

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร



ลลิตา เพชรใจหาญ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร



ลลิตา เพชรใจหาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบราชการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตผ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร

ลลิตา เพชรใจหาญ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวยการ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญใหญ่)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร
ชื่อผู้เขียน	นางสาวลลิตา เพชรใจหาญ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวยการ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีวิธีการผลิตถ่านชีวภาพหลากหลายรูปแบบ และคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตมีความแตกต่างกัน จากการศึกษาเตาเผาแบบธรรมดาทั่วไปที่ใช้สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพใช้ระยะเวลาเวลานานกว่า 7 ชั่วโมง โดยตลอดช่วงการผลิตถ่านชีวภาพไม่ได้มีการควบคุมกระบวนการผลิต อีกทั้งยังใช้แหล่งความร้อนในปริมาณมากทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยมีศึกษาและออกแบบเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ 3 ขนาด (50 100 และ 200 ลิตร) และใช้เวลาในกระบวนการให้ความร้อน 1-3 ชั่วโมง ซึ่งการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงาน ต้นทุนในการผลิต มูลค่าของถ่านชีวภาพ ทดสอบประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ก่อนการทดลองได้มีการศึกษาเตาต้นแบบขนาด 50 ลิตร เพื่อออกแบบและศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิตและได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อที่จะใช้เป็นตัวเลือกหรือเป็นตัวกำหนดตัวแปรและขอบเขตของการศึกษาเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการวิจัยถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรพบว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาทั้ง 3 ขนาดมีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยและผลผลิตมากที่สุดที่การทดลองด้วยระยะเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณถ่านชีวภาพ 27.6-51.1 wt.% ปริมาณแก๊ส 32.9-68.5 wt.% ช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 281.6±363.3 ถึง 352.9±529.0 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาถ่านชีวภาพพบว่าค่าความเป็นกรดต่าง (pH) 6.56-8.66 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 0.25-0.90 dS m⁻¹ การวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์มีธาตุอาหารพืชที่สำคัญประกอบด้วย Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sb, Ba, Th, U, Al และอื่น ๆ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าความชื้น 1.88-6.47 wt.% เถ้า 2.42-38.55 wt.% สารระเหยได้ 14.12-40.27 wt.% และคาร์บอนคงตัว 33.38-69.87

wt.% องค์ประกอบแร่ธาตุมีปริมาณ คาร์บอน 43.25-74.94% ปริมาณไฮโดรเจน 1.82-4.16% ปริมาณกำมะถัน 0.02-0.07% ปริมาณออกซิเจน 10.57-25.54% ปริมาณไนโตรเจน 0.29-1.58% Gross Heating Value 3,793-6,734% และ Net Heating Value 3,613-6,556% อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) 0.14-0.39 อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) 0.32-0.96 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) 45-287 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด 371-654 mg/kg และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม 409-646 mg/kg อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/Corg) 0.36-1.15 การวิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro มีค่าระหว่าง 25.60-145.65 μm องค์ประกอบแร่ธาตุ (SEM-EDX) ประกอบด้วย C, O, Ca, K, P, Si และ Mg เป็นต้น พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน 0.4-111.5 m^2/g ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 18.8-209.8 \AA ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) 26.99-94.85 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ ค่าความร้อน (HHV) 16.08-29.18 MJ/kg และค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำ (WHC) 30.08-97.62 wt.%

คุณสมบัติถ่านชีวภาพเหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ปรับปรุงดิน ลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนด้วยการเพิ่มและกักเก็บคาร์บอนในดิน เพิ่มอินทรีย์คาร์บอนรวมในดินและลดการสลายตัวของมวลรวมของดิน พัฒนาลักษณะทางกายภาพของดิน และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งหมุนเวียนได้ ปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สของเตาถ่านชีวภาพสูงสุดพบว่ามีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ 813 PPM ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ 9 PPM ก๊าซออกซิเจน 17.3% และฝุ่นละออง 0.511 PPM ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษทางอากาศเทียบกับการเผาในพื้นที่เกษตร ประสิทธิภาพทางความร้อน (Water Boiling Test) สูงสุด 26.8% สามารถนำไปต่อยอดการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบสูงสุด 51.0% ในส่วนของเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนและมูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้ ช่วยก่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเศรษฐกิจ อีกทั้งยังปกป้องสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ, ไบโอชาร์, ไพโรไลซิส, เศษวัสดุเกษตร, เตาถ่านชีวภาพ

Title	FACTORS EFFECTING ON BIOCHAR PRODUCTION FROM AGRICULTURAL RESIDUE.
Author	Miss Lalita Petchaihan
Degree	Master of Engineering in Agricultural Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Thanasit Wongsiriamnuay

ABSTRACT

At present, there are various methods of biochar production. The quality of biochar produced varies. The conventional kiln used for biochar production operates for more than 7 hours throughout the biochar production period, with the process was not under constant control. It also uses a large heat source, resulting in low production efficiency.

The objective of this research was to study the properties of biochar from agricultural residues such as corn cobs, rice husks, longan husks, coffee shells, and longan branches by experimental design using a biochar kiln with a capacity of 3 sizes (50, 100 and 200 liters) and took 1-3 hours in the testing process. The experiment had an average temperature control in the kiln not exceeding 600 degrees Celsius to study the factors affecting the properties of the biochar, energy cost analysis, production cost, value of biochar, system performance test, including the economics of biochar kiln. Before the experiment, a 50-liter prototype kiln was studied to design and study the factors of the biochar kiln that affected the production process and preliminary testing was performed to be used as an option or to determine the variables and scope of the study for analysis of the test results.

The results of research on biochar from agricultural residues showed that the temperature distribution of the kiln interior and pyrolysis products with all 3 kiln sizes had a mean temperature range and a maximum yield at a 3-hour experiment: biochar yield of 27.6-51.1 wt.%, the gas yield of 32.9-68.5 wt.% and an average

temperature distribution range of 281.6 ± 363.3 to 352.9 ± 529.0 °C. The results of the study on biochar were found that pH value (pH) was 6.56-8.66. The electrical conductivity (EC) was 0.25-0.90 dS m⁻¹. The mineral composition by X-ray spectroscopy (XRF) contained important plant nutrients: Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sb, Ba, Th, U, Al, etc. Proximate analysis showed that the moisture content of the group was 1.88-6.47 wt.%, ash content was 2.42-38.55 wt.%, volatile matter was 14.12-40.27 wt.% and fixed carbon was 33.38-69.87 wt.%. Ultimate analysis showed that carbon was 43.25-74.94%, hydrogen was 1.82-4.16%, sulfur was 0.02-0.07%, oxygen was 10.57-25.54% and nitrogen was 0.29-1.58%. Gross heating value was 3,793-6,734% and net heating value was 3,613-6,556%. Oxygen-carbon ratio (O/C) was 0.14-0.39, hydrogen-carbon ratio (H/C) was 0.32-0.96 and carbon-nitrogen ratio (C/N) was 45-287. Total carbon content was 371-654 mg/kg and total organic carbon was 409-646 mg/kg. Hydrogen-total organic carbon ratio (H/Corg) was 0.36-1.15. Biochar morphology (SEM) analysis and pore diameter and distribution by Image and Origin Pro programs ranged from 25.60 to 145.65 μm. Scanning electron microscope (SEM) and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), the element and mineral compositions were also analyzed, including C, O, Ca, K, P, Si, and Mg. BET Surface Area was 0.4-111.5 m²/g. Adsorption average pore diameter was 18.8-209.8 Å. Cation Exchange Capacity (CEC) was 26.99-94.85 cmol (+)/kg. The high heating value (HHV) was 16.08-29.18 MJ/kg and the water holding capacity (WHC) was 30.08-97.62 wt.%.

These biochar properties are suitable for soil improvement. reduces the effects of global warming by increasing and sequestering soil carbon, increases total organic carbon in the soil, reduces soil aggregate decomposition, develops physical characteristics, and can be used as a renewable solid fuel. The highest dust and gas content of the biochar kiln was found to contain 813 PPM of carbon monoxide in the combustion process. Nitrogen oxides were 9 PPM, oxygen was 17.3% and dust was 0.511 PPM which were within acceptable and below emissions standards compared to agricultural incineration. Thermal efficiency (Water Boiling Test) was found up to 26.8% and used to add heat to other uses. Analysis of the energy cost and efficiency of the system was up to 51.0%. In terms of the economics of the biochar kiln cost

and value of biochar, it can be able to create energy efficiency, reduces the burden of energy costs on the economy, and also protects the natural environment.

Keywords : Biochar, Pyrolysis, Agricultural residue, Biochar kiln



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานที่ผู้ทำวิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ และสติปัญญา จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ

ศาสตราจารย์ ดร.นคร ทิพย์าวงศ์ ที่ได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร สืบคำ ประธานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร ที่ช่วยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ ซึ่งช่วยตรวจสอบและแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง ซึ่งเป็นคณะกรรมการร่วมประเมินผลงานวิจัยฉบับนี้ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (ผู้ให้ทุน) และบริษัท ซูพรีม รีนิวเอเบิล เอ็นเนอร์ยี จำกัด (ผู้ร่วมให้ทุน) ได้สนับสนุนทุนงบประมาณตลอดโครงการ ประจำปีการศึกษา 2561 วันที่ 12 มี.ค. 2562 สัญญาเลขที่ MSD6210058

บริษัท ฮิลล์คอฟฟ์ จำกัด สนับสนุนวัสดุเหลือใช้จากการผลิตกาแฟ เพื่อใช้ในการนำมาผลิตไบโอชาร์และศึกษาคุณสมบัติไบโอชาร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้สนับสนุนทุนกักกันภูมิ ประจำปีการศึกษา 2561 อำนวยความสะดวกในด้านให้คำปรึกษา การแนะนำ และช่วยในการตรวจสอบแก้ไขเอกสารต่าง ๆ ตลอดเวลาในการเข้าศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้ความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และมีส่วนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาและเป็นกำลังใจให้

อย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้จัดทำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็น
อย่างสูง

ลลิตา เพชรใจหาญ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1	1
ความสำคัญและที่มา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
ขอบเขตของการวิจัย	8
บทที่ 2	9
ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	9
2.1 ทฤษฎี.....	9
2.1.1 ชีวมวล.....	9
2.1.2 ปฏิกริยาไพโรไลซิส	10
2.1.3 การจำแนกถ่านชีวภาพใช้คุณภาพเป็นเกณฑ์	11
2.1.4 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้.....	11
2.1.5 ปฏิกริยาและกระบวนการเผาไหม้.....	12
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3	23

วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 แผนดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	24
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเกษตร	24
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิง	25
3.2.3 ออกแบบ ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของเตาผลิตถ่านชีวภาพ.....	25
3.3 วิธีการผลิตถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์	28
3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่จะศึกษา	29
3.3.1 การผลิตถ่านชีวภาพ	29
3.3.2 อัตราการใช้เชื้อเพลิง	29
3.3.3 การวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุ.....	29
3.3.4 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ	30
3.3.5 การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน	30
3.3.6 การวิเคราะห์สัณฐานพื้นที่ผิวและรูพรุนและองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ	31
3.3.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ.....	31
3.3.8 การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่าง	31
3.3.9 การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า.....	32
3.3.10 การวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สและปริมาณฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้	32
3.3.11 การวิเคราะห์ค่า CEC ด้วย NH_4OA_c 1 N pH 7.....	33
3.3.12 การวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บน้ำ	34
3.3.13 การวัดการกระจายอุณหภูมิของเตาผลิตถ่านชีวภาพ	34
3.3.14 การวิเคราะห์แบบประมาณ	35
3.3.15 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	35
3.3.16 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนรวมทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม	35

3.3.17 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ.....	36
3.3.18 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม.....	38
บทที่ 4	39
ผลการทดลองและการวิเคราะห์	39
4.1 การกระจายอุณหภูมิกายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ได้จากการผลิตจากเตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร	39
4.1.1 การกระจายอุณหภูมิกายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร	39
4.1.2 การกระจายอุณหภูมิกายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร	42
4.1.3 การกระจายอุณหภูมิกายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร	44
4.2 คุณสมบัติความเป็นกรดต่างของถ่านชีวภาพ (pH-value)	47
4.3 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพ (Electrical Conductivity)	51
4.4 การวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ของถ่านชีวภาพ (X-ray fluorescence).....	56
4.5 คุณสมบัติของปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis).....	61
4.6 คุณสมบัติขององค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis).....	66
4.7 คุณสมบัติปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon).....	73
4.8 การวิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro	76
4.8.1 วิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (Scanning electron microscope: SEM).....	76
4.8.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro	83
4.9 การวิเคราะห์สัณฐานและองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ (SEM-EDX).....	89

4.10 พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของ ถ่านชีวภาพ (Adsorption average pore diameter)	93
4.11 คุณสมบัติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพ (Cation Exchange Capacity)	96
4.12 คุณสมบัติค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (Higher Heating Value).....	99
4.13 คุณสมบัติความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพ (Water Holding Capacity)...	103
4.14 การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้	105
4.15 ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ (Water Boiling Test).....	110
4.16 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ	113
4.17 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนในการผลิต และมูลค่าของถ่าน ชีวภาพที่ได้.....	114
บทที่ 5	125
สรุปและข้อเสนอแนะ	125
5.1 สรุปผลวิจัย.....	125
5.2 ข้อเสนอแนะ	129
5.3 ปัญหาที่พบในการศึกษา	129
ภาคผนวก.....	130
บรรณานุกรม.....	145
ประวัติผู้วิจัย.....	158

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางสถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย.....	2
ตารางที่ 2 องค์ประกอบสารอินทรีย์ของวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสโดยเครื่อง XRF ($g\ kg^{-1}$).....	3
ตารางที่ 3 องค์ประกอบแร่ธาตุของแกลบและน้ำมันชีวภาพ (wt.%).....	4
ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนการเกิดชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตที่ใช้ประเมินปริมาณการเกิดชีวมวลแต่ละชนิด	4
ตารางที่ 5 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ	6
ตารางที่ 6 แสดงอัตราการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการ ผลจากการทดสอบ	28
ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าการรดต่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	49
ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	53
ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) ของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ.....	64
ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	71
ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนและแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ.....	95
ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	98
ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	101

ตารางที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพที่ได้จาก การศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ... 104	104
ตารางที่ 15 แสดงรายการบางส่วนในการการวิเคราะห์ต้นทุน (Lehmann and Joseph, 2009). 114	114
ตารางที่ 16 แสดงต้นทุนคงที่ระยะเวลาการใช้งานเครื่องจักร 5 ปี..... 115	115
ตารางที่ 17 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 116	116
ตารางที่ 18 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพ ขนาด 100 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 116	116
ตารางที่ 19 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพ ขนาด 200 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 117	117
ตารางที่ 20 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 118	118
ตารางที่ 21 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 119	119
ตารางที่ 22 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรต่อรอบการผลิต..... 119	119
ตารางที่ 23 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง..... 120	120
ตารางที่ 24 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 100 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง..... 121	121
ตารางที่ 25 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง..... 122	122

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ตัวอย่างการผลิตถ่านชีวภาพ.....	7
ภาพที่ 2 ตัวอย่างถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด.....	7
ภาพที่ 3 อุปกรณ์ในการผลิตถ่าน (อรสา, 2553).....	13
ภาพที่ 4 แผนภาพเตา Anila type-IBI Biochar (เตาแอนนิลา, 2561).....	14
ภาพที่ 5 อุปกรณ์ทำเตาเผาชีวภาพ (พินิจภณและอนัญญา, 2560).....	16
ภาพที่ 6 แผนการดำเนินงานวิจัย	23
ภาพที่ 7 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กดัดใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b).....	26
ภาพที่ 8 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กดัด ใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b).....	27
ภาพที่ 9 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กดัด ใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b).....	27
ภาพที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล	35
ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	40
ภาพที่ 12 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร จาก เศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	41
ภาพที่ 13 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	43
ภาพที่ 14 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร จาก เศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	44
ภาพที่ 15 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	45

ภาพที่ 16 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร จาก เศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c).....	46
ภาพที่ 17 แผนภูมิแสดงค่ากรดต่างของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง.....	48
ภาพที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบค่ากรดต่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ.....	48
ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง.....	52
ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ	52
ภาพที่ 21 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง.....	58
ภาพที่ 22 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง.....	60
ภาพที่ 23 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง.....	61
ภาพที่ 24 แผนภูมิแสดงปริมาณความชื้น (moisture content: MC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุ เกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	62
ภาพที่ 25 แผนภูมิแสดงปริมาณเถ้า (ash content: Ash) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตา ถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	62
ภาพที่ 26 แผนภูมิแสดงปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุ เกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	63
ภาพที่ 27 แผนภูมิแสดงปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุ เกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	63

ภาพที่ 28 แผนภูมิแสดงปริมาณคาร์บอน (C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	67
ภาพที่ 29 แผนภูมิแสดงปริมาณไฮโดรเจน (H) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	67
ภาพที่ 30 แผนภูมิแสดงปริมาณกำมะถัน (S) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	68
ภาพที่ 31 แผนภูมิแสดงปริมาณออกซิเจน (O) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	68
ภาพที่ 32 แผนภูมิแสดงปริมาณไนโตรเจน (N) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	69
ภาพที่ 33 แผนภูมิแสดงปริมาณ Gross Heating Value ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่าน ชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	69
ภาพที่ 34 แผนภูมิแสดงปริมาณ Net Heating Value ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่าน ชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	69
ภาพที่ 35 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	70
ภาพที่ 36 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	71
ภาพที่ 37 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	71
ภาพที่ 38 แสดงปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่าน ชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	74
ภาพที่ 39 แสดงปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	74
ภาพที่ 40 แสดงอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/C _{org}) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จาก เตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	75

ภาพที่ 41 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b)
1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)..... 77

ภาพที่ 42 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b) ... 79

ภาพที่ 43 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b)
1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)..... 80

ภาพที่ 44 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b) .. 81

ภาพที่ 45 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b)
1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)..... 82

ภาพที่ 46 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b) .. 83

ภาพที่ 47 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ
Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3
ชั่วโมง..... 84

ภาพที่ 48 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนกับงานวิจัย
(Binh and Kajitvichyanukul, 2019)..... 84

ภาพที่ 49 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ
Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่ง
ลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 86

ภาพที่ 50 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ
Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่ง
ลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 87

ภาพที่ 51 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 89

ภาพที่ 52 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 91

ภาพที่ 53 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 91

ภาพที่ 54 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 92

ภาพที่ 55 แสดงพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 94

ภาพที่ 56 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (Adsorption average pore diameter) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 94

ภาพที่ 57 แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 97

ภาพที่ 58 แสดงค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 100

ภาพที่ 59 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ 100

ภาพที่ 60 แสดงค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง 103

ภาพที่ 61 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 107

ภาพที่ 62 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 109

ภาพที่ 63 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลาकाแพ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	110
ภาพที่ 64 แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 3 ขนาด โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	111
ภาพที่ 65 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกลำไย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลาकाแพ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	112
ภาพที่ 66 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกลำไย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลาकाแพ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	112
ภาพที่ 67 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกลำไย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลาकाแพ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	113
ภาพที่ 68 แสดงความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 3 ขนาด โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	114
ภาพที่ 69 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ระยะเวลา 3 ชั่วโมง	118
ภาพที่ 70 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	120
ภาพที่ 71 แสดงจุดพอตีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	123

บทที่ 1

ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากประเทศไทย เป็นประเทศที่มีทรัพยากรมีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายการพัฒนาพลังงานทดแทน ที่มีเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นในทุกภาคส่วนของสังคม นอกจากจะเป็นการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ยังเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย “จากการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปัจจุบัน จะใช้พลังงานที่ผลิตภายในประเทศเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังน้ำขนาดใหญ่ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอลและไบโอดีเซล) โดยที่การใช้พลังงานทดแทนดังกล่าวจะใช้ในรูปแบบของไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ ” (แสดงดังตารางที่ 1) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

จากผลการสำรวจพืชทางเลือกใหม่ เป็นแนวทางการพัฒนาพืชเศรษฐกิจ ช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ กาแฟ และลำไย จัดอยู่ในกลุ่มพืชพลังงานทดแทน พืชเศรษฐกิจของประเทศและยังมีองค์ประกอบทางเคมีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญต่อมนุษย์ และมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารของประเทศ และอุตสาหกรรมในด้านนี้ของไทย มีศักยภาพอีกมากในการผลิต เพื่อบริโภคและส่งออก และเศษวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวหรือจากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตรมีปริมาณมาก สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานทดแทน ผลิตสารปรับปรุงดิน หรือผลิตภัณฑ์อีกนานาชนิด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) โดยสามารถศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษวัสดุเกษตร เช่น ชังข้าวโพด (แสดงดังตารางที่ 2) และแกลบ (แสดงดังตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 ตารางสถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย

การใช้พลังงานทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)					อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
	2556	2557	2558	2559	2560	
1. ไฟฟ้า ^{1/2/} (แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำขนาดเล็ก พลังน้ำขนาดใหญ่ ชีวมวลขยะและก๊าซชีวภาพ)	1,341	1,467	1,556	2,122	2,473	16.5
2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และก๊าซชีวภาพ)	5,279	5,279	6,579	7,182	7,322	1.9
3. เชื้อเพลิงชีวภาพ	1,612	1,783	1,942	1,747	1,936	10.8
• เอทานอล	707	874	879	684 ^{3/}	733	7.2
• ไบโอดีเซล	905	909	1,063	1,063	1,203	13.2
รวม	8,232	9,025	10,077	11,051	11,731	6.2

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

หมายเหตุ

1/ รวมการผลิตไฟฟ้านอกระบบ

2/ เริ่มรวมพลังน้ำขนาดใหญ่ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2558

3/ มีการเปลี่ยนวิธีคำนวณค่าความร้อนจากน้ำมันเบนซินเป็นเอทานอล

ตารางที่ 2 องค์ประกอบสารอนินทรีย์ของวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสโดยเครื่อง XRF (g kg^{-1}).

	ช่วงข้าวโพด	ช่วงข้าวโพดหลังกระบวนการ
Si	5.33	27.9
Al	0.18	5.09
Fe	0.08	2.35
Ca	0.23	3.25
Mg	0.55	2.34
Na	0.10	0.23
K	10.38	4.44
Ti	0.003	0.37
Mn	0.01	0.98
P	1.11	2.15
Ba	0.11	0.02
Sr	0.002	0.005
S (Inorganic)	0.14	0.05

(Mullen, Boateng et al., 2010)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบแร่ธาตุของแกลบและน้ำมันชีวภาพ (wt.%)

องค์ประกอบแร่ธาตุ	แกลบ	น้ำมันชีวภาพ
Ultimate analysis ^a		
คาร์บอน	38.69	39.92
ไฮโดรเจน	5.40	8.15
ไนโตรเจน	0.67	0.61
ซัลเฟอร์	0.21	0.03
ICP-AES analysis ^a		
ซิลิกอน	6.82	0.096
โพแทสเซียม	0.36	0.0094
แคลเซียม	0.16	0.0056
แมกนีเซียม	0.051	0.0021
โซเดียม	0.009	0.0006
แมงกานีส	0.033	0.0014
เหล็ก	0.0055	0.0597
อะลูมิเนียม	0.0070	0.0006
ฟอสฟอรัส	0.0310	0.0014

(Lu, Yang et al., 2008)

ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนการเกิดชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตที่ใช้ประเมินปริมาณการเกิดชีวมวลแต่ละชนิด

ชนิด ชนิดพืช	ชนิดชีวมวล	สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (ตัน/ตันผลผลิต)
ข้าว	ฟางข้าว	0.49
	แกลบ	0.21
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ยอด ใบและลำต้น	1.84
	ซังข้าวโพด	0.24

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

เนื่องจากปริมาณเศษวัสดุจากเกษตร หรือชีวมวลมีปริมาณคงเหลือที่มาก (แสดงดังตารางที่ 4) การนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นค่อนข้างใช้ระยะเวลาาน เช่น การหมักปุ๋ยหมักด้านการเกษตร ต้องใช้ระยะเวลาในการหมักการย่อยสลายอย่างต่ำ 3 เดือน อีกทั้งอาจยังส่งกลิ่นเหม็นหากกระบวนการทำให้เกิดข้อผิดพลาด และวัสดุที่เหลือทางเกษตรส่วนมากเกษตรกรนำไปเผาทิ้งทำลาย เนื่องจากต้องการเตรียมพื้นที่ทำเกษตรและด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ จึงก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เกิดปัญหาดินเสื่อมโทรม ขาดปริมาณแร่ธาตุ สิ่งมีชีวิตในดินตายจากการเผา ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยทำการเกษตรเพิ่มขึ้น เกิดมลพิษทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อชีวิตมนุษย์และโลก อีกทั้งยังส่งผลทำให้เกิดโรคร้าย เช่น โรคระบบผิวหนังจากการใช้สารเคมี โรคระบบหายใจจากการเผาทิ้งทำลาย ดังนั้นจึงได้ศึกษากระบวนการนำเศษวัสดุเกษตรที่เหลือทิ้งมาก่อให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ และนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการ

ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมากเรียกกระบวนการนี้ว่าการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลัก ๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็วและอย่างช้า การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิเฉลี่ย 500 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 700 องศาเซลเซียส วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน หรือผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้วจะได้ถ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม แต่จะเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาทำถ่านชีวภาพ เมื่อนำมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม ถ่านชีวภาพช่วยปรับสภาพดิน โดยถ่านชีวภาพนั้นมีสถานะเป็นประจุลบ สามารถดูดซับหรือจับธาตุอาหารที่เป็นบวกได้ดีช่วยทำให้ดินมีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ เมื่อทำการเพาะปลูกพืชจะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดี นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีคุณสมบัติ (แสดงดังตารางที่ 5) ที่สำคัญคือมีพื้นที่ผิวภายในมากโดยมีค่าประมาณ 10-400 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิในการเผา ถ่านชีวภาพมีความคงตัวสูงย่อยสลายได้ช้าจึงช่วยกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้ยาวนานและไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ด้วยลักษณะทางกายภาพ มีประจุไฟฟ้าและมีความพรุนสูง สามารถกักเก็บน้ำและเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวสร้างสารอาหารในดินทำให้ดินชุ่มชื้นและอุดมสมบูรณ์ปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้า ๆ เพิ่มคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ให้สูงขึ้นสร้างความสมดุลให้กับระบบนิเวศน์

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ	คุณสมบัติ
1. องค์ประกอบของธาตุ	คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์
2. ความคงตัว	สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
3. พื้นที่ผิวจำนวนมาก	ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นที่ผิวทั้งภายนอกและภายใน รูพรุนได้
4. มีความพรุนจำนวนมาก	ช่วยกักเก็บน้ำทำให้ดินมีรูพรุนไม่จับตัวแน่นและเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์
5. มีสถานะเป็นประจุลบ	ช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกทำให้มีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ ช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชอย่างช้า ๆ ช่วยปรับค่า pH ของดินและน้ำ และช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

(พินิจภณและอนัญญา, 2560)

ในปัจจุบันมีวิธีการผลิตถ่านชีวภาพหลากหลายรูปแบบ มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตหลายปัจจัยด้วยกัน และปัจจัยที่เป็นหัวใจสำคัญของการผลิตถ่านชีวภาพ คืออุณหภูมิในกระบวนการและการออกแบบเตา เป็นการออกแบบเพื่อใช้ในกระบวนการการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) เป็นการนำถ่านเหล็กรูปแท่งหรือถ่านน้ำมันที่มีขายตามท้องตลาดมาตัดแปลง โดยใช้หลักการทางวิศวกรรมในการออกแบบ ดังนั้นจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ตั้งนี้เพื่อศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุทางการเกษตร เพื่อออกแบบและศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อทดสอบหาอัตราส่วนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุทางการเกษตร และความคุ้มค่าและเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการผลิตถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 2 ตัวอย่างถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพ ที่ได้จากงานวิจัย
2. เพื่อออกแบบและศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ
3. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนในการผลิต มูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้ ทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ที่มีคุณสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ที่ได้มาตรฐานสำหรับการนำไปใช้การปรับปรุงดิน
2. ผลการวิเคราะห์การผลิตถ่านชีวภาพจากต้นแบบที่ขนาดปริมาตร 50 100 และ 200 ลิตร

3. ผลการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนการผลิต มูลค่าของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

4. เป็นการจำกัดขยะ หรือวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร และลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร มาเปลี่ยนสภาพเป็นสารปรับปรุงดิน ลดการใช้สารเคมี และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบที่สภาวะเดียวกัน
2. ในการทดสอบใช้เศษวัสดุเกษตร จำนวน 5 ชนิด เช่น ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เป็นต้น
3. วัสดุในการทดสอบไม่มีการลดขนาด
4. ปริมาณเศษวัสดุเริ่มต้นการทดสอบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเศษวัสดุเกษตร
5. ความต่อเนื่องและสภาวะในการทดสอบ
6. ในการทดสอบความชื้นของวัสดุเกษตร ไม่เกิน 10% (w.b.)
7. ชนิดวัสดุที่ใช้ทำเตาถ่านชีวภาพ
8. ชนิดเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบเผา
9. หลังจากทดสอบลดอุณหภูมิโดยการ cool down คือการทำให้เย็นลง

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง “วัสดุ หรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ ชีวมวลนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชน” เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ “คือคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของ ไนโตรเจนและธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรต หรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และรวมไปถึงสิ่งต่าง ๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน เป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่น ๆ โดยทั่วไปชีวมวลอาจจำแนกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไมใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์” (นคร, ธนศิษฐ์ และคณะ, 2553)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล ส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์เพื่อนำความร้อนที่เกิดขึ้นใช้ในการต้มน้ำให้มีความดันและอุณหภูมิสูงไปขับเคลื่อนไอน้ำในการผลิตไฟฟ้าและพลังงานความร้อนร่วมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าในอีกรูปแบบหนึ่งโดยอาศัยหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลในที่จำกัดปริมาณอากาศด้วยการแปลงสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง หรือการแปลงสภาพให้เป็นน้ำมันชีวภาพของเหลวก่อน (นคร, 2553)

ลิกโนเซลลูโลส หมายถึง “ชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ ของพืชได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวงฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือนรวมถึงมูลสัตว์ต่าง ๆ” (อรุณี, 2561)

ซังข้าวโพด คือ “ส่วนหนึ่งของข้าวโพดที่เหลือจากการสีเมล็ดข้าวโพดออกไป เมื่อก่อนเกษตรกรจะไม่ได้ใช้ประโยชน์จากซังข้าวโพด บางรายทิ้งให้ย่อยสลายไปเอง หรือในบางรายก็นำมาเผาทิ้งเพื่อเตรียมพื้นที่ปลูกในฤดูกาลถัดไป จนกระทั่งมีการศึกษาและนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม ทำให้ซังข้าวโพดในปัจจุบันเป็นสิ่งที่มียุทธศาสตร์ ในซังข้าวโพดให้ค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 3,000 kcal/kg. ซังข้าวโพด มีความชื้น >30-20 และได้มีการนำมาผลิตพลังงานไฮโดรเจนตลอดถึงก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทั้งน้ำตาลกลูโคส และไซโลส ที่เหลืออยู่ในเศษพืชเป็นต้นกำเนิด” (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์, 2561)

“แกลบ คือส่วนที่เหลือจากการสีข้าวเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันแกลบนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำให้เกิดพลังงานความร้อน ผสมกับวัสดุอื่นในการทำอิฐและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ และนำไปใช้ทำปุ๋ย องค์ประกอบของแกลบนั้นประกอบด้วยสารอนินทรีย์อยู่ประมาณ 20-25% เซลลูโลส 30-40% ลิกนิน 19-47% และน้ำตาลประมาณ 17-26% โดยในส่วนของสารอนินทรีย์นั้น องค์ประกอบหลักก็คือซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ 85-99% นอกจากนั้นยังมี Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO และอื่น ๆ ซึ่งปริมาณซิลิกา” (คชินท์, 2561)

