สมรรถนะของเตาไพโรไลซิสกะลามะพร้าวชนิดให้ความร้อนด้วยตนเอง

Efficiency Performance Self-Heating Coconut Shell Pyrolysis Kiln

คณิต มานะธุระ[1*]และ อุกฤต สมัครสมาน[2]

Kanit Manatura[1*]and Ukrit Samaksaman[2]

Received 26 May 2022, Revised 30 August 2022, Accepted 30 August 2022

ABSTRACT

Charcoal is the first converted material produced by a human. Wood charcoal is an optimal renewable energy source in most developing countries. It has been of great importance to humans until now in terms of a domestic, chemical products, agriculture, and industries. The charcoal quality predominantly depends on biomass feedstock and charcoal production efficiency. Thus, this research aims to develop a highly efficient carbonizer using pyro-gas recovery. Experimental performance of the carbonizer, including temperature profiles and thermal efficiency along with charcoal heating value analysis is evaluated. These lead a wood carbonization system to achieve high charcoal yields with minimum energy losses. The carbonizer using raw coconut shell operated in temperature range of 200 - 370 °C with a mass yield of around 31% and efficiency of 40.79%. The calorific value of charcoal is 29.73 MJ/kg which can be used in the domestic heating applications.

Keywords: Pyrolysis, Coconut shell, Charcoal, Wood vinegar, Energy efficiency,

บทคัดย่อ

ถ่านชาร์นับเป็นวัสดุที่ถูกปรับสภาพในยุคแรกที่เกิดจากการผลิตของมนุษย์ ถ่านชาร์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมและถูกใช้ในประเทศกำลังพัฒนาเป็นส่วนใหญ่ ถ่านชาร์มีความสำคัญต่อมนุษย์อย่างมากจนถึงปัจจุบันทั้งในด้านการใช้งานในครัวเรือน เคมีภัณฑ์ การเกษตร และอุตสาหกรรม คุณภาพของถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบชีวมวลและประสิทธิภาพการผลิตถ่าน งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาเตาผลิตถ่านคุณภาพสูงโดยใช้แก๊สไพโรไลซิสหมุนวนโดยมีการทดสอบสมรรถนะของเตาซึ่งประกอบด้วยการกระจายตัวของอุณหภูมิ ประสิทธิภาพทางความร้อนและค่าความร้อนของถ่านชาร์เพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านสูงที่สูงที่สุดและลดการสูญเสียพลังงานให้มากที่สุด เตาเผาใช้กะลามะพร้าวเป็นชีวมวลดิบในการผลิตถ่านชาร์ทำงานที่อุณหภูมิ

[1*] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Sean, Kasetsart University Kamphaeng Sean Campus, Kamphaeng Sean, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

[2] ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Muang, Phitsanulok 65000, Thailand.

[*] Corresponding author: Tel 06-2638-8729, E-mail address: kanit.m@ku.th

ระหว่าง 200-370 องศาเซลเซียสผลผลิตเชิงมวลร้อยละ 31 และประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 40.79 ค่าความร้อนของถ่านเท่ากับ 29.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำความร้อนภายในครัวเรือนได้

คำสำคัญ: ไพโรไลซิส กะละมะพร้าว ถ่านชาร์ น้ำส้มควันไม้ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

คำนำ

ถ่านชาร์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญสำหรับประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งสามารถจัดเก็บสะดวก ราคาถูก มีการเผาไหม้สะอาดกว่า และมีค่าความร้อนสูงกว่าไม้ ถ่านชาร์แห้งมีค่าความร้อนสูง (HHV) 33 MJ/kg (Jung *et al*., 2008) เมื่อเทียบกับค่าความร้อนสูงของไม้ดิบ 15 MJ/kg (Basu, 2013) ถ่านชาร์สามารถแบ่งตามการใช้งานได้ 4 ประเภท ได้แก่ ครัวเรือน (domestic) ผลิตภัณฑ์เคมี (chemical product) เกษตรกรรม(agriculture) และอุตสาหกรรม (industry) (Rodrigues and Braghini, 2019)

การไพโรไลซิสสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่ ไพโรไลซิสแบบเร็ว ไพโรไลซิสแบบปานกลาง และไพโรไลซิสแบบช้า ขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อน (heating rate) ไพโรไลซิสแบบช้า (อัตราการให้ความร้อนต่ำ) หรือคาร์บอไนเซชัน (canonization) มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการแปลงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและป่าไม้ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูง (Xiong *et al*., 2014) ถ่านชาร์จากไม้ผลิตขึ้นจากการไพโรไลซิสแบบช้า (คาร์บอไนเซชัน) จากการสลายโครงสร้างชีวมวลด้วยความร้อน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปแก๊ส น้ำมันดินเหลว (liquid tar) และถ่านชาร์ (FAO, 1983) ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจนที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ไม้ให้กลายเป็นเถ้า

การไพโรไลซิสแบบช้าประกอบด้วย 1) การทำแห้ง (drying) โดยไม้จะดูดซับความร้อนเพื่อระเหยความชื้นในรูปของไอน้ำจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมถึงอุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส 2) สารระเหยอ่อน (light volatiles) จะเริ่มระเหยที่ 110 – 270 องศาเซลเซียส ขณะที่การสลายตัวทางความร้อนภายในเนื้อไม้เกิดที่ 270 - 400 องศาเซลเซียส ขั้นตอนนี้แก๊สต่างๆ และไอน้ำที่ถูกระเหยบางส่วนจะรวมตัวกันกลายเป็นน้ำมันดิน แก๊สที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอที่ควบแน่นได้ เช่น ไอน้ำ (H_2O), กรดอะซิติก ($C_2H_4O_2$), เมทานอล (CH_3OH), อะซีโทน (C_3H_6O), และน้ำมันดินและ 3) ขั้นตอนสมบูรณ์ ในการผลิตถ่าน อุณหภูมิของชีวมวลจะเข้าใกล้ 400 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะกลายเป็นถ่านชาร์โดยมีน้ำหนักคงเหลือประมาณร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น หากเพิ่มอุณหภูมิถึง 500 – 550 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์จะเพิ่มขึ้นสูงถึงร้อยละ 75 (หลังจากแยกน้ำมันดินออก)(Food U.S., 2008)

การผลิตถ่านชาร์ในประเทศไทยแบ่งได้ 2 ระดับ ได้แก่ ระดับอุตสาหกรรมและครัวเรือน การผลิตถ่านชาร์ในระดับอุตสาหกรรมจะทำในโรงงานที่ใช้เตาอิฐและเตาเหล็ก ระดับครัวเรือนมักใช้เตาดรัม (ลักษณะคล้ายถัง) และเตาเผาที่ก่อจากดิน แม้ว่าเตาเผาที่ก่อจากดินจะสร้างง่ายแต่ประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำมากและก่อเกิดมลพิษทางอากาศสูง ขณะที่เตาดรัมที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก เช่น เตาดรัมขนาด 200 ลิตร เป็นที่นิยมในชนบทเนื่องจากมีราคาไม่แพงและง่ายในการสร้าง (Suebsiri *et al*., 2020, นิกรานและคณะ, 2564 และ Manatura, 2021)

การเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเตา วิธีการหนึ่ง คือ การนำแก๊สไพโรไลซิสที่ออกจากเตาหมุนวนกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตของถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเตาดีขึ้นและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับเตาดังกล่าวพอสมควร ดังต่อไปนี้

