of raw cassava rhizomes in kiln ($M_{feedstock}$); (kg)	31.33±4.04	41.50±3.28	42.06±2.09
Process time (P_{time}); (h)	6.0±2.1	3.9±0.5	3.4±1.4
Yield production charcoal (M_{char}); (kg)	3±1.56	6±0.56	11.67±5.13
Yield charcoal rate (P_{char}); ($g\ min^{-1}$)	9.30±6.87	25.92±6.25	56.23±3.68
Charcoal Yield (Y_{char}); (%)	9.27±4.26	14.48±1.23	27.39±11.05
Efficiency (η_{char}); (%)	10.08±3.17	15.31±0.39	27.67±11.39

Table 3 Comparison of calorific values of cassava rhizome charcoal and blacksmith charcoal.

Type of Charcoal Kiln	High Heating Value ($cal\ g^{-1}$)
200 litre vertical drum kiln. (DEDE)	6,388.45 ^b ±131.42
200 litre pyrolysis vertical drum kiln	6,431.42 ^b ±126.20
200 litre open top lid drum kiln	6,269.38 ^b ±154.66
blacksmith charcoal	6,693.58 ^a ±25.49

^{a-b} Mean values with different letters for each row are significantly difference (DMRT) at $P < 0.05$.

3.2 ผลการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลัง

จากค่าความร้อนที่พบในถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ดังแสดงใน table 3 ที่ได้จากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ เตาเผาถ่านแบบแนวตั้งเตาแบบจำกัดอากาศ เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถ่านน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) และเตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาบาน มีค่าความร้อนเฉลี่ย 6,388.45 6,431.42 และ 6,269.38 $cal\ g^{-1}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนเฉลี่ยด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่า เตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบให้ค่าความร้อนเฉลี่ยของถ่านที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากค่าความร้อนที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งเหง้ามันสำปะหลังที่รายงานไว้โดย จุฑามาศ (2547) ที่ 6,281.08 $cal\ g^{-1}$ และสอดคล้องกับที่ ประเทืองและธารินี (2548) รายงานไว้ที่ 6,165.65 $cal\ g^{-1}$ และยังพบว่าสูงกว่าค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน ที่รายงานไว้โดย จารุณี และภูมินทร์ (2022) รายงานไว้ที่ 5,927.10 $cal\ g^{-1}$ ในขณะที่ Sen et al. (2016) ได้ทำการเผาถ่านเหง้ามันสำปะหลังด้วยเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวนอนพบว่า มีค่าความร้อนที่ 5,269 $cal\ g^{-1}$ ซึ่งค่าความร้อนที่แตกต่างกันของถ่านเหง้ามันสำปะหลัง น่าจะมีอิทธิพลมาจากความ

แตกต่างของพันธุ์มันสำปะหลัง ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ PKM จะมีขนาดของเหง้าค่อนข้างใหญ่มีส่วนที่เป็นแก่นเนื้อไม้มากกว่าพันธุ์อื่น

ในขณะที่ถ่านดีเกลือมีค่าความร้อนเฉลี่ย 6,693.58 $cal\ g^{-1}$ มีค่าความร้อนอยู่ระดับค่าเฉลี่ยกับค่าความร้อนของถ่านไม้ ที่ระบุไว้โดยผู้วิจัยที่อ้างอิงมาซึ่งรายงานค่าความร้อนของถ่านไม้ที่ 4,468–7,955 $cal\ g^{-1}$ (FAO, 1985; Juizo et al. 2017; Sayakoummame and Ussawarujikulchai, 2009; Ruiz-Aquino et al. 2015) ซึ่งแน่นอนว่าถ่านเหง้ามันสำปะหลังไม่สามารถให้ค่าความร้อนเทียบเท่าถ่านไม้ได้ ซึ่งจากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบเตาเผาถ่านที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ แต่เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตถ่าน เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน จะพบว่าเตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาบานจะมีความเหมาะสมมากกว่าเตาเผาถ่านแบบอื่น จึงจะนำถ่านที่ได้จากเตาเผาไปทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