2.1.2 ปฏิกริยาไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถแปลงสภาพชีวมวลให้กลายเป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) ก๊าซ และถ่านชาร์ ได้ที่สภาวะไร้ออกซิเจน สัดส่วนที่เป็นของเหลวสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยเทคนิคไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (fast pyrolysis) ซึ่งอาจได้ถึง 70% ของชีวมวลที่ใส่เข้าไป ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสนี้มีออกซิเจนกีดกันสูง หากมีการปรับปรุงคุณภาพ น้ำมันชีวภาพนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ได้ การปรับปรุงคุณภาพอาจทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับไฮโดรเจน (hydrogenation) เพื่อลดสัดส่วนออกซิเจนในของเหลว ซึ่งยังมีความซับซ้อน และข้อด้อยด้านพลังงานและราคาที่เกี่ยวข้อง ลักษณะของการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อนหลัก กระบวนการไพโรไลซิส อุณหภูมิ 250-900 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ผลิตภัณฑ์ก๊าซ H_2 , CO , H_2O , N_2 , hydrocarbons ผลิตภัณฑ์ของแข็ง ถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ของเหลว bio-oil, water ข้อมูลสมรรถนะและการสาธิตกระบวนการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน กระบวนการไพโรไลซิส มีช่วงขนาด < 500 kWth มีประสิทธิภาพ 60-70% พลังน้ำมันต่อวัตต์ดูบป้อน ส่วนสถานการณ์การนำไปใช้ ยังไม่มีเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ถือเป็นทางเลือกทางหนึ่ง (นคร, 2552)

การไพโรไลซิสคือกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 500-800 °C โดยได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อนมวลชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้แก่ เศษพืชที่เหลือทิ้งจากการเกษตร หรือจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ส่วนวิธีการให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท Conventional pyrolysis หรือ Slow pyrolysis ซึ่งอัตราการให้ความร้อนน้อยกว่า 10 °C/s และอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่า 500 °C โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็น น้ำมันดินและถ่าน และอีกประเภทหนึ่งคือ Flash หรือ Fast pyrolysis ซึ่งอัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 10,000 °C/s และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1,000 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สและของเหลวเป็นส่วนใหญ่ (ปิยรัตน์ ชัยยศ และคณะ, 2549)

2.1.3 การจำแนกถ่านชีวภาพใช้คุณภาพเป็นเกณฑ์

โดยดูจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี การเผาไหม้และคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

1. Proximate analysis “เป็นการวิเคราะห์ในเบื้องต้น เพื่อหาปริมาณของความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และปริมาณคาร์บอน (fixed carbon) ในถ่านชีวภาพ”
2. Ultimate analysis “การวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงเพื่อใช้หาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยหาปริมาณธาตุต่าง ๆ ในถ่านหิน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และคลอรีน”
3. การวิเคราะห์การเผาไหม้ ได้แก่ “การหาค่าความร้อน (specific energy or calorific value) คุณสมบัติในการบด (hard grove grindability) อุณหภูมิหลอมละลายของเถ้า (ash fusion temperature) และส่วนประกอบทางเคมีของเถ้า (ash composition analysis)”

2.1.4 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

เชื้อเพลิง หมายถึง “สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือออกซิเจน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้งานได้คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการจะนำสิ่งใดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้นจำเป็นต้องสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก สามารถจัดหามาใช้ได้อย่างสะดวกเก็บรักษาขนส่งและใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ไอเสีย ควัน เป็นต้น ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ทางอากาศ ทางน้ำ ฯลฯ เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพ เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง”

เชื้อเพลิงแข็ง หมายถึง “เชื้อเพลิงที่ใช้งานในสภาพที่เป็นของแข็งเชื้อเพลิงหลัก ๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ พีท ไม้ ฯลฯ และเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำเชื้อเพลิงธรรมชาติ

มาเผาถ่าน (Carbonization) เช่น ถ่านโค้ก (Coke) ถ่านเซมิโค้ก ((Semi-coke) ถ่านลิกไนต์โค้ก (Lignite coke) และถ่านไม้.” เป็นต้น

2.1.5 ปฏิกริยาและกระบวนการเผาไหม้

ปฏิกริยาเผาไหม้มีลักษณะเด่น “เป็นปฏิกริยาอุณหภูมิต่ำและความเร็วสูง ที่ประกอบด้วยอะตอมและอนุโมลอิสระรวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกริยาจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลทางกลศาสตร์ของก๊าซ กล่าวคือปฏิกริยาเผาไหม้ทั่วไป ปฏิกริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซไม่ว่าเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็ง หรือของเหลวเมื่อเริ่มเผาไหม้จะเกิดกลายเป็นไอก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชันเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นก๊าซของเหลว หรือของแข็งจะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ฯลฯ ที่ทำพันธะกันในรูปแบบต่าง ๆ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนก่อให้เกิดแสงและความร้อน สุดท้ายแล้วเชื้อเพลิงจะกลายเป็น CO₂, H₂O ทั้งนี้แล้ววัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อนคือการใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้”

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lehmann, da Silva et al. (2003) ได้ศึกษามนุษย์รู้จักการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพมาเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้วโดยชุมชนพื้นเมืองในแถบลุ่มน้ำอะเมซอนของทวีปอเมริกาใต้ได้ใช้เศษพืชจากพื้นที่เพาะปลูกและมูลสัตว์เผาให้กลายเป็นถ่านชีวภาพ “ซึ่งเรียกชื่อตามภาษาท้องถิ่นว่า Terra Preta มีความหมายว่าโลกดำ (Black earth) หมายถึงสีของดินบริเวณนั้นมีสีคล้ำจนเกือบดำเนื่องจากดินดังกล่าวมีปริมาณธาตุอาหาร หรืออินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าพื้นที่ที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพถึง 3 เท่า ปัจจุบันพบว่าพื้นที่ที่เคยมีการใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่เกษตรกรรม เช่น เอกวาดอร์และเปรูในอเมริกาใต้ เบนินและไลบีเรียในแอฟริกาตะวันตก และทุ่งหญ้าสะวันนาในแอฟริกาใต้”

Sjostrom (1993) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลมีผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตอุณหภูมิสูงกว่า 120 °C เริ่มได้รับการสลายตัวทางความร้อนบางส่วน สูญเสียความชื้น สูญเสียองค์ประกอบทางเคมี เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายที่ 200 °C ถึง 260 °C เซลลูโลสที่ 240 °C ถึง 350 °C และลิกนินที่ 280 °C ถึง 500 °C และ (Michael Jr., 2003)(Kotula, Keenan et al., 2003) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการพัฒนาพื้นที่ผิวและความเข้มข้นเซลลูโลสถ่าน ค่าทั้งสองมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิระหว่าง 500 และ 600 °C ในทางกลับกันพื้นที่ผิวสูงสุด (500 m²/g) ของถ่านเซลลูโลสที่ถูกทำให้เป็นถ่านที่ 900 °C การวิเคราะห์องค์ประกอบของ

ถ่านจากซังข้าวโพด C 86.38, H 1.20, O 5.34, N 0.56, S 0.05, และ Ash 4.31 wt.% และ องค์ประกอบของถ่านจากแกลบ C 52.61, H 0.82, O 3.87, N 0.57, S 0.06, และ Ash 41.34 wt.% ตามลำดับ

อรสา (2553) ได้ศึกษาเตาผลิตถ่านประกอบด้วยถังเหล็กใช้แล้ว 2 ขนาด (ในการทำอาจใช้ถังใช้แล้วก็ได้) สามารถหาซื้อได้ตามร้านขายถังใช้แล้ว (แสดงดังภาพที่ 3) “และวัสดุเหลือใช้จะต้องมีความชื้นไม่เกิน 10% ในการนำมาใช้ควรตากแดดให้แห้ง เพราะถ้ามีความชื้นมากเกินไปความร้อนที่จะเป็นความร้อนในการทำให้ความชื้นหายไป นอกจากจะเสียเวลาในการผลิตถ่านแล้วยังทำให้เกิดควันมากเกินไป และไม่เกิดกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis)”

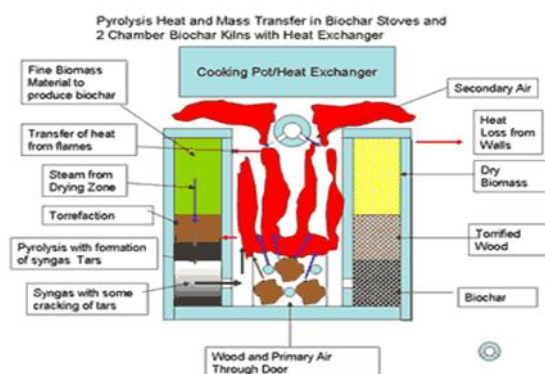


ภาพที่ 3 อุปกรณ์ในการผลิตถ่าน (อรสา, 2553)

Al-Wabel, Al-Omran et al. (2013) “กระบวนการไพโรไลซิส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อผลิตไบโอชาร์จากชีวมวลโคโนคาปัส (conocarpus) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (200, 400, 600 และ 800 °C) ภายใต้เงื่อนไขที่จำกัดด้วยออกซิเจน การวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric (TG) ของตัวอย่างไบโอชาร์ถูกนำมาใช้เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของไบโอชาร์ ในความสัมพันธ์อุณหภูมิ การวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอชาร์ได้จากการใช้ FTIR (Nicolet 6700 FTIR) ในช่วง 500-4000 cm^{-1} เพื่อระบุพื้นผิวอินทรีย์และกลุ่มฟังก์ชันสำหรับตัวอย่างไบโอชาร์ ผลที่ได้แสดงผลผลิตของไบโอชาร์ลดลงโดยการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิตั้งแต่ 51.33% เป็น 23.19% โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลผลิตของไบโอชาร์ลดลงจาก 51.33% ที่ 200 °C เป็น 31.86%, 27.22% และ 23.19% ที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 °C ตามลำดับ การลดลงของผลผลิตเป็นหลักเนื่องจากการสลายส่วนสารประกอบ เช่น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมทั้งการเผาไหม้ของวัสดุอินทรีย์ที่อุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น”

Sun, Gao et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอชาร์และไฮโดรซาร์จากวัตถุดิบหรือวัสดุ 3 ชนิด “ซึ่งได้แก่ ไม้ (HW), ชานอ้อย (BG), และไม้ไผ่ (BB) โดยผลิตไบโอชาร์จากเตาไฟฟ้า Olympic 1823HE ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน และใช้อุณหภูมิ 3 อุณหภูมิ (300, 450, และ 600 °C) และไฮโดรซาร์จากเตา Stainless steel autoclave ตั้งโปรแกรมเครื่องปฏิกรณ์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด (200 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ผลจากการทดลองพบว่าอัตรามวลผลิตของไบโอชาร์ มีตั้งแต่ 22.7-43.7% และไฮโดรซาร์ 27.8-48.4% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น วัสดุอุดมด้วยคาร์บอนประมาณ 45-46% องค์ประกอบปริมาณแร่ธาตุโดยทั่วไปแล้ว เมื่ออุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 600 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอน (C) เพิ่มขึ้นจาก 53% เป็น 83% แต่ปริมาณออกซิเจน (O) และไฮโดรเจน (H) ลดลงจาก 39% เป็น 11% และ 6% ถึง 2% ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณ N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe และ Al สรุปลักษณะสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบและตัวอย่างไบโอชาร์เป็นกรดอ่อน ๆ มีค่า pH เท่ากับ 5.8, 6.0 และ 6.6 ตามลำดับ ดังนั้นไบโอชาร์และไฮโดรซาร์ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงค่า pH ของดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช”

Lehmann and Joseph (2015) ได้ศึกษาเทคโนโลยีเตาถ่านชีวภาพ “ถ่านสามารถเก็บรักษาได้หากนำออกมาในเวลาที่เหมาะสมและไฟดับลง เตาประเภทแอนนิลา (Anila) ที่ทันสมัยได้รับการพัฒนาโดยสหประชาชาติ Ravikumar นักสิ่งแวดล้อมและวิศวกรผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีด้านการเกษตรที่เหมาะสม (CART) ที่สถาบันวิศวกรรมแห่งชาติอินเดีย เตาประเภทนี้จะใช้กระบอกศูนย์กลางสองเส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ซิวมวลถูกวางไว้ระหว่างกระบอกสอง และใช้เชื้อเพลิงจุดไฟลุกตรงกลาง ความร้อนที่ได้จากกระบวนการ จะได้แก๊สจะแพร่ไปยังรอบ ๆ จุดศูนย์กลางซึ่งจะเพิ่มเปลวไฟสามารถนำไปทำอาหาร และชีวมวลจะกลายเป็นถ่าน ห้องเผาไหม้กลางสามารถกำหนดค่าได้ที่มีการเผาไหม้อากาศหลักจากด้านล่าง” (ภาพที่ 4 Anila ของ Stephen Joseph)



ภาพที่ 4 แผนภาพเตา Anila type-IBI Biochar (เตาแอนนิลา, 2561)

ศิริลักษณ์และพิทยา (2558) ได้ศึกษางานวิจัยเรื่องการพัฒนาการเรียนรู้ การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร เรื่องการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดิน “ซึ่งการกักเก็บคาร์บอนลงดินเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก ขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร โดยใช้วิธีแยกสลายด้วยความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิส และขั้นตอนการนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มาปรับปรุงดินในแปลงทดลองปลูกผักคะน้า 6 แปลง โดยกำหนดให้ 1 แปลงเป็นแปลงควบคุม อีก 5 แปลงที่เหลือใส่ปุ๋ยหมักและถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนปุ๋ยหมักต่อถ่านชีวภาพ 50:50 ให้ผลผลิตเช่นเดียวกับแปลงที่ใส่ปุ๋ยหมักอย่างเดียว ขณะที่อัตราส่วน 75:25 ให้ผลผลิตดีกว่าแปลงที่ใส่ปุ๋ยหมักอย่างเดียว เพราะนอกจากช่วยปรับปรุงดินแล้วยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วย”

ภราภรณ์ และคณะ (2560) ได้ศึกษาการหมุนเวียนวัสดุแกลบที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตข้าวโดย “ผลิตเป็นถ่านแกลบชีวภาพ (rice husk biochar, RHB) คืนสู่ระบบการปลูกข้าว เพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และเพิ่มผลผลิตพืช การศึกษาบทบาทของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุอาหารพืช (แมงกานีส เหล็ก ทองแดง และสังกะสี) งานวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบผลของการใช้ถ่านแกลบชีวภาพอัตรา 0.5, 0.1 และ 2.0 ตันต่อไร่ ต่อการเปลี่ยนแปลงจุลธาตุอาหารพืชในสารละลายดิน สัดส่วนจุลธาตุอาหารพืชในดิน และการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ กข31 ที่ปลูกในดินนาเหนียว ผลการศึกษาพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพในอัตราสูง (RHB2.0) ลดค่าพีเอชดินต่ำกว่าควบคุม และส่งเสริมการละลายของธาตุเหล็กและแมงกานีสในสารละลายดินระหว่างการเจริญเติบโตของข้าว”

รัตชลและคณะ (2560) ได้ศึกษาสมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพดและศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ไบโอชาร์ที่ในการศึกษาได้จากการใช้เตาผลิตแบบแอนนิลา “โดยใช้เศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นวัตถุดิบในการผลิต สมบัติของไบโอชาร์ที่ศึกษา ได้แก่ สัมฐานของพื้นผิวด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดของช่องว่าง และพื้นที่ผิว ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ การวิเคราะห์องค์ประกอบสารและโครงสร้างผลึก ใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ค่าความเป็นกรดต่างและค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณคาร์บอน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ปริมาณโพแทสเซียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม, โซเดียม และฟอสฟอรัส ผลการศึกษาพบว่าไบโอชาร์มีลักษณะพื้นผิวที่มีความพรุนสูง มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $93.36 \text{ m}^2/\text{g}$ มีขนาดช่องว่างเฉลี่ย 30.24 \AA เปรอร์เซ็นต์ของแร่ออกไซด์ต่อน้ำหนักของไบโอชาร์ ส่วนใหญ่เป็นซิลิกาประมาณ 30.4 เปรอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของไบโอชาร์พบว่ามีค่าความเป็นกรดต่าง 7.76 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 46.06 cmol/kg จัดว่า

มีค่าสูงมาก มีปริมาณโซเดียมทั้งหมด 240 mg/kg ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 23,323 mg/kg ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด 1,407 mg/kg และ ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด 990 mg/kg ปริมาณฟอสฟอรัสนำไปใช้ได้ 421.22 mg/kg มีปริมาณคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ 52.77 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจน 1.09 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณซัลเฟอร์ 0.049 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 48.41 จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบว่าไบโอชาร์มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทั้งการเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำ การแลกเปลี่ยนประจุบวกเพื่อยึดธาตอาหาร และการเพิ่มธาตอาหารในดินโดยตรง”

พินิจภณและอนัญญา (2560) ได้ศึกษาอุปกรณ์ในการทำเตาเผาถ่านชีวภาพ (แสดงดังภาพที่ 5) “เป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด นำมาประดิษฐ์เป็นเตาเผาถ่านและผลิตน้ำส้มควันไม้ เพื่อนำน้ำส้มควันไม้ที่สกัดได้ มาใช้เป็นสารไล่แมลง กำจัดมด และปลวก ซึ่งเตาเผาถ่านชีวภาพที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถควบคุมอุณหภูมิและอากาศที่จะเข้าสู่เตาได้ ส่งผลให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพดี”



ภาพที่ 5 อุปกรณ์ทำเตาเผาชีวภาพ (พินิจภณและอนัญญา, 2560)

Chaiyaraksa, Jaipong et al. (2017) ได้ศึกษาโลหะปนเปื้อนดินเป็นปัญหาที่สำคัญในประเทศไทย “ซึ่งพืชที่ปลูกในพื้นที่นี้จะดูดซับโลหะและผลกระทบในวงกว้างทั่วทั้งห่วงโซ่อาหาร ไบโอชาร์บางชนิดสามารถลดผลกระทบดังกล่าว งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาแคดเมียมสังกะสีและการดูดซับตะกั่ว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด ได้รับการคัดเลือกในการผลิตไบโอชาร์ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนสูง ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ลักษณะทางเคมีของไบโอชาร์เหล่านี้ ลักษณะทางเคมีของวัสดุทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน ทั้งสองเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีค่า pH 10 และอัตราร้อยละของ C และ TOC รวมแคดเมียมตะกั่วและสังกะสี ได้เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้เป็นไปตามมาตรฐานความเป็นพิษแนะนำโดยนานาชาติ ความสามารถความสามารถในการบำบัดเพอร์และกรดวางตัวเป็นกลางมีการ

ตรวจสอบโดยการเพิ่มกรดและวิธีการแก้ปัญหาชั้นพื้นฐานจนถึงค่า pH ถึง 2-12 ความสามารถในการบัพเฟอร์ของไบโอชาร์ทั้งสองชนิดค่อนข้างสูง ค่าของความสามารถในการวางตัวเป็นกลางของกรด (ANC) ของไบโอชาร์ ผลิตจากเปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุดเป็น 1,464.80 เมกะไบต์/กก. และ 1,328.98 มิลลิควิวาเลนท์/ กก. ตามลำดับ การศึกษา รวมถึงไอโซเทอมการดูดซับ Freundlich เป็นไอโซเทอมที่เหมาะสมที่จะอธิบายการดูดซับของทั้งสามโลหะโดยไบโอชาร์จากเปลือกทุเรียนในขณะที่ไอโซเทอม Langmuir จะดีกว่าที่จะอธิบายการดูดซับโลหะโดยไบโอชาร์จากเปลือกมังคุด ความจุในการดูดซับของไบโอชาร์ทั้งสองชนิด ก็ไม่ได้แตกต่างกันมาก”

Pituya, Sriburi et al. (2017) ได้ศึกษาไบโอชาร์ถูกทำขึ้นจากไม้กระถินโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิส อุณหภูมิและเวลา “อุณหภูมิอยู่ในช่วง 300-500 °C ขณะเดียวกันเวลาที่แตกต่างกัน 1-3 ชั่วโมง การวิเคราะห์การถดถอยถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิว APD และค่า pH ของไบโอชาร์ (ตัวแปรตาม) และปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิและเวลา) ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอชาร์จากไม้กระถิน ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและอุณหภูมิ กระบวนการไพโรไลซิสและเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น อุณหภูมิ กระบวนการไพโรไลซิสมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (ในช่วงเวลาที่มีความเชื่อมั่น 95%) บนพื้นที่ผิว และ APD ของไบโอชาร์ ขณะเดียวกันเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสไม่ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไบโอชาร์จากไม้กระถิน ใช้ห้องปฏิบัติการเตาไฟฟ้าที่ 434.8 °C เวลา 1 ชั่วโมงที่ใช้อุณหภูมิ และกระบวนการไพโรไลซิส นอกจากนี้ในช่วงที่นำเสนอของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสเหมาะสมคือ 413-450 °C และช่วงเวลาไพโรไลซิสเหมาะสมเป็น 1-2 ชั่วโมง”

Pituya, Sriburi et al. (2017) ได้ศึกษาไบโอชาร์ที่ผลิตจากของเสียจากการเกษตรมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขดินที่เสื่อมโทรม “คุณสมบัติของไบโอชาร์จัดทำขึ้นจากไม้กระถินและกะลามะพร้าวตรวจสอบโดยเงื่อนไขกระบวนการไพโรไลซิสแตกต่างกันเพื่อระบุชีวมวลเริ่มต้นที่เหมาะสมในการนำไบโอชาร์มาใช้สำหรับการแก้ไขดินปนทราย กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าถูกนำมาใช้สำหรับการเตรียมไบโอชาร์ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้แตกต่างกันจาก 300, 400 และ 500°C ขณะเดียวกันเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสแตกต่างกันไป 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติไบโอชาร์มี SA, APD องค์ประกอบของธาตุ C, H, O และ N, ค่า pH, CEC และ WHC คุณสมบัติของไบโอชาร์จากไม้กระถินและไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว นำมาเปรียบเทียบโดยใช้จับคู่ t-test ในช่วงเวลาที่มีความเชื่อมั่น 95% ในการวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิจัยพบว่าประเภทของชีวมวลเริ่มต้นและเงื่อนไขในกระบวนการไพโรไลซิสที่มี

ผลกระทบต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์ สำหรับทั้งทางกายภาพและทางเคมี อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชนิดที่แตกต่างกันของมวลชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญผลกระทบต่อ SA, C และ O เนื้อหาค่า pH, CEC และ WHC ของไบโอชาร์ เตรียม ($P < 0.05$) คุณสมบัติของไบโอชาร์จากไม้กระถินระบุว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมมากกว่าไบโอชาร์จากกะลามะพร้าวที่จะนำไปใช้เป็นปรับปรุงดินทรายอันเนื่องมาจาก SA, CEC ที่สูงขึ้นและค่า pH เป็นกลาง ในขณะที่เดียวกันไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้สำหรับดินทั่วไปที่เหมาะสมและเพิ่มผลผลิตพืช C และ O”

Turan, Khan et al. (2018) “ธาตุอาหารไนโตรเจนที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทางการเกษตร เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการชะล้างแอมโมเนียมจากพื้นที่ทางการเกษตรโดยการใช้ถ่านไม้ไผ่ชีวภาพ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (100.47 ตารางเมตร/กรัม) และปริมาตรรูพรุน (0.0697 ลูกบาศก์เมตร/กรัม) สามารถดูดซับและปลดปล่อยแอมโมเนียมจากปุ๋ยที่ใช้อย่างช้า ๆ ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของถ่านไม้ไผ่ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมเท่ากับ 42.00 และความจุของการดูดซับเท่ากับ 0.05 มิลลิกรัม/กรัม กลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช การทดลองการปลดปล่อยทำการทดลองในคอลัมน์บรรจุถ่านไม้ไผ่ที่อิ่มตัวด้วยแอมโมเนียมจำนวน 100 กรัม ผลการศึกษาพบว่าแอมโมเนียมถูกปลดปล่อยออกมาได้ดีในครั้งที่ 1 และ 2 ของการชะล้างประมาณร้อยละ 5.47 หลังจากนั้นการปลดปล่อยจะคงที่ร้อยละ 4.00 นอกจากนี้มีการศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยแอมโมเนียม 3 หน่วยทดลอง คือดินผสมปุ๋ย ดินผสมถ่านไม้ไผ่ และดินผสมปุ๋ยยูเรียกับถ่านไม้ไผ่ ทำการทดลองในกระถางและปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผลการศึกษาพบว่าหน่วยทดลองที่ใช้ดินผสมปุ๋ยยูเรียกับถ่านไม้ไผ่ แอมโมเนียมถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณน้อยและค่อนข้างคงที่ ถ่านไม้ไผ่ชีวภาพมีศักยภาพที่ดีในการช่วยลดการชะล้างแอมโมเนียมและช่วยในการปรับปรุงดิน”

Li, Xing et al. (2020) โดยทั่วไปพบว่าชีวมวล “ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic) มีปริมาณออกซิเจน คาร์บอน และไฮโดรเจนสูง แต่มีไนโตรเจนต่ำ มีค่า pH และปริมาณเถ้าสูง ลิกโนเซลลูโลสต่าง ๆ ในชีวมวล ประกอบด้วยสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากความเชื่อมโยงและความเป็นผลึกแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของส่วนประกอบเฉพาะของวัตถุดิบ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันของเซลลูโลส (315–400 °C) เฮมิเซลลูโลส (220–315 °C) และลิกนิน (160–900 °C) และ (Duku, Gu et al., 2011) โครงสร้างสะท้อนให้เห็นถึงสัณฐานวิทยาของวัตถุดิบ องค์ประกอบทางการเกษตรที่สำคัญบางชนิดในซังข้าวโพด ปริมาณความชื้น 10% อินทรีย์วัตถุ 85–91% เถ้า 9–

15% กะลาแกไฟที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแปรรูปพืชผลสามารถใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอชาร์ สารตกค้างหลักที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปข้าวโพดและข้าวฟ่าง เช่น ข้าวโพด/ฟางข้าวโพดและซัง และฟางข้าวฟ่าง เป็นวัตถุดิบสำหรับไบโอชาร์ ไบโอชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจากการแปลงชีวมวลทางความร้อน ซึ่งมีดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C ในกรณีที่ไม่มียกซิงเจน หรือที่เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส ไบโอชาร์ไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์ แต่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) และเถ้า พบว่าการเติมไบโอชาร์ช่วยลดการสูญเสียแอมโมเนียมได้ 10% ไบโอชาร์เพิ่มการกักเก็บ N เมื่อรวมกับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (NH_4SO_4) บนดินที่มีสภาพอากาศสูง และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกต่ำมาก (CEC)”

กมลชนก และคณะ (2561) ได้ศึกษาการปลูกปาล์มน้ำมัน ได้มีการขยายตัวสู่ดินนา ซึ่งเป็นดินเปรี้ยวในภาคกลางของไทย อย่างไรก็ตาม “อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีของเสียชีวมวลหลายชนิดซึ่ง มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจาก ปาล์มน้ำมัน (OPB) ต่อสมบัติทางเคมี ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชและสัดส่วนของฟอสฟอรัส ในดินนาเปรี้ยวจัด (ชุดดินรังสิต: Rs) โดยทำการบ่มดิน ร่วมกับถ่านชีวภาพจากปาล์ม น้ำมันในอัตรา 0 0.5 1.0 และ 2.0 ตันต่อไร่ในสภาพขังน้ำ ผลการบ่มดินระยะ เวลา 16 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่า การใช้ OPB สามารถ เพิ่มพีเอชดินเล็กน้อย และเพิ่มปริมาณของฟอสฟอรัส ที่สกัดด้วยน้ำยา Bray-II ซิลิโคนที่สกัดด้วย CaCl_2 และแคตไอออนสภาพเบสที่สกัดได้ด้วยน้ำยา NH_4OAc ผลการศึกษาสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดินด้วยวิธีการสกัด เชนลำดับ 5 ขั้นตอนพบว่า ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่ อยู่ในรูปที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3, 81%) และรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็ก ออกไซด์ที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4, 9.5%) ส่วนฟอสฟอรัสในรูปที่สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (F2, 6.7%) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5, 2.8%) และฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้และสร้าง พันธะแบบอ่อน ๆ (F1, 0.035%) พบในปริมาณน้อยกว่าฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ การใส่ OPB เพิ่มฟอสฟอรัสใน F1 ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูงสุด การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ OPB ต่อการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส โฟสเฟตซีเอ็ม และซิลิโคนในดินเปรี้ยวภายใต้สภาพขังน้ำ”

Assirey and Altamimi (2021) การผลิตไบโอชาร์ทำได้โดยกระบวนการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 350 °C (BC-350) และ 450 °C (BC-450) ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน “คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพได้รับการตรวจสอบผ่านการวิเคราะห์ XRD, FTIR, BET, SEM และ EDX ทำการทดลองแบบกลุ่มสำหรับการดูดซับไอออน Pb^{2+} จากสารละลายในน้ำบนไบโอชาร์ โดย

ค่าหนึ่งถึง pH และเวลาที่สัมผัสปริมาณไบโอชาร์และความเข้มข้นของ Pb²⁺ เริ่มต้น ประสิทธิภาพการดูดซับของ Pb²⁺ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า pH และปริมาณไบโอชาร์สูงถึง 1.5 ก./ลิตร การศึกษาจลนศาสตร์และอุณหภูมิกวามร้อนแสดงให้เห็นว่าข้อมูลการทดลองพอดีกับแบบจำลองลำดับที่สอง เทียม Langmuir และ Freundlich isotherms การศึกษาได้เน้นย้ำถึงอุณหภูมิกวามร้อนการไพโรไลซิสที่ต้องการคือ 450 °C ตามแบบจำลอง Dubinin-Kaganer-Radushkevich (DKR) การดูดซับกวามร้อนของ Pb²⁺ เป็นปฏิกิริยาเคมีและดูดกวามร้อน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการบังคับใช้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำสำหรับไอออน Pb²⁺ การกำจัด”

เสาวคนธ์ (2557) “การเพิ่มอุณหภูมิกวามร้อนจาก 310 เป็น 850 °C ถ่านที่ผลิตจาก bagasse จะมี pH เพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 9.7 ซึ่งพบว่า ถ่านที่ผลิตภายใต้สภาพอุณหภูมิต่ำมีค่า CEC สูงในขณะที่ถ่านที่ผลิตในสภาพอุณหภูมิสูง (> 600 °C) จะมีค่า CEC ต่ำหรือไม่มีเลย อย่างไรก็ตาม ปริมาณคาร์บอน และไนโตรเจนทั้งหมด และสัดส่วน C/N ระหว่างถ่านไม้ไผ่ และถ่านแกลบไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่มีปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (545 g kg⁻¹) สูงกว่าถ่านแกลบ (307 g kg⁻¹) คุณสมบัติทางเคมีถ่านแกลบ ค่ากรดเบส 6.78 ค่า CEC 23.37 cmol kg⁻¹ ปริมาณคาร์บอน 307 g kg⁻¹ และไนโตรเจนทั้งหมด 10.4 g kg⁻¹ และสัดส่วน C/N 29.9”