Sangsuk *et al.* (2020) ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบดรัมแนวตั้งขนาด 200 ลิตร พร้อมท่อกระจายความร้อนเพื่อผลิตถ่านชาร์และน้ำส้มควันไม้เตาถูกหุ้มฉนวนด้วยไฟเบอร์กลาส (fiberglass) และเหล็กชุบสังกะสี (galvanized steel) โดยมีท่อกระจายความร้อนพร้อมช่องติดตั้งอยู่ที่ส่วนกลางของเตาเผา ปล่องไอเสีย 4 ตัว ใช้เพื่อปล่อยควันและเก็บน้ำส้มควันไม้ โดยใช้ไม้มะขามและซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ ผลการสอบแสดงให้เห็นว่า เตาใช้เวลา 3.5 - 5 ชั่วโมงเพื่อให้ได้อุณหภูมิสูงสุด (300 – 430 องศาเซลเซียส) และเย็นตัวลงภายใน 3 - 5 ชั่วโมงถัดไป ซึ่งใช้เวลาทั้งหมดในการผลิตถ่านชาร์จากไม้มะขามประมาณ 8 ชั่วโมง ถ่านไม้มะขามมีความชื้นร้อยละ 5, สารระเหยร้อยละ 20 - 21, คาร์บอนคงที่ร้อยละ 68.7 - 69.8, เถ้าร้อยละ 3.8 - 5.6 และค่าความร้อน 30 - 31 MJ/kg ผลผลิตถ่านและประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเท่ากับร้อยละ 24 - 28 และ 40 - 48 ตามลำดับ นิกราน และคณะ (2564) ทดสอบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเพื่อผลิตถ่านชาร์จากซังข้าวโพดและเศษไม้ลำไย ผลการทดสอบระบุว่าเตาดังกล่าวมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 1 - 1.8 kg/h ระยะเวลาการผลิตถ่าน 120 - 180 นาที ประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 67 - 97 ค่าความร้อนของถ่านชาร์จากซังข้าวโพดและเศษไม้ลำไยเท่ากับ 28.55 และ 25.41 MJ/kg ตามลำดับ Manatura (2021) ได้ศึกษาสมรรถนะของเตาไพโรไลซิสโดยใช้แก๊สไพโรไลซิสหมุนวนเพื่อผลิตถ่านชาร์และน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่ พบว่าการผลิตถ่านชาร์ใช้เวลาทั้งหมด 6 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียส ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานเท่ากับร้อยละ 38 - 45 และ 56 - 86 ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์อยู่ระหว่างร้อยละ 62 – 64 และประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 56 – 85

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาไพโรไลซิสชีวมวลชนิดให้ความร้อนด้วยตนเองเพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เตาไพโรไลซิสชนิดแก๊สหมุนวน

การทำงานของเตาไพโรไลซิสชนิดแก๊สหมุนวนแสดงดัง Figure 1 เตาดรัมมีขนาด 200 ลิตร ประกอบขึ้นจากเหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 60 และ 90 เซนติเมตร ตามลำดับ หุ้มฉนวนด้วยเซรามิกหนา 250 มิลลิเมตร ท่อกระจายความร้อนถูกติดตั้งไว้ส่วนกลางของเตาโดยรับความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหน้าเตา (Ignited fuel) ซึ่งใช้เป็นเศษไม้ ระหว่างการผลิตถ่าน (คาร์บอไนเซชัน) จะเกิดแก๊สไพโรไลซิสจากการระเหยของสารระเหยในชีวมวลดิบอย่างต่อเนื่อง แก๊สดังกล่าวเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อหมุนวนเนื่องจากความแตกต่างของความดันภายในเตา และท่อหมุนวน และจะเกิดแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็นที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมผ่านเครื่องควบแน่น (condenser) ทำให้ได้น้ำส้มควันไม้ ที่ส่วนบนของเตาจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวลดิบจากการวัดอุณหภูมิภายในเตา สมดุลมวลของเตาเผาดังกล่าวแสดงดัง Figure 2