3.3 ผลการศึกษาการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

3.3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กในปัจจุบัน

ผลการตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิของการใช้ถ่านตีเหล็กปัจจุบันเปรียบเทียบกับถ่านห้ำม้นสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในการตีเหล็ก ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงใน table 4 จากผลการตรวจวัด

พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถ่านห้ำม้นสำปะหลังในช่วงที่ไม่มีเป่าอากาศ 625.67°C และให้อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในช่วงที่มีการเป่าอากาศ 961.33°C ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านตีเหล็กปัจจุบัน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป ระหว่าง $900 - 1,100^{\circ}\text{C}$ (ไพฑูรย์, 2548; หาญณรงค์, 2553) ถ่านห้ำม้นสำปะหลังที่ทำการศึกษานี้ไม่สามารถให้ค่าความร้อนถึงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปได้

Table 4 Performance comparison results between cassava rhizome charcoal and blacksmith charcoal.

Performance	Blacksmith Charcoal	Cassava Rhizome Charcoal
The lowest temperature on the steel furnace rail; without blowing air ($^{\circ}\text{C}$)	860.33 ± 56.58	625.67 ± 107.87
The highest temperature on the steel furnace rails; air blowing range ($^{\circ}\text{C}$)	$1,078.20 \pm 49.89$	961.33 ± 28.20
Burning rate (kg h^{-1})	9.91 ± 0.33	11.14 ± 1.60
Coal Capacity ($\text{kg}_{(\text{iron})} \text{kg}_{(\text{coal})}^{-1}$)	1.66 ± 0.07	0.63 ± 0.06

3.3.2 ผลการศึกษสมรรถนะการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังตีเหล็ก

ผลการศึกษาสมรรถนะการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังจากผลการวิเคราะห์ข้อมูล ที่ประกอบด้วยน้ำหนักถ่านที่ใช้ น้ำหนักเหล็กที่ใช้ เวลาที่ใช้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ และคำนวณงานที่ทำได้ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังแสดงใน table 4 พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังที่นำมาใช้ตีเหล็ก มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 11.14 kg h^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กที่มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 9.91 kg h^{-1} พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังมีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ยมากกว่าถ่านไม้ 11% ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองมากกว่า สมรรถนะของถ่านห้ำม้นสำปะหลังสามารถเผาเหล็กได้งานเฉลี่ย $0.63 \text{ kg}_{(\text{iron})} \text{kg}_{(\text{coal})}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะของถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กในปัจจุบัน พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังมีสมรรถนะต่ำกว่าถ่านไม้ถึง 62% เมื่อนำมาใช้ในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในเตาเผาที่ถ่านห้ำม้นสำปะหลังทำได้ต่ำกว่าถ่านไม้และยังมีอัตราการเผาไหม้ที่มากกว่าถ่านไม้

แต่จากผลการศึกษาโดยรวม สามารถชี้ให้เห็นแนวทางการผลิตถ่านห้ำม้นสำปะหลัง ต้นทุนการผลิตถ่านห้ำม้นสำปะหลังซึ่งถ่านห้ำม้นสำปะหลังยังมีศักยภาพสามารถนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้มในครัวเรือนได้ โดยการเพิ่มความหนาแน่นในรูปถ่านอัดแท่งตามรายงานของ Nakason et al. (2019); Sen et al. (2016); ปรีชา และคณะ (2562); จุฬารัตน์ และสมโภชน์ (2554); จุฑามาต (2546) นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ตามรายงานของ Intagun and Maden (2020); Soponpongpiat et al. (2019); ธรีณี และคณะ (2556) หรือนำไปใช้ในรูปไบโอชาร์ปรับปรุงดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำได้เช่นกัน ตามรายงานของ Wijitkosum and Sriburi (2021) ซึ่งการนำถ่านห้ำม้นสำปะหลังมาใช้ประโยชน์จะเป็นช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังได้อีกทางหนึ่ง

3.4 ผลการศึกษาด้านทุนการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่าน ซึ่งได้ผลการศึกษา ดังแสดงใน table 5 and figure 6 ซึ่งไม่คิดต้นทุนวัตถุดิบถ่านห้ำม้นสำปะหลังในแปลง

Table 5 Cost analysis of the use of cassava rhizome charcoal in blacksmithing process.

