วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 (2564) 25-31
Available online at www.tci-thaijo.org /index.php/TSAEJ

บทความวิจัย
ISSN 1685-408X (Print)

การออกแบบและสร้างเตาผลิตถ่านจากชีวมวลและขยะมูลฝอยระดับชุมชน

Design and Fabrication of Biomass and Municipal Solid Waste Carbonizer

ธนพร เทพสมุทร[1,2], อิศราฐ์ เชาว์ภิสิทธิ์[1]*, อธิษฐาน ทิมแย้มประเสริฐ[1], สมชาย ศรีทนุ[1], กรีฑา สมเกียรติกุล[2,3], ชูตระกูล ศิริไพบูลย์[2,4], ชินธันย์ อารีประเสริฐ[2]

Tanaporn Thapsamut[1,2], Isara Chaopisit[1]*, Athitan Timyamprasert[1], Somchai Sritanu[1], Kreetha Somkeattikul[2,3], Chootrakul Siripaiboon[2,4], Chinnathan Areeprasert[2]

[1]ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปทุมธานี 12120

[1]Expert Centre of Innovative Industrial Robotics and Automation,
Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Pathum Thani 12120

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์, นนทบุรี 11120

[3]Major of Automotive Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi 11120

[4]แขนงวิชาเทคโนโลยีการผลิตอุตสาหกรรม, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี 11120

[4]Department of Industrial Technology, School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120

*Corresponding author: Tel: +6695 653 6459, E-mail: isara1973@gmail.com

บทคัดย่อ

การเผาขยะมูลฝอยและของเหลือทิ้งทางการเกษตรในที่โล่งก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โครงการวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างเตาผลิตถ่านระดับชุมชน เพื่อผลิตถ่านและเพื่อแก้ปัญหามลพิษดังกล่าว และทำการทดสอบโดยใช้ขยะมูลฝอยและกะลามะพร้าวเหลือทิ้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น และตรวจวัดคุณภาพแก๊สไอเสียจากกระบวนการฯ ผลการออกแบบคือ เตาผลิตถ่านประกอบด้วยเตาเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนแก่กระบวนการผลิตถ่าน และเตาผลิตถ่านเพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบเป็นถ่าน แก๊สไอเสียจะผ่านเข้าระบบบำบัดอากาศแบบเปียก อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตถ่านอยู่ที่ 400 °C อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 2.4 °C min-1 ร้อยละผลผลิตฐานเปียกที่ได้จากขยะชุมชนและกะลามะพร้าวอยู่ที่ 30% และ 39.2% ตามลำดับ สัดส่วนของคาร์บอนในถ่านจากขยะชุมชนและกะลามะพร้าวอยู่ที่ 37.02% และ 83.58% ตามลำดับ ของแข็งแขวนลอยในแก๊สไอเสียอยู่ที่ 233 mg m-3 ในแก๊สไอเสียที่ปรับให้มีออกซิเจนอยู่ 7% และผ่านเกณฑ์มาตรฐานฯ โดยสรุป เตาผลิตถ่านระดับชุมชนสามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบในการลดการเผาขยะมูลฝอยและของเหลือทิ้งทางการเกษตรในที่โล่งได้

คำสำคัญ: เครื่องปักต้นกล้า, ยาสูบ, ประสิทธิภาพการปักต้นกล้า

Abstract

Open burning of municipal solid waste (MSW) and agricultural waste causes environmental problems. This work designed and fabricates community-scale carbonizer. It covered feedstock testing by using MSW and coconut shell waste (CS). Elemental analysis of the products was performed and exhaust gas was analyzed. From the design, the carbonizer consisted of a combustion and carbonization chamber. The former generated heat by biomass combustion and delivered to the latter for carbonization. Flue gas is cleaned by water scrubbers. The carbonization temperature was 400 °C and the heating rate was 2.4 °C min^{-1}. Wet basis yields of char from MSW and CS were 39.2% and 30%, respectively. Carbon contents in the char products of MSW and CS were 37.02% and 83.58%,

Received: April 15, 2019
Revised: December 26, 2020
Accepted: December 26, 2020
Available online: January 20, 2021

respectively. Total suspended solid in flue gas was 233 mg m^{-3} which passed the regulation. In summary, this work provides the idea of open-burning emission reduction by using a community-scale carbonizer.

