การพัฒนาเตาเผาถ่านมลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร เพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่ : การเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมสำหรับใช้ในชุมชน

Development of a low-emission 200-liter charcoal kiln for producing biochar and wood vinegar from bamboo: A comparison with traditional charcoal kilns for community use

ศรีกุลณัฐ นิลโนรี และศศิธร สรรพ่อค้า [2*]

Srikunath Nilnoree [1] and Sasithorn Sunphorka [2*]

Received: 3 April 2025 ; **Revised**: 3 July 2025 ; **Accepted**: 22 July 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพและผลิตน้ำส้มควันไม้ขนาด 200 ลิตร เพื่อใช้สำหรับการผลิตระดับครัวเรือน มีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้ให้สามารถนำแก๊สที่ปลดปล่อยจากกระบวนการไพโรไลซิสกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม รวมถึงเปรียบเทียบผลการทดสอบเตาเผาที่พัฒนาขึ้นกับเตาเผาแบบดั้งเดิมที่มีการใช้ในชุมชนเป้าหมาย รวมถึงสมบัติของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากไม้ไผ่ด้วยเตาเผาถ่านทั้งสองประเภท จากการใช้งานพบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 29.06 เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าค่าความของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิม คือ 26.78 เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นปรากฏพีคของหมู่ -OH และหมู่ C-H ของอะโรมาติก แต่ไม่ปรากฏที่ถ่านชีวภาพจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีพื้นที่ผิวสูงกว่าแต่รูพรุนบางส่วนมีลักษณะอุดตันหรือแคบ สำหรับน้ำส้มควันไม้นั้น พบว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองแบบมีลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 659/2553 เมื่อนำน้ำส้มควันไม้มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค GC/MS พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้มีความใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม น้ำส้มควันไม้จากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น มีสีเข้มและมีน้ำมันทาร์มากกว่า เนื่องมาจากขนาดพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์เก็บน้ำส้มควันไม้ของเตาเผาถ่านทั้งสองประเภทแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานพบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการผลิตถ่านชีวภาพต่อรอบการผลิตน้อยกว่าเตาเผาแบบดั้งเดิมและช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิง ชุมชนสามารถนำถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตขึ้นไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อลดการใช้สารเคมี ตลอดจนส่งเสริมการทำการเกษตรที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ, น้ำส้มควันไม้, เตาเผา, เตาอิฐ, แก๊สเรือนกระจก

Abstract

This research aimed to develop a 200-liter charcoal kiln designed for household-level production of biochar and wood vinegar. The thermal efficiency was enhanced by modifying the condensation system to enable the reuse of pyrolysis gases as a co-fuel. The study comparatively analyzed the performance of the newly developed kiln and a traditional kiln commonly used in target communities. Furthermore, the properties of bamboo-derived biochar and wood vinegar produced by both kilns were evaluated.

---

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

[1] School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

[2] Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology, Uthen Thawai Area.

* Corresponding author: Sasithorn Sunphorka, Email: sasithorn_su@rmutto.ac.th

The results showed that the improved 200-liter kiln produced biochar with a higher calorific value (29.06 MJ/kg) compared to the traditional kiln (26.78 MJ/kg). Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed that biochar from the developed kiln exhibited -OH and aromatic C-H functional group peaks, which were absent in the traditional kiln's biochar. Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area, pore volume analyses, and scanning electron microscopy (SEM) images indicated that while the traditional kiln produced biochar with a higher surface area, some of its pores appeared clogged or narrow.

Regarding the wood vinegar, products from both kilns conformed to the Thai Community Product Standard (TCPS 659/2553). Gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) analysis demonstrated similar main constituents in both samples; however, the wood vinegar from the developed kiln was darker and contained a higher amount of tar oil. This difference was attributed to variations in the cross-sectional area and heat exchange surface of the condensation units. In terms of performance, the improved kiln required less time per production cycle and consumed less fuel. Ultimately, communities can utilize the resulting biochar and wood vinegar in agriculture to reduce chemical dependency and promote farming practices aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Biochar, wood vinegar, charcoal kiln, brick kiln, greenhouse gases

บทนำ

การใช้ถ่านไม้อยู่คู่กับวิถีชีวิตของมนุษย์มายาวนาน ในแง่ของการพึ่งพาถ่านเป็นแหล่งพลังงานหลักในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทหรือในบางประเทศที่การเข้าถึงไฟฟ้ายังมีจำกัด การใช้ถ่านเป็นส่วนสำคัญในการดำรงชีวิต ทั้งในการปรุงอาหารและการให้ความร้อน ซึ่งการย่างหรือการทำอาหารในเตาถ่านนั้น เป็นที่ยอมรับกันว่าอาหารที่ปรุงได้มักมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์และแตกต่างจากการใช้เตาแก๊สหรือเตาไฟฟ้า ถ่านเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจนเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการที่เรียกว่าคาร์บอไนเซชัน (carbonization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่วัสดุอินทรีย์ เช่น พืชหรือซากสิ่งมีชีวิต เป็นต้น ถูกเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นคาร์บอนหรือสารที่มีส่วนประกอบเป็นคาร์บอน วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสูงนี้จะมีความคงทนและสามารถใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อนได้ดี ซึ่งคาร์บอไนเซชันนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในพื้นที่จำกัดอากาศ หรือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ดังนั้นการผลิตถ่านจึงต้องทำในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่สามารถควบคุมปริมาณอากาศหรือออกซิเจน หรือเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะปิดเกือบสมบูรณ์ในขณะที่ทำการผลิตถ่าน เพื่อให้ไม้หรือวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านนั้นเกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนและกลายเป็นเถ้า

เตาเผาถ่านที่มีการใช้งานตามพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยหลายประเภท เช่น เตาลาน เตาดินเหนียว และเตาอิฐ เป็นต้น (Sangsuk *et al*., 2023; Ruangsan, *et al*., 2022) โดยในพื้นที่เป้าหมายในการทำการวิจัยนี้ คือ กลุ่มเกษตรคุณธรรม ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง มีการใช้เตาเผาถ่านที่ผลิตจากถังเหล็ก 200 ลิตร แบบแนวนอน มีการก่ออิฐโดยรอบและใช้ดินทรายถมทับเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน แสดงดังรูปที่ 1 โครงสร้างของเตาเผาถ่านประกอบด้วย ด้านหน้าเตาเป็นส่วนที่ใช้ใส่เชื้อเพลิง ด้านในเตาใส่ไม้หรือวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่าน ด้านหลังเตามีการต่อท่อสำหรับระบายแก๊สและเก็บน้ำส้มควันไม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกเตาเผานี้ว่า "เตาเผาแบบดั้งเดิม" ขั้นตอนในการใช้เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม คือ (1) การเตรียมวัสดุ ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่เป็นไม้ที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์ (2) การเรียงไม้ลงในเตาเผาด้านใน เมื่อเรียงไม้เสร็จแล้ว นำฝามาปิดเตาแล้วนำทรายมากลบไว้ โดยทรายนี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันการสูญเสียความร้อน (3) การจุดไฟ โดยใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง โดยการใส่ไม้ที่เตาด้านหน้าและจุดไฟเพื่อให้ความร้อนกับไม้ที่อยู่ในเตาเผา (4) การเผาถ่าน หลังจากที่จุดไฟที่เตาด้านหน้าแล้ว ไม้ที่อยู่ในเตาด้านในจะได้รับความร้อนแล้วเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีการปล่อยไอน้ำและแก๊สออกมา ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 2 – 4 วัน สำหรับเตาเผาแบบดั้งเดิม จากนั้นปิดท่อสำหรับระบายแก๊สและเก็บน้ำส้มควันไม้ที่อยู่ด้านหลัง โดยใช้ดินลูกรังผสมน้ำ กระบวนการนี้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากหากปิดปล่องไม่สนิทจะทำให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านผ่านกระบวนการเผาไหม้ (combustion) จนกลายเป็นเถ้าได้ ดังแสดงใน Figure 1 (right) (5) การลดอุณหภูมิเตาเผา ซึ่งทำหลังจากปิดปล่องเตาประมาณ 1 คืน เพื่อลดอุณหภูมิของเตาลง (6) การเก็บถ่าน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเผาถ่าน