Cost item	Analysis list	Cost (Baht kg ⁻¹) (raw material)	Cost ratio (%)
Cassava rhizome *	There is no buying-selling of cassava rhizomes in the area (only labor costs are collected and removed from the area).	0	0
Labor costs for collecting cassava rhizomes from the crop area	(350 Baht day ⁻¹ x 4 man)/2,700 kg.	0.51	18.2
Transportation costs from the crop area to the charcoal kiln plant (at a distance of 50 km; The average cassava rhizome density was 206.14 kg m ⁻³).	4-wheel pickup trucks, load capacity 3.25 m ³ ; 400 Baht trip ⁻¹ x 670 kg trip ⁻¹	0.59	21.1
Conversion cost of cassava rhizomes to cassava rhizome charcoal (Charcoal production rate per day = 11.67 kg charcoal kiln ⁻¹ x 5 kiln day ⁻¹ = 58.35 kg(charcoal) day ⁻¹ ; Calculating the quantity of raw materials of cassava rhizomes** 58.35 kg(charcoal) day ⁻¹ x 3.6 = 210.06 kg (cassava rhizomes) day ⁻¹	1) Kiln cost 600 Baht kiln ⁻¹ x 5 kiln = 3,000 Baht, estimated service life 365 Times, costing 8.22 Baht day ⁻¹ . 2) Labor cost 350 Baht day ⁻¹ 3) no fuel charge Total expenses 358.22 Baht day ⁻¹	1.70	60.7
Total cost of cassava rhizome charcoal production		2.80	100

* No charge for the cost of cassava rhizomes, because the farmers already wish to remove the rhizomes from the the crop area. Usually have to hire workers to collect out, collect the incineration pile or plow, but be careful not to become weeds in the new round of planting.

** Calculated from the ratio of the conversion rate from cassava rhizomes to cassava rhizome charcoal at 3.6:1.

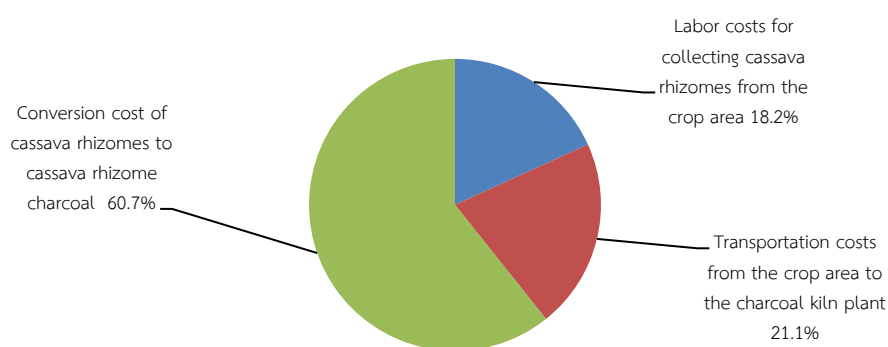


Figure 6 The production cost of cassava rhizome charcoal.

พบว่า ค่าแรงงานเก็บรวบรวมเหง้ามันสำปะหลังออกจากพื้นที่ 0.51 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 18.2% ค่าขนส่งจากแปลงสู่เตาเผาถ่าน 0.59 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 21.1% ค่าแปลงสภาพเหง้ามันสำปะหลังเป็นถ่านเห้งมันสำปะหลัง 1.70 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 60.7% รวมต้นทุนการผลิตถ่านเห้งมันสำปะหลัง 2.80 Baht kg⁻¹ (เห้งมันสำปะหลัง) ถ้าคิดวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายในส่วนของ

ค่าแรงงานเก็บรวบรวมและค่าขนส่งจากแปลง เท่ากับ 1,100 Baht tons⁻¹ (เข้ามาเก็บรวบรวมภายหลังจากที่เก็บหัวมันสำปะหลังออกจากแปลงไปก่อนหน้านี้แล้ว) ในขณะที่ราคาซื้อขายของผู้ประกอบการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวลจากเห้งมันสำปะหลังตันละ 670-970 Baht (ธรีณี, 2556) และ 615 Baht (อุกฤษ, 2565) ทำให้เกษตรกรขาดแรงจูงใจที่จะเก็บรวบรวม