Liu, Zhang et al. (2014) การศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะทางกวามร้อนและฟิสิกส์เคมีของ CC และไบโอชาร์ได้รับการวิเคราะห์และแยกความแตกต่างจาก CS และ SD “ปัจจัยควบคุมเกี่ยวกับผลผลิตของไบโอชาร์คืออุณหภูมิกวามร้อนการไพโรไลซิส อัตราส่วน H/C และ O/C แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิกวามร้อนการไพโรไลซิสสูงกว่า 500 °C และ CC สามารถเปลี่ยนแปลงทางกวามร้อนทางเคมีเป็นไบโอชาร์ที่เสถียรได้ CC500 มีค่า pH ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ SD500 และ CS500 ลำดับปฏิกิริยาและกลไกนิวเคลียสอธิบายปฏิกิริยากวามร้อนการไพโรไลซิส CC จะมีปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างที่ได้มาจาก CC มี EC ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ได้มาจาก CS และ SD”

Nattaporn, Gilkes et al. (2013) “กวามร้อนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (<550 °C) มีการวัดค่า pH, EC, C, N, เเปอร์เซ็นต์เถ้า องค์ประกอบทางเคมี และวิทยาแร่ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำหนดสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในถ่านชีวภาพแกลบ ถ่านชีวภาพของแกลบมีความเป็นด่างสูง (8.5-9.7) โดยมีปริมาณเถ้าสูง (36-44%) ปริมาณซิลิกอน โซเดียม โพแทสเซียมสูง แคลเซียม และแมกนีเซียม ประกอบด้วย archerite (KH₂PO₄) แคลไซต์ (CaCO₃) คลอโรแคลไซต์ (KCaCl₃) คาลิซิไนต์ (KHCO₃) pyroproprite

($K_2MgO_7P_2$) สตรูไวท์ ($KMgPO_4 \cdot 6H_2O$) ซิลไวต์ (KCl) และวาเทอไรท์ ($CaCO_3$) ถ้าวางอยู่ระหว่าง 36-44 wt% และมีค่า pH สูง (8.5-9.7) เนื่องจากมีแร่ธาตุที่เป็นต่าง”

Yu, Abudukeranmu et al. (2020) ไบโอชาร์ที่ได้จากอุณหภูมิกะบวนการไพโรไลซิส 550 °C พบว่ามีปฏิกิริยาสูงสุดเนื่องจากการผลิตก๊าซในปริมาณมากที่สุด (โดยเฉพาะก๊าซไฮโดรเจน) ในระหว่างกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส และด้วยเหตุนี้จึงถูกกำหนดให้เป็นถ่านชีวภาพที่เหมาะสมที่สุด ที่อัตราการไหลของน้ำต่ำ (0.05-0.20 g/min) อนุภาคขนาด S (0.5-1.0 มม.) แสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่อัตราการไหลของน้ำสูง (0.25-0.30 กรัม/นาท) อนุภาคขนาด L (1.0-2.8 มม.) จะแสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแทนสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการทำให้เป็นแก๊สของไบโอชาร์ที่ได้จาก PAB ถูกกำหนดโดยอุณหภูมิปฏิกิริยาที่ 850 °C อัตราการไหลของน้ำ 0.25 กรัม/นาท และขนาดอนุภาค 1.0-2.8 มม. โดยมี Syngas ทั้งหมดและผลผลิตไฮโดรเจน 48.5 และ 33.0 mmol/g-biomass

Vu and Do (2021) “การผลิตไบโอชาร์อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้น CFH 350 มี BET ต่ำ (0.43 m²/g) และปริมาตรของ micropore ทั้งหมดเพียง 0.0024 cm³/g เนื่องจาก CFH350 มีพื้นผิวจำเพาะต่ำ การมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันบางกลุ่มอาจมีบทบาทสำคัญมากกว่าพื้นผิว การกำจัดแอมโมเนียมด้วยไบโอชาร์ CFH350 ประสิทธิภาพของกะลาปากแฟถึง 43% ที่สภาวะแวดล้อม (กล่าวคือ 25 °C ความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้นที่ 50 มก./ลิตร และ pH 7) ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลได้มาจากเฟสของเหลวที่เป็นของแข็งเวลา 6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับสามารถปรับปรุงได้ในช่วง pH จาก 6 ถึง 10”

Claoston, Samsuri et al. (2014) ผลผลิตของไบโอชาร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิกะบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 350–650 องศาเซลเซียส ผลผลิตถ่านชีวภาพ RH สูงสุดคือ 50.67% (ที่ 350 °C) และต่ำสุดคือ 29.02% (ที่ 650°C) และสำหรับถ่านชีวภาพ EFB ผลผลิตสูงสุดที่ได้รับคือ 37.57% (ที่ 350 °C) และต่ำสุด คือ 20.93% (ที่ 650 องศาเซลเซียส) ผลผลิตลดลงอย่างมากระหว่าง 350 ถึง 500 °C สำหรับถ่านชีวภาพทั้งสอง แต่ความแตกต่างของผลผลิตระหว่าง 500 ถึง 650 °C นั้นน้อย ส่วนเปอร์เซ็นต์ของปริมาณถ่านคือ 52.87, 61.33 และ 72.54% สำหรับ RH350, RH500 และ RH650 และสำหรับ EFB350, EFB500 และ EFB650 คือ 77.06, 78.13 และ 86.28% ผลการวิจัยบ่งชี้ว่าความพรุน ปริมาณถ่าน การนำไฟฟ้า (EC) และค่า pH ของถ่านชีวภาพทั้ง EFB และ RH เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลผลิต ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

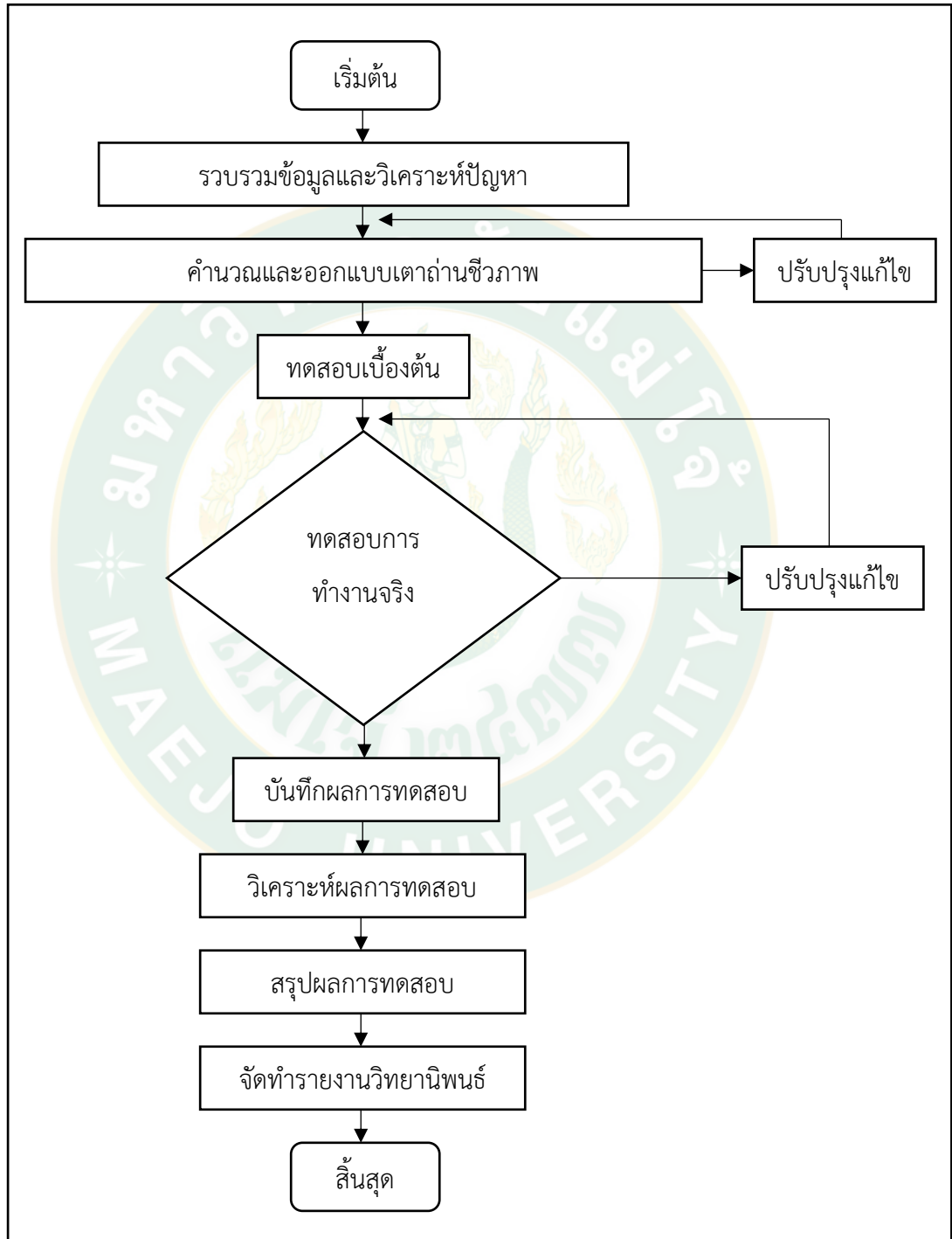
(CEC) และปริมาณ H C และ N ลดลงเมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น Fourier transform IR spectra มีความคล้ายคลึงกันสำหรับทั้ง RH และ EFB

Lam, Liew et al. (2018) กระบวนการไพโรไลซิสสร้างผลผลิต 30.7-47.7 โดยน้ำหนักของไบโอชาร์สีเข้มที่อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ไบโอชาร์ไม่มีกำมะถันและมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง มีปริมาณระเหยต่ำ (34 wt%) และคาร์บอนคงที่ในปริมาณสูง (72 wt%) การใช้ไบโอชาร์เป็นตัวดูดซับในการบำบัด POME แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 57% ในการลดความเข้มข้นของความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี COD สารแขวนลอยรวม (TSS) และน้ำมันและไขมัน (O&G) ของ POME ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยผลพลัธ์ของเราระบุว่ากระบวนการไพโรไลซิสแสดงให้เห็นว่าเป็นเทคนิคในการเปลี่ยนเปลือกกล้วยและเปลือกส้มให้เป็นไบโอชาร์ที่เพิ่มมูลค่าเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการรักษา POME การนำไบโอชาร์จากขยะผลไม้กลับมาใช้ใหม่ยังแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบเหนือวิธีการฝังกลบแบบดั้งเดิมในการกำจัดของเสียนี้



บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 6 แผนการดำเนินงานวิจัย

จากแผนการดำเนินงานวิจัยได้เริ่มจากการศึกษาปัญหาเนื่องจากปริมาณชีวมวลมีปริมาณคงเหลือที่มาก มีการกำจัดเศษวัสดุเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวผิดวิธี เช่น การเผา การใช้สารเคมีกำจัดส่งผลกระทบต่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและเกิดปัญหาในดิน จึงได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิส เป็นการนำเศษวัสดุเกษตรที่เหลือทิ้งมาก่อให้เกิดประโยชน์ ซึ่งชีวมวล เป็นวัสดุหรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ จึงนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ในปัจจุบันมีวิธีการผลิตถ่านชีวภาพหลากหลายรูปแบบ มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตหลายปัจจัยด้วยกัน จึงได้ทำการศึกษาเตาประเภทแอนนิลา (Anila) จะใช้กระบอกศูนย์กลางสองเส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ชีวมวลถูกวางไว้ระหว่างกระบอกที่สองและใช้เชื้อเพลิงจุดไฟตรงกลาง ความร้อนที่ได้จากกระบวนการจะได้แก๊ส จะแพร่ไปยังรอบ ๆ ซึ่งจะเพิ่มเปลวไฟสามารถนำไปทำอาหาร และชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นไบโอชาร์ จากการศึกษาเตาเผาแบบธรรมดาทั่วไปใช้สำหรับการผลิตไบโอชาร์ ใช้ระยะเวลาานานกว่า 7 ชั่วโมง อุณหภูมิในกระบวนการไม่เท่ากัน และใช้แหล่งความร้อนจำนวนมากทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเตาดันแบบขนาด 50 ลิตร เพื่อออกแบบและศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิต และได้ทำการทดสอบเบื้องต้น (Pretest) เพื่อที่จะใช้เป็นตัวเลือกหรือเป็นตัวกำหนดตัวแปรและขอบเขตของการศึกษา จากนั้นเมื่อได้ตัวแปรการศึกษาแล้วจะทำการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพรวมถึงบันทึกข้อมูล และนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ อีกทั้งสรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์

การศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเตา ขนาดรูเจาะ จำนวนแถวรูเจาะ และเศษวัสดุเกษตรที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบโดยเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการผลิตและความร้อนภายในเตาเผาถ่านชีวภาพ ประกอบด้วยผลการทดสอบ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่กล่าวมาแล้ว จึงจัดกระบวนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง
2. วิธีการผลิตถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์
3. การวิเคราะห์ตัวแปรที่จะศึกษา

3.2 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเกษตร

- วัสดุที่จะใช้ทดสอบในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น แกลบ: ได้จากการแปรรูปจากข้าวพันธุ์สันป่าตอง ชังข้าวโพด: ได้จากการแปรรูปจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ กะลากาแฟ: ได้จากการแปรรูป

กาแฟ พันธุ์ราบิก้า เปลือกลำไย: ได้จากการแปรรูปลำไย พันธุ์อีดอ และกิ่งลำไย: ได้จากการตัดแต่งกิ่ง พันธุ์อีดอ เป็นต้น

- นำวัสดุแต่ละชนิดมาลดความชื้น และความชื้นต้องไม่เกิน 10 %(w.b.) ก่อนนำไปทดสอบในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพ ประกอบด้วยเชื้อเพลิงไม้ลำไย และซังข้าวโพด โดยมีความชื้นไม่เกิน 10 %(w.b.)

3.2.3 ออกแบบ ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของเตาผลิตถ่านชีวภาพ

- ส่วนประกอบหลักของเตาเผาถ่านชีวภาพ จะประกอบด้วยตัวเตาเผาและแกนกลางบรรจุเชื้อเพลิงซึ่งแต่ละส่วนจะมีการออกแบบตามหลักการและทฤษฎีทางวิศวกรรม ที่สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพสูงได้

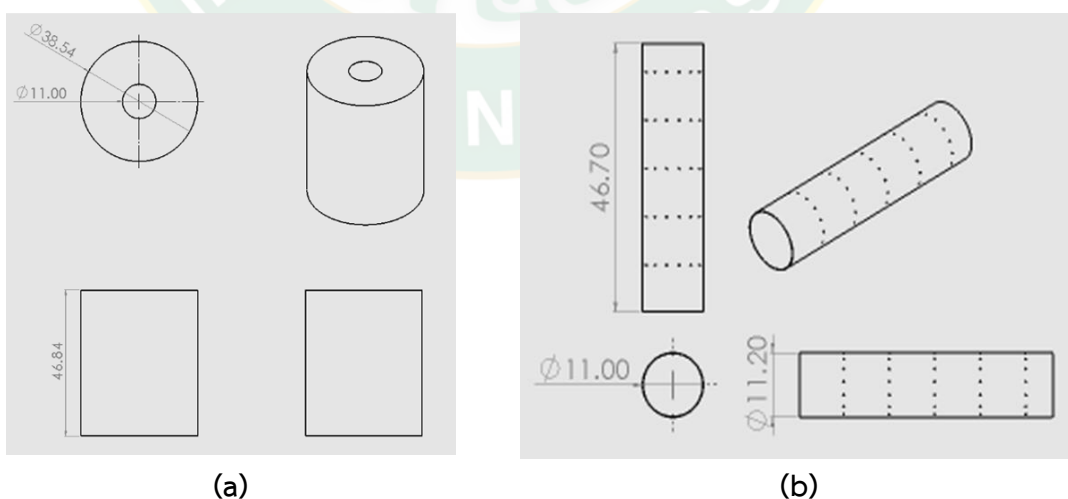
- โครงสร้างและองค์ประกอบของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ประกอบด้วยตัว 1. เตาเผาถ่านชีวภาพ 2. แกนกลางบรรจุเชื้อเพลิง (แกนเหล็กดำนใน) 3. ปล่องควัน 4. ตะแกรงสำหรับใช้รองหรือฐานเตาผลิตถ่านชีวภาพต้นแบบ และตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

- การออกแบบเตาผลิตถ่านชีวภาพ คำนวณและออกแบบตามขนาดของเตาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ ได้แก่ เตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ซึ่งมีตัวแปรในการออกแบบ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนกลาง ความสูงของเตา ความสูงของแกนกลาง พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเตาใส่ชีวมวล พื้นที่ผิวของแกนกลาง พื้นที่ผิวของรูเจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ จำนวนแถวของรูเจาะของเตา และจำนวนรูเจาะต่อแถว

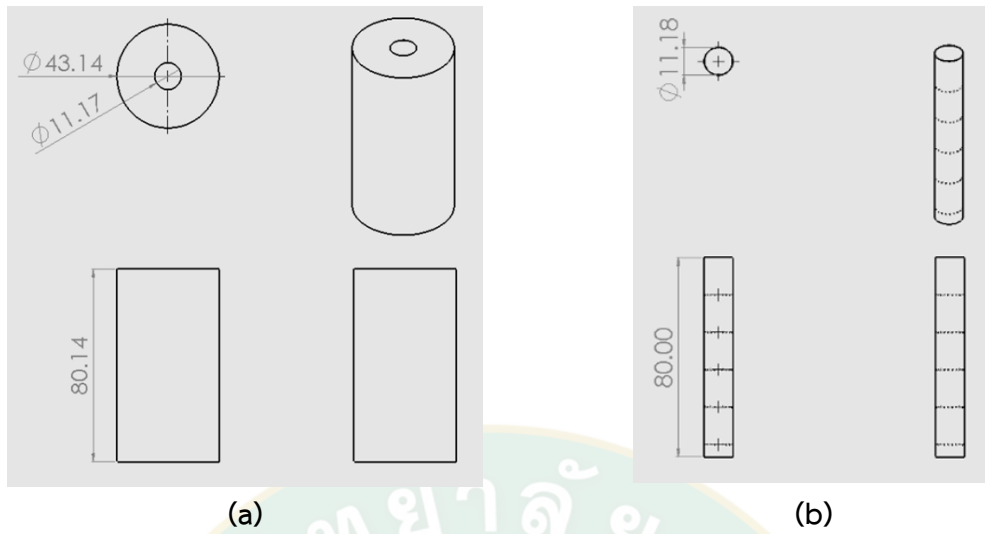
- การศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพและการทดสอบ การคำนวณตัวแปรที่ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิ ได้แก่ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางแกนกลางต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (D_c/D ratio) พื้นที่ผิวแกนกลางต่อพื้นที่ผิวรูเจาะ (a/a_p ratio) ปริมาตรแกนกลางต่อปริมาตรของถัง (V_c/V ratio) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของถังใส่ชีวมวลต่อพื้นที่ผิวของรูเจาะ (A/a_p ratio) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนถังใส่ชีวมวลต่อพื้นที่ผิวแกนกลาง (A/a ratio) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนถังใส่ชีวมวลไม่รวมฝาและก้นถังต่อพื้นที่ผิวแกนกลาง (A_s/a ratio) เป็นต้น และทดสอบตั้งตัวแปรต่อไปนี้

1. การศึกษาขนาดรูเจาะแกนกลาง 3 ขนาด (3.18, 4.76, และ 6.35 mm)
2. การศึกษาการกระจายของรูเจาะ 3 แบบ (การกระจายค่อนบนแกนกลาง 3 แถว การกระจายค่อนล่างแกนกลาง 3 แถว และการกระจายปกติ 3 แถว)
3. การศึกษาจำนวนแถวของรูเจาะ 3 แบบ (3, 5 และ 7 แถว)

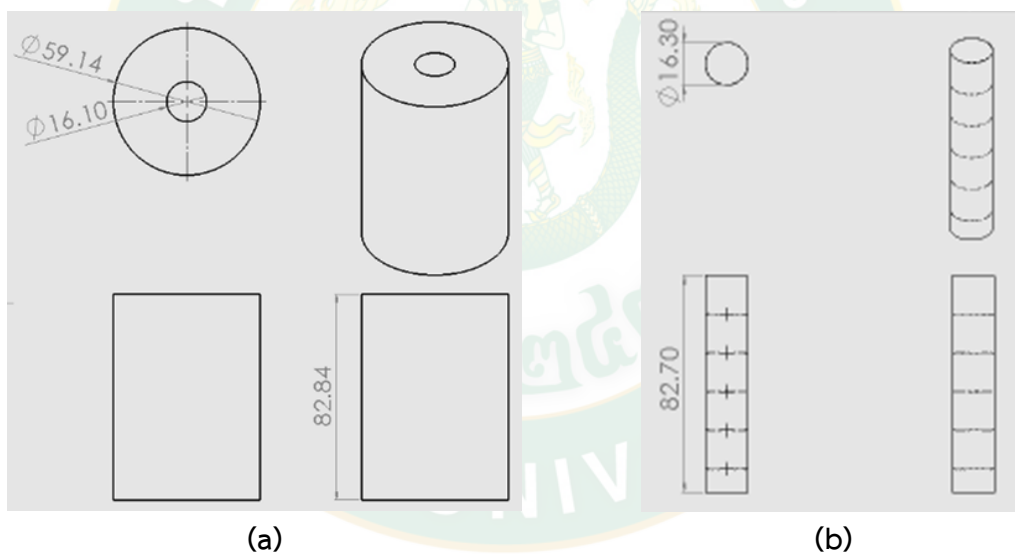
ผลการศึกษานาตรูเจาะแกนกลาง 3 ขนาด วัสดุเกษตรที่แตกต่างกัน (ซึ่งข้าวโพด แกลบ และเปลือกกล้วย) พบว่านาตรูเจาะ 3.18 mm มีปริมาณไบโอชาร์มากที่สุด ผลจากการกระจาย อุณหภูมิไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส ขนาดรูเจาะ 4.76 และ 6.35 mm ผลของการกระจายอุณหภูมิ สูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณไบโอชาร์ลดลงและมีปริมาณเถ้า ผลการศึกษาการ กระจายของรูเจาะ 3 แบบ วัสดุเกษตรจากซึ่งข้าวโพด ขนาดรูเจาะ 3.18 mm การกระจายค่อนบน แกนกลาง 3 แถว, การกระจายค่อนล่างแกนกลาง 3 แถว, และการกระจายปกติ 3 แถว พบว่าการ กระจายปกติมีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่าแบบอื่น ๆ และผลการศึกษานาตรูเจาะ 3 แบบ วัสดุเกษตรจากซึ่งข้าวโพด ขนาดรูเจาะขนาด 3.18 mm (3 แถว 5 แถว และ 7 แถว) พบว่าการ กระจายอุณหภูมิ 5 แถว และ 7 แถวมีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า 3 แถว แต่เมื่อเพิ่มเป็น 7 แถวส่งผล ทำให้อุณหภูมิสูงเกิน 600 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณไบโอชาร์ จำนวน 5 แถวให้ผล ผลิตสูงที่สุดในกระบวนการผลิต จากนั้นคำนวณตัวแปรที่ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิ มีขนาดรูเจาะ 3.18 mm จำนวน 5 แถว โดยมีการนำถ่านน้ำมันที่มีอยู่ทั่วไปตามท้องตลาดมาดัดแปลงและออกแบบ คำนวณพื้นที่ตามอัตราส่วนตั้งอัตราส่วนดังกล่าว จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ระยะห่าง ระหว่างรูเจาะ จำนวนรูเจาะ ของเตาขนาด 50 (แสดงดังภาพที่ 7) ขนาด 100 ลิตร (แสดงดังภาพที่ 8) และขนาด 200 ลิตร (แสดงดังภาพที่ 9) พร้อมทั้งติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพื่อลดความสูญเสียความ ร้อนที่ผิวเตาและเพิ่มประสิทธิภาพเตา



ภาพที่ 7 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กด้านใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b)



ภาพที่ 8 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กด้านใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b)



ภาพที่ 9 แสดงส่วนประกอบเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร เตาถ่านชีวภาพ (a) และแกนเหล็กด้านใน หรือห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง (b)

3.3 วิธีการผลิตถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์

- ชั่งน้ำหนักเศษวัสดุเกษตรที่ใช้ทดสอบ โดยน้ำหนักวัสดุขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ
- ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ โดยการเติมเชื้อเพลิง จะมีการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยต้องไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส (ดังแสดงตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 แสดงอัตราการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการ ผลจากการทดสอบ

เตา (ลิตร)	เวลา (ชั่วโมง)	ไม้ลำไย (กิโลกรัม)	วัสดุช่วยจุดติดไฟ (กิโลกรัม)
50	1	1.5	1
	2	3	1
	3	5	1
100	1	2	1
	2	4	1
	3	6	1
200	1	6	1
	2	9	1
	3	12	1

- นำเศษวัสดุเกษตรต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบที่จะทดสอบตามบรรจุลงในเตาผลิตถ่านชีวภาพ ตัวเตาเผา (ถังเหล็กด้านนอก) บรรจุเศษวัสดุเกษตร และแกนกลางบรรจุเชื้อเพลิง (แกนเหล็กด้านใน) ที่ใช้ทดสอบ จากนั้นปิดเตาพร้อมล็อกฝาปิด และยกเตาวางบนตะแกรงสำหรับใช้รอง หรือฐานเตา
- ให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงจากด้านบนตัวเตาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยเตาผลิตถ่านชีวภาพ ไม่ให้อุณหภูมิเกิน 600 องศาเซลเซียส
- วางปล่องควันด้านบนเพื่อควบคุมให้อากาศไหลเข้าจากด้านล่างของแกนกลางบรรจุเชื้อเพลิง (แกนเหล็กด้านใน) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และลดปัญหาการเกิดควัน
- ทำการจับเวลา ตั้งแต่เริ่มจุดเชื้อเพลิงติดไฟ
- ปล่องทิ้งไว้จนเตาเย็นตัวลง หรือหลังการทดสอบลดอุณหภูมิโดยการ cool down คือการทำให้เย็นลง จากนั้นเพื่อคัดส่วนประกอบจากกระบวนการผลิต
- ทำความสะอาดเตาและตรวจสอบความเสียหายและเตรียมการทดสอบครั้งต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ตัวแปรที่จะศึกษา

3.3.1 การผลิตถ่านชีวภาพ

คำนวณหาปริมาณถ่านชีวภาพได้ดังสมการ...(1) (ดัดแปลงจาก Arami-Niya et al. 2012) และปริมาณเถ้าได้ดังสมการ...(2) (ดัดแปลงจาก Al-Wabel et al. 2013)

$$\text{ปริมาณถ่านชีวภาพ (\%)} = \frac{W_f}{W_o} \times 100 \quad \dots (1)$$

เมื่อ W_f = มวลถ่านชีวภาพ (kg)

W_o = มวลเศษวัสดุเริ่มต้น (kg)

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{W_{\text{ash}}}{W_{\text{BC}}} \times 100 \quad \dots (2)$$

เมื่อ W_{ash} = มวลเถ้า (kg)

W_{BC} = มวลถ่านชีวภาพ (kg)

3.3.2 อัตราการใช้เชื้อเพลิง

คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้ดังสมการ...(3)

$$\text{อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ}}{\text{เวลา}} \quad \dots (3)$$

3.3.3 การวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุ

ค่าความชื้นของไบโอชาร์ ทำการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (ASTM D1762-84) โดยการนำไบโอชาร์ที่ได้หลังสิ้นสุดกระบวนการไพโรไลซิส ชั่งน้ำหนัก 5 ± 0.01 กรัม และนำไปลดความชื้นด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณด้วยสมการ...(4)

$$\text{Water content (\%wt)} = [(M_{\text{Biochar,B}} - M_{\text{Biochar,A}}) / M_{\text{Biochar,A}}] \times 100 \quad \dots (4)$$

เมื่อ Water content (%wt) คือ ค่าความชื้นของไบโอชาร์

$M_{\text{Biochar,B}}$ คือ น้ำหนักของไบโอชาร์ก่อนลดความชื้น (กรัม)

$M_{\text{Biochar,A}}$ คือ น้ำหนักของไบโอชาร์หลังลดความชื้น (กรัม)

3.3.4 การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ

VITA (1985) การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาสามารถหาหลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกคือ วิธี Water Boiling Test จากมาตรฐานนานาชาติ VITA ซึ่งกำหนดไว้ในปี ค.ศ.1985 เป็นวิธีการหนึ่งที่ยิมนำมาใช้สำหรับการทดสอบหาประสิทธิภาพของเตาเผาโดยประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) คำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพได้ดังสมการ...(5)

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาผลิตถ่านชีวภาพ} = \frac{M_i C_p (T_b - T_i) + M_e H_f \times 100}{M_f H_f} \quad \dots (5)$$

- เมื่อ
- m_i = มวลน้ำเริ่มต้น (kg)
 - m_e = มวลน้ำที่ระเหย (kg)
 - C_p = ความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.190 kJ/kg °C
 - T_b = อุณหภูมิสุดท้าย (°C)
 - T_i = อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (°C)
 - H_i = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (2,260 kJ/kg)
 - H_f = ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)
 - M_f = น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg)

3.3.5 การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน

การวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Thermal energy) ที่เกิดขึ้นในไบโอชาร์ด้วยวิธีการ Bomb calorimeter โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องทางเทคนิคโดยเฉพาะ ซึ่งแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) การเตรียมตัวอย่างบดย่อยตัวอย่างให้ละเอียดมีลักษณะเป็นผง จากนั้นชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม และอัดให้เป็น pellet โดยใช้เครื่อง pellet press
- 2) นำตัวอย่างที่จะบรรจุในลูกบอมบมาวางในที่วางของ Bomb head ตัด lead wire ยาว 10 เซนติเมตร นำไปสอดใน eyelet โดยเลื่อน cap ขึ้นเมื่อสอดเสร็จแล้วทั้งสองข้างและดึง cap ลง
- 3) นำ bomb head ใส่ใน oxygen bomb และปิดฝา
- 4) เต็มออกซิเจนใน bomb โดนการเปิดวาล์วของถังออกซิเจน ตั้ง pressure gauge ไว้ที่ 450 psi จากนั้นกด O2 Fill key เครื่องจะทำการออกซิเจนอัตโนมัติ โดยใช้เวลาประมาณ 60 นาที

5) เติมน้ำลงในกระบอกสแตนเลส (Bucket) ประมาณ 2000 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าเครื่อง bomb จากนั้นให้เครื่องเริ่มทำงานวิเคราะห์

6) เมื่อเครื่องทำงานเสร็จ นำ Oxygen bomb ออกมา ไล่แก๊สออก และนำฝา bomb head ออกมาวาง เพื่อวัดความยาวของขดลวดที่เหลือจากการเผาไหม้ และคำนวณพลังงานความร้อน

3.3.6 การวิเคราะห์สัณฐานพื้นที่ผิวและรูพรุนและองค์ประกอบแร่ธาตุผ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์สัณฐานพื้นที่ผิวและรูพรุนและองค์ประกอบแร่ธาตุผ่านชีวภาพ จะวิเคราะห์ด้วยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการวิเคราะห์สัณฐานและองค์ประกอบแร่ธาตุผ่านชีวภาพ EDX spectrum เพื่อดูรูพรุนที่เกิดในไบโอชาร์ ด้วยวิธีการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ หรือเรียกว่า SEM ที่กำลังขยาย 200 500 1500 และ 5000 เท่า และหาองค์ประกอบแร่ธาตุด้วยกำลังไฟฟ้า 15 kV เคลือบด้วยแผ่นทอง เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวในลักษณะสัณฐานวิทยา วิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) และรูพรุน (Pore volume) รายละเอียดของลักษณะพื้นที่ผิว และการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเดี่ยวเบนของอิเล็กตรอนสำหรับใช้เทียบผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ด้วยวิธีการ BET โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวและรูพรุน ด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากเครื่อง Model Autosorb 1 MP, ยี่ห้อ Quantachrome และวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพ

3.3.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ

APSRDO (2551) มาตรฐาน APSRDO, DOA 4/2551, Combustion Carbon /Titrate เช่น คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), แมกนีเซียม (Mg), อลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si), ฟอสฟอรัส (P), ซัลเฟอร์ (S), คลอรีน (Cl), โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) เป็นต้น และปริมาณธาตุอื่น ๆ ของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) เพื่อตรวจหาปริมาณธาตุทั้งหมดที่มีอยู่ในถ่านชีวภาพ

3.3.8 การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของไบโอชาร์ ทำการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (EBC DIN ISO 10390) ในอัตราส่วน 1:5 (v:v) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1) นำไบโอชาร์บดย่อยอย่างละเอียด และนำไปลดความชื้นด้วยเครื่องอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตวงด้วยปิเกตอร์ ให้ได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

2) ชั่งสารแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ 0.01 โมล ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายในการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่าง (pH) ของไบโอซาร์

3) นำไบโอซาร์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เทผสมกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เมื่อเขย่าครบตามเวลาที่กำหนด นำไบโอซาร์ที่ผสมกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เทออกมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อป้องกันไบโอซาร์หลุดติดเข้าไปในเครื่อง จากนั้นวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ด้วยเครื่อง PC450/EUTECH และบันทึกผลดังค่าที่แสดงบนหน้าจอ

3.3.9 การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า

การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: EC) ของไบโอซาร์ ทำการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (EBC DIN ISO 10390) ในอัตราส่วน 1:10 (v:v) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1) นำไบโอซาร์บดย่อยอย่างละเอียด และนำไปลดความชื้นด้วยเครื่องอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตวงด้วยบีกเกอร์ ให้ได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

2) นำไบโอซาร์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เทผสมกับน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เมื่อเขย่าครบตามเวลาที่กำหนด นำไบโอซาร์ที่ผสมกับน้ำกลั่น เทออกมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อป้องกันไบโอซาร์หลุดติดเข้าไปในเครื่อง จากนั้นวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ด้วยเครื่อง PC450/EUTECH และบันทึกผลดังค่าที่แสดงบนหน้าจอ

3.3.10 การวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สและปริมาณฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้

การศึกษามาตรฐานการวิเคราะห์หาปริมาณฝุ่นละออง ASTM D1739-98 (ASTM., 2004) เช่น ตรวจจับฝุ่นละออง เครื่องมือวัดควันเป็นไปตามข้อกำหนดตามที่กำหนดไว้ในวิธีทดสอบความหนาแน่นของควันจากการเผาเชื้อเพลิงมาตรฐาน ASTM D-2156-80 (ASTM., 1980) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ออกซิเจน (O_2) เป็นต้น ในการวิเคราะห์จะใช้เครื่อง testo 330-2 LL โดยหลักการของ Impactor-Oscillating crystal-Principle ซึ่งใช้หลักการดูดฝุ่นผ่านหัวคัดขนาด (nozzle) ที่ใช้หลักการตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Impaction) เพื่อให้ได้ฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่กำหนด โดยมีอุปกรณ์ประกอบหลัก 3 อุปกรณ์ด้วย ได้แก่

- 1) Testo 330-2 LL
- 2) Probe และ
- 3) Measuring box

นอกจากนี้ตัวอุปกรณ์ testo 330-2 LL ยังเป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่า Flue Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ มีการติดตั้ง sensor สำหรับวัดปริมาณของก๊าซไอเสียต่าง ๆ ไว้ภายในตัวเครื่องทำให้สามารถใช้วัดปริมาณของก๊าซไอเสียต่าง ๆ ได้ ประกอบไปด้วย ก๊าซออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO) รวมถึงสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้

3.3.11 การวิเคราะห์ค่า CEC ด้วย NH_4OA_c 1 N pH 7

1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 1 ± 0.05 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปใน centrifuge tubes ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1 N NH_4OA_c 1 N pH 7 ลงไป 40 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้สารละลายด้วยเครื่อง horizontal shaker 15 ชั่วโมง

2) ทำการตั้ง Buchner funnel กับ Vacuum flask และเครื่อง Suction จากนั้นนำกระดาษกรองเบอร์ 42 (ใช้กระดาษกรองให้มีขนาดพอดีกับ Buchner funnel) ทำการชะกระดาษกรองด้วยน้ำ DIW (20 มิลลิลิตร) เทสารละลายทิ้ง

3) นำตัวอย่างออกจาก centrifuge tubes โดยการเทลงใน Buchner funnel นำ NH_4OA_c 10 มิลลิลิตร ชะตัวอย่างที่ติดบริเวณหลอด centrifuge tubes การล้างต้องใช้เวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยการปรับแรงดูดให้พอเหมาะ

4) จากนั้นชะตัวอย่างด้วยสารละลาย NH_4OA_c จำนวน 50 มิลลิลิตร เทประมาณ 25 มิลลิลิตร ต่อครั้ง โดยค่อย ๆ เติมลงไปหลังจากสารละลาย NH_4OA_c ใน Buchner funnel ลดลง จนเห็นตัวอย่างไหลออกมา ระวังอย่าให้ตัวอย่างแห้ง จากนั้นล้างเอาส่วนของ NH_4OA_c ที่เหลืออยู่ตามช่องว่างดินออกให้หมดโดยการชะล้างด้วย ethyl alcohol จำนวน 10 มิลลิลิตร. จำนวน 3 ครั้ง

5) จากนั้นนำตัวอย่างใน Buchner funnel ไปแช่ด้วย KCl 2M ใน Erlenmeyer flask จำนวน 50 มล. เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

6) ทำการตั้ง Buchner funnel กับ Vacuum flask และเครื่อง Suction จากนั้นนำกระดาษกรองเบอร์ 42 (ใช้กระดาษกรองให้มีขนาดพอดีกับ Buchner funnel) ทำการชะกระดาษกรองด้วยน้ำ DIW (20 มิลลิลิตร) เทสารละลายทิ้ง

7) นำตัวอย่างจากข้อ 5 มาสกัดโดยการเทลงใน Buchner funnel นำ KCl 2M จำนวน 40 มิลลิลิตร ชะตัวอย่างที่ติดบริเวณ Erlenmeyer flask

8) เทสารละลายทั้งหมดใน Suction flask ลงสู่ volumetric flask แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล. ด้วย KCl 2M พร้อมทั้งจะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3.3.12 การวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บน้ำ

การวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บ ดูดซับน้ำ หรือการอุ้มน้ำ (Water holding capacity: WHC) จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (EBC E DIN ISO 14238) โดยเอาตัวอย่างมาบดย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 0.05 มิลลิเมตร นำไปลดความชื้นด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกมาชั่งให้ได้ปริมาณ 5 ± 0.1 กรัม และเทลงในน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่บรรจุในบีกเกอร์ ทิ้งให้ตัวอย่างแช่อยู่ในน้ำ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำไปไอซาร์ที่แช่น้ำออกมารองด้วยกระดาษกรองทิ้งตัวอย่างไว้ 2 ชั่วโมง จากนั้นบันทึกผลน้ำหนักและคำนวณความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดังสมการ...(6)

$$\text{WHC (\%wt)} = \frac{(m_s - m_T - m_D)}{m_D} \times 100 \quad \dots(6)$$

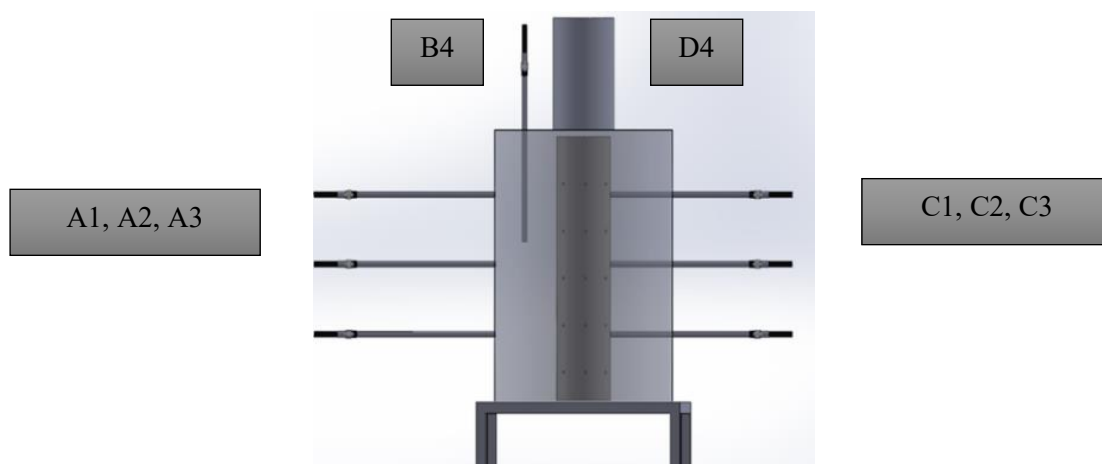
เมื่อ	WHC (%wt.)	คือ	ความสามารถในการกักเก็บน้ำ
	m_s	คือ	น้ำหนักไปไอซาร์และกระดาษกรองเปียก (กรัม)
	m_T	คือ	น้ำหนักถ้วยชั่งและกระดาษกรองแห้ง (กรัม)
	m_D	คือ	น้ำหนักไปไอซาร์เริ่มต้นแห้ง (กรัม)

3.3.13 การวัดการกระจายอุณหภูมิของเตาผลิตถ่านชีวภาพ

1) ในการติดเทอร์โมคัปเปิลจะติดกับตัวยึดที่ได้เจาะบริเวณเตาเผาถ่านชีวภาพ โดยจะวัดอุณหภูมิตามตั้ง 3 แนว จะเลือกวัดบริเวณแกนกลางเตาเผา ระหว่างแกนกลางและขอบถึงด้านใน และผนังด้านในถึง ในแต่ละแนวจะแบ่งวัดอุณหภูมิด้านบนถึง กลางถึง และด้านล่างถึง (แสดงดังภาพที่ 10)

2) โดยใช้โปรแกรม WISCO มาตรฐาน RS232 (RC22, 2561) โปรแกรม Wisco AI Utility จะมีหน้าที่หลักคือการทดสอบการทำงานของโมดูลว่าถูกต้องหรือไม่ และเลือกชนิดของ Analog Input ที่ต้องการใช้งานให้กับโมดูล โดยโมดูลที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม

3) โปรแกรม Wisco Online Datalogger OD04 ใช้สำหรับอ่านค่าวัดในขณะนั้น (Real Time) และการบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแสดงข้อมูลได้ทั้งแบบตารางข้อมูล และกราฟข้อมูล อีกทั้งยังสามารถแปลงไฟล์ข้อมูลเป็นชนิด *.csv เพื่อนำไปใช้งานใน Microsoft Excel



ภาพที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

3.3.14 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณ ความชื้น (Moisture content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และปริมาณเถ้า (Ash)

3.3.15 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นวิเคราะห์ที่ไหลละบุถึงปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะหลักอ้างอิง และไม่คิดที่เถ้า ปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะปิดที่ บรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสีย เพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจนและที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้นกำมะถันจะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมีในขณะที่ออกซิเจนจะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุ C H N และ S

3.3.16 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนรวมทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon) ทั้งหมดจะวัดปริมาณคาร์บอนทั้งหมดเท่านั้น การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนรวมจึงจำเป็นต้องมีบัญชีบางส่วนสำหรับคาร์บอนอินทรีย์ที่มีอยู่เสมอ เทคนิคการวิเคราะห์แบบหนึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการ 2 ขั้นตอนที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า TC-IC วัดปริมาณของอินทรีย์คาร์บอน (IC) วิวัฒนาการมาจากกรด aliquot ของตัวอย่างและยังมีปริมาณของคาร์บอนรวม (TC) อยู่ในกลุ่มตัวอย่าง TOC คำนวณโดยการลบค่า

IC จาก TC ของตัวอย่าง ตัวแปรอื่นใช้การเป็นกรดของตัวอย่างเพื่อวิวัฒนาการคาร์บอนไดออกไซด์ และวัดเป็นคาร์บอนอินทรีย์ (IC) จากนั้นออกซิไดซ์และวัดปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่ไม่สามารถกำจัดได้ (NPOC) ที่เหลืออยู่เรียกว่าการวิเคราะห์ TIC-NPOC วิธีการที่ใช้กันทั่วไปจะวัด TOC ในตัวอย่างโดยตรงโดยการทำให้ตัวอย่างเป็นกรดอีกครั้งให้มีค่า pH เท่ากับสอง หรือน้อยกว่าเพื่อปล่อยก๊าซ IC ออกมา แต่ในกรณีนี้จะไม่ใช้สำหรับการวัดในอากาศ ก๊าซ CO₂ ที่ไม่สามารถกำจัดได้ (NPOC) ที่เหลืออยู่ซึ่งบรรจุอยู่ในของเหลวจะถูกออกซิไดซ์โดยปล่อยก๊าซออกมา จากนั้นก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งไปยังเครื่องตรวจจับเพื่อทำการวัด

3.3.17 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ

- การทดสอบประสิทธิภาพของระบบของเตาด้านพลังงาน พลังงานจากเชื้อเพลิงป้อน พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาไบโอชาร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ดังสมการที่...(7) ดัดแปลงจาก (ประภาพิทย, 2556)

$$Q_C = m_F \cdot LHV \quad \dots(7)$$

เมื่อ Q_C = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (เมกะจูลต่อชั่วโมง)

m_F = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (เมกะจูลต่อชั่วโมง หรือเมกะจูลต่อกิโลกรัม)

- การสูญเสียความร้อนทางปล่อง พลังงานความร้อนที่ได้จากการสูญเสียความร้อนทางปล่องเตาไบโอชาร์ สามารถวิเคราะห์จากชนิดข้อมูล ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ และอุณหภูมิจากปล่องคว้น ดังสมการที่...(8)

$$Q_g = \dot{V}_g \cdot \rho_g \cdot C_p \cdot (\Delta T) \quad \dots(8)$$

เมื่อ Q_g = ปริมาณความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสีย (กิโลวัตต์)

\dot{V}_g = ปริมาณการไหลของก๊าซไอเสียเท่ากับ 0.122928 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

ρ_g = ความหนาแน่นของก๊าซไอเสียเท่ากับ 1.19 (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

C_p = ค่าความจุความร้อนก๊าซไอเสียเท่ากับ 1.134 (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

- การสูญเสียความร้อนทางผนังเตา ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมลดลง การสูญเสียที่ผนังเตาเกิดจากการพาความร้อนโดยอากาศแวดล้อม และการแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากผนังเตาที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจึงแวดล้อม การคำนวณการสูญเสียความร้อนทางผนังเตาสามารถทำได้โดยการเขียนสมการสมดุลพลังงานที่บริเวณผนังเตา

$$Q_{Sur} = Q_{Conv} + Q_{Rad} \quad \dots(9)$$

$$Q_{Sur} = hA(T_s - T_a) + \epsilon \sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad \dots(10)$$

เมื่อ Q_{Conv} = การสูญเสียความร้อนจากการพา (วัตต์)

Q_{Rad} = การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี (วัตต์)

A = พื้นที่ผิวของผนังเตา (ตารางเมตร)

T_s = อุณหภูมิผิวของผนังเตา (เคลวิน)

T_a = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (เคลวิน)

ϵ = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ = ค่าคงที่ Stefan Boltzman = 5.67×10^{-8} (W/m²·K⁴)

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

H = ความสูงของเตา ในพื้นที่ที่หุ้มฉนวนแต่เกิดการถ่ายเทความร้อน (เมตร)

หลังจากเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของระบบเตาผลิตถ่านชีวภาพแล้ว นำไปคำนวณสมดุลพลังงาน ความร้อน และคำนวณประสิทธิภาพของระบบเตาผลิตถ่านชีวภาพ ดังสมการที่...(11)

$$\text{ประสิทธิภาพของระบบเตาผลิตถ่านชีวภาพ} = \frac{\text{ความร้อนสูญเสียให้กับระบบ}}{\text{ความร้อนจากการเผาไหม้}} \quad \dots(11)$$

3.3.18 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การคำนวณความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของเตาในการผลิตถ่านชีวภาพ จำเป็นต้องคำนึงถึง ความสำคัญของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นการทดลอง ต้นทุนในการผลิต มูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Discounted payback period, DPB) หรือระยะเวลาที่กระแสเงินรับจากโครงการสามารถชดเชยกระแสเงินสด จ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดี หรือตัวตัดสินใจในการลงทุนประกอบไปด้วยระยะเวลาคืนทุนและความคุ้มค่าการลงทุน ดังสมการที่...(12)

$$\text{Discounted payback period} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายสุทธิเทียบเท่าปัจจุบัน}}{\text{รายได้สุทธิเทียบเท่าปัจจุบันต่อปี}} \quad \dots(12)$$



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

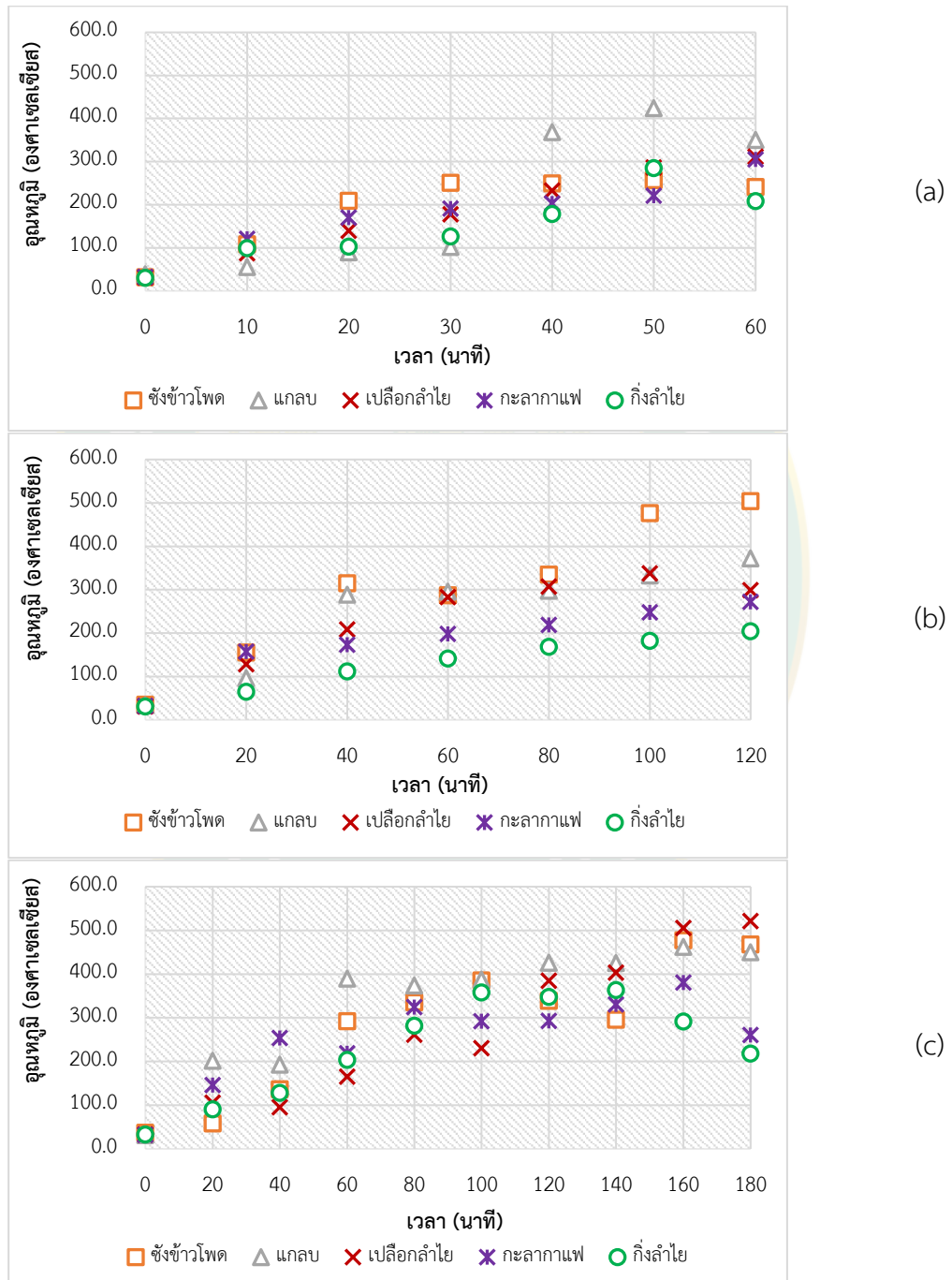
4.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ได้จากการผลิตจากเตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร

โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 300-600 °C (EEDA, 2009) การวิเคราะห์ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์จากซังข้าวโพด (Deal, Brewer et al. 2012), (Mengesha and Ramayya), และ (Mullen, Boateng et al., 2010) ถ่านชีวภาพจากแกลบภายใต้ไพโรไลซิสช้าที่อุณหภูมิต่างกัน 300-700 °C (Sukiran, Kheang et al., 2011) และวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน หรือผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้วจะได้อ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบทางเคมี แต่จะเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของชีวมวลที่นำมาทำถ่านชีวภาพ เพื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการปรับปรุงสภาพดิน (Al-Wabel, Al-Omran et al., 2013) จึงได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันเพื่อหาผลิตภัณฑ์ของแข็ง ก๊าซ และของเหลว ช่วงอุณหภูมิการผลิต ขณะเดียวกันเวลาแตกต่างกัน 1 2 และ 3 ชั่วโมง การผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวล หรืออินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น ไม้ ของเสียบ ไม้ หรือเศษซากทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด ก้านถั่ว ถั่วเปลือกแข็ง เปลือกผลไม้ (Collison, Collison et al., 2009) ข้าวสาลี ฟางข้าว (Qiu, Zhou et al., 2019) ต้นสน ชีวมวลวิลโลว์ ซังข้าวโพด แกลบ ฟางข้าว และชีวมวลมิสแคนทัส (Scistowska, Włodarczyk et al., 2015) และ (Lee, Park et al., 2013) โดยควบคุมอุณหภูมิด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

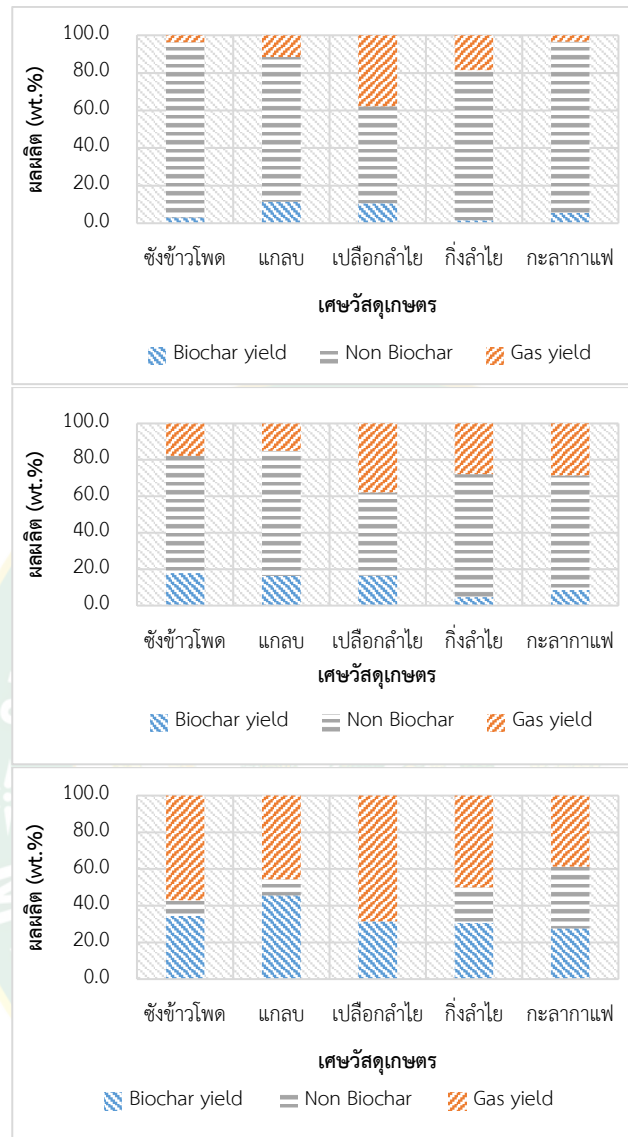
4.1.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร

ผลการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาขนาด 50 ลิตร (ดังแสดงภาพที่ 11 และ 12) พบว่าระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากแกลบและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 126.4±285.1 ถึง 101.5±424.2 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพระหว่าง (1.6-11.5 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (3.5-37.9 wt.%) จากเปลือกลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและกิ่งลำไยน้อยสุด ตามลำดับ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 141.3±328.0 ถึง 287.0±504.0 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพระหว่าง (4.6-17.8 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (15.0-37.8 wt.%) จากเปลือกลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและแกลบน้อยสุด ตามลำดับ และระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 281.6±363.3 ถึง

261.3±521.1 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพจากแกลบสูงที่สุดและกะลาจากาแฟน้อยสุดระหว่าง (27.6-45.6 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (38.6-68.5 wt.%) จากเปลือกลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและกะลาจากาแฟน้อยสุด ตามลำดับ



ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)



(a)

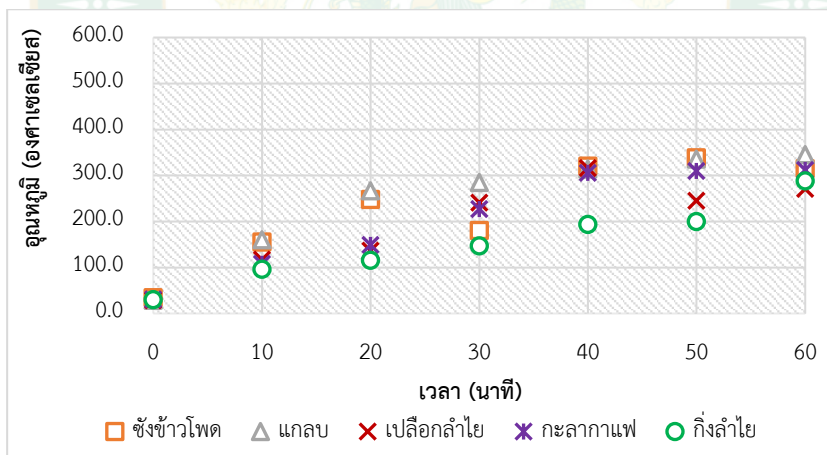
(b)

(c)

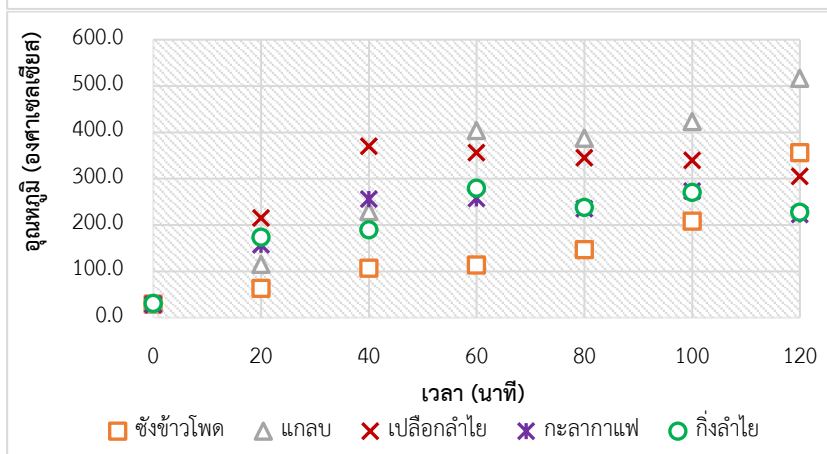
ภาพที่ 12 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)

4.1.2 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร

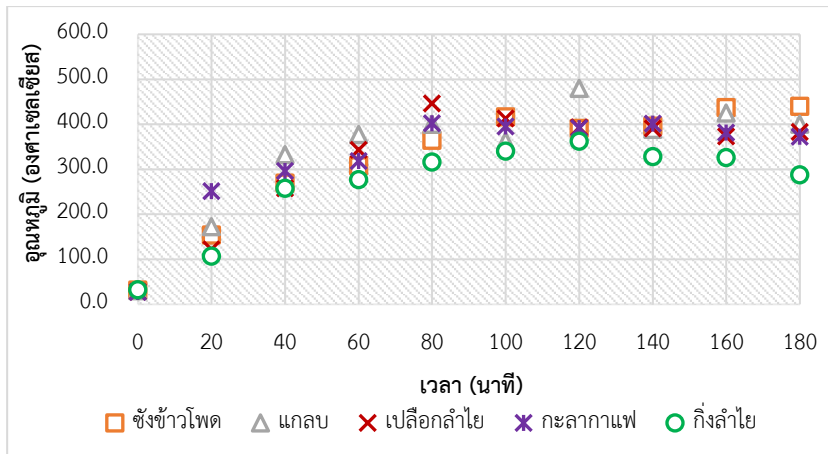
ผลการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาขนาด 100 ลิตร (ดังแสดงภาพที่ 13 และ 14) พบว่าระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากแกลบและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 146.8 ± 288.5 ถึง 285.2 ± 345.1 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพระหว่าง (6.3-18.5 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (33.5-16.7 wt.%) จากเปลือกลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและกะลาตากาแฟน้อยสุด ตามลำดับ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากแกลบและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 189.9 ± 318.1 ถึง 229.0 ± 466.5 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพระหว่าง (14.7-34.2 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (22.1-37.0 wt.%) จากเปลือกลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและซังข้าวโพดน้อยสุด ตามลำดับ และระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 258.1 ± 372.9 ถึง 333.0 ± 497.1 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพจากแกลบสูงที่สุดและกะลาตากาแฟน้อยสุดระหว่าง (32.9-47.8 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (40.7-65.5 wt.%) จากกิ่งลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและกะลาตากาแฟน้อยสุด ตามลำดับ



(a)

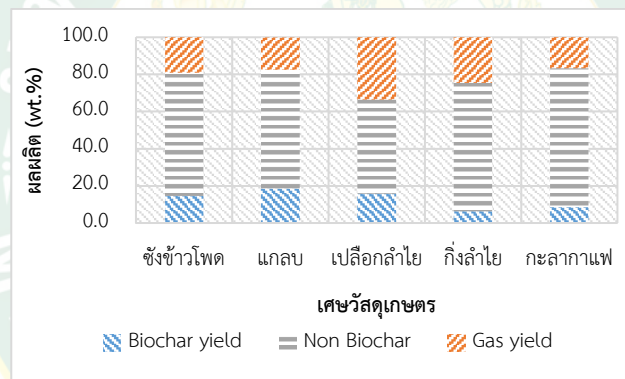


(b)

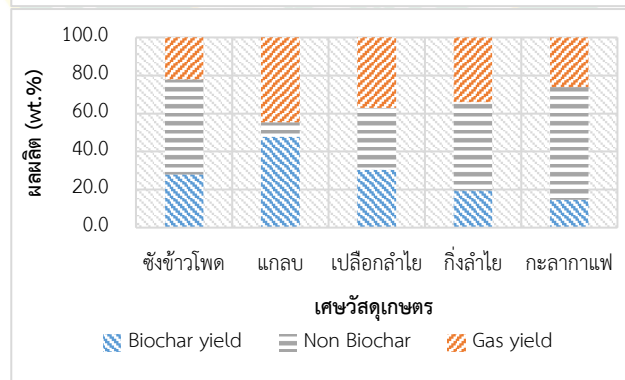


(c)