ขั้นตอนการเผาถ่านดังกล่าวนี้เป็นวิถีชาวบ้านอย่างหนึ่งที่มีการทำสืบต่อกันมา โดยไม่จำกัดเฉพาะในการใช้งานเตาเผาแบบดั้งเดิมนี้เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการใช้งานเตาเผาอื่น เช่น เตาดินเหนียวและเตาอิฐ อีกด้วย ซึ่งมีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยแก๊สจากกระบวนการผลิตถ่าน แก๊สนี้มีองค์ประกอบ คือคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และแก๊สเชื้อเพลิงอื่นๆ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก โดยเฉพาะมีเทนมีค่า Global Warming Potential (GWP) หรือ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ที่แสดงถึงคุณสมบัติสะสมพลังงานความร้อนได้ดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 28 เท่า (28 $kgCO_2$-eq/$kgCH_4$) (Tsiklios *et al*., 2025) นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการผลิตถ่านนานประมาณ 3-7 วัน ต่อหนึ่งรอบการผลิต (Bureau of Environmental Health, Department of Health, Ministry of Public Health, 2012; Hamwong, 2024) รวมถึงต้องใช้ความระมัดระวังในหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพเหมาะสมไม่กลายเป็นเถ้า Figure 1 (right) ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้การใช้งานเตาเผาแบบดั้งเดิมในปัจจุบันได้รับความนิยมน้อยลงแม้ว่าจะยังมีความต้องการในการใช้ถ่านสำหรับในครัวเรือนหรือเพื่อการเกษตรอยู่ก็ตาม

Figure 1 traditional charcoal kiln (left), charcoal inside the traditional kiln (center) and charcoal covered by ash (right)

ปัจจุบันมีการพัฒนาเตาเผาขึ้นหลากหลายรูปแบบให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น ซึ่งเตาเผาที่เป็นที่นิยมและง่ายต่อการดัดแปลงเพื่อใช้งานในประเทศรายได้น้อยถึงปานกลางเป็นเตาเผาที่เรียกว่า “drum retort kiln” (Namaswa *et al*., 2023) มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกมีการหุ้มฉนวนด้วยวัสดุต่างๆ เตาเผาลักษณะนี้ง่ายต่อการดัดแปลง โครงสร้างไม่ซับซ้อน และปรับให้สามารถเคลื่อนย้ายได้ นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาเตาเผาให้สามารถผลิตถ่านคุณภาพสูง และลดมลพิษจากกระบวนการผลิตถ่านบางส่วนได้ ในรูปแบบ “เตาเผาไร้ควัน” หรือ “เตาเผามลพิษต่ำ” โดยมีการดัดแปลงถัง 200 ลิตรที่มักนำมาใช้เป็นเตาเผาถ่านในชุมชนให้มีท่อนำแก๊สเพื่อส่งแก๊สจากกระบวนการผลิตถ่านกลับมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ รวมถึงการดัดแปลงให้สามารถเก็บผลิตภัณฑ์พลอยได้จำพวกน้ำส้มควันไม้ เพื่อใช้ในการทำการเกษตรอีกด้วย ศศิธร สรรพ่อค้า และวุฒิชัย ยังสว่าง (Sunphorka & Yangsawang, 2023) พัฒนาเตาเผามลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร สำหรับผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 70.49 มีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม น้ำส้มควันไม้มีส่วนประกอบของ 2-Methoxy-phenol (หรือ Guaiacol) ที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านเชื้อราและสารต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้นทุนของเตาเผาและเครื่องบดอัดถ่านชีวภาพประมาณเครื่องละ 5,000 บาท ปิยรัตน์ มูลศรี และ อาทิตย์ หู้เต็ม (Moonsri & Hutem, 2018) ศึกษาการผลิตน้ำส้มควันไม้จากไม้มะขาม ไม้สะเดา ไม้กระถิน ไม้ไผ่ และไม้ยูคาลิปตัส โดยการศึกษาจากเตาเผาถ่านในพื้นที่อำเภอเขาค้อ อำเภอหล่มสัก และอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ทำการออกแบบและสร้างชุดเตาเผาถ่านที่สร้างจากถังน้ำมัน 200 ลิตร และท่อดักน้ำส้มควันไม้ที่มีการดัดแปลงระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ จากการทดลองสรุปได้ว่าการใช้ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อจะสามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ในปริมาณมากกว่าและมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าการใช้ท่อแบบทั่วไป น้ำส้มควันไม้ที่ได้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.5 – 3.4 และค่าความร้อนของถ่านประมาณ 13 – 18 เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม สมมาส แก้วล้วน และคณะ (Kaewluan *et al*., 2021) ศึกษาหาปริมาณและคุณภาพของถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไผ่เลี้ยง โดยใช้เตา

เผาถ่านแบบถังตั้งขนาด 200 ลิตร ที่มีส่วนฐานเชื่อมต่อกับชุดให้ความร้อนอุณหภูมิสูงจากเตาผลิตโดยสามารถป้อนแก๊สร้อนที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำที่ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อกำจัดแก๊สเหลือทิ้งที่ควบแน่นไม่หมด ส่วนบนของเตาเผาเชื่อมต่อเข้ากับชุดควบแน่นแบบ Shell & Coil น้ำส้มควันไม้ดิบถูกแยกออกจากกันด้วยไซโคลน และไหลเข้าสู่ถังเก็บ การทดลองเสร็จสิ้นเมื่อไม่มีน้ำส้มควันไม้ไหลออกจากเครื่องควบแน่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ไม้ไผ่ที่มีความชื้นร้อยละ 27.78 กระบวนการคาร์บอไนเซชันจะเสร็จสิ้นในเวลา 350 นาที โดยให้มวลถ่านร้อยละ 22.38 และมวลน้ำส้มควันไม้ร้อยละ 59.25 ไผ่ที่มีความชื้นสูงใช้เวลาในการเผาถ่านนาน ให้ผลผลิตถ่านต่ำแต่ให้ปริมาณน้ำส้มควันไม้สูง คุณภาพของถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)

อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษารูปแบบเตาเผาต่างๆ โดยละเอียด พบว่าเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่มีการพัฒนาขึ้นแล้วนั้นยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ เช่น มีระบบการควบแน่นที่ซับซ้อน ชุมชนไม่สามารถสร้างได้เองหรือไม่สามารถดัดแปลงจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดได้ รวมถึง ยังมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าต่อเข้ากับอุปกรณ์บางส่วนของเตาเผา ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่เกษตร งานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาเตาเผาถ่านขึ้น โดยผลิตจากถังเหล็ก 200 ลิตร มีการต่อท่อระบายควันออกจากเตาเผาเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ และนำแก๊สชีวมวลหรือสารระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้กลับไปเป็นเชื้อเพลิงร่วมในการให้ความร้อน ทำให้แก๊สมีเทนในแก๊สชีวมวลเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์จนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปลดปล่อยสู่บรรยากาศ มีการออกแบบท่อควบแน่นให้ไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นหรือไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากเตาเผามลพิษต่ำที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม โดยมีการดำเนินการในพื้นที่ของกลุ่มเกษตรคุณธรรม ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง

การทดลอง

1. วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไม้ไผ่ซางหม่น (*Dendrocalamus sericeus* Munro) ตัดเป็นท่อนความยาว 10 – 15 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 11 เชื้อเพลิงที่ใช้ คือ ไม้ยาง (*Dipterocarpus alatus* Roxb.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 เซนติเมตร ตัดเป็นท่อนความยาว 30 – 40 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 9 ไม้ทั้งสองชนิดมาจากพื้นที่ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง

2. การพัฒนาเตาเผามลพิษต่ำและการผลิตถ่านด้วยเตาเผามลพิษต่ำ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้ทดแทนเตาเผาแบบดั้งเดิมได้ สามารถผลิตถ่านคุณภาพสูงและน้ำส้มควันไม้ที่มีสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.659/2553) หรือมีคุณภาพไม่น้อยไปกว่าถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม ชุมชนสามารถผลิตเตาเผาเองได้ ใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านสั้น และมีการปล่อยมลพิษน้อยลง Figure 2 แสดงโครงสร้างเตาเผาแบบดั้งเดิม (Figure 2a) โครงสร้างเตาเผามลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร (Figure 2b) และภาพเตาเผามลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร ที่ชุมชนสร้างขึ้นตามที่ออกแบบ (Figure 2c) และนำมาใช้ในระดับภาคสนามในพื้นที่กลุ่มเกษตรคุณธรรม ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง เตาเผาทั้งสองแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ❶ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นส่วนล่างสุดของเตาเผาทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนแก่ ❷ เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งวางอยู่ด้านบนเตาเผาไหม้เชื้อเพลิง ผลิตจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร และ ❸ ชุดท่อควบแน่นน้ำส้มควันไม้

Figure 2(a) แสดงโครงสร้างเตาเผาแบบดั้งเดิมโดยส่วนที่ ❶ เป็นส่วนที่ใส่เชื้อเพลิงสร้างจากอิฐบลอค ส่วนที่ ❷ เป็นเตาเผาสำหรับผลิตถ่านชีวภาพสร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แนวนอน ด้านบนตัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมสำหรับใส่ไม้และนำถ่านออก ส่วนที่ ❸ เป็นชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้สร้างจากเหล็กท่อกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาวทั้งหมด 3 เมตร ต่อออกจากปลายด้านหนึ่งของถังเหล็ก และพาแก๊สจากด้านในถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ปล่อยออกสู่บรรยากาศด้านบนดังรูป มีการก่ออิฐบลอคโดยรอบเตาเผาถ่านและปิดทับด้วยดินทรายเพื่อเป็นฉนวนความร้อน การเก็บน้ำส้มควันไม้จะกระทำบริเวณรอยต่อของท่อแนวตั้งและท่อเฉียงที่ซึ่งมีการเจาะรูไว้สำหรับเก็บน้ำส้มควันไม้

Figure 2(b) แสดงโครงสร้างเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่พัฒนาขึ้น โดยส่วนที่ ❷ สร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แนวตั้ง ด้านบนมีฝาปิดพร้อมเข็มขัดล็อก สำหรับใส่ไม้และนำถ่านออก มีการหุ้มฉนวนเซรามิกส์ไฟเบอร์โดยรอบ ตรงกลางมีเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมเชื่อมผ่านจากด้านล่างเตาเผาเพื่อนำเปลวไฟจากส่วนที่ ❶ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง ไปจนถึงด้านบนของถังเหล็ก เพื่อให้ความร้อนกระจายในส่วนเตาเผาถ่านมาก

ขึ้น ส่วนที่ ❸ ชุดท่อหล่อเย็นนี้สร้างขึ้นเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้และแก้ไขปัญหาการปลดปล่อยแก๊สมีเทนและแก๊สเชื้อเพลิงอื่นออกสู่บรรยากาศ มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น ท่อชั้นนอกใส่น้ำสำหรับหล่อเย็น สร้างจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 4 นิ้ว ท่อชั้นในสำหรับระบายแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสออกจากเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ สร้างจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 1 นิ้ว โดยชุดท่อควบแน่นดังกล่าวมีทั้งหมด 3 ชุด (ในรูปแสดงเพียงสองชุด) เมื่อแก๊สจากส่วนเตาเผาถ่านหรือถังเหล็ก 200 ลิตร ผ่านบริเวณท่อสองชั้น แก๊สบางส่วนจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว หรือ น้ำส้มควันไม้ ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกป้อนเข้าไปยังเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำหน้าที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในการให้ความร้อน กระบวนการนี้จะทำให้แก๊สมีเทนและแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ได้ถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ

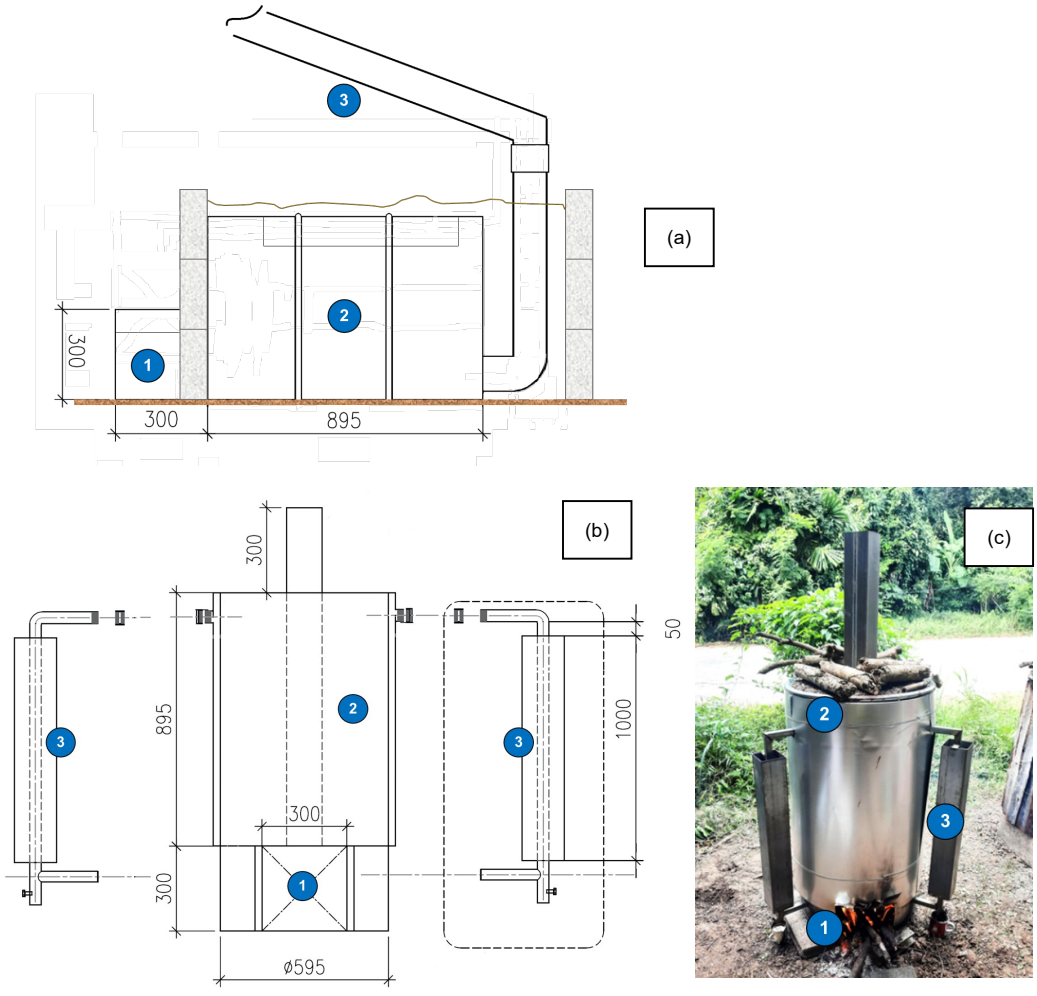

Figure 2 Schematic representation of traditional charcoal kiln (a) and 200-liter low-emission charcoal kiln (b) with actual 200-liter low-emission charcoal kiln (c)