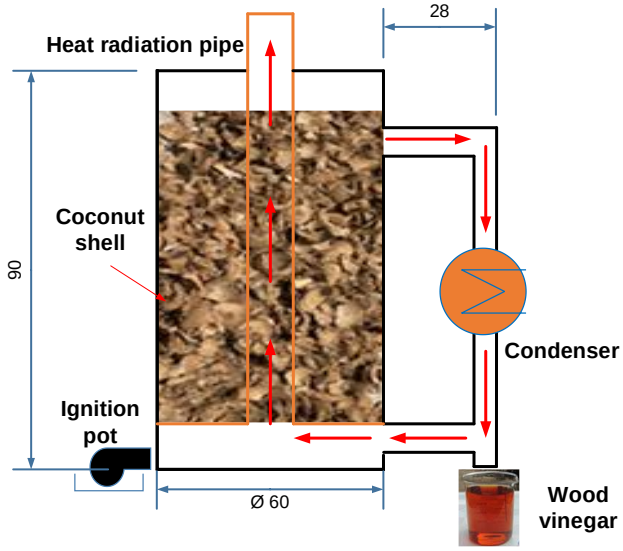

Figure 1 Schematic diagram of self-heating carbonizer (Unit: cm)

อุปกรณ์และวิธีการ

ชีวมวลดิบซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตถ่านชาร์ในงานวิจัยนี้คือ กะลามะพร้าว ซึ่งถูกวางในที่โล่งเพื่อไล่ความชื้นในกะลามะพร้าวประมาณ 1 สัปดาห์ ก่อนนำมาผลิตถ่านชาร์ Figure 3 แสดงขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน กะลามะพร้าวถูกสับให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 80 มิลลิเมตร โดยถูกป้อนใส่เตาเผาแต่ละครั้งที่ 29 กิโลกรัม หลังจากป้อนกะลามะพร้าวแล้วทำการปิดล็อกฝาด้านบนอย่างแน่นเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าสู่เตาเผา หลังจากนั้นทำการให้ความร้อนแก่เตาโดยเผาไหม้เชื้อเพลิงหน้าเตา (เศษไม้) การป้อนเชื้อเพลิงหน้าเตาจะสิ้นสุดลงเมื่อสังเกตเห็นเปลวไฟเกิดขึ้นที่ท่อส่วนกลางด้านบน ซึ่งแสดงถึงแก๊สไพโรไลซิสเริ่มเกิดขึ้นจากการระเหยออกจากชีวมวล และพร้อมที่จะเป็นแหล่งความร้อนแก่เตาเผาเองได้ เปลวไฟจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งหมดซึ่งแสดงว่าสารระเหยในชีวมวลดิบได้หมดแล้วเหลือเพียงถ่านชาร์ อย่างไรก็ตาม ณ เวลานี้ยังไม่สามารถนำถ่านชาร์ออกจากเตาเผาได้เนื่องจากอุณหภูมิของถ่านชาร์ยังสูง อาจติดไฟได้เมื่อพอกับอากาศภายนอกเมื่อเปิดเตา จำเป็นต้องรออุณหภูมิภายในเตาใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพื่อป้องกันอันตรายจากการการลุกไหม้ของถ่านชาร์ การทดสอบทำทั้งหมด 4 ครั้ง ค่าความร้อนของชีวมวลและถ่านชาร์ถูกวิเคราะห์จากเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน LEC รุ่น AC-500 โดยนำค่าเฉลี่ยของน้ำหนักถ่านชาร์ น้ำส้มควันไม้และแก๊สไปคำนวณสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อไป

สมรรถนะการคาร์บอนไนเซชัน

ประสิทธิภาพของเตาไพโรไลซิสสามารถประเมินได้จากสมรรถนะการคาร์บอนไนเซชัน (Manatura, 2021) ได้แก่ ผลผลิตถ่านชาร์ (Charcoal Yield, CY) ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy Density, ED) และผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy Yield, EY) รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน ดังสมการต่อไปนี้

$$CY\ (\%) = m_{char}/m_{raw} \times 100 \quad (1)$$

$$ED\ (-) = HHV_{char}/HHV_{raw} \quad (2)$$

$$EY\ (\%) = CY \times ED \quad (3)$$

$$\eta_{th} = E_{char}/E_{raw} \quad (4)$$

$$E = m \times HHV \quad (5)$$

โดย CY แสดงผลผลิตของถ่านชาร์ที่ผลิตได้หลังการคาร์บอไนเซชั่น, ED แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนในถ่านชาร์เทียบกับชีวมวลดิบ และ EY แสดงพลังงานของถ่านชาร์หลังการคาร์บอไนเซชั่น