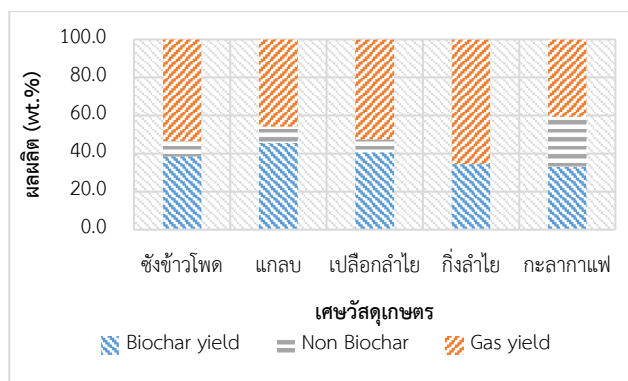
ภาพที่ 13 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)



(a)



(b)



(c)

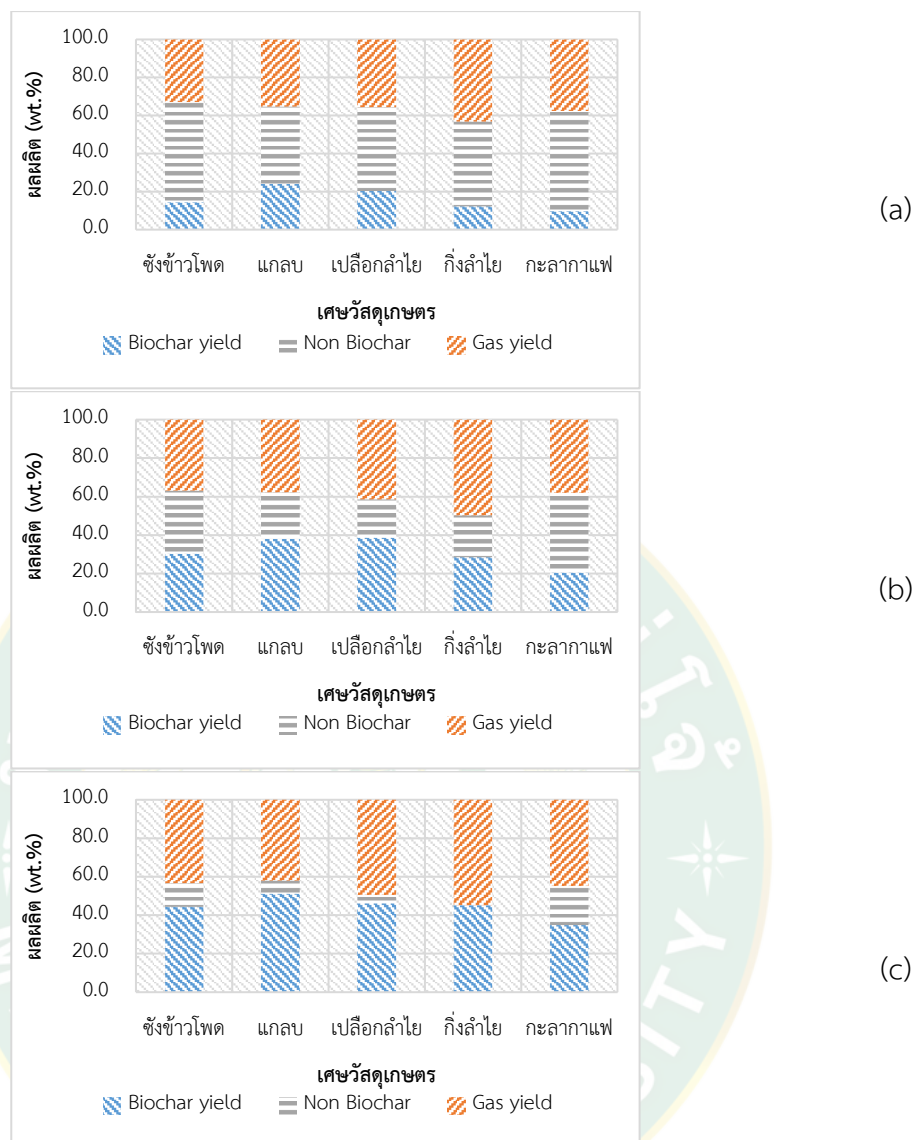
ภาพที่ 14 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)

4.1.3 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร

ผลการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตภัณฑ์กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยเตาขนาด 200 ลิตร (ดังแสดงภาพที่ 15 และ 16) พบว่าระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 201.1 ± 326.8 ถึง 194.4 ± 449.7 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพแกลบสูงสุดกะลากาแฟน้อยสุดระหว่าง (9.7-24.0 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (32.9-43.2 wt.%) จากกิ่งลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและซังข้าวโพดน้อยสุด ตามลำดับ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากแกลบและกิ่งลำไยน้อยสุดระหว่าง 244.7 ± 390.7 ถึง 367.5 ± 488.3 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพแกลบสูงสุดกะลากาแฟน้อยสุดระหว่าง (20.6-38.6 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (36.9-49.7 wt.%) จากกิ่งลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและซังข้าวโพดน้อยสุด ตามลำดับ และระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดคือถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยและกะลากาแฟสุดระหว่าง 238.5 ± 435.6 ถึง 352.9 ± 529.0 °C ให้ผลผลิตเป็นถ่านชีวภาพจากแกลบสูงสุดและกะลากาแฟน้อยสุดระหว่าง (34.9-51.1 wt.%) และปริมาณแก๊สระหว่าง (42.1-54.7 wt.%) จากกิ่งลำไยให้ผลผลิตสูงสุดและแกลบน้อยสุด ตามลำดับ



ภาพที่ 15 แผนภูมิแสดงการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)



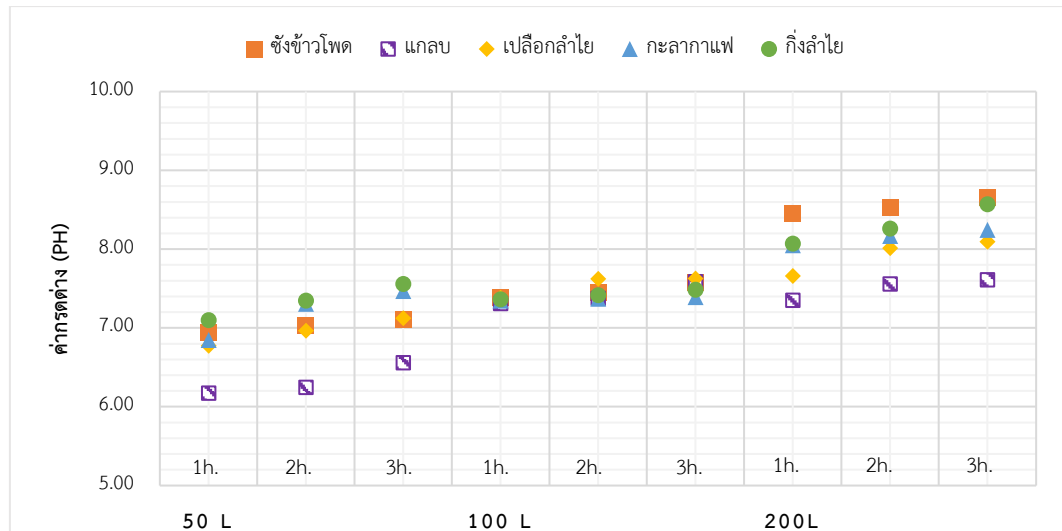
ภาพที่ 16 แผนภูมิแสดงผลผลิตในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร เวลา 1 ชั่วโมง (a) เวลา 2 ชั่วโมง (b) และเวลา 3 ชั่วโมง (c)

ผลจากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในกระบวนการและเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิและผลผลิต (ปริมาณถ่านชีวภาพ) ดีที่สุดโดยเตาทั้ง 3 ขนาด และเมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าเศษวัสดุเกษตรจากแกลบให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุด 51.1 wt.% จากช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 352.9 ± 529.0 องศาเซลเซียส และส่วนปริมาณแก๊สจากกิ่งลำไยสูงที่สุด 54.7 wt.% โดยเตาขนาด 200 ลิตร เพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม ส่งผลทำให้มีกำลังการผลิตและประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด เนื่องจากการกระจายอุณหภูมิที่ดีที่สุดตามทฤษฎีไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง $350-600$ °C

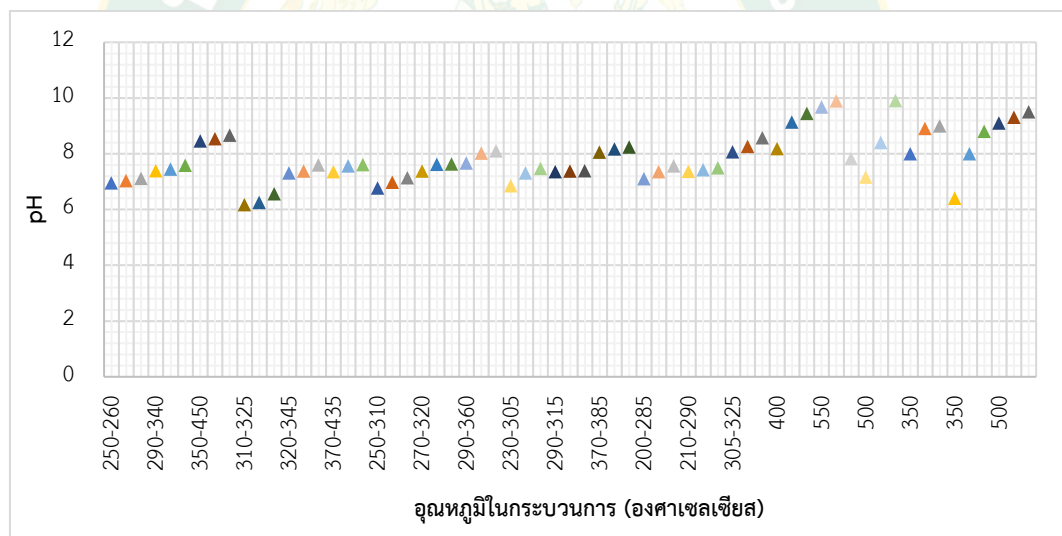
(Collison, Collison et al., 2009) การผลิตถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์โดยวิธีไพโรไลซิสแบบช้า อัตราการให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์และผลผลิตก๊าซ (Chen, Liu et al., 2015) ขณะเดียวกันระยะเวลาในกระบวนการ (Pituya, Sriburi et al., 2017) ยังส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและคุณสมบัติของถ่านชีวภาพอีกด้วย ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้เกิดจากการสลายตัวความร้อนองค์ประกอบของเศษวัสดุเกษตรจะมีความแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิและระยะเวลา ในการผลิตถ่านชีวภาพจะมีช่วงอุณหภูมิ 0-300 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส เป็นการย่อยสลายโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งในช่วงกระบวนการนี้จะทำให้เกิดน้ำมันดินและไบโอชาร์ และตั้งแต่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป จะทำให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกเอาไหม้จนหมด ทำให้เกิดการควบแน่นของโครงสร้าง polycyclic ที่เป็นสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนจนทำให้เป็นไบโอชาร์มีค่าคาร์บอนสูง และเริ่มเกิดปริมาณเถ้ามากขึ้น สำหรับวัสดุอินทรีย์หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หรือการเผาไหม้แล้ว ไบโอชาร์จะมีองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ ประโยชน์ที่ได้รับคือการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพดิน (Sun, Gao et al., 2014)

4.2 คุณสมบัติความเป็นกรดต่างของถ่านชีวภาพ (pH-value)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตรมีองค์ประกอบคาร์บอนจะมีความสอดคล้องกับปริมาณเถ้า และส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น (Mullen, Boateng et al., 2010) จึงได้ทำการศึกษาความเป็นกรดต่างของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กะลากาแฟ และกิ่งกล้วย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลค่ากรดต่างของเศษวัสดุเกษตรอยู่ในช่วง 4.09-6.01 เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 17) พบว่าระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 6.17-7.10, 7.31-7.39 และ 7.35-8.46 ตามลำดับ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 6.25-7.35, 7.37-7.62 และ 7.56-8.53 ตามลำดับ และระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 6.56-7.56, 7.39-7.63 และ 7.61-8.66 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสและเวลาการรักษาอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ค่าความเป็นต่างของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น (Liu, Zhang et al., 2014 และ Chen, Li et al., 2016) อีกทั้งยังเกิดการกำจัดองค์ประกอบของวัสดุ สารอินทรีย์ และเกลืออัลคาไลจากถ่านชีวภาพ (Xu, Xiao et al., 2011, Angin., 2013, และ Reza, Afroze et al., 2020)



ภาพที่ 17 แผนภูมิแสดงค่ากรดต่างของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เต่าถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบค่ากรดต่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นมีค่าความเป็นกรดต่างของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน การสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เนื่องจากระยะเวลาและการกระจายอุณหภูมิภายในเตา ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Zhang, Voroney et al., 2015) ทำให้องค์ประกอบหลักซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์, อะลูมิเนียมออกไซด์, เพอริกออกไซด์, แคลเซียมออกไซด์, และออกไซด์ของอัล

ค่าไล องค์กรประกอบเถ้าของเศษวัสดุเกษตรที่สูงนั้นส่งผลทำให้ค่าความเป็นด่างสูงตาม และตามมาตรฐาน EBC นั้นจะต้องมีค่าความเป็นกรดต่างไม่เกิน 10.0 (Abenavoli, Longo et al., 2016) เพื่อที่จะได้แปลงธาตุอาหารให้พืชดูดซึมได้ง่าย และการใส่ถ่านชีวภาพที่ปริมาณเถ้ามากอาจทำให้ค่า pH ของดินสูงเกินไป และอาจทำให้พืชขาดจุลธาตุได้ (Fox and Kamprath., 1971) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติค่าความเป็นกรดต่างเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 7 และภาพที่ 18)

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่ากรดต่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

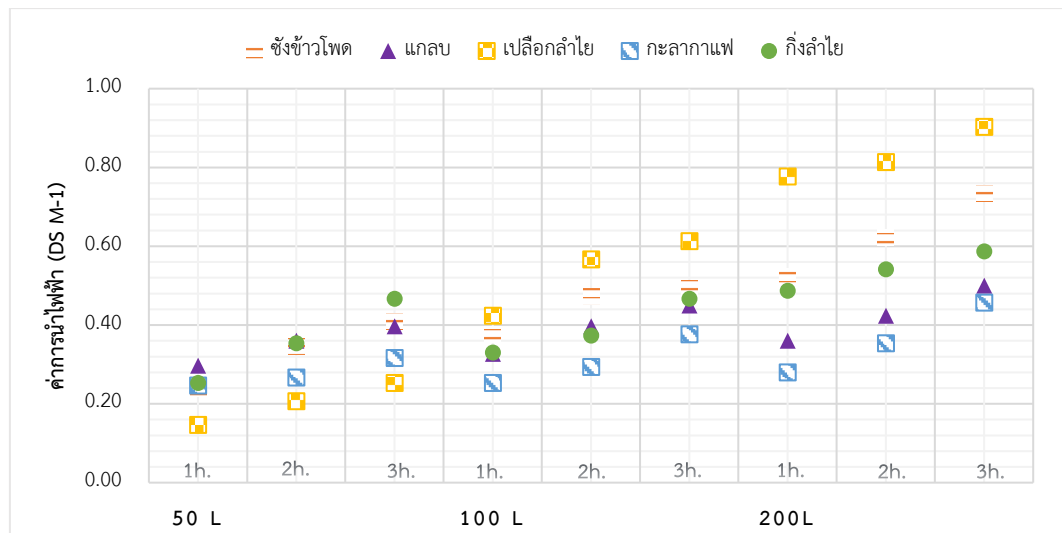
ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	pH	ขนาดเตา	References
ซังข้าวโพด	250-260	6.95	50 ลิตร	
	360-505	7.03		
	390-490	7.11		
	290-340	7.39	100 ลิตร	
	335-360	7.45		
	395-440	7.58		
	350-450	8.46	200 ลิตร	
	370-420	8.53		
	410-450	8.66		
แกลบ	310-325	6.17	50 ลิตร	
	320-370	6.25		
	420-465	6.56		
	320-345	7.31	100 ลิตร	
	435-515	7.38		
	410-500	7.59		
	370-435	7.35	200 ลิตร	
	405-490	7.56		

	450-530	7.61	
เปลือกลำไย	250-310	6.77	50 ลิตร
	290-340	6.97	
	355-520	7.13	
	270-320	7.38	100 ลิตร
	335-370	7.62	
	395-450	7.63	
	290-360	7.66	200 ลิตร
	340-380	8.02	
	400-510	8.10	
กะลากาแฟ	230-305	6.85	50 ลิตร
	240-310	7.31	
	300-380	7.47	
	290-315	7.35	100 ลิตร
	295-330	7.37	
	380-405	7.39	
	370-385	8.05	200 ลิตร
	410-470	8.17	
	400-435	8.24	
กิ่งลำไย	200-285	7.10	50 ลิตร
	215-330	7.35	
	300-365	7.56	
	210-290	7.36	100 ลิตร
	275-318	7.42	
	320-375	7.49	
	305-325	8.07	200 ลิตร
	300-390	8.26	
	420-500	8.57	
หญ้าเนเปียร์	400	8.18	Reza, et al. (2020)
	450	9.13	

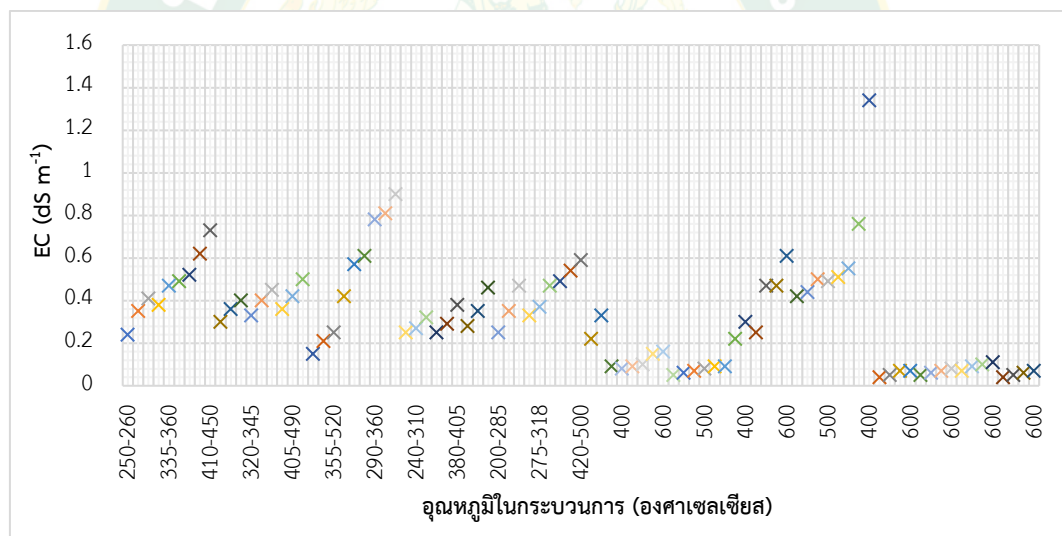
	500	9.44	
	550	9.67	
	600	9.89	
ซังข้าวโพด	500	7.82	Mullen, et al.
ส่วนที่เหลือจาก		7.16	(2010)
ข้าวโพด			
ไม้มะกอก	400	8.4	Abenavoli, et al.
ไม้เฮเซลนัท		9.9	(2016)
ฟางโคโนล่า	350	8.0	Xu, et al. (2011)
ฟางถั่วลิสง		8.9	
ฟางถั่วเหลือง		9.0	
แกลบ		6.4	
ซีเลื่อยไม้ป้อปลาร์	400	8.0	Chen, et al. (2016)
	450	8.8	
	500	9.1	
	550	9.3	
	600	9.5	

4.3 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพ (Electrical Conductivity)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) แสดงถึงค่าความเค็มของถ่านชีวภาพ เนื่องจากคุณสมบัติองค์ประกอบของเกลืออัลคาไลและปริมาณคาร์บอน (Abenavoli, Longo et al., 2016) จึงได้ทำการศึกษาความเป็นกรนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกถั่วลิสง กะลากาแฟ และกิ่งถั่วลิสง โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในการกระบวนการผลิต 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลค่าการนำไฟฟ้าของเศษวัสดุเกษตรอยู่ในช่วง 0.13-0.21 dS m⁻¹ เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 19) พบว่าระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 0.15–0.30, 0.25–0.42 และ 0.28–0.78 dS m⁻¹ ตามลำดับ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 0.21–0.36, 0.29–0.57 และ 0.35–0.81 dS m⁻¹ ตามลำดับ และ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 0.25–0.47, 0.38–0.61 และ 0.46–0.90 dS m⁻¹ ตามลำดับ



ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เต่าถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเต่าผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

จากผลการทดสอบพบว่าเต่าทั้ง 3 ขนาดนั้นระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นมีค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสและเวลาการรักษาอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น (Sun, He et al., 2017 และ Zhang, Zhang et al., 2020) และจะแปรผันตามชนิดของเศษวัสดุเกษตร (Zhang, Chen et al., 2017) ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการปรับปรุงดินในพื้นที่แห้งแล้ง แต่ที่

อุณหภูมิสูงเมื่อนำไปใช้กับดิน อาจเพิ่มความเค็มของดินและส่งผลที่ไม่พึงประสงค์ต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ (Al-Wabel, Al-Omran et al., 2013) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มการซึมน้ำจึงทำให้เกลือสามารถถูกชะออกจากชั้นดินได้มากขึ้น และช่วยลดการระเหยน้ำจากผิวดินจึงช่วยลดการสะสมเกลือที่ชั้นบนดินได้ (Lakhdar, Rabhi et al., 2009) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมในการปรับปรุงดิน (Jung, Kim et al., 2016) เป็นต้น ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 8 และภาพที่ 20)

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	EC (dS m ⁻¹)	ขนาดเตา	References
ซังข้าวโพด	250-260	0.24	50 ลิตร	
	360-505	0.35		
	390-490	0.41		
	290-340	0.38	100 ลิตร	
	335-360	0.47		
	395-440	0.49		
	350-450	0.52	200 ลิตร	
	370-420	0.62		
	410-450	0.73		
แกลบ	310-325	0.30	50 ลิตร	
	320-370	0.36		
	420-465	0.40		
	320-345	0.33	100 ลิตร	
	435-515	0.40		
	410-500	0.45		
	370-435	0.36	200 ลิตร	
	405-490	0.42		

	450-530	0.50	
เปลือกลำไย	250-310	0.15	50 ลิตร
	290-340	0.21	
	355-520	0.25	
	270-320	0.42	100 ลิตร
	335-370	0.57	
	395-450	0.61	
	290-360	0.78	200 ลิตร
	340-380	0.81	
	400-510	0.90	
กะลากาแฟ	230-305	0.25	50 ลิตร
	240-310	0.27	
	300-380	0.32	
	290-315	0.25	100 ลิตร
	295-330	0.29	
	380-405	0.38	
	370-385	0.28	200 ลิตร
	410-470	0.35	
	400-435	0.46	
กิ่งลำไย	200-285	0.25	50 ลิตร
	215-330	0.35	
	300-365	0.47	
	210-290	0.33	100 ลิตร
	275-318	0.37	
	320-375	0.47	
	305-325	0.49	200 ลิตร
	300-390	0.54	
	420-500	0.59	
ไม้มะกอก	400	0.22	Abenavoli, et al.
ไม้เฮเซลนัท		0.33	(2016)
ไม้โอ๊ค	350	0.09	Zhang, et al.

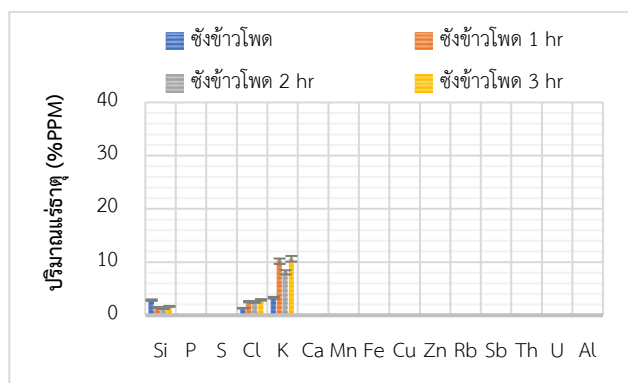
	400	0.08	(2017)
	450	0.09	
	500	0.10	
	550	0.15	
	600	0.16	
ไม้สน	350	0.05	
	400	0.06	
	450	0.07	
	500	0.08	
	550	0.09	
	600	0.09	
กากอ้อย	350	0.22	
	400	0.30	
	450	0.25	
	500	0.47	
	550	0.47	
	600	0.61	
เปลือกถั่วลิสง	350	0.42	
	400	0.44	
	450	0.50	
	500	0.49	
	550	0.51	
	600	0.55	
เศษวัสดุโคน	200	0.76	Al-Wabel, et al.
คาร์ปัส	400	1.34	(2013)
ฟางข้าวสาลี	300	0.04	Zhang, et al.
	400	0.05	(2020)
	500	0.07	
	600	0.07	
ฟางข้าวโพด	300	0.05	
	400	0.06	

	500	0.07
	600	0.08
ฟางผักกาด	300	0.07
	400	0.09
	500	0.10
	600	0.11
ฟางข้าว	300	0.04
	400	0.05
	500	0.06
	600	0.07

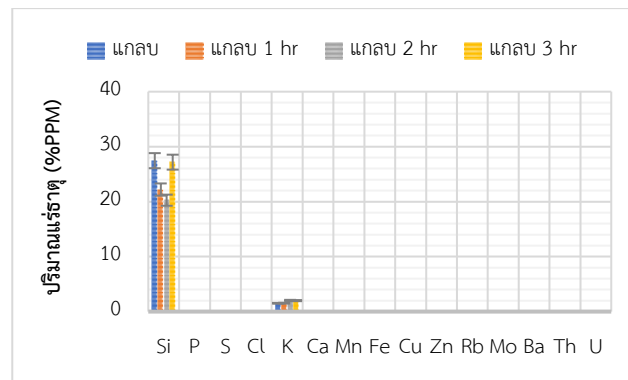
4.4 การวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ของถ่านชีวภาพ (X-ray fluorescence)

การวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence: XRF) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการกระตุ้นพลังงานแก่สารตัวอย่าง เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร จึงได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กะลากาแฟ และกิ่งกล้วย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 1, 2 และ 3 ชั่วโมง องค์ประกอบแร่ธาตุประกอบด้วย Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sb, Ba, Th, U, และ Al เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 21, 22 และ 23) พบว่าชังข้าวโพดมีปริมาณซิลิกอน 2.84 % และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (1.22-1.66%), (2.02-2.53%) และ (1.84-2.41%) ปริมาณแคลเซียม 1.32% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (2.47-2.89%), (2.06-3.11%) และ (1.90-3.62%) ปริมาณโพแทสเซียม 3.30% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (8.05-10.61%), (8.32- 9.19%) และ (8.90-10.53%) และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ตามลำดับ แกลบมีปริมาณซิลิกอน 27.45% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (20.26-27.18%), (22.79-28.89%) และ (28.52-33.13%) ปริมาณโพแทสเซียม 1.51% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (1.53-2.03%), (1.67-2.09%) และ (1.43-2.86%) และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ตามลำดับ เปลือกกล้วยมีปริมาณโพแทสเซียม 3.43% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (3.41-7.35%), (3.90-4.48%) และ (4.07-5.66%) ปริมาณแคลเซียม 2.14% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (5.81-7.12%), (5.04-9.64%) และ (6.00-7.98%) และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ตามลำดับ กะลากาแฟมีปริมาณโพแทสเซียม 1.34% และ

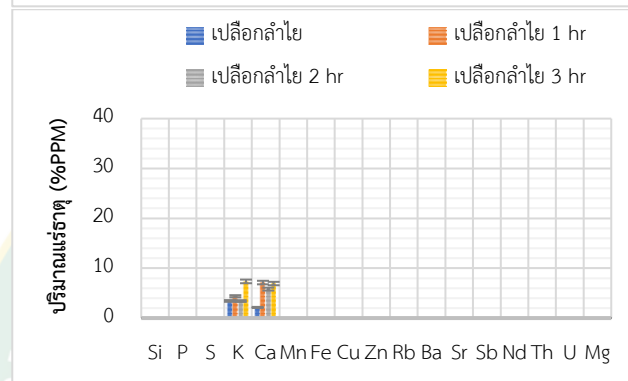
ถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (3.60-4.84%), (2.10-3.95%) และ (3.54-4.20%) ปริมาณแคลเซียม 0.0089% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (0.0092-0.0099%), (1.56-5.04%), และ (1.04-1.29%) และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ตามลำดับ กิ่งลำไยมีปริมาณโพแทสเซียม 2.88% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (2.23-3.01%), (3.24-3.44%) และ (3.32-4.09%) ปริมาณแคลเซียม 2.95% และถ่านชีวภาพมีปริมาณระหว่าง (4.59-6.09%), (6.02-8.36%) และ (6.81-7.34%) และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีองค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านชีวภาพแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่ระยะเวลา 2-3 ชั่วโมงในการผลิต องค์ประกอบแร่ธาตุที่เกิดขึ้นจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล (Pituya, Sriburi et al., 2017) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าขององค์ประกอบแร่ธาตุทั้งเพิ่มขึ้น (Zhang, Voroney et al., 2015) และลดลง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบชีวมวลและระยะเวลาในการผลิตจะสอดคล้องมีความเข้มข้นตามปริมาณธาตุ ธาตุอาหารพืชที่สำคัญ อย่างเช่น โพแทสเซียม (K), ฟอสฟอรัส (P), แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น (Mullen, Boateng et al., 2010 และ Kim, Kim et al., 2013) และความเข้มข้นปริมาณธาตุจะสัมพันธ์กับปริมาณซิลิกอน โขเดียม โพแทสเซียม ปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียม ประกอบด้วย (KH_2PO_4), (CaCO_3), (KCaCl_3), (KHCO_3), ($\text{K}_2\text{MgO}_7\text{P}_2$), ($\text{KMgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), (KCl) และ (CaCO_3) รวมอยู่ในองค์ประกอบธาตุ (รัตนชลและคณะ, 2560) และอีกทั้งยังส่งผลให้มีค่า pH สูง (Nattaporn, Gilkes et al., 2013) เนื่องจากมีแร่ธาตุที่เป็นต่างถ่านชีวภาพมีไอออนบวกในปริมาณที่แตกต่างกันตามวัตถุดิบที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ CEC กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังสัมพันธ์กับองค์ประกอบแร่ธาตุที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน (Das, Ghosh et al., 2021) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติขององค์ประกอบแร่ธาตุเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน และการดูดซับโลหะ ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



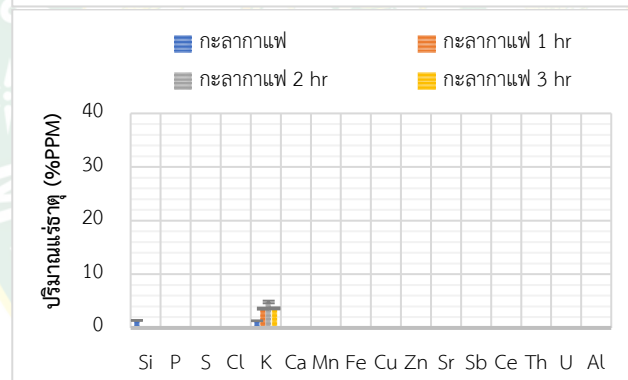
(a)