การใช้งานเตาเผามลพิษต่ำที่พัฒนาขึ้นนี้ทำได้โดยการใส่ชีวมวลลงไปที่เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ปิดฝา และจุดไฟที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่สู่เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่อยู่ด้านบน จากนั้นเมื่อชีวมวลหรือไม้ไผ่ได้รับความร้อนจะค่อยๆ ปลดปล่อยความชื้นและสารระเหยออกมาในรูปของแก๊ส แก๊สที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกสู่ชุดท่อหล่อเย็น กลายเป็นน้ำส้มควันไม้และแก๊สเชื้อเพลิงตามกระบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้สำหรับให้ความร้อนในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะใช้ปริมาณหนึ่งสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงช่วงแรก จากนั้นจะลดปริมาณการใช้ลงหลังจากเก็บน้ำส้มควันไม้เสร็จสิ้นแล้ว เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากเพียงพอจนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนและลดปริมาณเชื้อเพลิงแข็งได้

การทดสอบประสิทธิภาพของเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผามลพิษต่ำขนาด 200 ลิตรที่พัฒนานี้ มีการควบคุมชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านและชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ ไม้ไผ่ และไม้ยาง ตามลำดับ ปริมาณไม้ไผ่เริ่มต้น 70 กิโลกรัม ปริมาณไม้ยางที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะมีการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลตลอดกระบวนการผลิตถ่าน เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาสองประเภทไม่เท่ากัน มีการวัดอุณหภูมิของเตาเผา โดยวัดอุณหภูมิที่ปล่องกลางของเตาเผามลพิษต่ำด้วยเครื่อง Dual-input K-type digital thermometer 6802II ซึ่งตลอดกระบวนการมีอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในช่วง 550 – 600 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดอุณหภูมิของเตาเผาแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากโครงสร้างของเตาเผาไม่รองรับอุปกรณ์จึงใช้อุณหภูมิอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดสอบเตาเผาทั้งสองชนิดมีการทำซ้ำสองครั้ง การเก็บตัวอย่างถ่านจากเตาเผาจะเก็บจากบริเวณที่อยู่ก้นเตาเพื่อหลีกเลี่ยงการเก็บตัวอย่างถ่านที่อาจเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศขณะลดอุณหภูมิเตาเผา

3. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพ

วิเคราะห์องค์ประกอบโดยธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง THERMO FLASH 2000 CHN ANALYZERS วิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter Model: LECO AC500 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer - SEM-EDS) รุ่น JEOL JSM-IT300 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy - FTIR) รุ่น PERKIN ELMER Spectrum One ด้วยเทคนิค KBr-pellet ช่วงเลขคลื่น 4000 – 400 cm^{-1} วิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของรูพรุนด้วย NOVA 2200 gas sorption analyzer (Quantachrome, USA)

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS/MS TQ) รุ่น AGILENT 7890 GC/7000C GC/MS TRIPLE QUAD ใช้คอลัมน์ CP-Wax ก่อนนำน้ำส้มควันไม้ไปวิเคราะห์สามารถเตรียมตัวอย่างได้โดยการนำน้ำส้มควันไม้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Q RëC™ AMMONIA SOLUTION 28%) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 5 จากนั้นเติมไดคลอโรมีเทน (Fisher Chemical™ Dichloromethane) หรือ เอธิลแอซิเตต (RCI Labscan™ Ethyl Acetate 99.8%) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปกรองเพื่อเตรียมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Pimenta *et al*., 2018)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดสอบประสิทธิภาพของเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีผลการทดสอบดัง Table 1 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบจากการใช้ไม้ไผ่ปริมาณ 70 กิโลกรัม เท่ากัน เตาเผาแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการให้ความร้อนนานกว่า โดยเตาเผาแบบดั้งเดิมใช้เวลา 2 วันในการให้ความร้อน โดยมีอุณหภูมิสูงที่สุด 500 องศาเซลเซียส (National Innovation Agency, 2019) ในขณะที่เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการให้ความร้อน 5 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในช่วง 550 – 600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าเตาเผาแบบดั้งเดิมประมาณ 20 กิโลกรัม ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาสั้นในการผลิตถ่านชีวภาพ สาเหตุอีกประการหนึ่งเกิดจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีการนำแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้องค์ประกอบแก๊สส่วนที่เผาไหม้ได้ในแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และสารระเหยอินทรีย์ (Thawon *et al*., 2020; Sparrevik *et al*., 2014) ถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแก๊สจากกระบวนการเผาถ่านที่ควบแน่นไม่ได้ ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เท่ากับร้อยละ 13.4, 11.18, 7.35 และ 1.758 โดยปริมาตร เมื่อนำไปเผาไหม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง องค์ประกอบของแก๊สที่ได้ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เท่ากับร้อยละ 19.80, 0.06, 0.00 และ 0.409 โดยปริมาตร ตามลำดับ (Thawon *et al*., 2020) ซึ่งจะเห็นว่าองค์ประกอบของแก๊สดังกล่าวมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลดลงจากกระบวนการที่ปล่อยแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสสู่บรรยากาศโดยตรง

เมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว มีการปล่อยให้เตาเผาเย็นลงด้วยการตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติ สำหรับเตาเผาแบบดั้งเดิมมีการใช้เวลาในขั้นตอนดังกล่าวประมาณ 2 วัน เนื่องจากมีการใช้ดินทรายกลบทั่วเตาเผาทำให้การระบายความร้อนจากภายในเตาเผาสู่ด้าน

นอกใช้เวลานาน ในขณะที่เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาข้ามคืน หรือ 16 ชั่วโมง จึงนำถ่านชีวภาพออกจากเตาเผา จาก Table 1 เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลวจากกระบวนการผลิตถ่านด้วยเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น พบว่าร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลวจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น คือ ร้อยละ 21.43 และร้อยละ 6.43 ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลวจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 14.29 และร้อยละ 1.71 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานจึงทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น องค์ประกอบที่เป็นสารระเหยถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของชีวมวลได้มากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอนของถ่านที่ได้จากเตาเผาสองประเภทนี้ ซึ่งจะอภิปรายในส่วนถัดไป

Figure 3 แสดงลักษณะภายนอกของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาถ่านมลพิษต่ำ พบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมเฉพาะถ่านจากไม้ไผ่ที่อยู่บริเวณใกล้กับฝาเตา แต่ถ่านจากไม้ไผ่ที่อยู่บริเวณที่ห่างจากฝาเตามีผิวมันวาว คล้ายกับถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านมลพิษต่ำ

Table 1 Ultimate analysis and high heating values of biochars

Conditions/ Yields	Traditional kiln	200-liter low-emission kiln
Bamboo (kg)	70	70
Rubber tree (kg)	50	30
Total pyrolysis time	2 days	5 h
Total cooling time	2 day	16 h
Solid yield (wt.%)	14.29	21.43
Liquid yield (wt.%)	1.71	6.43

Figure 3 biochar from traditional charcoal kiln (left) and 200-liter low-emission charcoal kiln (right)

Table 2 Ultimate analysis and high heating values of biochars

Properties	Biochar	
	Traditional kiln	200-liter low-emission kiln
C (wt.%)	72.86	73.06
H (wt.%)	1.12	2.32
N (wt.%)	0.46	0.59
HHV (cal/g)	6,400.8	6,945.8
H/C ratio	0.18	0.38
BET Surface area (m^2/g)	93.46	41.60
Total pore volume (cm^3/g)	0.054	0.025
Micropore area (m^2/g)	81.17	40.80
Micropore volume (cm^3/g)	0.043	0.022
Average pore diameter (Å)	22.97	23.71