Keywords: Carbonizer; Municipal solid waste; Biomass; Biochar

1 บทนำ

ขยะมูลฝอยในประเทศไทยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ในแต่ละปีมีการจัดการขยะมูลฝอยแบบไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ เนื่องจากในบางพื้นที่โดยเฉพาะพื้นที่ห่างไกลอาจไม่มีการเก็บขยะมูลฝอยที่ครอบคลุมในทุกพื้นที่อย่างครบถ้วน จึงมีขยะชุมชนเป็นจำนวนมากที่ถูกเผาทิ้งในพื้นที่เปิดโล่งขาดการควบคุมจนก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ ดังนั้นการจัดการขยะมูลฝอยและชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพจะช่วยแก้ปัญหาด้านมลพิษนอกจากนี้ยังช่วยประหยัดทรัพยากรธรรมชาติได้ เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาหลักการทำงานของเตาเผาขยะ เพื่อนำมาดัดแปลงใช้ภายในชุมชนหรือหมู่บ้าน (Suebnukarn A. 2001) จะช่วยลดปริมาณการจัดการขยะมูลฝอยและชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรแบบไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการได้มากยิ่งขึ้น ในขณะเดียวกันการจัดการชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการทำเกษตรกรรมมักถูกจัดการโดยวิธีการเผาเป็นจำนวนมากยกตัวอย่าง เช่น ซังข้าว ชานอ้อย และกะลามะพร้าวเป็นต้น ซึ่งขยะของเสียที่เกิดจากเกษตรกรรมส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สารเมื่อถูกนำมาแปรสภาพทางความร้อนจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีองค์องค์ประกอบของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งปริมาณคาร์บอนนี้เองจะเป็นดัชนีชี้วัดค่าพลังงานความร้อนของถ่านที่ได้ กล่าวคือถ้าถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะส่งผลให้ถ่านมีค่าพลังงานความร้อนสูงตามไปด้วย ในกรณีเดียวกันกับขยะมูลฝอยซึ่งประกอบไปได้ด้วยสารองค์ประกอบหลากหลายชนิดเมื่อถูกแปรสภาพทางความร้อนแล้วจะส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับขยะชีวมวล โดยถ่านที่ได้จากการเผาก็จะถูกแบ่งแยกนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม เช่น ถ่านจากชีวมวลมีค่าความร้อนสูงจะถูกนำไปเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงหลักหรือถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับ ถ่านจากขยะชุมชนซึ่งให้ค่าความร้อนที่น้อยกว่าอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมให้กับอุตสาหกรรมต่างๆ แต่วิธีการกำจัดขยะแบบการเผาไหม้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศต่าง ๆ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สารประกอบอินทรีย์ระเหยได้ (Volatile organic compound) และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งสามารถลอยตัวในอากาศและกระจายตัวไปได้ไกล เกิดผลเสียโดยตรงต่อสุขภาพ นอกจากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้ความสามารถในการขนถ่ายออกซิเจนลดลง สารประกอบอินทรีย์จำพวกโฮโดรคาร์บอนทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ

กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เช่น กระบวนการคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) และกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น (Torrefaction) เป็นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง โดยพื้นฐานหลักของกระบวนการแปรรูป ดังกล่าวคือ กระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิดคือ น้ำมัน ถ่าน และแก๊ส สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับการควบคุมเงื่อนไขของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาการให้ความร้อน และตัวกลางการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ กระบวนการคาร์บอไนเซชันใช้สำหรับผลิตถ่านจากชีวมวล ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ กระบวนการคาร์บอไนเซชันใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 °C และใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาประมาณ 6 ถึง 24 h กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า หรือคาร์บอไนเซชันสามารถนำมาผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเหลือทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Velghe Inge et al., 2011)

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและสร้างต้นแบบเตาผลิตถ่านระดับชุมชนเพื่อนำมาใช้ในการแปรรูปชีวมวลเหลือทิ้งและขยะมูลฝอย เพื่อลดการเผาซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่าง ๆ เช่น ฝุ่นละออง ลดระยะเวลาในการเผาเนื่องจากเตามีรูปแบบการให้ความร้อนโดยตรง การทดสอบเตา ผลิตถ่านใช้วัตถุดิบในการทดสอบคือขยะมูลฝอยและกะลามะพร้าวเหลือทิ้ง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้ และวิเคราะห์แก๊สไอเสียจากปล่องเตาผลิตถ่าน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การออกแบบและขั้นตอนการทดสอบ