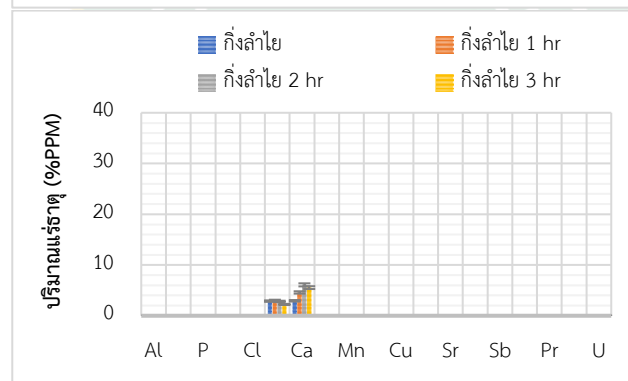
(b)



(c)

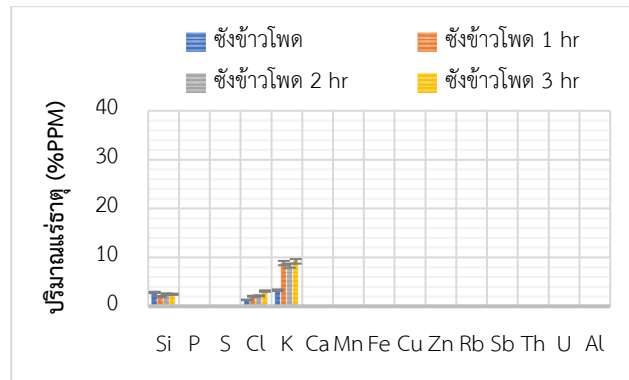


(d)

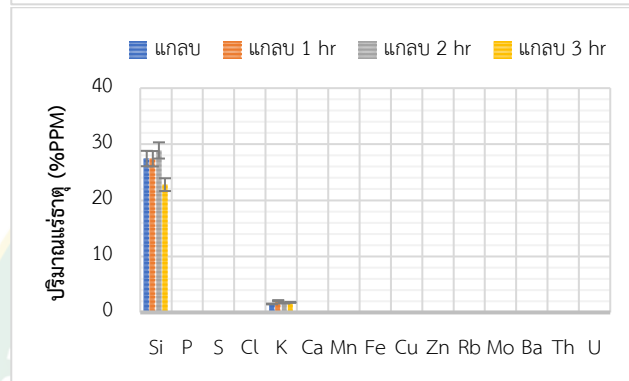


(e)

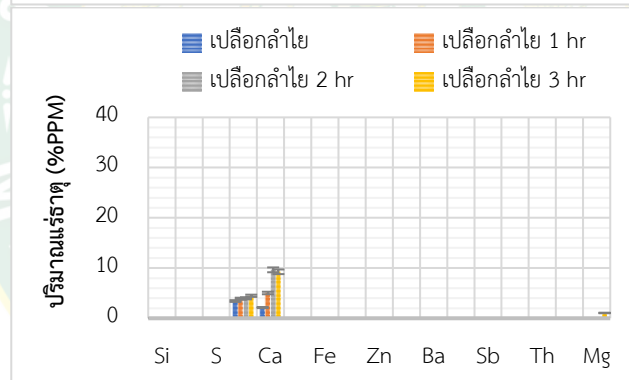
ภาพที่ 21 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกกล้าโย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง



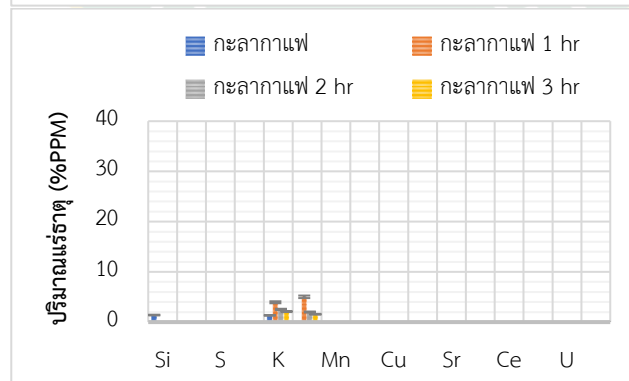
(a)



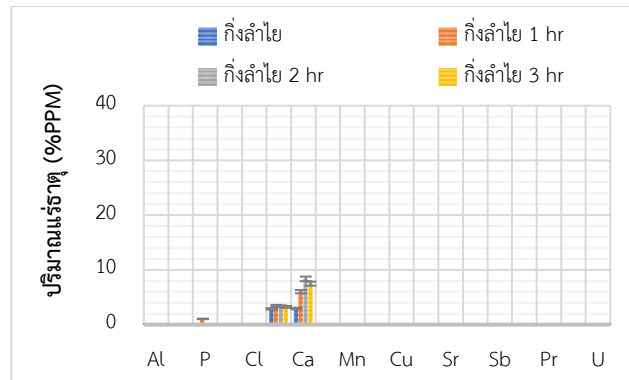
(b)



(c)

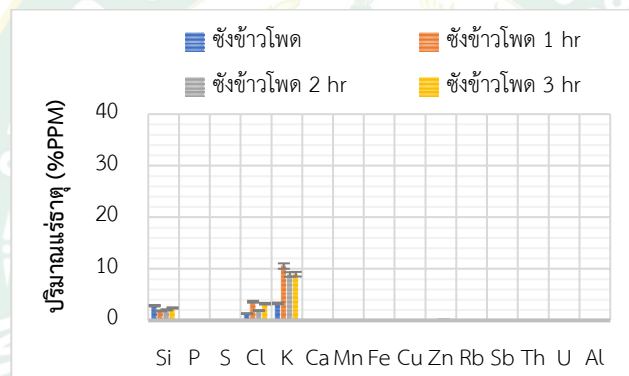


(d)

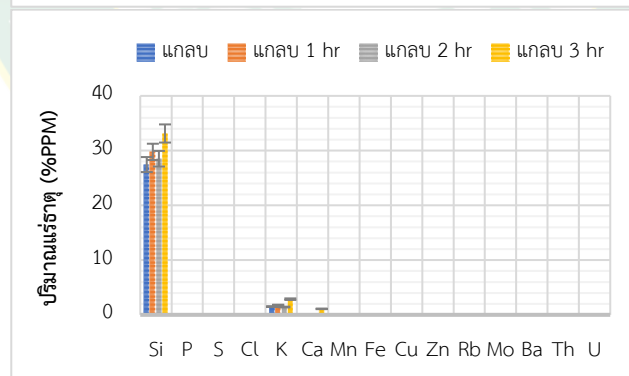


(e)

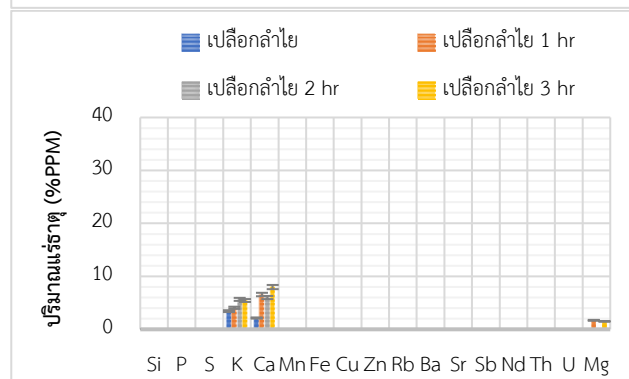
ภาพที่ 22 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง



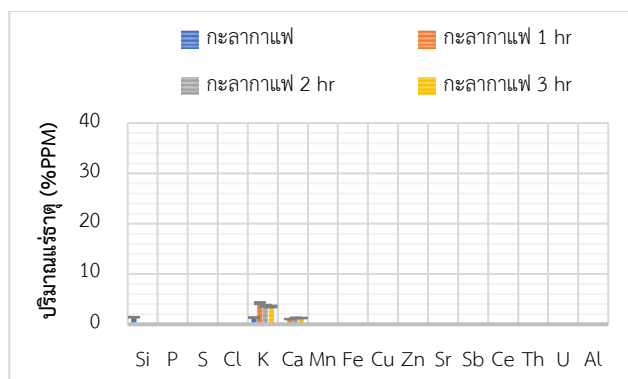
(a)



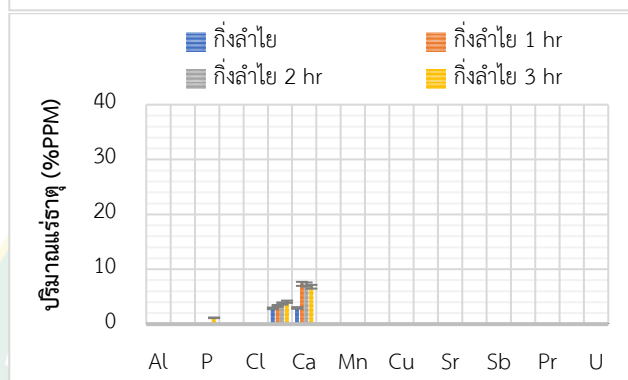
(b)



(c)



(d)



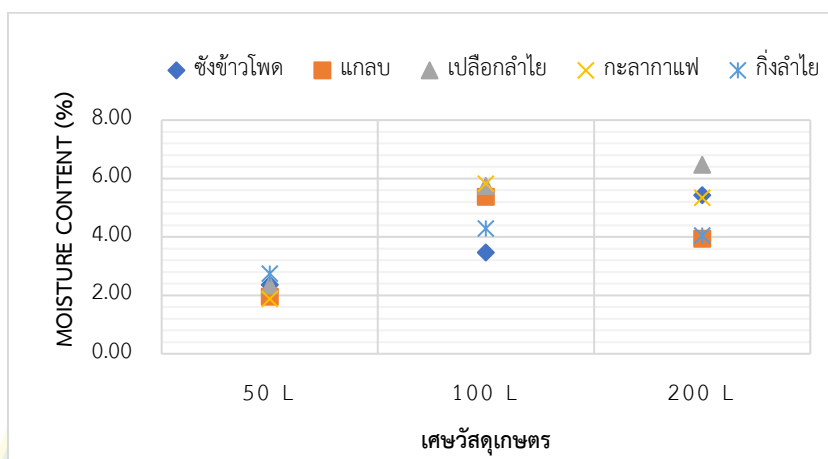
(e)

ภาพที่ 23 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ ของเศษวัสดุเกษตรและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกกล้วย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

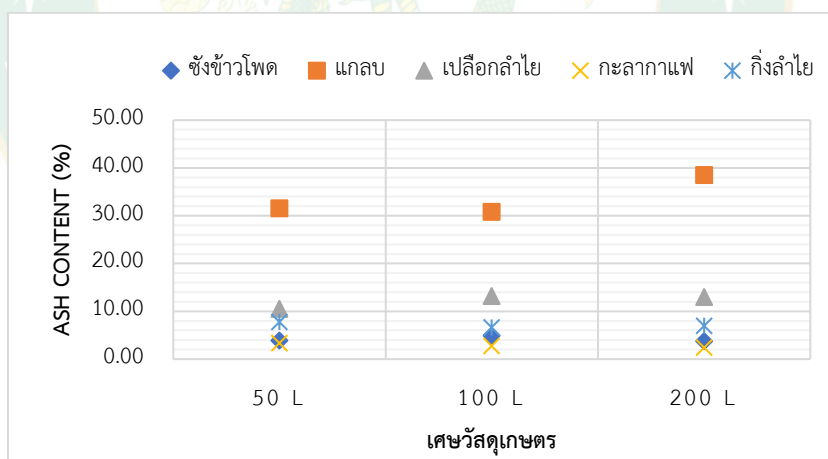
4.5 คุณสมบัติของปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร จึงได้ทำการศึกษาค่าคุณสมบัติของปริมาณกลุ่มสารของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าถ่านชีวภาพมีปริมาณความชื้น (moisture content) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (1.88-2.74 wt.%), (3.47-5.82 wt.%) และ (3.94-6.47 wt.%) ดังแสดงภาพที่ 24 ตามลำดับ ปริมาณเถ้า (ash content) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (3.32-31.54 wt.%), (2.73-30.84 wt.%) และ (2.42-38.55 wt.%) ดังแสดงภาพที่ 25 ตามลำดับ ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (26.63-40.27 wt.%), (19.22-35.71 wt.%) และ (14.12-32.07 wt.%) ดังแสดงภาพที่ 26 ตามลำดับ และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ

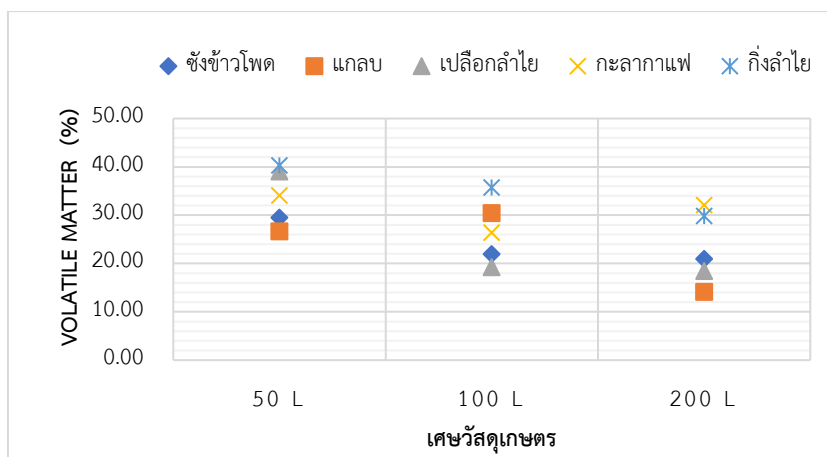
(39.88-64.28 wt.%), (33.38-69.66 wt.%) และ (43.39-69.87 wt.%) ดังแสดงภาพที่ 27 ตามลำดับ



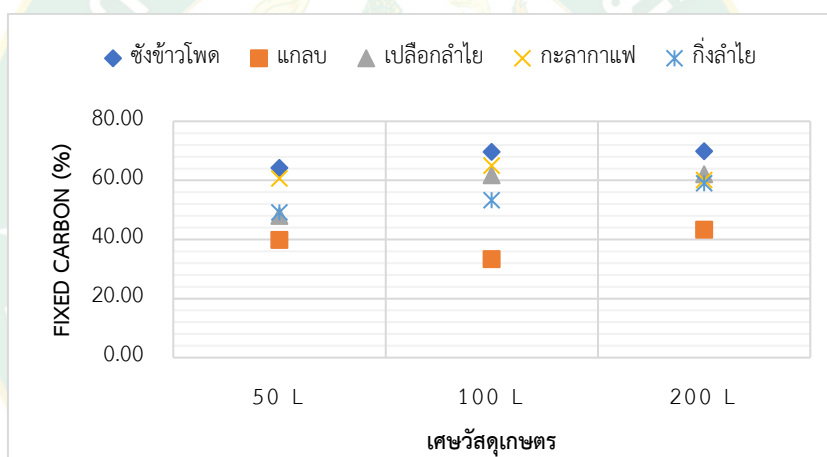
ภาพที่ 24 แผนภูมิแสดงปริมาณความชื้น (moisture content: MC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 25 แผนภูมิแสดงปริมาณเถ้า (ash content: Ash) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 26 แผนภูมิแสดงปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 27 แผนภูมิแสดงปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีปริมาณกลุ่มสาร (Proximate) ของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล แสดงให้เห็นว่าหลังจากกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยของถ่านชีวภาพลดลง ปริมาณเถ้าทั้งเพิ่มขึ้น (Mullen, Boateng et al., 2010) และลดลง เนื่องจากการกระจายอุณหภูมิในเตา ซึ่งเป็นหน่วยวัดของสารที่ไม่ระเหยและส่วนประกอบที่ไม่ติดไฟของถ่านชีวภาพ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Brewer, Schmidt-Rohr et al., 2009, Angin., 2013, และ Das, Ghosh et al., 2021) ปริมาณคาร์บอนคงที่และเถ้าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น การสลายตัวด้วยความร้อนของส่วนประกอบ

อินทรีย์เกิดการก่อตัวของออกไซด์และคาร์บอนेटของเถ้าทำให้องค์ประกอบเป็นคาร์บอน ส่งผลทำให้ปริมาณสารระเหยลดลง (Yousaf, Liu et al., 2017) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติปริมาณกลุ่มสาร (Proximate) เพื่อนำไปใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพถ่านชีวภาพ ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) ของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิใน กระบวนการ (°C)	MC (wt.%)	Ash (wt.%)	VM (wt.%)	FC (wt.%)	ขนาด เตา (ลิตร)	References
ซัง	-	5.06	2.99	72.77	-		
ข้าวโพด	390-490	2.36	3.90	29.47	64.28	50	
	395-440	3.47	4.92	21.95	69.66	100	
	410-450	5.43	3.74	20.95	69.87	200	
แกลบ	-	7.58	17.95	57.28	-		
	420-465	1.95	31.54	26.63	39.88	50	
	410-500	5.37	30.84	30.42	33.38	100	
	450-530	3.94	38.55	14.12	43.39	200	
เปลือก	-	7.20	5.58	67.98	-		
ลำไย	355-520	2.34	10.55	39.05	48.06	50	
	395-450	5.75	13.21	19.22	61.82	100	
	400-510	6.47	12.98	18.47	62.07	200	
กะลา	-	5.53	0.61	75.90	-		
กาแฟ							
	300-380	1.88	3.32	34.05	60.75	50	
	380-405	5.82	2.73	26.42	65.03	100	
	400-435	5.34	2.42	32.07	60.17	200	
กิ่งลำไย	-	7.12	1.50	69.80	-		
	300-365	2.74	7.77	40.27	49.22	50	
	320-375	4.29	6.66	35.71	53.34	100	

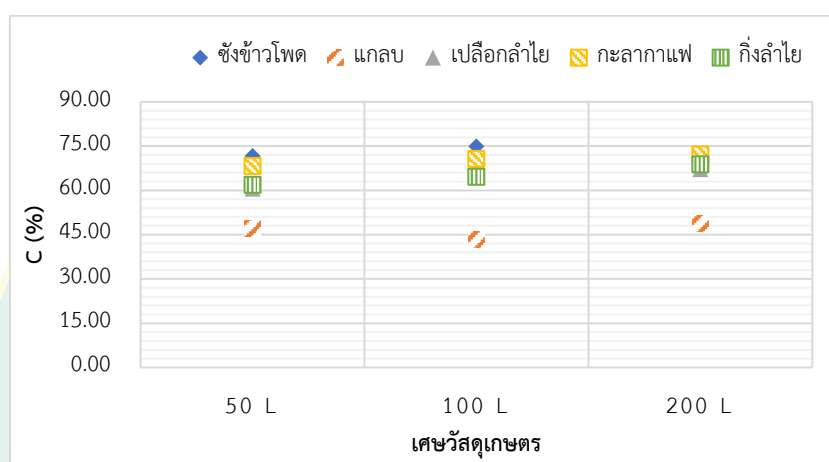
	420-500	4.05	6.98	29.86	59.11	200	
ต้นหญ้า	500	0.9	52.5	7.1	39.5		Brewer, et al. (2009)
ต้นข้าวโพด		1.8	32.4	11.1	54.7		
ไม้		2.6	13.9	19.7	63.8		
เมล็ดดอก	400	-	7.50	25.20	67.30		Angin (2013)
คำฝอย	450		8.20	20.00	71.80		
	500		8.50	16.50	75.00		
	550		8.90	13.90	77.20		
	600		9.20	11.60	79.20		
ซัง	-	-	1.94	-	-		Mullen, et al. (2010)
ข้าวโพด	500		13.34				
ส่วนที่เหลือจาก	-		4.88				
ข้าวโพด	500		32.78				
ต้น	400	15.62	15.2	26.56	45.56		Das, et al. (2021)
ข้าวโพด	500	10.90	19.7	20.67	48.13		
	600	7.28	23.4	17.81	49.56		
ต้นถั่ว	400	11.61	19.7	28.18	39.56		
	500	7.80	23.3	23.56	40.73		
	600	5.62	26.5	20.61	42.29		
ใบหรือ	400	10.36	10.3	31.46	47.73		
เข้มน	500	6.60	13.5	27.62	50.83		
	600	4.48	16.7	24.53	52.56		
ต้นวัชพืช	400	12.37	11.6	28.81	52.61		
	500	8.30	15.7	22.56	55.61		
	600	6.26	20.2	19.48	57.67		
เปลือกถั่ว	-	6.24	2.02	72.90	18.84		Yousaf, et al. (2017)
ลิสง	300	3.54	9.53	45.12	41.81		
	500	2.25	10.94	15.58	71.23		
ฟางข้าว	-	6.95	4.86	69.06	19.13		

300	2.84	8.15	35.65	53.36
500	2.14	9.97	19.46	68.43

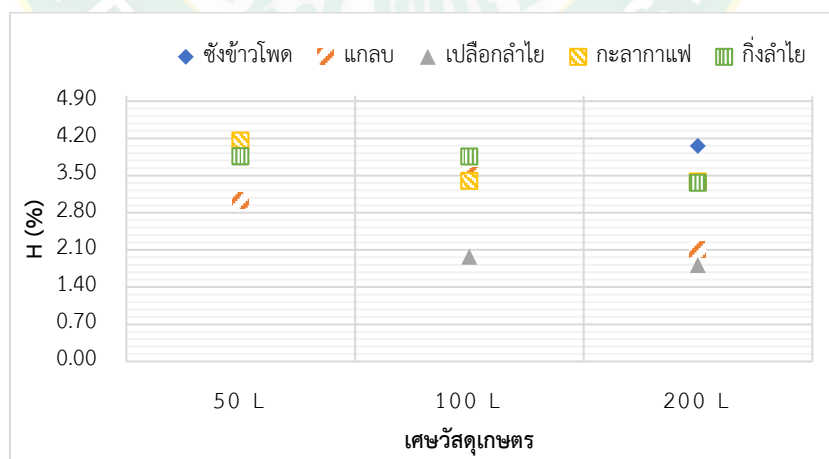
4.6 คุณสมบัติขององค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของ ไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ ในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรต หรือเซลลูโลส (นคร ธนศิษฐ์ และคณะ, 2552) จึงได้ทำการศึกษาลำดับองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชั่งข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลาเผา และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน (C) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (47.26-71.65%), (43.25-74.94%) และ (48.81-68.91%) ดังแสดงภาพที่ 28 ตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจน (H) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (3.04-4.16%), (1.98-3.86%) และ (1.82-4.06%) ดังแสดงภาพที่ 29 ตามลำดับ กำมะถัน (S) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (0.02-0.07%), (0.01-0.04%) และ (0.01-0.02%) ดังแสดงภาพที่ 30 ตามลำดับ ปริมาณออกซิเจน (O) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (17.24-25.54%), (13.99-22.29%) และ (10.57-22.14%) ดังแสดงภาพที่ 31 ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจน (N) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (0.57-1.58%), (0.54-1.32%) และ (0.29-1.40%) ดังแสดงภาพที่ 32 ตามลำดับ Gross Heating Value มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ (4,133.13-6,456.35%), (3,793.03-6,733.81%) และ (4,276.92-6,522.42%) ดังแสดงภาพที่ 33 ตามลำดับ และ Net Heating Value (3,977.16-6,259.19%), (3,613.35-6,556.40%) และ (4,168.30-6,348.34%) ดังแสดงภาพที่ 34 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีสำหรับองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล องค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในกระบวนการและเวลาปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิสูงปริมาณคาร์บอน (Brewer, et al., 2009) และไนโตรเจนก็จะสูงตาม แต่เนื่องจากเศษวัสดุเกษตรมีปริมาณไนโตรเจนน้อย หากนำไปใช้ในการบำรุงดิน หรือบำรุงพืชต้องมีการศึกษาองค์ประกอบวัสดุเกษตรอื่น ๆ เพิ่มเติม หรือใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการช่วยตรึงไนโตรเจนเพื่อให้พืชดูดซึมได้ดีขึ้น ส่วนไฮโดรเจนและออกซิเจนจะลดลงอาจเกิดจากการสูญเสียสารระเหย (Zhang, Zhang et al., 2020 และ Lin, Zhang et al., 2021) ค่าความแตกต่างของ Gross Heating Value และ Net Heating Value สำหรับถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น และปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่าน และกำมะถันมีปริมาณ

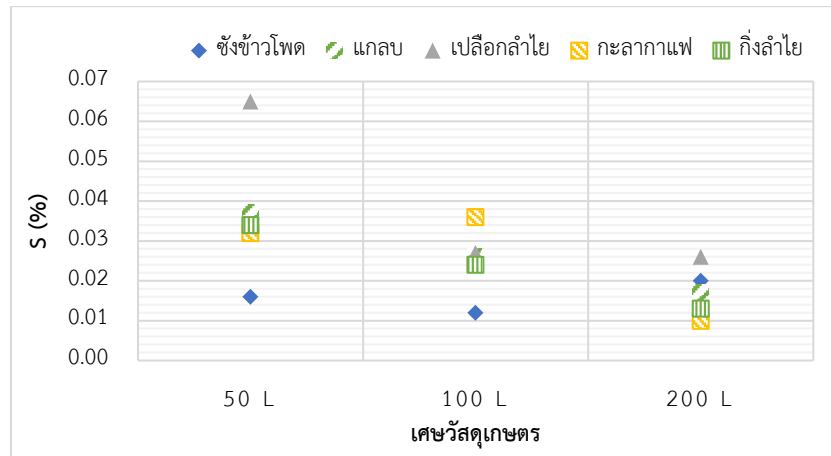
น้อยมากนั้น จะส่งผลดีต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ (Angin., 2013) ถ่านชีวภาพยังช่วยลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนด้วยการเพิ่มและกักเก็บคาร์บอนในดิน (Zhang and You., 2013) ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium จะต้องมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 50% (Abenavoli, Longo et al., 2016) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน หรืออื่น ๆ ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 10)



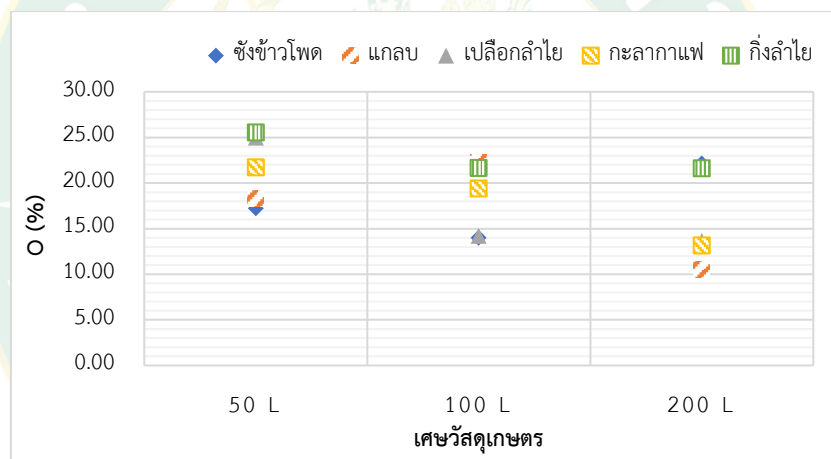
ภาพที่ 28 แผนภูมิแสดงปริมาณคาร์บอน (C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



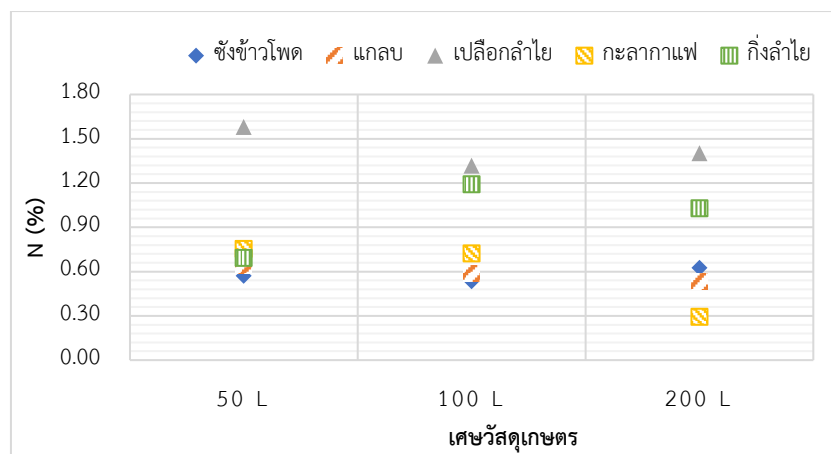
ภาพที่ 29 แผนภูมิแสดงปริมาณไฮโดรเจน (H) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



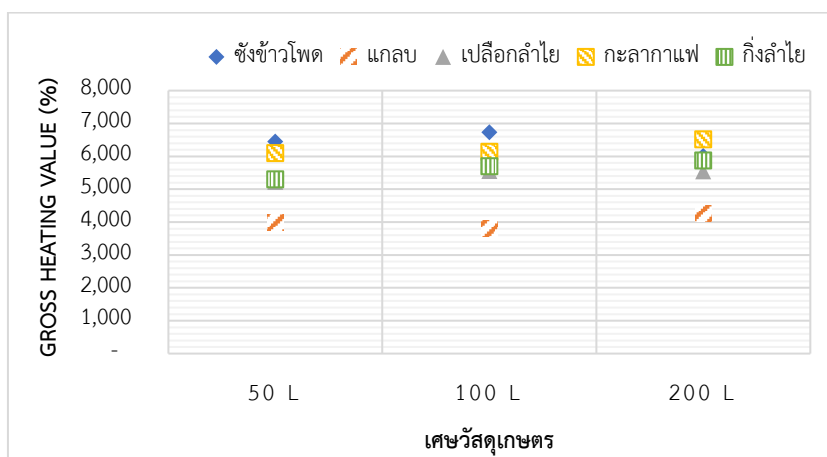
ภาพที่ 30 แผนภูมิแสดงปริมาณกำมะถัน (S) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



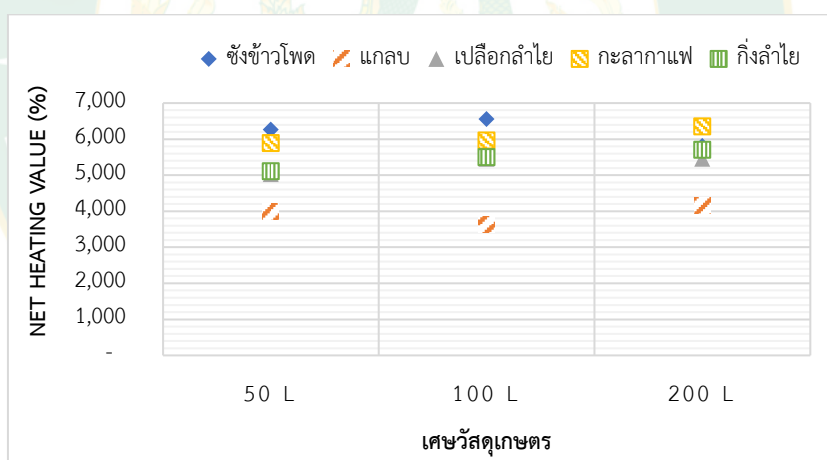
ภาพที่ 31 แผนภูมิแสดงปริมาณออกซิเจน (O) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 32 แผนภูมิแสดงปริมาณไนโตรเจน (N) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



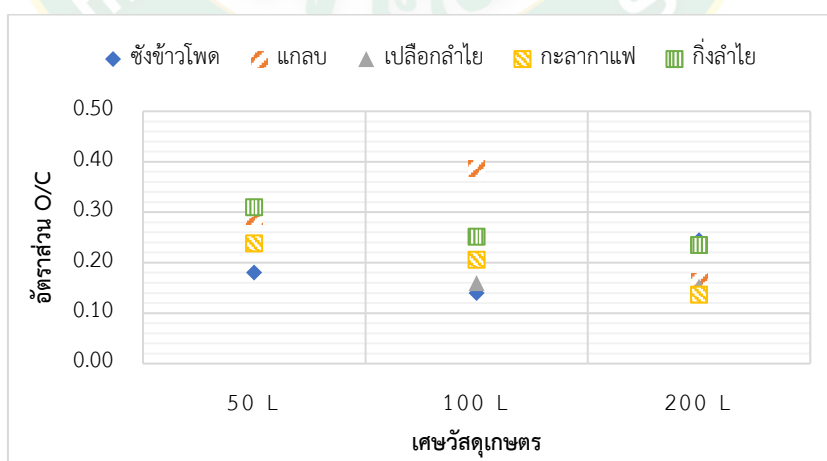
ภาพที่ 33 แผนภูมิแสดงปริมาณ Gross Heating Value ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