Table 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น พบว่าปริมาณร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ของถ่านชีวภาพทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณร้อยละคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 72.86 และ 73.06 ปริมาณร้อยละไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 1.12 และ 2.32 ปริมาณร้อยละไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 0.46 และ 0.59 สำหรับถ่านชีวภาพจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ องค์ประกอบที่คล้ายกันนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 6,400.8 และ 6,945.8 แคลลอรีต่อกรัม หรือ 26.78 และ 29.06 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่ามากกว่าของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมเล็กน้อย โดยมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Chambers *et al*., 2025; Shezi *et al*., 2025) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน พบว่าถ่านจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนน้อยกว่าถ่านจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นประมาณสองเท่า เนื่องมาจากการใช้เวลาในการให้ความร้อน (total pyrolysis time) นานกว่า ตามผลการทดสอบประสิทธิภาพที่แสดงในตารางที่ 1 ทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันได้ดีขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นและปริมาณสารระเหยที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเบาลดลง (Muoghalu *et al*., 2025)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนพบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ 93.46 m^2/g และ 41.60 m^2/g ในขณะ

ที่ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ 0.054 cm^3/g และ 0.025 cm^3/g ตามลำดับ ซึ่งมีสมบัติอยู่ในช่วงของถ่านชีวภาพจากกระบวนการทั่วไปที่มีพื้นที่ผิวในช่วง 8-132 m^2/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.016–0.083 cm^3/g (Leng *et al*., 2021) จะเห็นว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ (<2nm) มากกว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้เร่งการปล่อยสารระเหยและส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างของรูพรุน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงภาพถ่ายดัง Figure 4

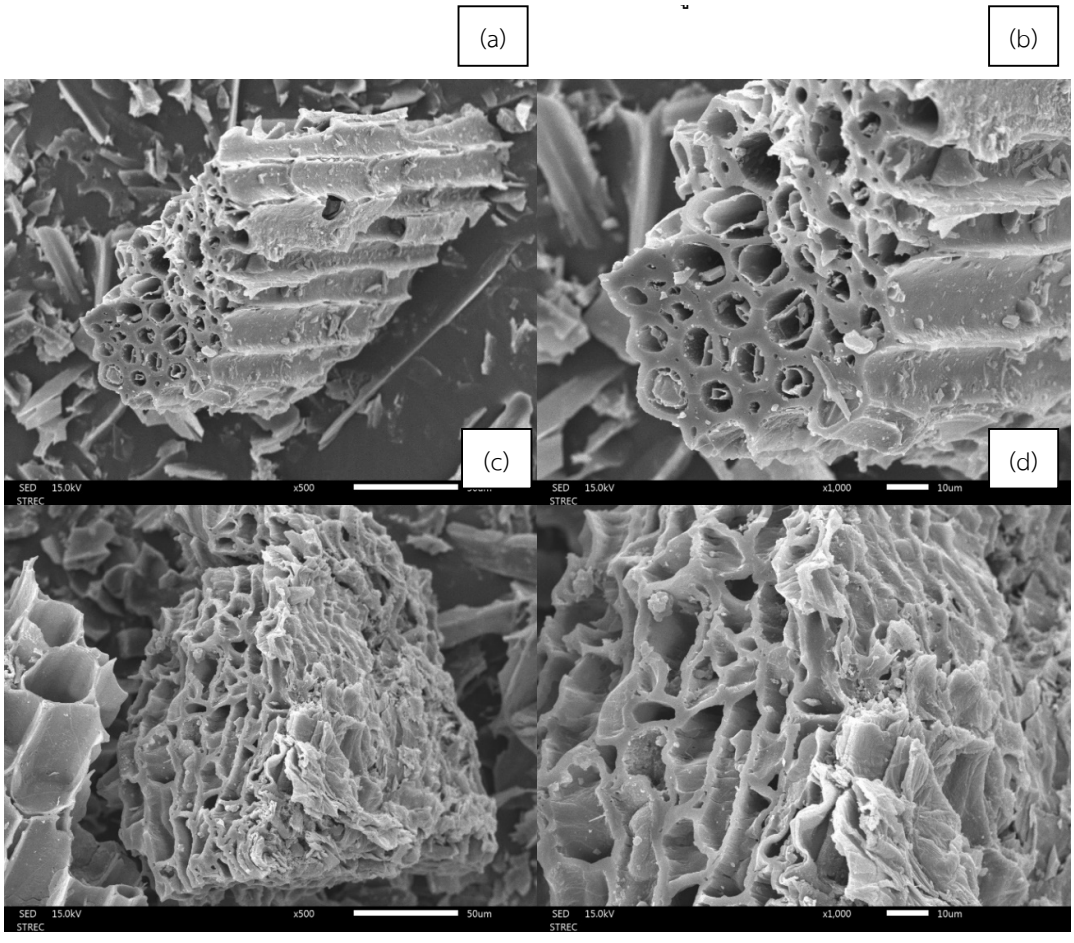

Figure 4 SEM images of biochar from traditional kiln (a and b) and 200-liter low-emission kiln (c and d) with magnitude × 500 (a and c) and with magnitude × 1,000 (b and d)

Figure 4 (a) และ 4 (b) แสดงให้เห็นภาพถ่าย SEM ของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า ตามลำดับ และ Figure 4 (c) และ 4 (d) แสดงให้เห็นภาพถ่าย SEM ของถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะของรูพรุนของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีการสังเกตเห็นความลึกของรูพรุนชัดเจน ต่างจากลักษณะของรูพรุนถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นที่มีความกว้างและสังเกตความลึกไม่ชัดเจน ตามลำดับอย่างไรก็ตามการใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงอาจเกิดผลที่ตรงกันข้าม กล่าวคือ โครงสร้างของรูพรุนบางส่วนถูกทำลาย (Leng *et al*., 2021) จาก Figure 4 (b) พบว่ารูพรุนบางส่วนของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีลักษณะอุดตันหรือแคบ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการที่ถ่านจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการเผานาน แม้ว่าการใช้เวลานานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันได้ดีขึ้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ก็มีแนวโน้มว่าการใช้เวลานานจะทำให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพเสียหาย (Yavari *et al*., 2015) จากการที่สารระเหยบางส่วนหลอมเหลวชั่วคราวและปิดรูพรุนของถ่านชีวภาพ

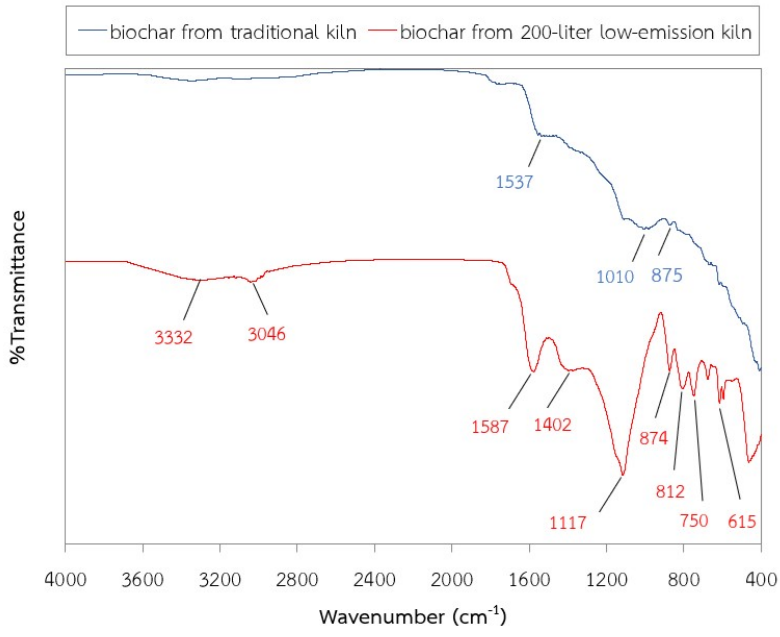

Figure 5 FTIR spectrum of biochar from traditional kiln and 200-liter low-emission kiln