แนวคิดในการออกแบบเตาผลิตถ่านคือ การใช้เชื้อเพลิงแข็งจากกะลามะพร้าว เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงราคาถูก ค่าความร้อนสูง และสามารถหาได้ง่าย ตามพื้นที่ชนบท การผลิตถ่านจะใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลัก การคำนวณขนาดของเตาและเชื้อเพลิงที่ใช้คิดจากการทดสอบวิจัยการผลิตถ่านจากขยะมูลฝอยก่อนหน้า (Areeprasert et al., 2018) ซึ่งเกิดจากการเก็บข้อมูลการทดสอบการผลิตถ่านในระดับต้นแบบพบว่าใช้พลังงานประมาณ 2.83 MJ kg^{-1} ขยะมูลฝอย แนวคิดในการออกแบบแสดงใน Figure 1

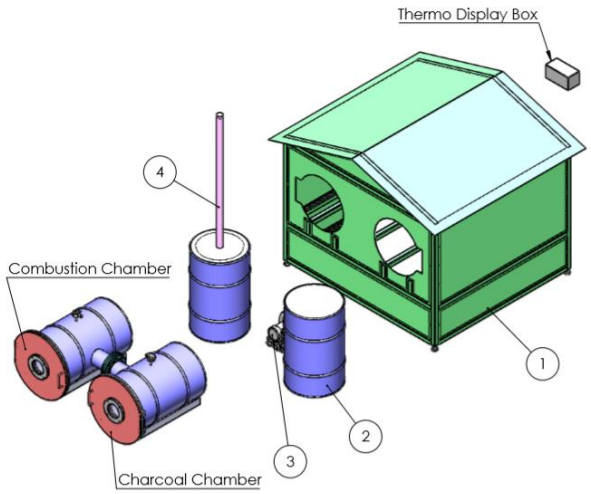

Figure 1 Design of carbonization reactor.

เตาผลิตถ่านทำงานโดยใส่เชื้อเพลิงและวัตถุดิบในช่วงเริ่มต้นของกระบวนในอัตราส่วน 2:1 หลังจากนั้นเริ่มจุดเตาเผาและป้อนอากาศด้วยมอเตอร์ปั๊มลม(14N433-02, Mitsubishi) ขนาด 3 HP ความเร็วรอบ 1,460 rpm จ่ายลมเข้าสู่ท่อส่งสมขนาด 50 mm เพื่ออัดอากาศเข้าสู่ถังเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ อุณหภูมิการเผาไหม้จะอยู่ที่ประมาณ 700-900 °C และเตาผลิตถ่านได้รับความร้อนจากเตาเผาไหม้เข้าสู่เตาผลิตถ่าน โดยอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ประมาณ 400 °C ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ตรวจวัดแก๊สไปเสียที่เกิดขึ้นการกระบวนการผลิตถ่าน หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 3 h ก่อนลดอุณหภูมิและเก็บตัวอย่าง โดยมีการทำซ้ำ 2 ในวัตถุดิบกะลามะพร้าวและทำซ้ำ 3 ครั้งในวัตถุดิบขยะชุมชน

2.1.1 การออกแบบระบบเตาผลิตถ่าน

การออกแบบเตาผลิตถ่านขนาด 200 × 170 cm ปลายปล่องควันสูง 32.2 cm ซึ่งเตาผลิตถ่านประกอบด้วยเตาสองส่วนคือ *เตาเผาไหม้* ทำจากเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) ความหนา 3 cm นำม้วนให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58.5 cm สูง 88.5 cm เพื่อให้ความร้อนแก่กระบวนการผลิตถ่าน เตาเผาไหม้ออกแบบให้ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เตาเผาไหม้ยังมีการป้อนอากาศอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ โดยใช้พัดลมเป่าตรงไปยังห้องเผาไหม้ การป้อนอากาศในเตาเผาไหม้ออกแบบให้มีการป้อนอย่างสม่ำเสมอ และ *เตาผลิตถ่าน* ทำจากเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) ความหนา 3 cm นำม้วนให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58.5 cm สูง 88.5 cm โดยมีท่อขนาดใหญ่ต่อจากเตาเผาไหม้เพื่อนำความร้อนจากเตาเผาไหม้เข้าสู่เตาผลิตถ่าน หลังจากวัตถุดิบในเตาผลิตถ่านได้รับความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้ว จะเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน

เตาเผาทั้งสองชุดออกแบบให้หุ้มด้วยแผ่นฉนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm สมารถทนความร้อนได้สูงสุด 1,300 °C เพื่อลดการสูญเสียความร้อนในขณะเผาไหม้ รวมทั้งการซีลประตูเตาเผาและเตาผลิตถ่านจะใช้ประเก็นผ้าเซรามิกไฟเบอร์หนา 5 mm ที่ทนความร้อนสูงถึง 1,300 °C ป้องกันการรั่วของแก๊สจากการเผาไหม้และการผลิตถ่าน อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงและเตาผลิตถ่านวัดด้วย Thermocouple Type K และมีการแสดงอุณหภูมิ แต่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ การควบคุมอุณหภูมิจะได้โดยการปรับลมที่เติมเข้าสู่ห้องเผาไหม้