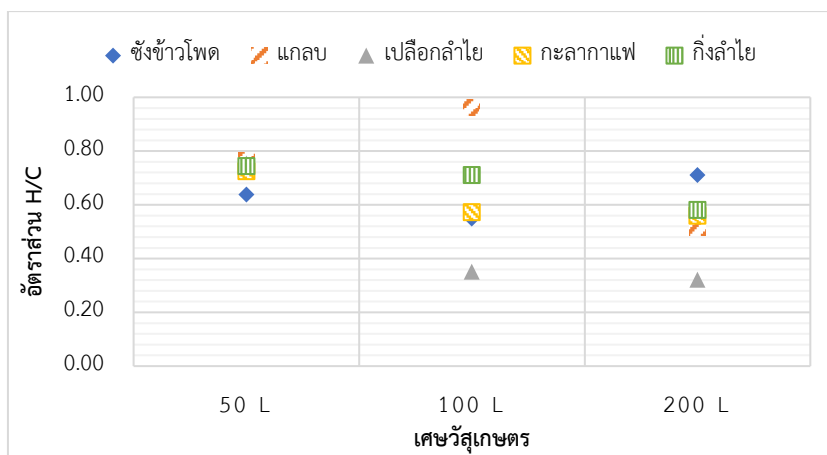
ภาพที่ 34 แผนภูมิแสดงปริมาณ Net Heating Value ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

องค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร โดยเตาผลิต ขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง พบว่ามีอัตราส่วนแร่ธาตุ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) แสดงถึงความเจริญเติบโตของพืชเมื่อได้รับ เนื่องจากเป็นสิ่งที่พืช ต้องการใช้ พบว่าถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดมีค่าระหว่าง (0.14-0.24) แกลบ (0.16-0.39) เปลือก ลำไย (0.15-0.31) กะลากาแฟ (0.14-0.24) และกิ่งลำไย (0.24-0.31) ดังแสดงภาพที่ 35 ตามลำดับ

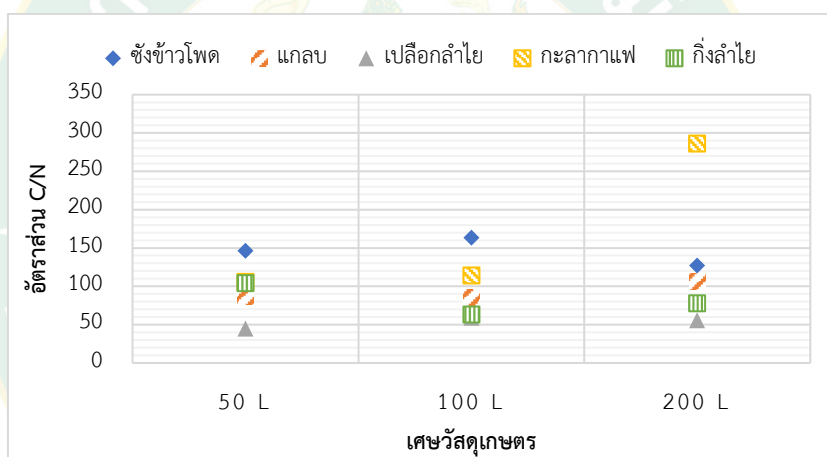
ส่วนอัตราส่วนแร่ธาตุของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) บ่งบอกถึงความเสถียรภาพระยะในสิ่งแวดล้อม พบว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าระหว่าง (0.55-0.71) แกลบ (0.52-0.96) เปลือกลำไย (0.32-0.75) กะลากาแฟ (0.56-0.73) และกิ่งลำไย (0.58-0.74) ดังแสดงภาพที่ 36 ตามลำดับ และรวมถึงอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) แสดงถึงการดึงดูดสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช การย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้น ๆ รวมถึงลดการชะล้างสารอาหารที่เป็นประโยชน์ออกสู่สิ่งแวดล้อม พบว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าระหว่าง (127-163) แกลบ (86-106) เปลือกลำไย (45-59) กะลากาแฟ (106-287) และกิ่งลำไย (63-104) ดังแสดงภาพที่ 37 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าอัตราส่วน O/C, H/C และ C/N ของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน อัตราส่วนที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราส่วน H/C และ O/C จะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีอะโรมาติกและคาร์บอนมากขึ้น (Al-Wabel, Al-Omran et al., 2013, Angin., 2013, และ Kim, Kim et al., 2013) ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างอะโรมาติกก่อตัวที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการสลายตัวของเซลลูโลส และโมเลกุลขนาดใหญ่อื่น ๆ ส่วนอัตราส่วน (C/N+O/C) แสดงถึงกลุ่มฟังก์ชันที่มีขั้วในถ่านชีวภาพในการตรึงแร่ธาตุในดิน อุณหภูมิ กระบวนการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นจะทำให้เศษวัสดุเกษตรกลุ่มฟังก์ชันที่มีขั้วและการดูดซับน้ำน้อยลง (Ma, Zhou et al., 2016, Zhang, Zhang et al., 2020, และ Lin, Zhang et al., 2021) ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium อัตราส่วน O/C จะต้องไม่เกิน 0.4 และ H/C จะต้องไม่เกิน 0.7 (Abenavoli, Longo et al., 2016)



ภาพที่ 35 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 36 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 37 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิใน กระบวนการ (°C)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)	ขนาดเตา และ References
ช้าง	390-490	71.65	3.84	0.57	17.24	0.02	50 ลิตร
ข้าวโพด	395-440	74.94	3.46	0.54	13.99	0.01	100 ลิตร
	410-450	67.98	4.06	0.62	22.14	0.02	200 ลิตร

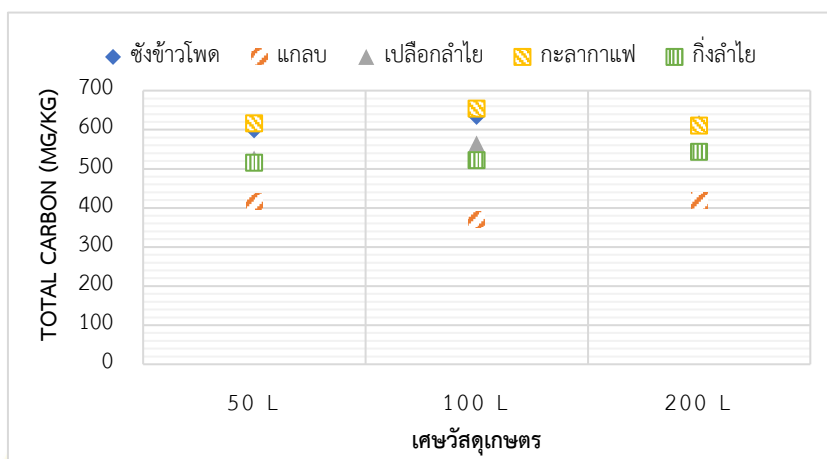
แกลบ	420-465	47.26	3.04	0.64	18.35	0.04	50 ลิตร	
	410-500	43.25	3.50	0.59	22.29	0.03	100 ลิตร	
	450-530	48.81	2.12	0.54	10.57	0.02	200 ลิตร	
เปลือก	355-520	60.67	3.84	1.58	25.00	0.07	50 ลิตร	
ลำไย	395-450	66.89	1.98	1.32	14.21	0.03	100 ลิตร	
	400-510	67.24	1.82	1.40	13.65	0.03	200 ลิตร	
กะลา	300-380	68.34	4.16	0.75	21.71	0.03	50 ลิตร	
กาแฟ	380-405	70.74	3.40	0.72	19.39	0.04	100 ลิตร	
	400-435	72.20	3.39	0.29	13.15	0.01	200 ลิตร	
กิ่งลำไย	300-365	61.87	3.87	0.69	25.54	0.03	50 ลิตร	
	320-375	64.67	3.86	1.19	21.66	0.02	100 ลิตร	
	420-500	68.91	3.36	1.03	21.60	0.01	200 ลิตร	
ต้นหญ้า	500	39.4	1.3	0.7	-	0.002	Brewer, et al. (2009)	
	ต้น	62.8	2.9	1.3		0.05		
ข้าวโพด	ไม้	65.3	2.6	0.6		0.05		
	เมล็ดดอก	400	68.76	4.07	3.77	23.49	-	Angin (2013)
คำฝอย	450	70.43	3.49	3.69	22.39			
	500	71.37	2.96	3.91	21.76			
	550	72.96	2.67	3.74	20.63			
	600	73.72	2.34	3.84	20.10			
ฟางข้าว	300	61.48	2.73	1.40	19.61	0.39	Zhang, et al. (2020)	
	สาเลี	400	64.18	1.78	1.36	13.93		0.47
		500	67.39	1.01	1.38	7.35		0.48
ฟาง	600	65.34	0.52	1.10	10.77	0.45		
	300	61.20	3.68	2.93	17.39	0.54		
	ข้าวโพด	400	63.36	1.96	2.52	17.39	0.51	
500		65.08	0.77	2.43	11.36	0.39		
600		67.48	0.18	2.12	8.98	0.24		
ฟาง	300	61.80	3.54	1.02	17.95	0.59		
ผักกาด	400	63.74	1.91	0.98	13.48	0.59		

	500	66.96	0.87	0.88	9.46	0.64	
	600	67.85	0.18	0.90	7.89	0.64	
ฟางข้าว	300	56.49	2.95	2.15	17.73	0.45	
	400	56.42	1.35	1.99	13.71	0.44	
	500	59.59	0.47	1.90	8.27	0.34	
	600	61.30	0.12	2.01	5.71	0.29	
ชี้เลี้ยงไม้	400	68.03	3.03	0.65	28.29	-	Lin, et al.
สน	500	71.33	2.41	0.60	25.66		(2021)
	600	73.28	2.30	0.85	23.57		
ไม้ป้อป	450	78.05	3.44	0.18	9.42	0.01	
ลาร์	550	78.82	3.66	0.20	12.54	0.05	
ไม้สน	450	83.69	2.74	0.10	5.7	0.03	
	550	85.97	2.94	0.22	7.11	0.03	

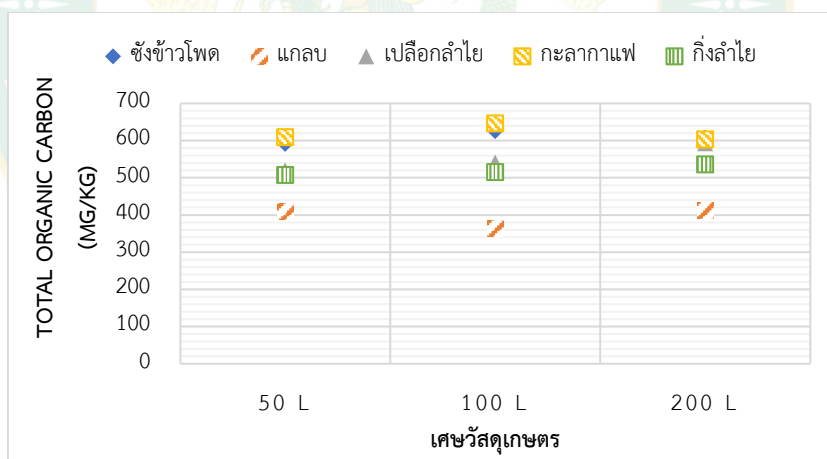
4.7 คุณสมบัติปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร จึงได้ทำการศึกษาปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 ลิตร และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าเตาขนาด 50 ลิตร และ 100 ลิตร มีปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) กะลากาแฟสูงสุดและแกลบน้อยสุด (417-617 mg/kg), (371-654 mg/kg) และเตาขนาด 200 ลิตร เปลือกลำไยสูงสุดและแกลบน้อยสุด (418-617 mg/kg) แสดงดังภาพที่ 38 ตามลำดับ และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon) เตาขนาด 50 ลิตร กะลากาแฟสูงสุดเท่ากับ 609 mg/kg รองลงมาคือถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดเท่ากับ 591 mg/kg ถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยเท่ากับ 519 mg/kg ถ่านชีวภาพจากกิ่งลำไยเท่ากับ 507 mg/kg และถ่านชีวภาพจากแกลบเท่ากับ 409 mg/kg ตามลำดับ เตาขนาด 100 ลิตร กะลากาแฟสูงสุดเท่ากับ 646 mg/kg รองลงมาคือถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดเท่ากับ 626 mg/kg ถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยเท่ากับ 541 mg/kg ถ่านชีวภาพจากกิ่งลำไยเท่ากับ 515 mg/kg และถ่านชีวภาพจากแกลบเท่ากับ 363 mg/kg ตามลำดับ และเตาขนาด 200 ลิตร ชังข้าวโพดสูงสุดเท่ากับ 607 mg/kg รองลงมาคือ

ถ่านชีวภาพจากกะลาปากแฟเท่ากับ 603 mg/kg ถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยเท่ากับ 592 mg/kg ถ่านชีวภาพจากกิ่งลำไยเท่ากับ 536 mg/kg และถ่านชีวภาพจากแกลบเท่ากับ 411 mg/kg แสดงดังภาพที่ 39 ตามลำดับ



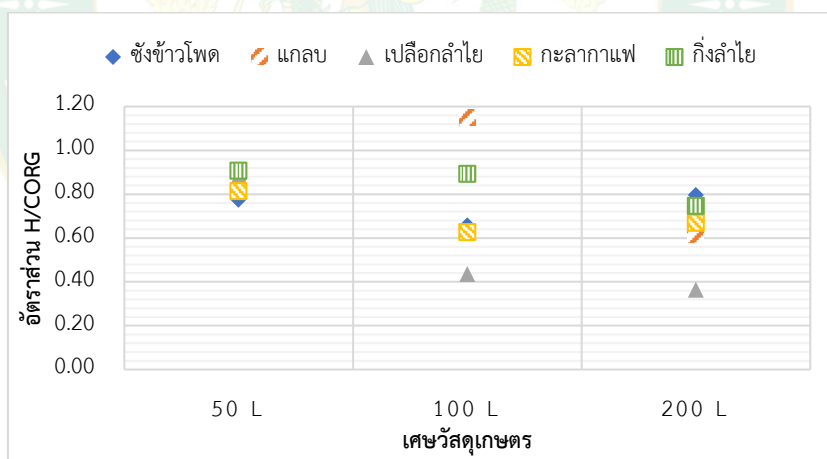
ภาพที่ 38 แสดงปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 39 แสดงปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้องค์ประกอบของถ่านชีวภาพในกลุ่มปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเพิ่มขึ้น

(กันยาพรและสิทธิบูรณ์, 2559) ผลของชีวมวลที่แตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ไอออนบวก ไอออนลบ และอนุภาคแขวนลอย (Tian, Wang et al., 2019) ผลจากงานวิจัยพบว่าปริมาณคาร์บอนและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ผ่านเกณฑ์ค่ากำหนด สูงสุดตามมาตรฐานความเป็นพิษโดยมาตรฐานนานาชาติ (Chaiyaraksa, Jaipong et al., 2017) และเมื่อนำถ่านชีวภาพไปใช้ปรับปรุงดินจะช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมในดิน ลดการสลายตัวของมวลรวมของดิน อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และ ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ส่งผลทำให้ผลิตพืชที่ดีขึ้น (Dong, Guan et al., 2016) ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/C_{org}) จะต้องไม่เกิน 0.7 (Abenavoli, Longo et al., 2016) พบว่าอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/C_{org}) ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าระหว่าง (0.66-0.80) แกลบ (0.61-1.15) เปลือกลำไย (0.36-0.88) กะลากาแฟ (0.63-0.81) และกิ่งลำไย (0.75-0.91) ดังแสดงภาพที่ 40 ตามลำดับ มีบางเศษวัสดุเกษตรที่มีค่าอัตราส่วนเกินมาตรฐานเพียงเล็กน้อย เพราะปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

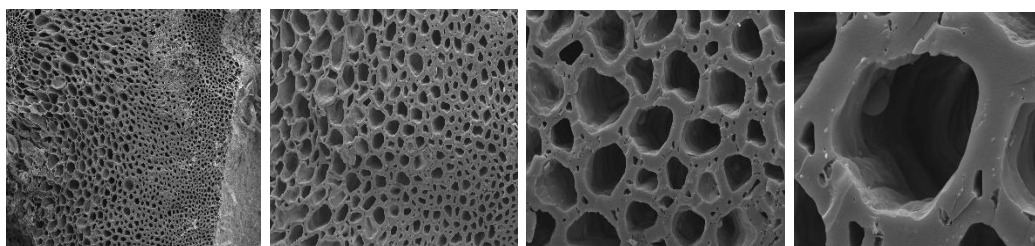


ภาพที่ 40 แสดงอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/C_{org}) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

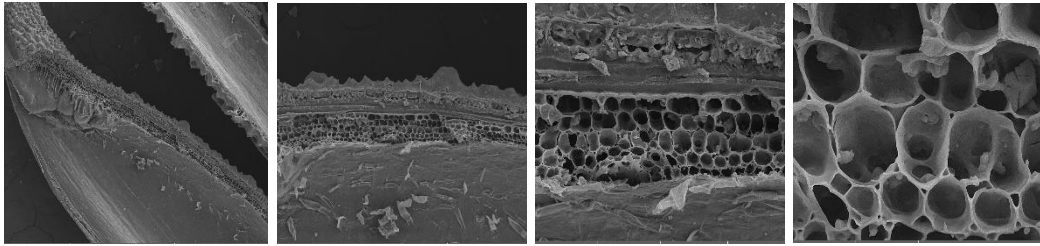
4.8 การวิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro

4.8.1 วิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (Scanning electron microscope: SEM)

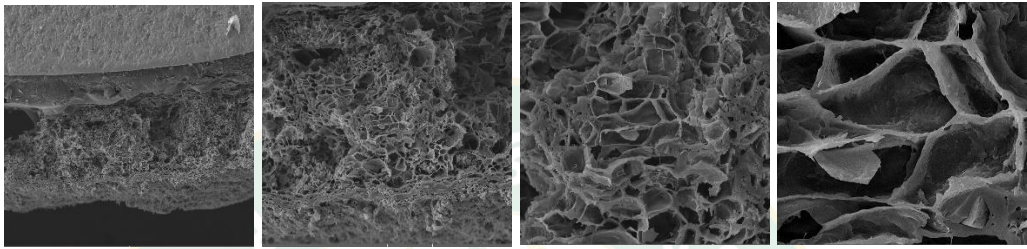
เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิสูงขึ้น (Brewer, Schmidt-Rohr et al., 2009) จะส่งผลทำให้โครงสร้างพื้นผิวและความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น (Lin, Zhang et al., 2021) จึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์สัณฐานของถ่านชีวภาพโดยการวิเคราะห์ภาพ SEM จากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 41, 43 และ 45) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของถ่านชีวภาพจากเตาทั้ง 3 ขนาด และกำลังการขยาย 200 500 1500 และ 5000 เท่า มีโครงสร้างของถ่านชีวภาพเกือบจะคล้ายกัน แต่รอยแตกและรูพรุนนั้นจะแตกต่างกันตามชนิดของเศษวัสดุเกษตร (Mullen, Boateng et al., 2010) พื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จะมีลักษณะความขรุขระแต่ไม่มีรูพรุน (ดังแสดงภาพที่ 42, 44 และ 45) ดังเช่น (Lam, Liew et al., 2018) โครงสร้างของถ่านชีวภาพรอยแตกและรูพรุนที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น (Kim, Kim et al., 2013) เกิดการสลายตัวเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีการกำจัดสารระเหย (Chatterjee, Sajjadi et al., 2020) สามารถควบคุมให้เกิดกระบวนการอะโรมาติกทั้งระหว่างและภายในโมเลกุล (Liu and Balasubramanian., 2013) และการจัดลำดับโครงสร้างทั้งภายในและพื้นผิวถ่านชีวภาพ ลักษณะรูพรุนมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ รูปทรงที่เกิดขึ้นมีหลากหลายรูปแบบ (Zhang and You., 2013) ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนพื้นผิวเพิ่มขึ้น (Mohanty, Nanda et al., 2013 และ Reza, Afroze et al., 2020) โครงสร้างถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติที่ดี ซึ่งมีผลต่อการพัฒนาลักษณะทางกายภาพของดินและธาตุอาหารให้พืช ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติโครงสร้างถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



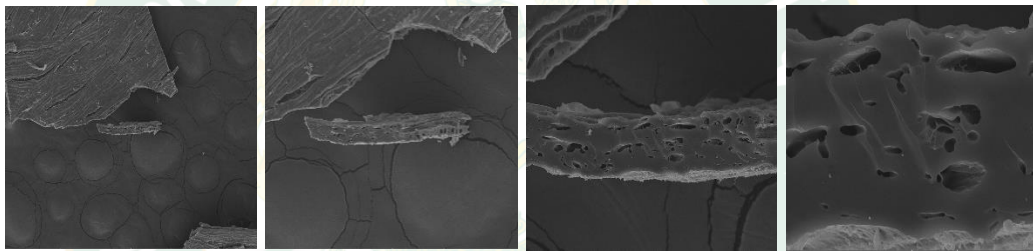
ช้างข้าวโพด



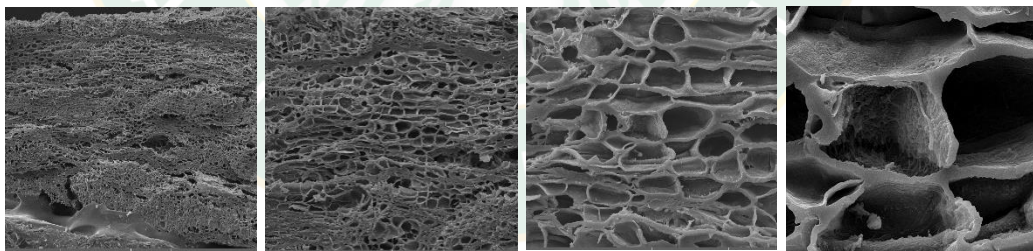
กล้วย



เปลือกลำไย



กะลากาแฟ



กิ่งลำไย

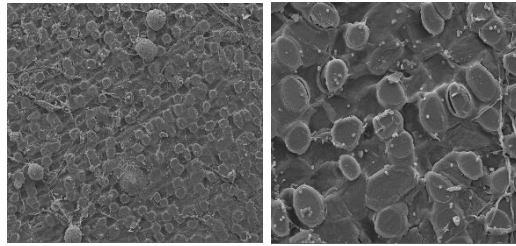
(a)

(b)

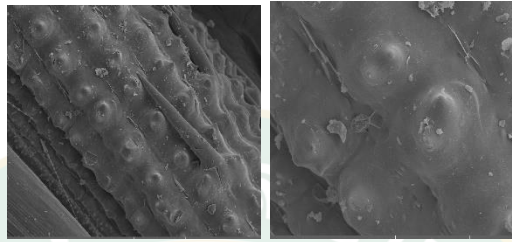
(c)

(d)

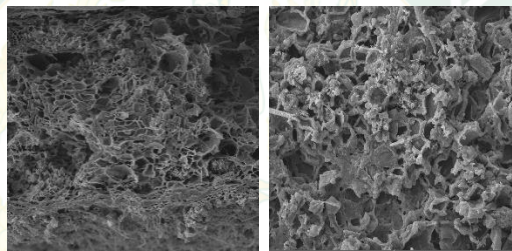
ภาพที่ 41 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด กล้วย เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b) 1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)



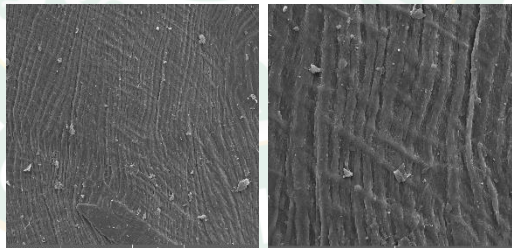
ซังข้าวโพด



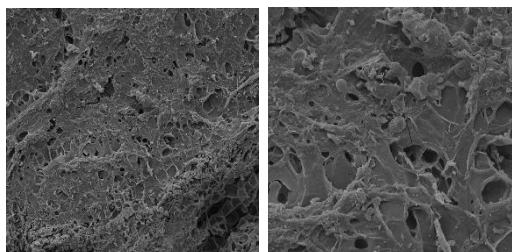
กล้วย



เปลือกลำไย



กะลากาแฟ

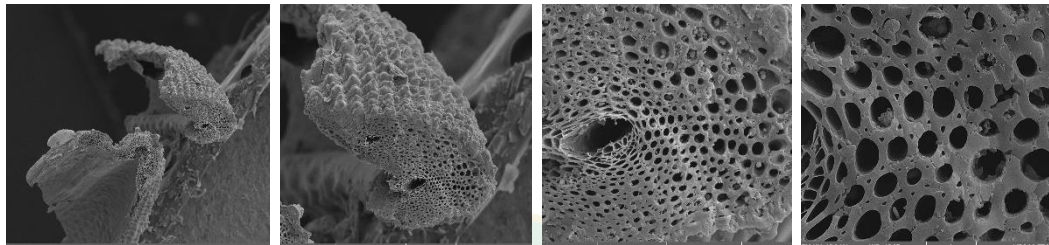


กิ่งลำไย

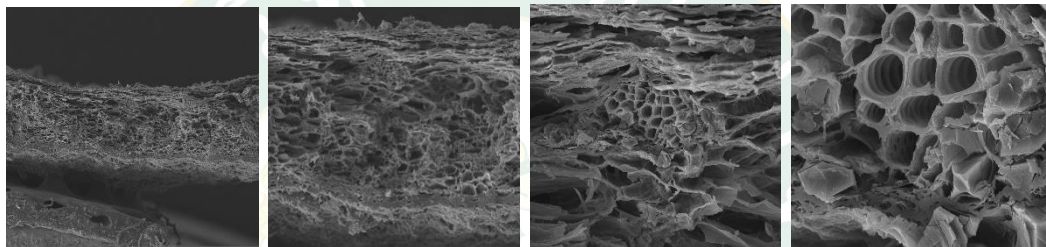
(a)

(b)

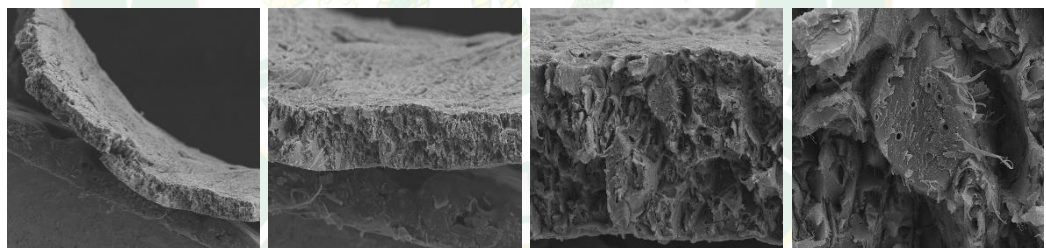
ภาพที่ 42 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b)



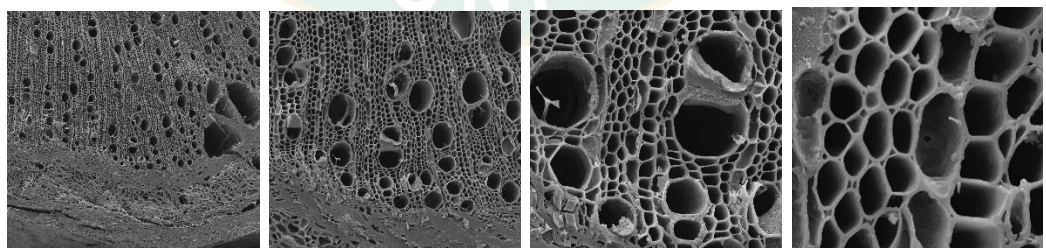
ซังข้าวโพด



แกลบ



เปลือกลำไย



กิ่งลำไย

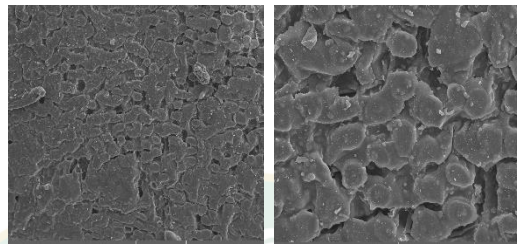
(a)

(b)

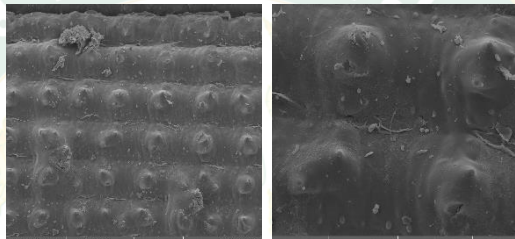
(c)

(d)

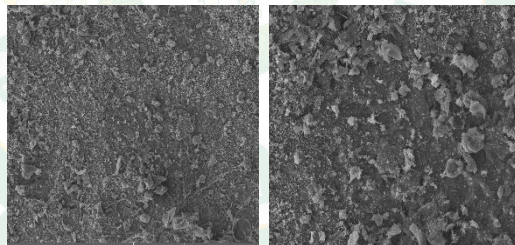
ภาพที่ 43 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่ง
ลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b)
1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)



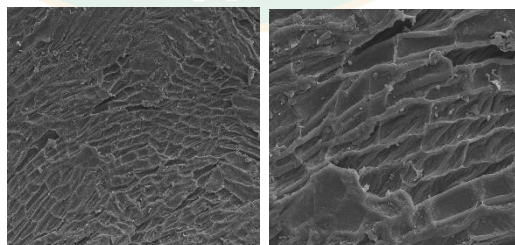
ข้าวโพด



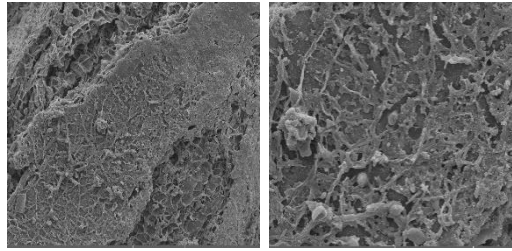
แกลบ



เปลือกลำไย



กะลากาแฟ

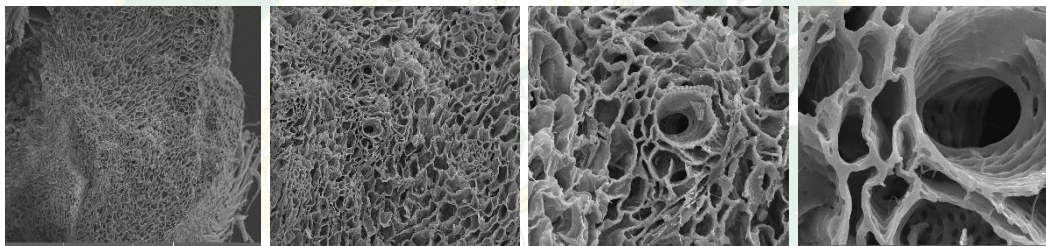


กิ่งลำไย

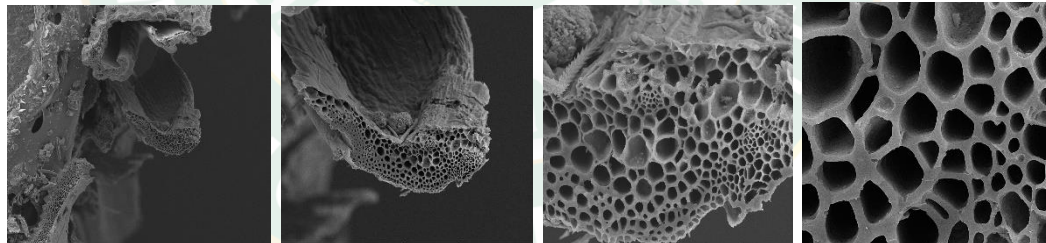
(a)