Figure 5 แสดงสเปกตรัม FTIR ของถ่านทั้งสอง จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพจากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ปรากฏพีคในช่วงความยาวคลื่น 3,550 – 3,200 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นของหมู่ -OH (แอลกอฮอล์ ฟีนอล หรือ กรดคาร์บอกซิลิก) พีคที่ความยาวคลื่น 1,587 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C=C (วงแหวนอะโรมาติก, พันธะคู่สลับเดี่ยว) หมู่ C=O (พันธะคู่สลับเดี่ยว) และ/หรือพันธะ N-H รวมถึงพีคที่ความยาวคลื่น 874 cm^{-1} 812 cm^{-1} พีคที่ความยาวคลื่น 1,402 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C-H (หมู่แอลเคน) และ/หรือหมู่ O-H (แอลกอฮอล์ ฟีนอล หรือ กรดคาร์บอกซิลิก) รวมถึง 750 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C-H (อะโรมาติก) ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้มีแนวโน้มคล้ายกับถ่านชีวภาพจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Handiso *et al*., 2024) ทั้งนี้ พบว่าพีคของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมมีความสูงน้อยกว่าพีคของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนผิวของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ ถ่านที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมไม่ปรากฏพีคที่ความยาวคลื่นมากกว่า 3,000 สำหรับหมู่ -OH และพีคที่ความยาวคลื่น 750 cm^{-1} สำหรับหมู่ C-H ของสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งเป็นไปได้ว่าการใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) เปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอนิล (Muoghalu *et al*., 2025) นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิสูง โลหะแอลคาไลน์และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (alkali and alkaline earth metals; AAEM) และเกลือที่อยู่ในเถ้าอาจบดบังหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบางตัวด้วยพันธะ AAEM-O-C linkages (Ganesan *et al*., 2025)

Figure 6 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำส้มควันไม้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นน้ำส้มควันไม้ที่ไม่ผ่านการกรอง และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 60 วัน ส่วน Table 3 แสดงคุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาทั้งสองประเภทเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตชุมชน มผช. 659/2553 พบว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่แยกชั้น มีสีน้ำตาลแดงเข้ม มีกลิ่นคล้ายควันไฟ มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.018 และ 1.024 สำหรับน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐานผลิตชุมชน

อย่างไรก็ตาม น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่พัฒนาขึ้น (Figure 6 right) มีสีเข้มกว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมเล็กน้อย นอกจากนี้น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมนั้นจะสังเกตเห็นสีที่ใสกว่าและมีน้ำมันทาร์ปริมาณน้อย เนื่องจากกระบวนการควบแน่นด้วยการใช้อุปกรณ์ของเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมนั้นผ่านท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีความยาวเฉพาะส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกท่อเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ 2 เมตร แสดงให้เห็นถึงพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประมาณ 0.0079 ตารางเมตร และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.63 ตารางเมตร ในขณะที่การควบแน่นด้วยการใช้อุปกรณ์ของเตาเผาที่พัฒนาขึ้นผ่านท่อสี่เหลี่ยมขนาด 1 นิ้ว มีความยาวเฉพาะส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกท่อเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ 1 เมตร มีชุดควบแน่นทั้งหมด 3 ชุด แสดงให้เห็นถึงพื้นที่หน้า

ตัดของท่อรวม 0.0019 ตารางเมตร และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.30 ตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าอุปกรณ์ของเตาเผาแบบดั้งเดิม ดังนั้น สารระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาเผาแบบดั้งเดิมจึงใช้เวลาในกระบวนการควบแน่นมากกว่า ทำให้สารระเหยที่มีน้ำหนักเบาสามารถควบแน่นได้มาก นอกจากนี้น้ำมันทาร์และตะกอนบางส่วนถูกกรองด้วยผิวด้านในอุปกรณ์ควบแน่น ในขณะที่อุปกรณ์ควบแน่นของเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนน้อย สารระเหยใช้เวลาในกระบวนการควบแน่นไม่นานก็ถูกปล่อยเข้าไปที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง สารระเหยที่มีน้ำหนักมากสามารถควบแน่นได้ดี แต่สารระเหยที่มีน้ำน้อยกว่าจะควบแน่นได้ไม่สมบูรณ์

Figure 6 Wood vinegar obtained from traditional kiln (left) and 200-liter low-emission kiln (right)

Table 3 Physical properties of wood vinegar

Proper-ties	Thai Community Product Standards [a]	Traditional kiln	200-liter low-emission kiln
Charac-teristics	Clear and homogeneous liquid	Clear and homogeneous liquid	Clear and homogeneous liquid
Color	reddish brown or yellowish brown	reddish brown	reddish brown
Odor	Smells like smoke	Smells like smoke	Smells like smoke
pH [b]	2.0 - 3.0	2.5	2.8
Specific gravity[c]	1.010 – 1.025	1.018	1.024

[a] Thai Community Product Standards no. 659/2553 (Office of Industrial Product Standards, 2010)

[b] Analyzed by HM Digital pH meter PH-80

[c] Analyzed by Brannan Density Hydrometer

Table 4 แสดงองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ในเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร ด้วยเทคนิค GC/MS ซึ่งได้จากการนำน้ำส้มควันไม้มาสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยในการทดลองนี้ได้นำเสนอผลการทดลองกรณีที่ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายและกรณีที่ใช้เอธิลแอซิเตตเป็นตัวทำละลาย จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบที่ละลายในตัวทำละลายทั้งสองกรณีแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบที่แสดงพีคอย่างชัดเจน พบว่าองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ในเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีความคล้ายกันมากกว่าร้อยละ 50 โดยเฉพาะองค์ประกอบสำคัญในน้ำส้มควันไม้ ได้แก่ ไกวอะคอล (guaiacol) หรือ 2-เมทอกซีฟีนอล (Phenol, 2-methoxy-) ที่แสดงในลำดับที่ 20 รวมถึงฟีนอล (แสดงในลำดับที่ 26) และอนุพันธ์ของฟีนอลอื่น ๆ เช่น พาราครีซอล (p-Cresol) 4-เอธิลฟีนอล (Phenol, 4-ethyl-) 2,6-ไดเมทอกซีฟีนอล (Phenol, 2,6-dimethoxy-) 3,5-ไดเมทอกซี-4-ไฮดรอกซีโทลูอีน (3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene) และ 4-เอธิล-2,6-ไดเมทอกซีฟีนอล (4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol) เป็นต้น ต่างแสดงพีคที่ชัดเจนและพบได้ในน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองแบบ ส่วนองค์ประกอบรองของน้ำส้มควันไม้มีความแตกต่างกันบางส่วน ซึ่งองค์ประกอบที่มีพื้นที่ใต้กราฟน้อย (area sum% น้อยกว่า 0.5) จะไม่ถูกวิเคราะห์ในการทดสอบดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้นี้มีแนวโน้มคล้ายกับองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Gani *et al*., 2024; Vinturelle *et al*., 2024; Zhu *et al*., 2020) โดยระบุว่าไกวอะคอลและแคทีคอล (catechols) มาจากการสลายตัวทางความร้อนของลิกนิน และยังพบว่าองค์ประกอบในน้ำส้มควันไม้สามารถยับยั้งแบคทีเรียบางชนิดได้