ส่วน m, HHV และ E คือ มวล (kg) ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) และพลังงาน (MJ) ตามลำดับ ตัวย่อ char และ raw แสดงถึงถ่านชาร์และชีวมวลดิบ ตามลำดับ พลังงานจากถ่านชาร์ ชีวมวลดิบ และ เศษไม้คำนวณจากผลคูณของมวลและค่าความร้อนสูงดังสมการที่ (5)

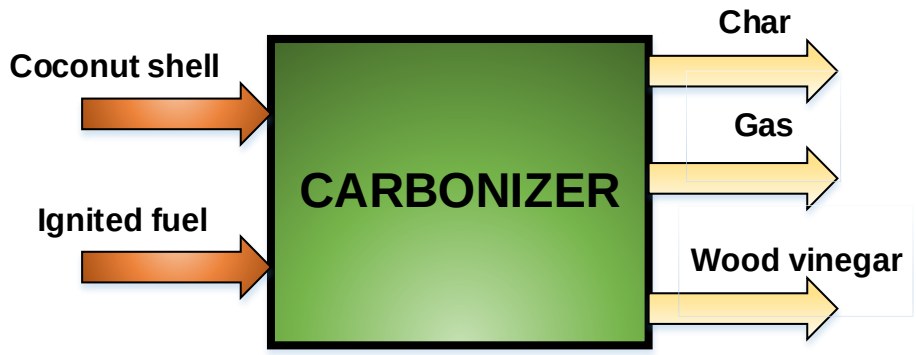

Figure 2 Mass balance of the carbonizer

Figure 3 Charcoal production a) raw coconut shell, b) placing coconut shell insides carbonizer, c) igniting, d) carbonizing, e) charcoal and f) wood vinegar

ผลและวิจารณ์

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาไพโรไลซิสและสมรรถนะของเตาสามารถแสดงได้จากตัวแปรเชิงสมรรถนะ ได้แก่ ผลผลิตเชิงมวล (CY), ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (ED) และผลผลิตเชิงพลังงาน (EY) รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th})

Figure 4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาไพโรไลซิส โดยสามารถแบ่งการกระจายอุณหภูมิเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงให้ความร้อน (Heating)