เห้จ้มน้ส้ปปะหล้งออกจ้กฟ้้นที่เปล้งปล้ก แต่ถ้มีกรว้งแพน เก้บเก้ยวเห้จ้พรว้มน้ส้ปปะหล้ง และม่เครื่งจ้กรกเล เกษตรชว้ท้่นแร้งและสมารถจ้ดการเก้บเก้ยวได้น้ซ้้นตอนเด้ยว จะส่่งผลให้ค้ใช้จ้ยในซ้้นตอนน้้ลดลงได้

4 สรุปผลการศึกษา

การศ้กษารูปแบบและว้ธีการเผาถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง รูปแบบเตาเผาถ้นแบบ 200 ล้ตรที่น้าศ้กษาม้ 3 รูปแบบ พบว้ ค้ความร้อนของถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งเด้ล้ยที่ไ้จ้กเตาเผาถ้น ท้้ 3 รูปแบบอยู่ระหว้าง 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹ มม่ความ แตกต่างก้นเมื่อเปร้ยบเท้ยบค้ความร้อนเด้ล้ยดว้ยว้ธีการทาง สลลถิ แต่เมื่อพ้จารณาว้ตราการผลลถ้น เปร้เช้้นด้ผลผลลถ้น ประสลทธิภาพของเตาเผาถ้น จะพบว้เตาเผาถ้นแบบเผา โดยตรงแบบเป้ดฝ้าบน จะม่ความเหมาสมมากกว่าเตาเผาถ้น แบบอ้้น

ผลการศ้กษาความเป้้นไปไ้การใช้ถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง ทดแทนถ้นม่ในการเผาเล้กเพื่อต้ซ้้นรูปของผ้ประกบการต้ เล้กบ้านน้าถ้น เปร้ยบเท้ยบกับถ้นม่ที่ใช้ในป้จจุบั้น ซ้้ สามารถสร้บได้ว้ถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งที่ท้การศ้กษามม่ สามารถให้ค้ความร้อนถ้นค้ความร้อนถ้นที่เหมาสมในการเผาเล้ก เพื่อต้ซ้้นรูปได้ มม่ตราการเผาไหม้สูงกว้ถ้นม่ต้เล้กถ้ถึง 11% ท้ให้ล้้นเปล้ืองถ้นมากกว่าและถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งมี สมรรถนะต้กว้ถ้นม่ถ้ถึง 62% เมื่อน้มาใช้ในการเผาเล้กเพื่อ ต้ซ้้นรูป ซ้้เป็นผลมาจากอุนถ้มถ้นในเตาเผาที่ถ้นเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้งท้ได้ต้กว้ถ้นม่และย้มีว้ตราการเผาไหม้ที่มากกว่า ถ้นม่

ด้้นทุนการผลลถ้นจ้กเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง พบว้ ค้แร้งงาน เก้บรวบรวมน้ส้ปปะหล้งออกจ้กฟ้้นที่ 0.51 Baht kg⁻¹ ค้ด เป้้น 18.2% ค้ขนส่่งจ้กเปล้งสู่เตาเผาถ้น 0.59 Baht kg⁻¹ ค้ด เป้้น 21.1% ค้เปล้งสภาพเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งเป้้นถ้นเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้ง 1.70 Baht kg⁻¹ ค้ดเป้้น 60.7% รวมด้้นทุนการผลล ถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง 2.80 Baht kg⁻¹

สร้บได้ว้ เป้้นไปม่ไ้ด้ที่จ้จะน้าถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งมาใช้ ทดแทนถ้นม่ในกระบวนการต้เล้ก