Table 4 Compositions of wood vinegar

No	Compound name	Traditional kiln						200-liter low-emission kiln					
		Dichloromethane			Ethyl acetate			Dichloromethane			Ethyl acetate		
		OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %
1	Pyridine		5.51	1.13		5.50	0.90	*	*	*	*	*	*
2	Pyridine, 2-methyl-		6.39	0.61		6.38	0.51	*	*	*	*	*	*
3	Decane, 2,4-dimethyl-		8.98	0.85	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	2-Cyclopenten-1-one		10.88	0.77		10.87	0.41		10.88	0.64		10.87	0.54
5	1-Hydroxy-2-butanone		11.65	1.02		11.64	0.57		11.65	0.53		11.64	0.47
6	Ethanone, 1-(2-furanyl)-		17.12	1.04		17.11	0.59		17.12	0.82		17.11	0.59
7	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-		17.32	1.75		17.31	1.29		17.32	1.81		17.31	1.69
8	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		18.25	0.80		18.24	0.64		18.25	0.69		18.25	0.56
9	Pyridine, 3-methoxy-		20.23	1.78		20.23	1.46		20.23	1.62		20.22	1.44
10	Butyrolactone		22.09	0.82		22.08	0.57		22.15	1.20		22.08	1.27
11	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl		23.09	0.86		23.10	0.69		23.11	0.79		23.09	0.68
12	3-Furanmethanol		24.11	2.65		24.11	3.39		24.12	2.86		24.11	3.85
13	2(5H)-Furanone, 3-methyl-		25.92	0.56		25.91	0.43	*	*	*	*	*	*
14	3-n-Propyl-2-pyrazolin-5-one		26.30	0.98		26.29	0.66	*	*	*	*	*	*
15	2,4-Dimethyl-2-oxazoline-4-methanol	*	*	*	*	*	*		26.36	1.82		26.33	1.90
16	1-(Aminomethyl)-N,N-dimethylcyclopentanamine	*	*	*	*	*	*		27.94	0.76		27.92	0.80
17	Acetamide	*	*	*		28.37	0.78	*	*	*		28.35	0.56
18	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-		30.78	2.21		30.79	2.38		30.81	4.14		30.79	3.94
19	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	*	*	*	*	*	*		31.07	0.52	*	*	*
20	Phenol, 2-methoxy-		32.14	6.08		32.13	5.97		32.15	5.44		32.13	5.38
21	Cycloheptanone, 2-ethyl-		32.74	0.66		32.73	0.52	*	*	*	*	*	*
22	4-Methyl-5H-furan-2-one	*	*	*	*	*	*		32.76	0.70		32.73	0.62
23	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-		33.45	1.32		33.44	1.31		33.46	1.62		33.44	1.67
24	Hexadecane, 2,6,11,15-tetramethyl-		33.79	0.56	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	Creosol		35.95	1.95		35.95	1.79		35.95	1.82		35.95	1.67
26	Phenol		37.95	9.47		37.96	11.22		37.96	7.37		37.97	9.23
27	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-		38.82	1.40		38.82	1.17		38.82	1.75		38.81	1.22
28	p-Cresol		40.90	3.79		40.90	3.60		40.90	4.17		40.90	3.79
29	Phenol, 2,4-dimethyl-		*	*		*	*		40.98	0.53		40.90	0.51
30	Phenol, 3-methyl-		41.17	1.87		41.18	1.67		41.18	1.69		41.18	1.46
31	Phenol, 4-ethyl-		44.30	5.15		44.30	4.53		44.30	5.95		44.30	5.28
32	1H-Imidazole, 4-methyl-		45.41	0.59		45.45	0.58	*	*	*		45.42	0.74
33	2,3-Anhydro-d-mannosan	*	*	*	*	*	*	*	*	*		46.89	0.85
34	Phenol, 2,6-dimethoxy-		47.47	17.11		47.46	15.78		47.48	14.09		47.43	14.36
35	Phenol, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-	*	*	*	*	*	*	*	*	*		49.55	0.77
36	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene		50.37	4.20		50.37	3.64		50.37	3.67		50.36	2.97

No	Compound name	Traditional kiln						200-liter low-emission kiln					
		Dichloromethane			Ethyl acetate			Dichloromethane			Ethyl acetate		
		OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %
37	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	*	*	*	*	*	*		51.61	1.14		51.60	2.92
38	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol		52.31	3.26		52.31	2.95		52.32	2.57		52.30	3.59
39	5-Oxotetrahydrofuran-2-carboxylic acid, ethyl ester	*	*	*	*	*	*	*	*	*		54.11	0.58
40	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol		54.61	0.65		54.61	0.55		54.61	0.57	*	*	*
41	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	*	*	*		55.20	2.89	*	*	*	*	*	*
42	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-		59.81	1.20		59.81	0.98		59.82	2.04		59.81	1.26
43	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	*	*	*		60.36	1.18	*	*	*	*	*	*
44	Catechol		61.30	1.15		61.25	7.04	*	*	*	*	*	*
45	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl) phenol	*	*	*	*	*	*		62.33	0.57	*	*	*
46	1,2-Benzenediol, 4-methyl-		63.39	0.44		63.38	1.56	*	*	*	*	*	*
47	4-Ethylcatechol	*	*	*		66.26	0.79	*	*	*	*	*	*
48	Syringylacetone		70.32	1.23		70.32	0.73		70.32	1.87		70.32	0.94
49	Resorcinol	*	*	*		70.96	0.92	*	*	*		70.95	2.26
50	9-Octadecenamide, (Z)-		82.04	1.45		82.03	0.94		82.04	0.86		82.03	1.49

OC—Compound Occurrence : (positive occurrence—marked in green; negative occurrence—marked with an asterisk).
Compounds with area sum% less than 0.5 were not detected.

ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตขึ้นนั้นสามารถนำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรมได้ โดยน้ำส้มควันไม้สามารถนำไปใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน และปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพของดิน (Kumar *et al*., 2025) ส่วนถ่านชีวภาพนั้นมีโครงสร้างรูพรุนที่นำไปสู่ศักยภาพที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของโครงสร้างดิน (Yadav *et al*., 2023) จึงมีการนำถ่านชีวภาพไปผสมกับดินปลูกในพื้นที่การเกษตร อาจใช้ร่วมกับน้ำส้มควันไม้เพื่อลดการพึ่งพาสารเคมีทางการเกษตร และก้าวไปสู่เกษตรกรรมที่ยั่งยืนสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ได้แก่ เป้าหมายที่ 2 ยุติความหิวโหย บรรลุความมั่นคงทางอาหารและยกระดับโภชนาการ และส่งเสริมเกษตรกรรมที่ยั่งยืน และเป้าหมายที่ 12 สร้างหลักประกันให้มีแบบแผนการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน เป็นต้น สำหรับพื้นที่เป้าหมายของงานวิจัยนี้ นอกจากจะนำถ่านชีวภาพไปใช้ในพื้นที่การเกษตรแล้ว ยังมีการนำเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพจากมังคุดและแปรรูปเป็นกำยานหอมไร้ควันเพื่อจำหน่าย ดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งจะมีการทดสอบคุณภาพของถ่านมังคุดเพื่อใช้เป็นถ่านดูดกลิ่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.180/2546 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เอส มอก. เอส 250-2566 ต่อไป

Figure 7 Smokeless incense made from mangosteen biochar (left) and mangosteen biochar (right)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพและผลิตน้ำส้มควันไม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยสร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร โดยมีการนำไปทดสอบประสิทธิภาพในพื้นที่เป้าหมาย คือ ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเตาเผาแบบดั้งเดิมที่ใช้ในชุมชน เตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้มีการมีนำแก๊สที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิสในเตาเผามาควบแน่นเพื่อเก็บ

น้ำส้มควันไม้ และนำแก๊สส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้ใช้เชื้อเพลิงน้อยลง และแก๊สเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ก่อนปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานระหว่างเตาเผาที่พัฒนาขึ้นกับเตาเผาแบบดั้งเดิม พบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาการผลิตถ่านชีวภาพน้อยกว่า ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแข็งและของเหลวจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่ามากกว่า จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพพบว่าถ่านจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมากกว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมประมาณสองเท่า เนื่องจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีระยะเวลาในการให้ความร้อนนานกว่า ปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันเกิดได้ดีขึ้นและทำให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่าความร้อนสูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่รูพรุนบางส่วนมีลักษณะแคบหรืออุดตัน แสดงถึงโครงสร้างรูพรุนที่เสียหายจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ใช้เวลานาน

สำหรับการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้พบว่า น้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 659/2553 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค GC/MS พบว่าองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทใกล้เคียงกัน โดยมีองค์ประกอบของไกวอะคอลและอนุพันธ์ฟีนอลอื่นที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียบางชนิดได้ ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อใช้ปรับปรุงดินและช่วยลดการพึ่งพาสารเคมี รวมถึงส่งเสริมการพัฒนาตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งนี้ การปรับปรุงเตาเผาและชุดท่อหล่อเย็นให้สามารถควบแน่นน้ำส้มควันไม้ได้อย่างสมบูรณ์ขึ้นนั้น จำเป็นต้องดำเนินการในขั้นตอนถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การปรับใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมด้านเตาเผามลพิษต่ำผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้เพื่อยกระดับเศรษฐกิจด้วยเศรษฐกิจหมุนเวียนและผลิตภัณฑ์ชุมชน โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ได้รับการสนับสนุนโดยกองทุนส่งเสริม ววน. และหน่วย บพท. (รหัสโครงการ A11F670266) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานจากสถาบันวิจัยและพัฒนา และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวาย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรสายสนับสนุนที่กรุณาช่วยเหลือด้านเอกสาร ขอขอบคุณกลุ่มเกษตรคุณธรรม ในพื้นที่ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและพื้นที่ในการดำเนินโครงการ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

เอกสารอ้างอิง

Bureau of Environmental Health, Department of Health, Ministry of Public Health. (2012). *Academic manual on guidelines for business operations that are hazardous to health, Type: Charcoal burning or charcoal accumulation*. Office of Printing, War Veterans Organization of Thailand.

Chambers, E., Hassall, M., Johnson, D., McGoran, C., Williams, O., Blair, A., Catlow, F., & Saha, B. (2025). From bamboo to biochar: A critical review of bamboo pyrolysis conditions and products with a focus on relevance to the developing world. *RSC Sustainability*. https://doi.org/10.1039/D4SU00800F

Ganesan, A., Rezazgui, O., Langlois, S., Boussabbeh, C., & Barnabe, S. (2025). Pyrolytic conversion of construction, renovation, and demolition (CRD) wood wastes in Québec to biochar: Production, characterization, and identifying relevant stability indices for carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, *965*, Article 178650. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178650

Gani, A., Adlim, M., Rahmayani, R. F., Hanum, L., & Nabila, R. (2024). Preparation and characterization of coconut shell liquid smoke and the properties of preserving tofu. *Kuwait Journal of Science*, *51*(4). https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100289

Hamwong, W. (2024). *Information technology for agriculture* [Massive open online course]. Rajamangala University of Technology Isan. https://natres.skc.rmuti.ac.th/elibrary/uploads/files/67c6cb5a281207.27297954.pdf

Handiso, B., Pääkkönen, T., & Wilson, B. P. (2024). Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar. *Waste Management Bulletin*, 281–287. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008

Kaewluan, S., Sriromreun, P., Jansri, S. N., Asadamongkon, P., & Chuichulcherm, S. (2021). Charcoal and wood vinegar products from hedge bamboo by using 200 liters community charcoal kiln working with gasified biomass burner. *RaJabhat Chiang Mai Research Journal*, *22*(2), 229–245.

Kumar, S., Rahman, M., Chenari Bouket, A., Ahadi, R., Meena, M., Bhupenchandra, I., Singh, U. B., Arutselvan, R., Kumar, R., Singh, S. P., Kashyap, A. S., Tripathi, R., Gupta, S., Dutta, P., Harish, Singh, R., & Swapnil, P. (2025). Unravelling the multifarious role of wood vinegar made from waste biomass in plant growth promotion, biotic stress tolerance, and sustainable agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *185*, Article 106851. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106851

Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, *763*, Article 144204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204

Moonsri, P., & Hutem, A. (2018). Development of wood vinegar production from local wisdom in Phetchabun Province for organic agriculture utilization. *Journal of Science & Technology Phetchabun Rajabhat University*, *3*(1), 13–31.

Muoghalu, C., Kaboggoza, H. C., Semiyaga, S., & Manga, M. (2025). Adsorptive removal of organics and nutrients from septic tank effluent using oak wood chip biochar: Kinetic analysis and numerical modeling. *Cleaner Water*, *3*. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100073

Namaswa, T., Burslem, D. F., & Smith, J. (2023). Emerging trends in appropriate kiln designs for small-scale biochar production in low to middle income countries. *Bioresource Technology Reports*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101641

National Innovation Agency. (2019). *Manual for constructing a 200-liter horizontal charcoal kiln*. https://social.nia.or.th/

Office of Industrial Product Standards. (2010). *Community product standard: Wood vinegar (TCPS 659/2553)*.

Pimenta, A. S., Fasciotti, M., Monteiro, T. V., & Lima, K. M. (2018). Chemical composition of pyroligneous acid obtained from Eucalyptus GG100 clone. *Molecules*, *23*(2). https://doi.org/10.3390/molecules23020426

Ruangsan, K., Heman, A., Tasaroj, H., Reungrit, S., Kraisoda, P., Heman, W., & Ruangsan, S. (2022). Development of wood charcoal for cooking retort with community product standards. *Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation*, *1*(1), 1–10. https://doi.org/10.14456/ksti.2022.6

Sangsuk, S., Buathong, C., & Suebsiri, S. (2023). Modified Iwate kiln for production of good quality charcoal and high volume of wood vinegar. *Fuel Communications*. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2023.100095

Shezi, M., & Kiambi, S. L. (2025). Isothermal pyrolysis of bamboo and pinewood biomass: Product characterization and comparative study in a fluidized bed reactor. *Bioengineering*, *12*(2), Article 99. https://doi.org/10.3390/bioengineering12020099

Sparrevik, M., Adam, C., Martinsen, V., Jubaedah, & Cornelissen, G. (2015). Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved “retort” kilns. *Biomass and Bioenergy*, *72*, 65–73. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.016

Sunphorka, S., & Yangsawang, W. (2023). Biochar and wood vinegar production from pineapple leaves using low-emission 200-liter kiln and the feasibility study of production. *Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)*, 1–13.

Thawon, K., Sriromreun, P., & Kaewluan, S. (2020). Performance and emission study of 200 L charcoal kiln with gasifier burner. *Proceedings of the 13th Srinakharinwirot University Research Conference*.

Tsiklios, C., Hermesmann, M., Stumm, P., & Müller, T. E. (2025). Comparative analysis of hydrogen vs. methane pipeline transport systems with integrated methane pyrolysis for low-carbon hydrogen supply. *Applied Energy*, *383*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125276

Vinturelle, R., Cabral, T. d., Oliveira, P. C., Salles, J. P.,

Faria, J. V., Teixeira, G. P., . . . Chagas, E. F. (2024). Slow pyrolysis of Terminalia catappa L. municipal solid waste and the use of the aqueous fraction produced for bovine mastitis control. *Biochemistry and Biophysics Reports*, *38*, Article 101704. https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2024.101704

Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, *11*, Article 100498. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498

Yavari, S., Malakahmad, A., & Sapari, N. B. (2015). Biochar efficiency in pesticides sorption as a function of production variables—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 13824–13841.

Zhu, Y., Cheng, S., Wang, P., Chen, H., Zhang, X., Liu, L., Li, X., & Ding, Y. (2020). A possible environmental-friendly removal of Microcystis aeruginosa by using pyroligneous acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *205*. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111159