ช่วงคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) และช่วงลดอุณหภูมิ (Cooling) (Manatura, 2021) โดยมีระยะเวลาการผลิตถ่านทั้งหมดเท่ากับ 360 นาทีหรือ 6 ชั่วโมง ช่วงให้ความร้อนเกิดขึ้นภายใน 49 นาทีแรก โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 285 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เป็นช่วงที่ต้องการพลังงานมากที่สุด เนื่องจากต้องใช้ในการระเหยความชื้นที่และไล่สารระเหยในโฮโลเซลลูโลสอยู่ในชีวมวล (Ayass *et al.*, 2018; Basu, 2013) จึงจำเป็นต้องใส่ความร้อนจากหน้าเตาช่วงนี้มีอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 6 องศาเซลเซียสต่อนาที ช่วงคาร์บอไนเซชันเป็นช่วงถัดมาที่เกิดการระเหยของสารระเหยทั้งหมดเนื่องจากได้รับความร้อนจากช่วงแรกและแก๊สไพโรไลซิสหมุนวน ช่วงนี้ใช้ระยะเวลาทั้งหมดประมาณ 70 นาที สังเกตจากช่วงที่เปลวไฟเกิดขึ้นจนกระทั่งเปลวไฟดับซึ่งแสดงว่าสารระเหยจากชีวมวลเกิดการระเหยออกหมดแล้ว อุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาเกิดในช่วงนี้ที่ 370 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ระยะเวลา 69 นาที หลังจากเริ่มให้ความร้อนแก่เตาเผา ของแข็งที่เหลือในเตาในช่วงนี้จะมีสภาพเป็นถ่านชาร์ Sangsuk *et al.* (2020) ใช้อัตราการให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 1 - 2 องศาเซลเซียส/นาที แก่เตาไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชาร์จากไม้ไผ่ พบว่าเตาดังกล่าวให้ผลผลิตเชิงมวลร้อยละ 20 - 21 ขณะที่เตาเผานี้มีอัตราการให้ความร้อนที่ 6 องศาเซลเซียส/นาที โดยมีผลผลิตเชิงมวลร้อยละ 31.31 แสดงให้เห็นว่าเตาเผาชนิดใช้แก๊สหมุนวนนี้ช่วยเพิ่มอัตราการให้ความร้อนภายในเตาเผาส่งผลให้ผลผลิตเชิงมวลสูงขึ้น (สารระเหยถูกไล่ออกไปมากขึ้น) ช่วงทำความเย็นเป็นช่วงก่อนที่จะนำถ่านชาร์ออกจากเตา ช่วงนี้จำเป็นต้องรออุณหภูมิภายในเตาเผาให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพื่อป้องกันการลุกไหม้ของถ่านชาร์เมื่อสัมผัสกับอากาศภายนอก และเพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อนของเตาเผา ช่วงนี้เป็นช่วงที่ใช้เวลานานที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านชาร์ประมาณ 4 ชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิของเตาเผาสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส

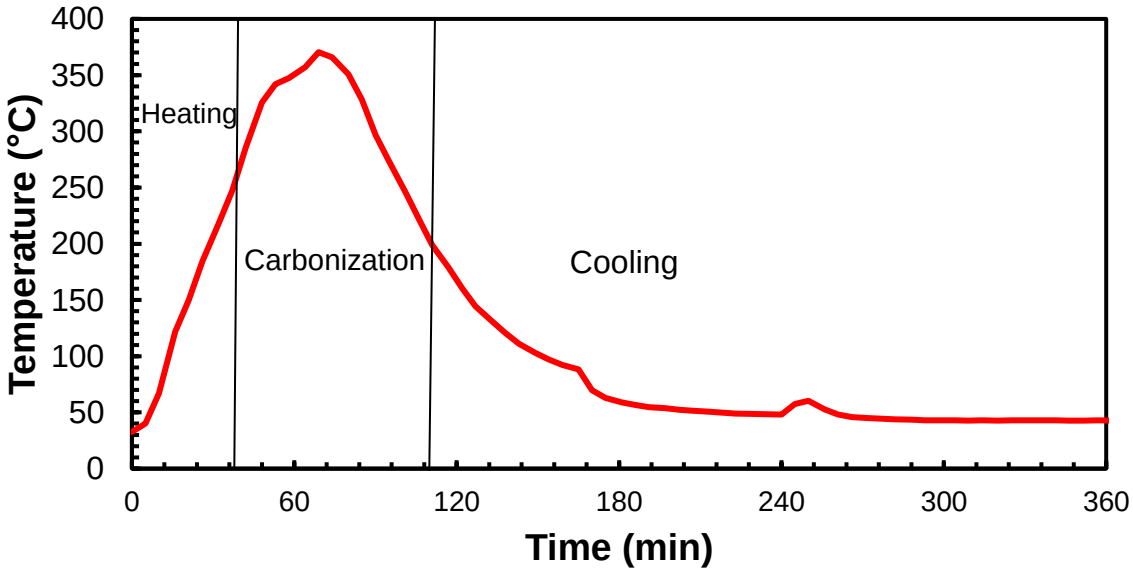

Figure 4 Temperature profile during carbonizing coconut shell

Table 1 แสดงมวลของชีวมวลดิบ มวลเชื้อเพลิงหน้าเตา(เศษไม้) มวลถ่านชาร์ มวลน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการชั่งน้ำหนักจากการคาร์บอไนเซชันเตาเผาชนิดแก๊สหมุนวนและสมดุลมวลแสดงดัง Figure 5 มวลเข้าเตาประกอบด้วยวัตถุดิบ (กะลามะพร้าว) และมวลของเศษไม้ (Ignited fuel) มวลออกจากเตาประกอบด้วยถ่านชาร์ น้ำส้มควันไม้ และแก๊ส โดยมวลของแก๊สคำนวณจากการทำสมดุลของมวลขาเข้ากับถ่านชาร์และน้ำส้มควันไม้จาก Figure 5 พบว่า แก๊สมีสัดส่วนมากที่สุดสำหรับ

มวลขาออก (ร้อยละ 74) เนื่องจากมีไอน้ำและสารระเหยอยู่ในกะลามะพร้าว มวลของถ่านชาร์และเชื้อเพลิงหน้าเตามีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 23-24) มวลของน้ำส้มควันไม้มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่เหลือจากการระเหย

Table 2 แสดงค่าความร้อนสูง (HHV) ของกะลามะพร้าวดิบ และถ่านชาร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.68 และ 29.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์มีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุดซึ่งเกิดจากการระเหยของสารระเหยจำนวนระหว่างคาร์บอไนเซชัน

Table 3 แสดงสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผา โดยสมรถนะของเตาประกอบด้วยผลผลิตเชิงมวล (CY) ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (ED) และผลิตเชิงพลังงาน (EY) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) ,(2) และ (3) ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผา คำนวณจากสมการที่ (4) และ (5) ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานของเตาเผาชนิดใช้แก๊สไพโรไลซิสหมุนวนเท่ากับร้อยละ 31 และ 53 ตามลำดับ และจาก Table 3 เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาเผาของ Sangsuk *et al.*(2020) ซึ่งใช้ผลิตถ่านชาร์จากต้นมะขามและไม้ไผ่แล้วพบว่า เตาเผาที่ใช้แก๊สร้อนไพโรไลซิสหมุนวนนี้มีสมรรถนะสูงกว่าอย่างชัดเจนโดยสังเกตจากผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อน เนื่องจากความสามารถในการดึงสารระเหยออกจากชีวมวลจำนวนมากและการใช้ความร้อนจากสารระเหยดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

สรุป

จากการศึกษาสมรรถนะของเตาไพโรไลซิสชนิดใช้แก๊สหมุนวนโดยใช้กะลามพร้าวเป็นชีวมวลดิบเพื่อผลิตถ่านชาร์และน้ำส้มควันไม้ จากการทดสอบสมรรถนะพบว่าระยะเวลาการผลิตถ่านชาร์อยู่ประมาณ 111 นาที ขณะที่ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้การเก็บถ่านอยู่ที่ 360 นาที อุณหภูมิสูงสุดของเตาเท่ากับ 370 องศาเซลเซียส ผลผลิตเชิงมวลและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 31 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่าเตาเผารุ่นก่อนเนื่องจากมีการใช้แก๊สไพโรไลซิสหมุนวนช่วยเร่งอัตราการให้ความร้อนแก่เตาเผาในการไล่สารระเหยออกจากชีวมวลดิบ อย่างไรก็ตาม ความร้อนจากการปล่อยแก๊สยังมีจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น การต้มน้ำ และอาจพิจารณาปรับเปลี่ยนฉนวนเพื่อลดความร้อนสูญเสีย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ปีงบประมาณ 2564 รหัส KPS-RDI 2021-016 ขอขอบคุณนายมูอัซซิน เบ็ญหีม นายวิชยุตม์ ปากโมกข์ นายอิทธิพล เครือวรพันธุ์และนายโชติภาคย์ วสุมงคล ที่ช่วยดำเนินการทดสอบและเก็บข้อมูล รวมถึงศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัยมา ณ โอกาสนี้