5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการน้้สำเร็จล้่งไปไ้ด้ดว้ยดี ขอขอบคุนกองท้่นว้จ้ยและ พ้ฒนา มหาว้ทยาล้ยนครพนม ประจ้าป้้งประมาณ พ.ศ. 2565 ที่สน้บสนุนท้่นว้จ้ย ขอบคุนสาขาวิชาเครื่งกล คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรมและสาขาวิชาเครื่งจ้กรกเลเกษตร คณะเกษตรและ เทคโนโลยี มหาว้ทยาล้ยนครพนม ที่ให้สถ้านที่และเครื่งม้อในการ ท้าว้จ้ย

ขอขอบคุนกลุ่มช่างต้เล้ก บ้านน้าถ้น ต้าบลน้าถ้น อำเภอ ธาตุพนม จ้หว้ดนครพนม ที่ให้ข้อมูลและความร้วมม้อ อ้้นเป้้น ประโยชน้ในการศ้กษาในคร้้งน้้

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมพ้ฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง พลังงาน. 2566. โครงการพ้ฒนาการผลลและการใช้เตาเผา ถ้นแบบถ้ 200 ล้ตร. แหล่งข้อมูล: <http://e-lib.dede.go.th>. เข้าถ้ถึงเมื่อ 6 มกราคม 2566.
- กิตติพงษ์ ลาถ้น. 2557. การศ้กษาและพ้ฒนาเครื่งผลลถ้นอ้ด แท้จ้กถ้นช้วมวล. ว้ทยานิพนธ์ป้ริญญาดุษฎีบัณทิต. ขอนแก่น: บัณทิตว้ทยาล้ย มหาว้ทยาล้ยขอนแก่น.
- จุฑามาศ บุชร้าค้มว้ดี. 2547. สมบัถิของถ้นอ้ดแท้จ้กเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้งโดยอ้างถ้ถึงแหล่งว้ถ้ดุดิ บ ขนาดผงและอ้ตรา ส่วนดว้ประสาน. ว้ทยานิพนธ์ว้ศกรรมศาสตรมหาบัณทิต. กรุงเทพมหานคร: บัณทิตว้ทยาล้ย, มหาว้ทยาล้ย เกษตรศาสตร.
- จุฬารัตน์ ขาวก้าแพง, สมโกชน์ สุตจ้ันทร. 2554. การศ้กษาและ พ้ฒนาถ้นอ้ดแท้จ้กว้สตุเกษตร. วารสารว้ทยาการศาสตร เกษตร 42(3)พิเศษ, 481-484.
- ธัญชัย สาทะกลาง, ปรีญ คงกระพ้ันธ, อ้ครินทร อ้นทนิเวศน. 2559. การศ้กษาเตาเผาถ้นไร้คว้้นดว้ยการต้ดต้ังคร้บนำ ความร้อนรูปส้เล้ยมผ้้นฝ้าเพื่อเพิ่มประสลทธิภาพเช้งความ ร้อนและประหยัถพลังงาน. รายงานการประกุมว้ชาการ เครื่งชว้พลังงานแท้งประเทศไทย คร้้งที่ 12, พิชญโลก: คณะว้ทยาการศาสตร และว้ทยาล้ยพลังงานทดแทน มหาว้ทยาล้ยนเรศวร ร้วมกับ มหาว้ทยาล้ยแม่จ้. 8-10 มิถุนายน 2559, โรงแรมว้จ้จ้นท้รีเวอร์ว้, พิชญโลก.
- ธรีนิ มณัศรี, ศิริศกย เทพจ้ิต, ธนภณ เจียรณัณ. 2556. การศ้กษา รูปแบบธุรกิจการผลลเช้ือเพลิงช้วมวลจ้กเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง ดว้ยแนวค้ดการจ้ดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน. วารสารศรี ปทุมป้ริทศน 5(ฉบับว้ทยาการศาสตรและเทคโนโลยิ), 100-109.
- น้กราน หอมดว, พ้ณธวัณน ไซยวรรณ, ญุณัถิต สายแก้ว, ประภัสสร ร้ตนไพบูลย์, กิตติกร สาสุจ้ิต, เสริมสุข บว้เจริญ, นงเยาว์ หอมดว, ย้งร้กษ อรรถเวชกุล,ชุร้ตน์ ธาราร้กษ. 2564. การพ้ฒนาเครื่งป้ฏิภณัไฟโรลชีสส้สำหรับการใช้งาน ผลลความร้อนและถ้นช้วมวล. วารสารว้ทยาการพลังงาน ทดแทนสู่ชุมชน 4(1), 47-53.
- ปฐมศก วิไลพล. 2551. เศษว้สตุจ้กการเกษตรอ้ดแท้ง. กรุงเทพมหานคร: จรัสสนิทว้งศ้การพ้ิมพ.
- ประเทือง อุษาบร้สุทธ, ธารินี มหายนันท. 2548. การศ้กษาการ อ้ดแท้จ้กถ้นเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งโดยใช้เครื่งอ้ดถ้นแบบแม่ แร้งไฮโดรลิก. ว้ศกรรมสาร มก. 56(19), 32-40.
- ประลอง ดำรงค้ไทย. 2540. การศ้กษาทดลองเปร้ยบเท้ยบว้ธีการ ผลลและคุณภาพของถ้นตามว้ธีการเผาแบบท้องถ้้นกับว้ธี ของกรมป่าม่. รายงานการประกุมทางว้ชาการของ มหาว้ทยาล้ยเกษตรศาสตร คร้้งที่ 35, 709-717. กรุงเทพมหานคร: สาขาพ้ช ส่่งเสริมและน้เทศศาสตรเกษตร อุตสาหกรรมเกษตร มหาว้ทยาล้ยเกษตรศาสตร. 3-5 กุมภาพันธ์ 2540, กรุงเทพมหานคร.