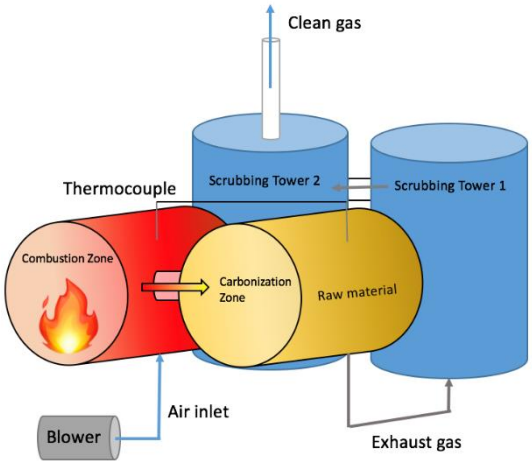

Figure 2 Working principle of carbonization reactor.

2.1.2 การออกแบบระบบบำบัดไอเสีย

แก๊สร้อนหลังจากกระบวนการผลิตถ่านจะผ่านเข้าระบบทำความสะอาดแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยถังบำบัดไอเสีย 2 ชุด โดยทั้ง 2 ถังมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58.5 cm สูง 88.5 cm โดยหน้าที่ในถังแรกทำการลดอุณหภูมิและความเร็วของแก๊ส โดยการบังคับให้แก๊สวิ่งผ่านเบดที่ใส่ขี้เลื่อยและหินหยาบ เนื่องจากขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมากยกตัวอย่าง เช่น เซลลูโลสชนิดเอลฟ่า เฮมิเซลลูโลส และลิกนินโดยมีสัดส่วนอยู่ที่ 41.58%, 33.56% และ 32.81% ตามลำดับ (Zuriana,S.et al.,2016) โดยสารอินทรีย์เหล่านี้มีหมู่โพลีฟีนอลเป็นส่วนประกอบซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักและน้ำมันดินได้บางส่วน ภายในถังมีการพ่นละอองน้ำเพื่อลดอุณหภูมิและจับฝุ่นละออง ในถังที่สอง ประกอบด้วยเบดในลักษณะเดียวกันกับถังที่ใช้หินหยาบสำหรับขีดขวางทางเดินของอากาศภายในถังเพื่อชะลอความเร็วและเพิ่มการไหลวนของแก๊สที่เคลื่อนที่ภายในถังบำบัดและถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับมลพิษอีกครั้งหนึ่ง ก่อนปล่อยออกผ่านปล่องด้านบนของเตา การทำงานของระบบบำบัดไอเสียแสดงใน Figure 3

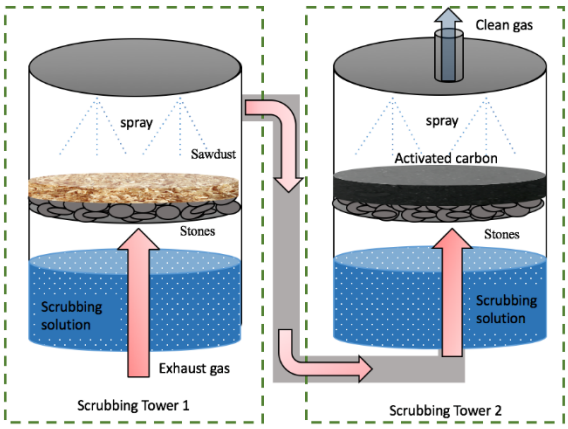

Figure 3 Working principle of gas cleaning system.

2.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ ขยะมูลฝอยชุมชน และกะลามะพร้าวเหลือทิ้ง ปริมาณความชื้น 27.3% และ12.4% ตามลำดับ องค์ประกอบขยะมูลฝอยชุมชนที่ใช้ในการทดสอบการผลิตถ่านแสดงใน Table 1 โดยองค์ประกอบจัดเตรียมตามสัดส่วนของโครงการสำรวจและวิเคราะห์องค์ประกอบขยะมูลฝอยชุมชนเทศบาลทั่วประเทศของกรมควบคุมมลพิษในปีพ.ศ. 2547

Table 1 Municipal solid waste composition.