Table 1 Mass flow across the carbonizer

No	Raw coconut shell (kg)	Ignited fuel (kg)	Char (kg)	Wood vinegar (kg)
1	29.00	6.50	8.70	0.70
2	29.00	10.20	9.80	1.10
3	29.00	8.40	8.80	1.10
4	29.00	11.50	9.00	1.30
Avg.	29.00	9.15 ± 2.18	9.08 ± 0.5	1.05 ± 0.25

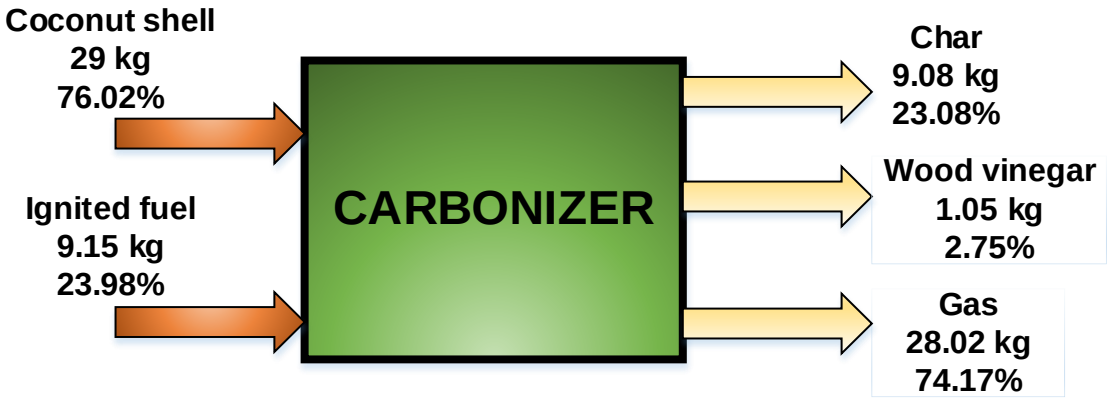

Figure 5 Mass balance across the carbonizer

Table 2 Heating value of related fuels in the carbonizer

Biomass type	Raw coconut	Char
Higher heating value (MJ/kg)	17.68	29.73

Table 3 Carbonizer performance and energy efficiency

Carbonizer performance	This study	Sangsuk *et al.* (2020)
Performance factor		
Char yield, CY (%)	31.31	24 - 28
Energy density, ED (-)	1.68	1.68 - 1.72
Energy yield, EY (%)	52.60	40.32 - 48.16
Energy		
Raw coconut shell (MJ)	512.72	-
Char (MJ)	269.95	-
Efficiency (%)	52.65	40 - 48

เอกสารอ้างอิง

นิกราน หอมดวง, พันธวัฒน์ ไชยวรรณ์, ภูนิฑิต สายแก้ว, ..., ชูรัตน์ ธารารักษ์. (2564). การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนลถ่านชีวภาพ. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*, *4(1)*, 47-53.

Basu, P. (2013). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory: Academic press.

FAO, F. (1983). Agriculture Organisation of the United Nations. Simple technologies for charcoal making. FAO forestry paper, 41.

Food, U. S. (2008). Agriculture Origination: Industrial charcoal production. FAO forestry paper.

Jung, S.-H., Kang, B.-S., & Kim, J.-S. (2008). Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 240-247. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.04.001

Rodrigues, T., & Braghini Junior, A. (2019). Charcoal: A discussion on carbonization kilns. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 143, 104670. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670

Manatura, K. (2021). Novel performance study of recirculated pyro-gas carbonizer for charcoal production. *Energy for Sustainable Development*, 64, 8-14.

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, 1-7.

Xiong, S., Zhang, S., Wu, Q., Guo, X., Dong, A., & Chen, C. (2014). Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. Bioresource Technology, 152, 86-92.