- ปรีชา ชันติโกมล, โมตรี พลสงคราม, ตินกร ภูวดิน, วิวัฒน์ อภิสิทธิ์ภิญโญ. 2562. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการไพโรไลซิส เหน้กมันสำปะหลังอัดแท่งเย็นโดยเตาแบบแก๊สหมุนวนปิด. รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 ประจำปี 2562, 707-712. อุตรธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2-5 กรกฎาคม 2562, โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุตรธานี.
- พัชรินทร์ ฤชวรารักษ์, พันธุ์ทิพย์ ตาทอง. 2557. การเผาถ่าน วิถีดั้งเดิมของชุมชนท้องถิ่นสู่เทคโนโลยีพลังงานทางเลือก. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ 6(2), 52-71.
- พิตมาส หวังดี, วุชรินทร์ เขียวไกร, จิรศักดิ์ บุอ่อน. 2558. การศึกษาการใช้ถ่านชีวมวลอัดแท่งทดแทนถ่านไม้ในอุตสาหกรรมตีเหล็ก. รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติการพัฒนาชุมชนที่ยั่งยืน ครั้งที่ 5, 178-188. ขอนแก่น. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 23-25 ธันวาคม 2558, โรงแรมเซ็นทารา แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์, ขอนแก่น.
- พิสิษฐ์ มณีโชติ, ประพิศาร ธารักษ์, บงกช ประสิทธิ์, ชาติ ไชยสิทธิ์, ณัฐภูมิ ขาวสะอาด, กิ่งกานต์ พันธวานิชย์, วิภาณต์ วันสูงเนิน, อธิกา เพชร, จันจิรา คุ่มปากฟุ้ง. มปป. คู่มือการสร้างเตาเผาถ่านแบบแนวนอนขนาด 200 ลิตร. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). แหล่งข้อมูล: <https://social.nia.or.th/wp-content/uploads/2019/12/05-การสร้างเตาเผาถ่านแบบแนวนอนขนาด-200-ลิตร.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 6 มกราคม 2566.
- ไพฑูรย์ สาลี. 2548. งานตีเหล็กและชุบแข็ง ภูมิปัญญาท้องถิ่นจังหวัดนครนายก. แผนกวิชาพื้นฐานช่างอุตสาหกรรม: วิทยาลัยเทคนิคนครนายก.
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2565. ผลสำรวจมันสำปะหลังของคณะสำรวจภาวะการผลิต การค้ามันสำปะหลัง. แหล่งข้อมูล: <https://tapiocathai.org/L1.html>. เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2566.
- รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล, อุวิทย์ สุวคันธกุล, อัมพร ฤกษ์รัตน์. 2553. การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเหน้กมันสำปะหลัง. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา 4(2), 18-28.
- หาญณรงค์ บำรุงศิริ. 2553. สมบัติทางกลและทางกายภาพของถ่านไม้อัดก้อนที่ผลิตจากเศษถ่านไม้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. อุบลราชธานี: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- อับดุลรอหมัน โต๊ะฮิเล, มูฮัมหมัด ยือลาแป, โรสลินา จาราแว. 2561. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร. รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 3 ประจำปี 2561, 642-657. ยะลา: คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. 11-12 กุมภาพันธ์ 2561, ยะลา.
- อุกฤษ อุณหเลขกะ. 2565. การส่งเสริมเกษตรกรเก็บซากวัสดุทางการเกษตรผ่านแอปพลิเคชัน รีคัลท์. รายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. แหล่งข้อมูล: https://www.khonthai4-0.net/system/resource/file/kpfgo_content_attach_file_320_1.pdf?date=2022-02-23%2016:28:56.1. เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2566.