Composition	As received basis (wt.%)
Organic	52.9
Plastic	20
Paper	10.9
Textile	3.8
Wood	1.8
Rubber	0.1

ที่มา: โครงการสำรวจและวิเคราะห์องค์ประกอบขยะมูลฝอยชุมชนเทศบาลทั่วประเทศ กรมควบคุมมลพิษ พ.ศ. 2547

2.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักหลังจากนำออกมาจากเตา และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบแห้งด้วยตู้อบความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 24 h ตามมาตรฐาน (AOAC,1990) หลังจากนั้นนำไปบดและคัดขนาด และนำไปวิเคราะห์ทางเคมีเบื้องต้นด้วยวิธี Ultimate analysis ด้วยมาตรฐาน ASTM D5373 ตามลำดับ แก๊สที่เกิดจากกระบวนการผลิตถ่านทำการตรวจวัดด้วยวิธีการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากปล่องระบายด้วยมาตรฐาน US. EPA Method 2, 3, 4 และ 5 สำหรับ ความเร็วลม ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และ ปริมาณฝุ่นละออง ตามลำดับ

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านด้วยเตาผลิตถ่านจากชีวมวลและขยะมูลฝอยระดับชุมชนแบบ t-Test: paired Two sample for Means โดยเป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบที่นำมากำจัดด้วยเตาเผาขยะยกตัวอย่างเช่น ปัจจัยความชื้นและสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นเป็นต้น ที่มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานความร้อนสูงสุด (high heating value, HHV) ของผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้ โดยผลจากการวิเคราะห์สถิตินี้จะนำมาอธิบายความสอดคล้องกันของปริมาณถ่านและค่าความร้อนสูงสุดที่ได้จากการเผาในแต่ละวัตถุดิบตั้งต้น เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาให้เตาเผาถ่านจากชีวมวลและขยะมูลฝอยระดับชุมชนมีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

3 ผลการทดสอบ

3.1 ผลการออกแบบและการทำงาน

ผลการออกแบบเตาผลิตถ่านระดับชุมชนแสดงใน Figure 4 อุปกรณ์หลักของเตาตามที่ออกแบบมีดังนี้ (1) เตาเผาเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน (2) เตาผลิตถ่าน (3) ระบบตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเชื้อเพลิง เตาผลิตถ่าน และระบบทำความสะอาดไอเสีย (4) พัดลมและมอเตอร์ไฟฟ้า (5) โครงสร้าง (6) การหุ้มฉนวนเตา

เตาทำงานแบบกะโดยใส่เชื้อเพลิงและวัตถุดิบในอัตราส่วน 1:2 โดยการทดลองใส่เชื้อเพลิง 10 kg และ ปริมาณ 20 kg สำหรับวัตถุดิบในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหลังจากนั้นเริ่มจุดเตาเผาและป้อนอากาศเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในส่วน Combustion zone โดยอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ 700-900 °C และเตาผลิตถ่านได้รับความร้อนจากเตาเผาไหม้ผ่านทางไอเสียจากถังเผาไหม้โดยมีอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ประมาณ 400 °C หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 3 h ก่อนลดอุณหภูมิโดยวิธีการจำกัดอากาศถังเผาไหม้และเก็บตัวอย่าง

3.2 ผลของการออกแบบ

ผลการผลิตถ่านจากกะลามะพร้าวและขยะชุมชนแสดงใน Figure 5 พบว่า ถ่านจากกะลามะพร้าวมีลักษณะเป็นสีดำทั้งหมดมีความแข็ง และเปราะ ดังแสดงใน Figure 5a และถ่านจากขยะชุมชนแสดงใน Figure 5b มีลักษณะเป็นสีดำแต่มีสิ่งเจือปนสูงเนื่องจากถ่านจากขยะชุมชนมีความหลากหลายขององค์ประกอบมากกว่าซึ่งแต่ละสารประกอบจะมีอุณหภูมิในการสลายตัวต่างกันทำให้ถ่านที่ได้มีการปนเปื้อนและมีสีดำไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับถ่านที่ได้จากกะลามะพร้าว

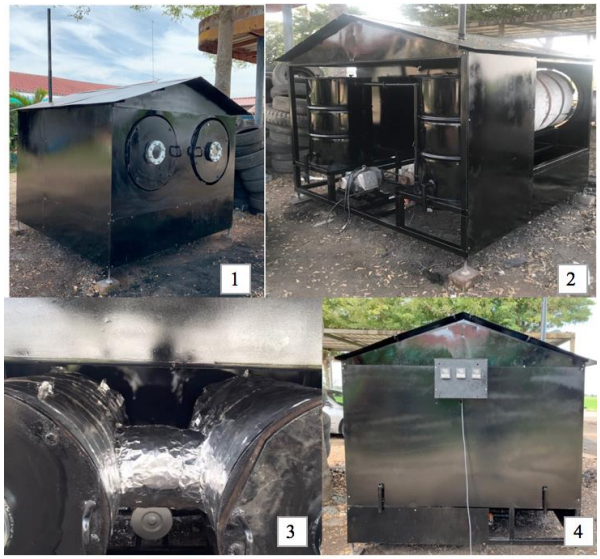

Figure 4 Carbonization reactor: 1. Carbonization chamber (Right) & Combustion chamber (Left) 2. Gas cleaning system 3. Insulation 4. Temperature monitor.

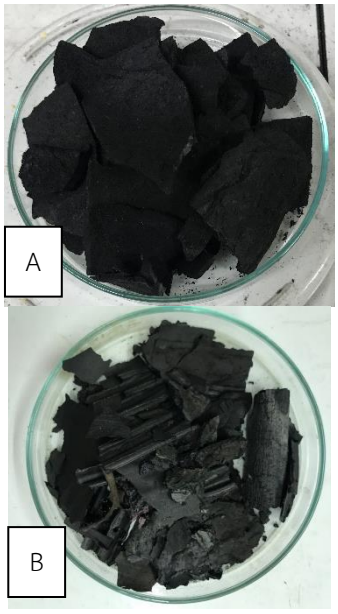

Figure 5 A. ถ่านกะลามะพร้าว B. ถ่านจากขยะชุมชน

อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ระหว่างการผลิตถ่านแสดงใน Figure 6 พบว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Combustion temperature) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านไปได้ 50 min การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิของการผลิตถ่าน (Carbonization temperature) เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ อุณหภูมิการผลิตถ่านเพิ่มขึ้นสูงกว่า 300 °C โดยใช้เวลาประมาณ 120 min หลังจากนั้นจึงขึ้นไปถึงอุณหภูมิเป้าหมายคือประมาณ 400 °C โดยใช้เวลาประมาณ 140 min โดยคิดเป็นอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 2.86 °C min^{-1} ในภาพรวมอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการคาร์บอไนเซชันอยู่ที่ประมาณ 2.4 °C min^{-1} ถือว่าอยู่ในระดับต่ำและเหมาะสม (Williams and Serpil, 1996) การควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้และอุณหภูมิการผลิตถ่าน ควบคุมโดยการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้ดี อุณหภูมิสำหรับผลิตถ่านพบว่าอยู่ในระดับค่อนข้างคงที่

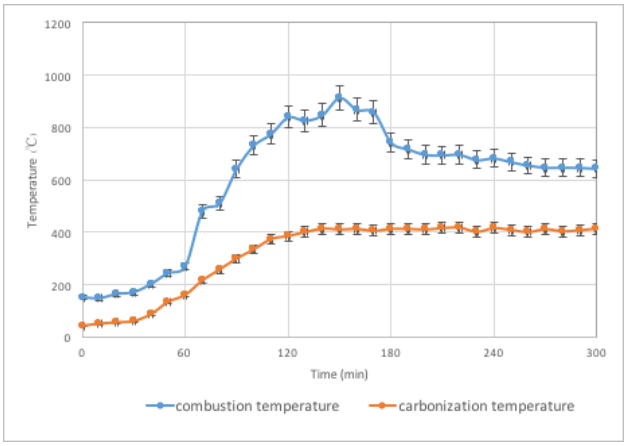

Figure 6 Temperature during the experiment.

ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันของขยะชุมชนและกะลามะพร้าวแสดงใน Table 2 พบว่าร้อยละผลผลิตฐานเปียกที่ได้จากกะลามะพร้าวและขยะชุมชนตามสมการที่ 1 อยู่ที 30% แล 39.2% ตามลำดับ ถือว่าอยู่ในระดับดี เนื่องจากขยะชุมชนและกะลามะพร้าวมีความชื้นตั้งต้นอยู่ที่ 27.30% และ 12.35% ตามลำดับ และมีการสลายตัวทางความร้อน โดยสารระเหยภายในวัตถุดิบตั้งต้นจะถูกขับออกเป็นจำนวนมากภายใต้กระบวนการคาร์บอไนเซชัน ทำให้เหลือสัดส่วนของถ่านเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่

วิธีการคำนวณหา %Yield

$$\frac{\text{ปริมาณหลังการเผา (g)}}{\text{ปริมาณก่อนเผา (g)}} \times 100 \qquad (1)$$

Table 2 Product yield.