- Carnaje, N.P., Talagon, R.B., Peralta, J.P., Shah, K., Paz-Ferreiro, J. 2018. Development and characterisation of charcoal briquettes from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)-molasses blend. PLOS ONE 13(11), e0207135.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. 1985. Industrial Charcoal Making. Rome: FAO.
- Homchat, K., Sucharitakul, T., Khantikamol, P. 2012. The experimental study on pyrolysis of the cassava rhizome in the large scale metal kiln using flue gas. Energy Procedia 14(2012), 1684 - 1688.
- Intagun, W., Maden, A. 2020. Effect of mixing ratios on physical properties and energy consumption of leucaena pellets by using fermented cassava rhizome. Science, Engineering and Health Studies 14(3), 193-202.
- Jarunee Khempila, Pumin Kongto. 2022. Torrefaction of Cassava Rhizome to Produce High-Grade Solid Biofuels. Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) 21(1), 88-102.
- Juizo, C.G.F., Lima, M.R., Silva, D.A. 2017. Quality of the bark and wood of nine Eucalyptus species for the charcoal production. Revista Brasileira de Ciências Agrárias-Brazilian 12(3), 386-390.
- Nakason, K., Pathomrotsakun, J., Kraithong, W., Khemthong, P., Panyapinyopol, B. 2019. Torrefaction of agricultural wastes: Influence of lignocellulosic types and treatment temperature on fuel properties of biochar. International Energy Journal 19(4), 253-266.
- Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M.M., Valdez-Hernández, J.I., Revilla, U.S., Romero-Manzanares, A. 2015. Chemical characterization and fuel properties of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. Industrial Crops and Products 65(March 2015), 90-95.
- Sangsuk, S., Buathong, C., Suebsiri, S. 2020. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. Energy for Sustainable Development 59(December 2020), 1-7.

Sayakoummane, V., Ussawarujikulchai, A. 2009.

Comparison of the physical and chemical properties of briquette and wood charcoal in Khammouane Province, Lao PDR. *Environment and Natural Resources Journal* 7(1), 12–24.

Sen, R., Wiwatpanyaporn, S., Annachhatre, A.P. 2016.

Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management* 17(2), 158–175.

Soponpongpipat, N., Comsawang, P., Nanetoe, S. 2019.

Quality properties and pyrolysis characteristics of cassava rhizome pellets produced by alternating between pelletizing and torrefaction. *Processes* 7(12), 930.

Tippayawong, N., Rerkkriangkraia, P., Aggarrangsi, P.,

Pattiya, A. 2017. Biochar production from cassava rhizome in a Semi-continuous carbonization system. *Energy Procedia* 141(2017), 109–113.

Tippayawong, N., Saengow, N., Chaiya, E., Srisang, N.

2010. Production of charcoal from woods and bamboo in a small natural draft carbonizer. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)* 1(5), 911-918.

Wijitkosum, S., Sriburi, T. 2021. Applying cassava stems

biochar produced from agronomical Waste to enhance the yield and productivity of maize in unfertile soil. *Fermentation* 7(4), 277.