Sample	Material input	Product yield	
	(kg)	(kg)	(%)
Coconut shell	24	9.5	39.6
Municipal solid waste	10	3.0	30.0

3.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้แสดงใน Table 3 พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนในถ่านจากกะลามะพร้าวมีสูงถึง 83.58% ซึ่งสูงกว่าถ่านจากขยะมูลฝอยอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะวัตถุดิบตั้งต้นมีความแตกต่างกัน กะลามะพร้าวเป็นชีวมวลที่มีส่วนประกอบหลักคือ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสอยู่ที่ 33.30%, 30.58% และ 26.70% ตามลำดับ (Noemi, A., et al.,2016) ซึ่งเซลลูโลส และลิกนินมีสภาพคงตัว และมีความแข็งแรง เมื่อผ่านการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ

ประมาณ 300 ถึง 400 °C อาจมีการสลายตัวบ้าง แต่โครงสร้างหลักยังอยู่ โดยเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำเป็นองค์ประกอบหลักที่สลายตัวทางความร้อนระหว่างกระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Park et al., 2016) แตกต่างจากขยะมูลฝอยที่เป็นของผสม มีส่วนประกอบของชีวมวล และมีส่วนที่เป็นพลาสติก องค์ประกอบและการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขยะอินทรีย์ที่เป็นชีวมวลมีการสลายตัวทางความร้อนคล้ายกันชีวมวลทั่วไป แต่พลาสติกมีการสลายตัวทางความร้อนแตกต่างกันคือ พลาสติกมีองค์ประกอบหลักคือ สารระเหย เมื่อสลายตัวทางความร้อนจะทำให้สารระเหยสลายตัวเป็นแก๊สเกือบทั้งหมด จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับขยะอินทรีย์ ไม้ และกระดาษ ดังนั้นองค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุจึงมีผลโดยตรงกับองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่นค่าความร้อนสูงสุด (high heating value, HHV) ของถ่านขยะชุมชน และถ่านจากกะลามะพร้าวมีค่า 19.47 และ 28.09 MJ kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์ แคลอริมิเตอร์ โดยเป็นค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้รวมกับค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอน้ำของความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ถ่าน ผลการวิเคราะห์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่าค่าความร้อนสอดคล้องกับปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

Table 3 Ultimate analysis of product.

Char product	Chemical composition (wt. %)			HHV (MJ kg^{-1})
	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	
Coconut shell	83.58	3.06	4.01	28.09 ±0.06
Municipal solid waste	59.23±1.24	5.11±0.0	7.60±1.96	19.47 ±0.06

3.4 ผลการวิเคราะห์ประเภทวัตถุดิบที่ส่งผลต่อค่าความร้อนสูงสุด

ผลการวิเคราะห์ t-Test: paired Two sample for Means แสดงใน Table 4 แสดงว่าปัจจัยลักษณะทางกายภาพของแต่ละวัตถุดิบตั้งต้นมีผลต่อค่าพลังงานความร้อนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ว่า ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนสูงสุดในแต่ละประเภทวัตถุดิบไม่มีความแตกต่างกัน

Table 4 Result of t-Test: paired Two sample for Means.

Sample	$\overline{X}$	SD	t	df	sig
Coconut shell	6709.15	10.35	5150	1	0.00
Municipal solid waste	4649.15	9.95	NA	NA	NA

3.5 การวิเคราะห์แก๊สไอเสียจากปล่อง

แก๊สไอเสียจากปล่องตรวจวัดเมื่อทำการทดลองผลิตถ่านจากขยะมูลฝอยพบว่า อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก เพราะมีการใช้การพ่นน้ำในการลดความร้อนของแก๊สไอเสีย ปัจจัยที่มีความสำคัญคือ ฝุ่นละอองทั้งหมดหรือของแข็งแขวนลอยในแก๊สไอเสียทั้งหมด (Total suspended solid) อยู่ที่ 177 mg m^{-3} ในแก๊สไอเสีย หรือ 233 mg m^{-3} ในแก๊สไอเสียที่ปรับให้มีออกซิเจนอยู่ 7% ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย พ.ศ. 2553 ทั้งนี้เนื่องจากเตาผลิตถ่านที่ใช้ขยะมูลฝอยเป็นวัตถุดิบไม่ได้มีการเผาขยะมูลฝอยโดยตรง แต่เป็นการใช้กระบวนการคาร์บอไนเซชันในการแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นถ่าน

Table 5 Exhaust gas during carbonization of MSW.

Item	Unit	Results
Atmospheric pressure	mmHg	759
Temperature at chimney	°C	34.60
Gas velocity	ms^{-1}	5.800
Flow rate	Nm^3h^{-1}	164.07
Oxygen	%	10.30
Carbon dioxide	%	5.73
Moisture	%	3.65
Total suspended particulate	mg m^{-3}	177, 233*

* Adjusted to 7% oxygen in flue gas.

4 สรุป

จากการออกแบบ สร้าง และทดสอบเตาผลิตถ่านจากชีวมวลและขยะมูลฝอยระดับชุมชนสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการทดสอบเตาผลิตถ่าน สามารถทำอุณหภูมิได้ตามเป้าหมายคือประมาณ 400 °C โดยใช้เวลาประมาณ 140 min อัตราการให้ความร้อนของกระบวนการคาร์บอไนเซชันอยู่ที่ประมาณ 2.4 °C min^{-1}

ร้อยละผลผลิตฐานเปียกที่ได้จากกะลามะพร้าวและขยะชุมชนอยู่ที่ 39.2% และ 30% ตามลำดับ สัดส่วนของคาร์บอนในถ่านจากกะลามะพร้าวมีสูงถึง 83.58% ซึ่งสูงกว่าถ่านจากขยะมูลฝอย

ฝุ่นละอองทั้งหมดหรือ ของแข็งแขวนลอยในแก๊สไอเสียทั้งหมด (Total suspended solid) อยู่ที่ 177 mg m^{-3} ในแก๊สไอเสีย หรือ 233 mg m^{-3} ในแก๊สไอเสียที่ปรับให้มีออกซิเจนอยู่ 7% และผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งตัวต้นแบบเตาผลิตถ่านระดับชุมชนแบบถัง 200 L (ตามโครงการจัดทำแผนพลังงานชุมชนสนองพระราชดำริ เศรษฐกิจพอเพียงปี 2553) ไม่มีอุปกรณ์ในส่วนบำบัดไอเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเตาเผาขยะ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ให้สูงขึ้นจากตัวต้นแบบโดยการเพิ่มปั๊มลมเพื่ออัดอากาศเข้าเตาเผาสำหรับ

ช่วยให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และสามารถเผาวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงได้ พร้อมทั้งเพิ่มอุปกรณ์ถังบำบัดไอเสียแบบเปียกจำนวน 2 ถังเพื่อช่วยในส่วนดักจับทำความสะอาดควันและไอสารระเหยที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน โดยเตาผลิตถ่านระดับชุมชนเป็นต้นแบบในการลดการเผาขยะมูลฝอยและของเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการนำมาผลิตถ่านเพื่อนำไปใช้ในกิจกรรมอื่น ๆ ต่อไป

โดยสรุปผลการศึกษาวิจัยเตาผลิตถ่านเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อยอดการนำเตาผลิตถ่านชุมชนไปใช้ในการแปรรูปขยะมูลฝอยและชีวมวลเหลือทิ้ง

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สำหรับทุนวิจัย และผู้อำนวยการและคณะทำงานแผนงานวิจัยตอบสนองนโยบาย/เป้าหมายรัฐบาล แผนงานวิจัยท้าทายไทย : ทะเลไทยไร้ขยะ ปีงบประมาณ 2561 และ ธนพร เทพสมุทร ได้รับทุนจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ผ่านโครงการภาคีบัณฑิต

6 เอกสารอ้างอิง

Areeprasert, C., Leelachaikul, P., Jangkobpattana, G., Phumprasop, K., Kiattiwat, T. 2018. Biochar Preparation from Simulated Municipal Solid Waste Employing Low Temperature Carbonization Process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 311 Vol. 1. IOP Publishing, 1-5.

Noemi, A., Lee, J., Roland, C. 2016. Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. Journal of Cleaner Production 125, 68-77.

Park, S.W., Jang, C.H., Baek, K.R., Yang, J.K. 2012. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: Evaluation of fuel characteristics of the products. Energy 45, 676-685.

Suebnukarn A. 2001. Upgrading the Capacity a small Scale Solid Waste Incinerator. Complete research report. Suranaree University of Technology. (In Thai)

Velghe, I., Carleer, R., Yperman, J., Schreurs, S. 2011. Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 92(2), 366-375.

Williams, P.T., Besler, B. 1996. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. Renewable energy 7(3), 233-250.

Zuriana, S.A., Sakinah, A., Farhan M. 2016. Characterization of Marandi wood Sawdust and Removal of Lignin Content using Pretreatment process. Materials science, 598-606