(b)

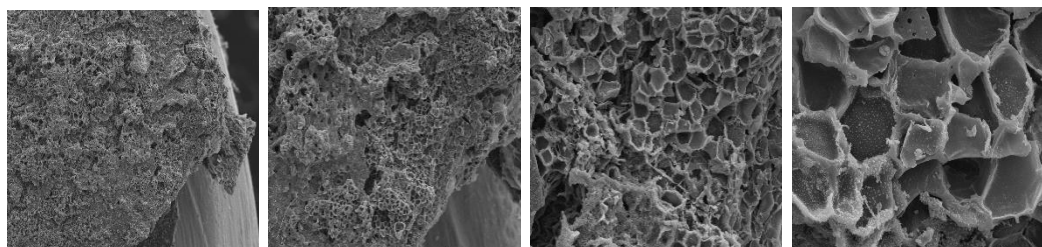
ภาพที่ 44 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b)



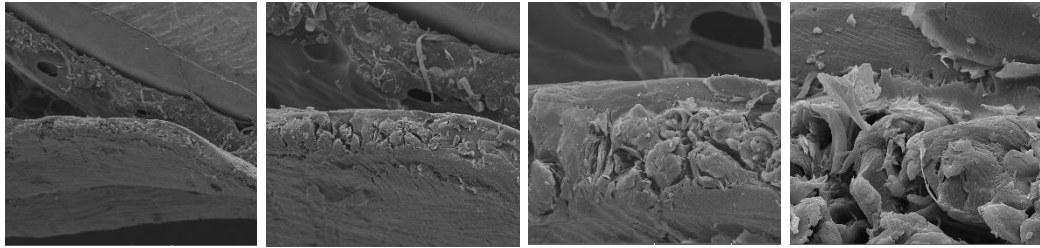
ซังข้าวโพด



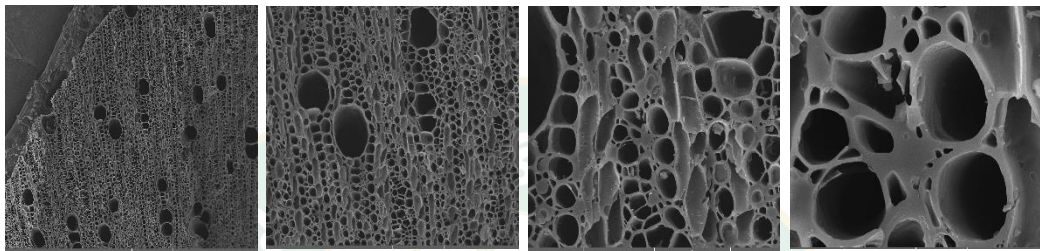
แกลบ



เปลือกลำไย



กะลากาแพ



กิ่งลำไย

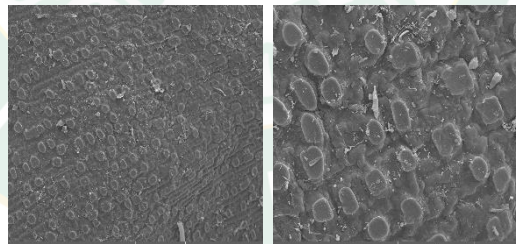
(a)

(b)

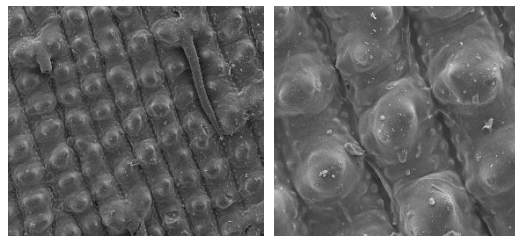
(c)

(d)

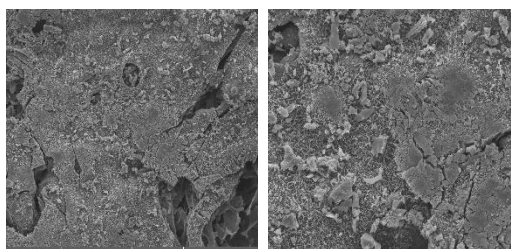
ภาพที่ 45 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแพ และกิ่งลำไย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ด้านตัดขวางกำลังการขยาย 200 เท่า (a) 500 เท่า (b) 1500 เท่า (c) 5000 เท่า (d)



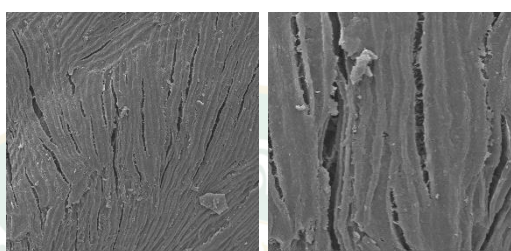
ซังข้าวโพด



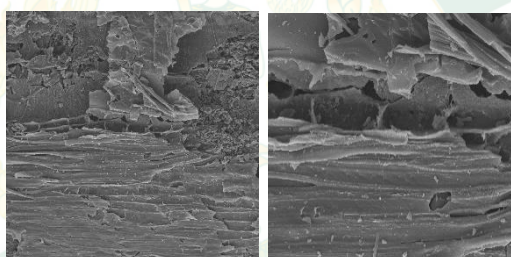
แกลบ



เปลือกกล้าโย



กะลาภาแพ



กิ่งกล้าโย

(a)

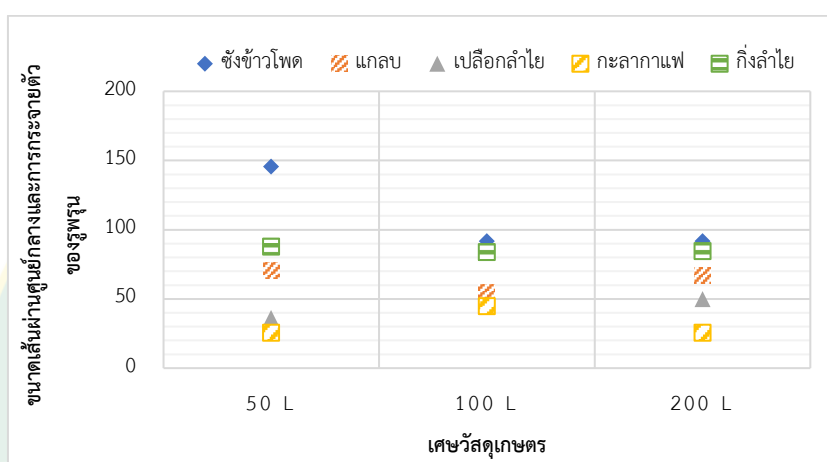
(b)

ภาพที่ 46 แสดงภาพถ่าย SEM ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้าโย กะลาภาแพ และกิ่งกล้าโย ของเตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ด้านพื้นผิวกำลังการขยาย 500 เท่า (a) 1500 เท่า (b)

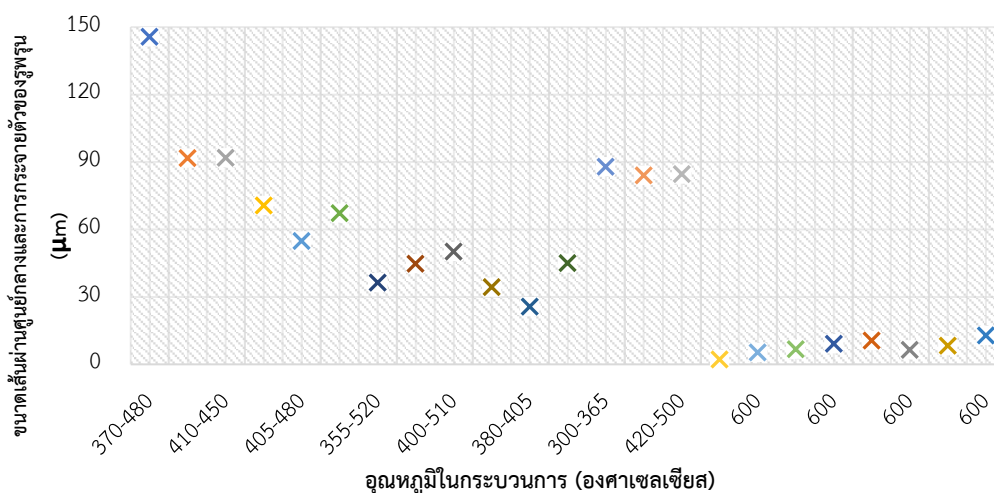
4.8.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro

การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้าโย กะลาภาแพ และกิ่งกล้าโย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง พบว่าถ่านชีวภาพจากเตาขนาด 50 ลิตร ซังข้าวโพดสูงสุดและกะลาภาแพน้อยสุด (25.63-145.65 μm) เตาขนาด 100 ลิตร ซังข้าวโพดสูงสุดและเปลือกกล้าโยน้อยสุด (44.64-91.73 μm) และเตาขนาด 200 ลิตร ซังข้าวโพดสูงสุดและกะลาภาแพน้อยสุด (25.60-91.77 μm) ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุน

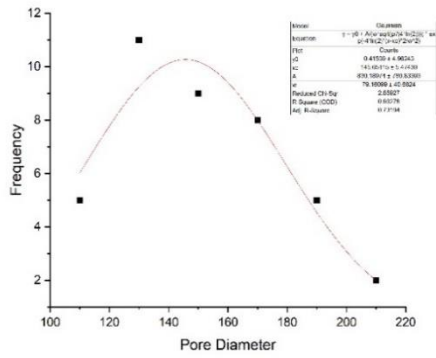
ด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอนุหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล โครงสร้างเซลล์ของชีวมวล (Kameyama, Miyamoto et al., 2019) ลักษณะและขนาดรูปร่าง ดังนั้นผลการทดสอบภาพ SEM กำลังการขยาย 1500 เท่า ของเตาทั้ง 3 ขนาดจึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนจึงมีความแตกต่างกัน (ดังแสดงภาพที่ 47) และเทียบกับงานวิจัยของ (Binh and Kajitvichyanukul., 2019) (ดังแสดงภาพที่ 48)



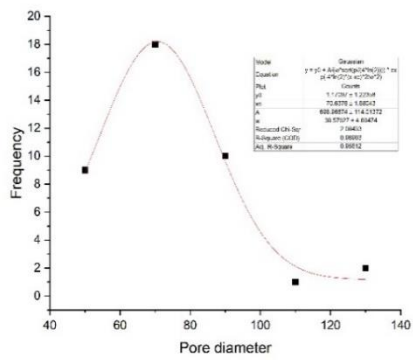
ภาพที่ 47 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร เตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



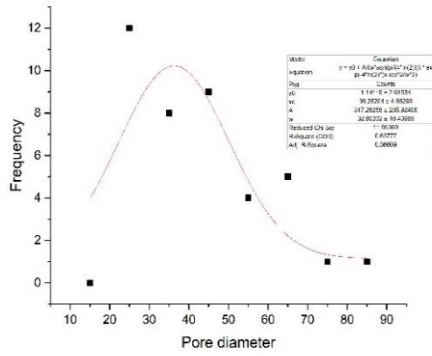
ภาพที่ 48 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนกับงานวิจัย (Binh and Kajitvichyanukul., 2019)



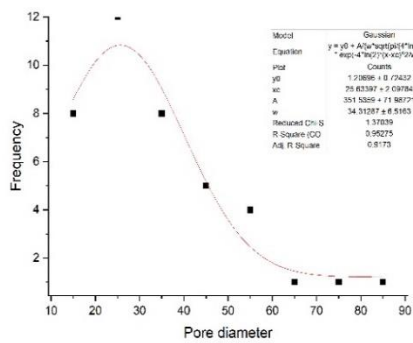
(a)



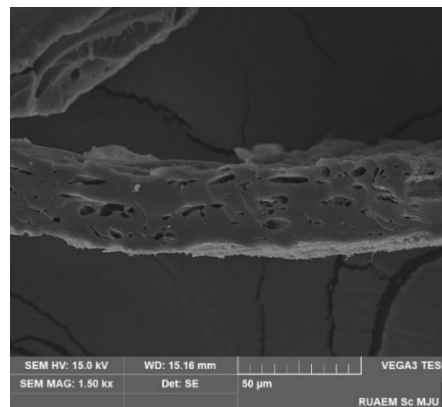
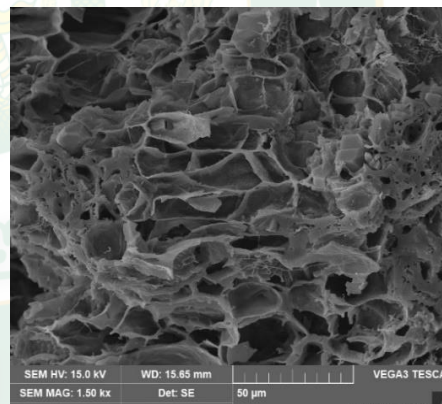
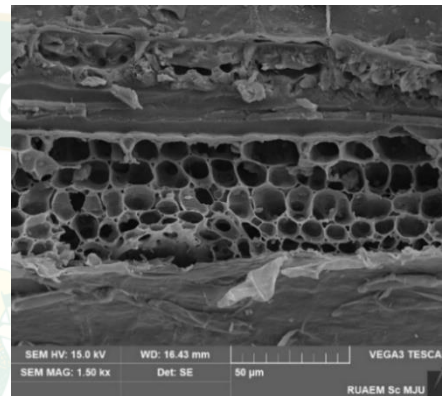
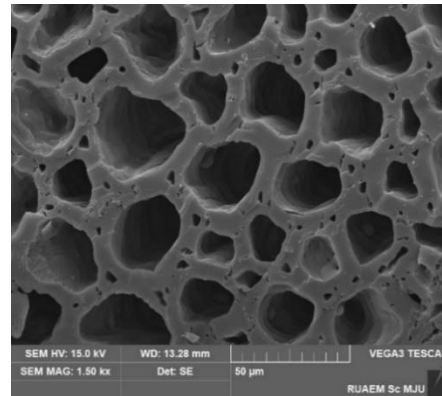
(b)

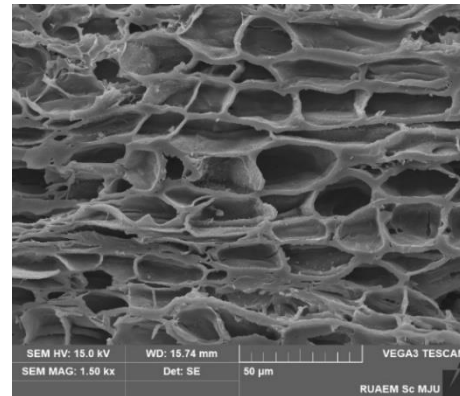
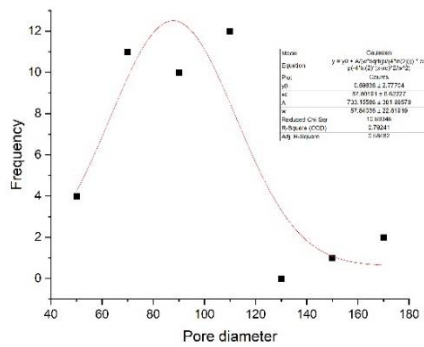


(c)



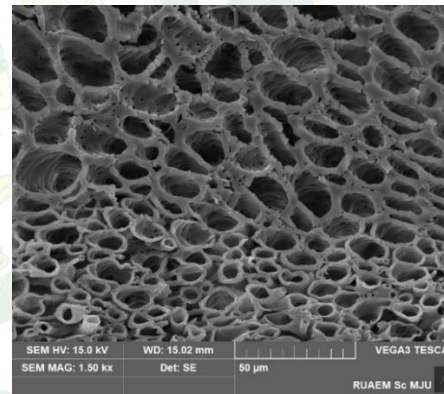
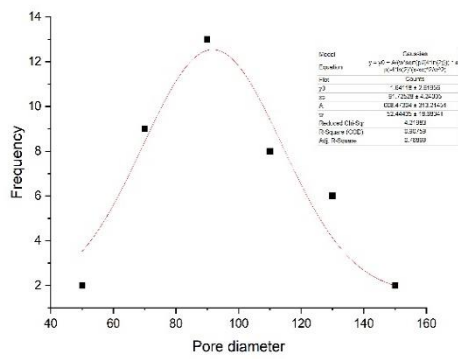
(d)



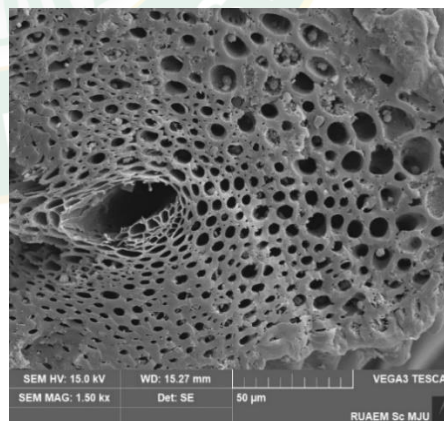
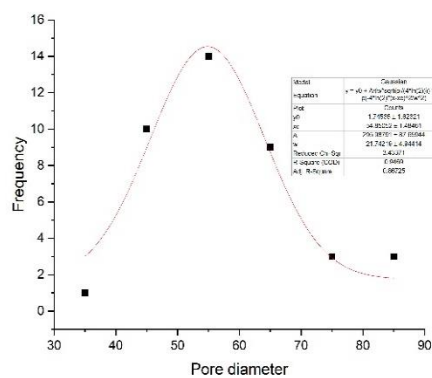


(e)

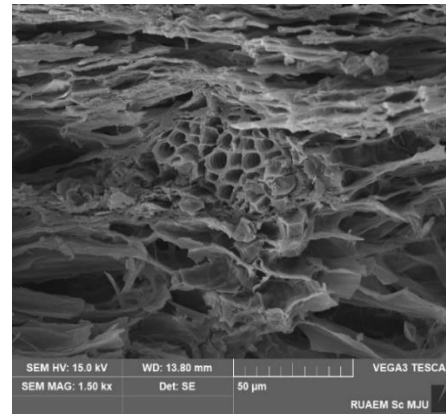
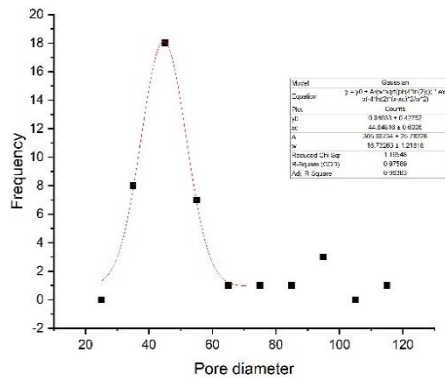
ภาพที่ 49 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกกล้วย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งกล้วย (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



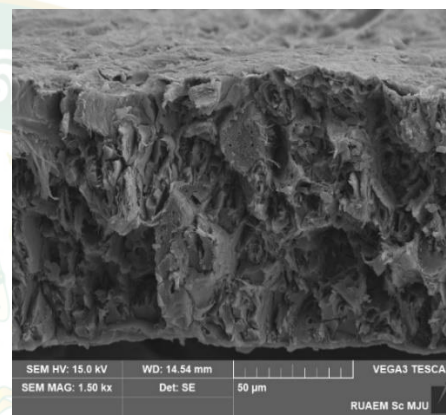
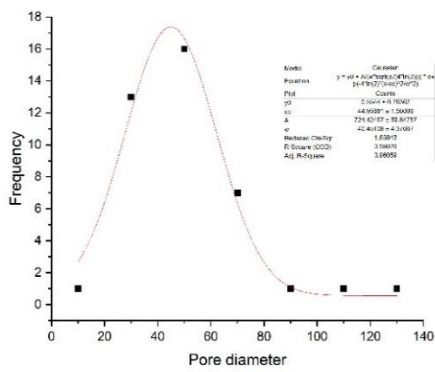
(a)



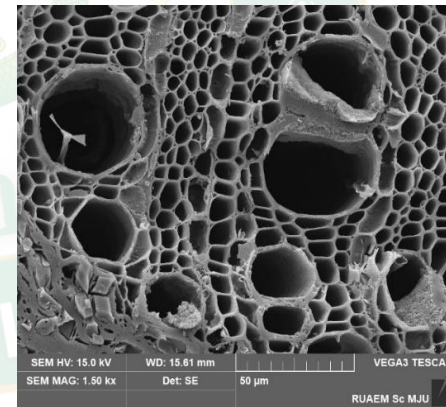
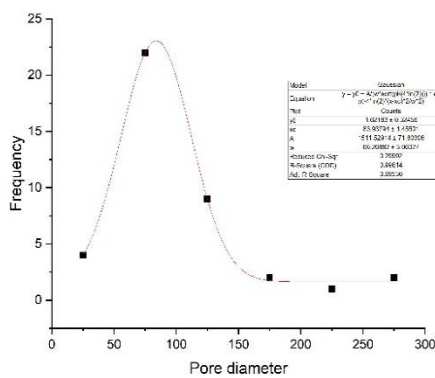
(b)



(c)

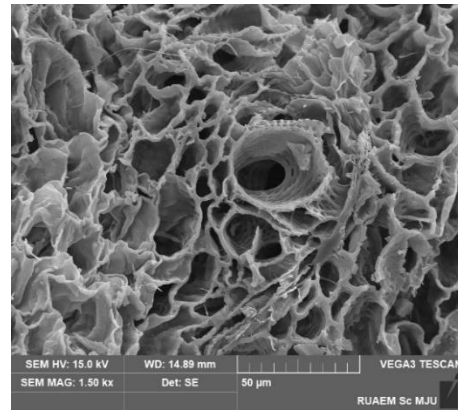
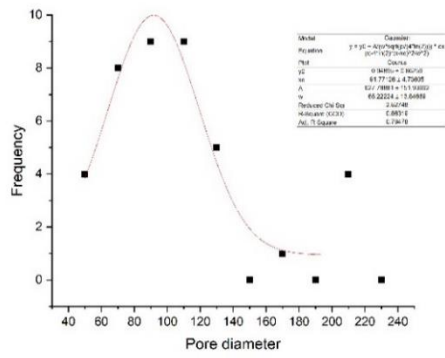


(d)

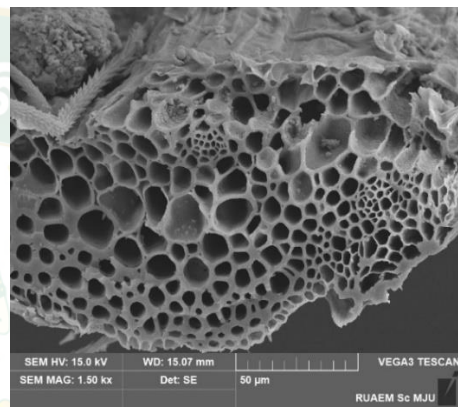
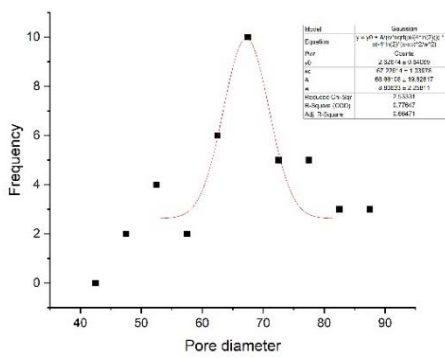


(e)

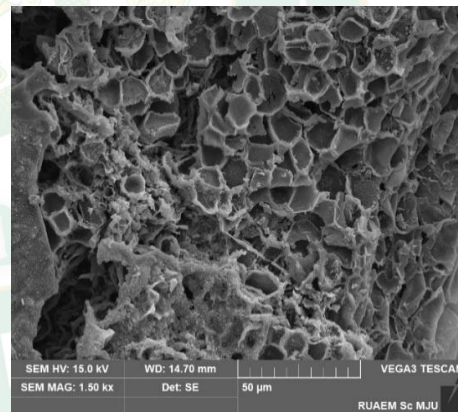
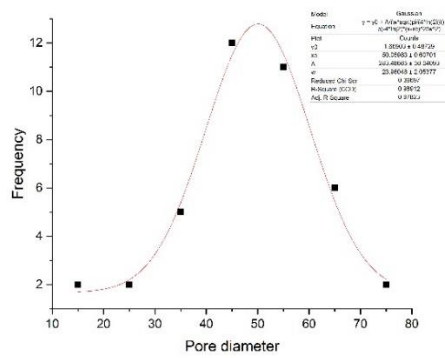
ภาพที่ 50 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



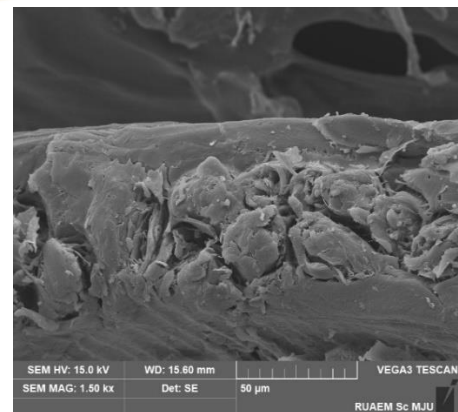
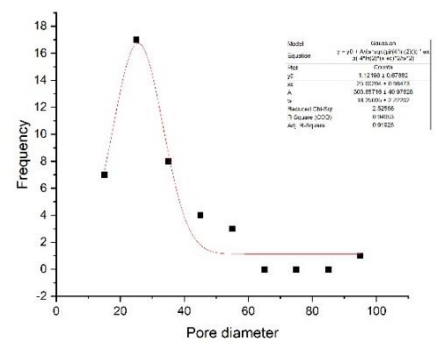
(a)



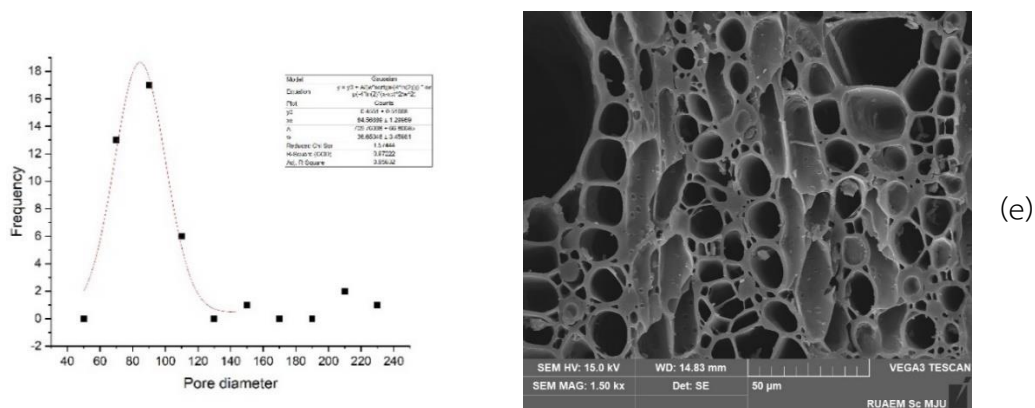
(b)



(c)



(d)

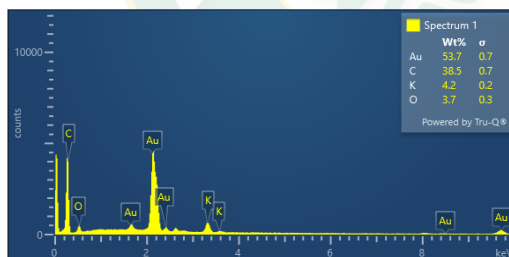


ภาพที่ 51 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกลำไย (c) กะลาकाแพ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง

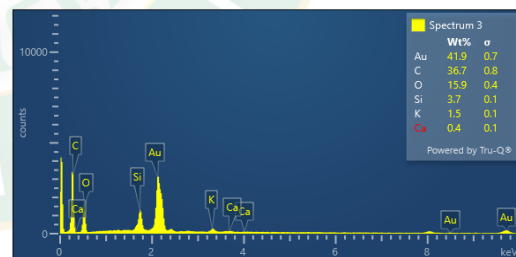
4.9 การวิเคราะห์พื้นฐานและองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ (SEM-EDX)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร Scanning electron microscope: (SEM) และ Energy dispersive X-ray spectroscopy: (EDX) เป็นเทคนิคที่ใช้ได้มากที่สุดวิธีหนึ่งในการประมาณค่ารูปร่างและคุณสมบัติของแร่ธาตุ จึงได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ EDX spectrum จากภาพ SEM ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลาकाแพ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ ประกอบด้วย C, O, Ca, K, P, Si และ Mg จากเตาขนาด 50 ลิตร มีปริมาณคาร์บอนกะลาकाแพสูงสุดและแกลบน้อยสุดอยู่ในช่วง (39.6-51.5 wt.%) ปริมาณออกซิเจนแกลบสูงสุดและซังข้าวโพดน้อยสุด (3.7-15.9 wt.%) ปริมาณแคลเซียมเปลือกลำไยสูงสุดและน้อยสุด แต่ไม่พบในกะลาकाแพและซังข้าวโพด (0.4-4.6 wt.%) ปริมาณโพแทสเซียมกะลาकाแพสูงสุด แกลบน้อยสุด (1.5-16.2 wt.%) ปริมาณฟอสฟอรัสพบเฉพาะเปลือกลำไย 0.6 wt.% ปริมาณซิลิกอนพบเฉพาะแกลบ 3.7 wt.% และปริมาณแมกนีเซียมพบเฉพาะเปลือกลำไย กะลาकाแพ และกิ่งลำไย (0.2-0.5 wt.%) (ดังแสดงภาพที่ 52) ตามลำดับ เตาขนาด 100 ลิตร มีปริมาณคาร์บอนกิ่งลำไยสูงสุดกะลาค่าน้อยสุด 35.9-54.1 wt.% ปริมาณออกซิเจนเปลือกลำไยสูงสุดและแกลบน้อยสุด (4.5-16.3 wt.%) ปริมาณแคลเซียมเปลือกลำไยสูงสุดและกิ่งลำไยน้อยสุด (1.4-6.8 wt.%) แต่ไม่พบในแกลบ กะลาค่าน้อยสุด และซังข้าวโพด ปริมาณโพแทสเซียมเปลือกลำไยสูงสุด แกลบและกิ่งลำไยน้อยสุด (1.0-5.1 wt.%) แต่ไม่พบในแกลบ และซังข้าวโพด ปริมาณซิลิกอนพบเฉพาะแกลบ 3.4 wt.% และปริมาณแมกนีเซียมพบเฉพาะเปลือก

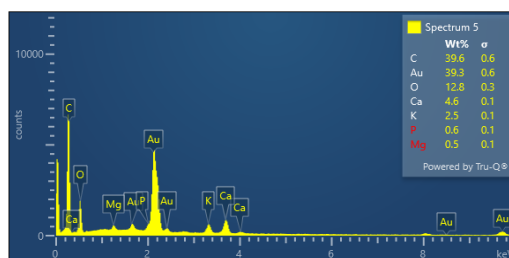
ล่ำไย 0.8 wt.% (ดังแสดงภาพที่ 53) ตามล่ำดับ และเตาขนาด 200 ลิตร มีปริมาณคาร์บอนแกลบ สูงสุดกะลาภาแพน้อยสุด (40.4-70.0 wt.%) ปริมาณออกซิเจนกะลาภาแพสูงสุดและแกลบน้อยสุด 3.6-20.5 wt.% ปริมาณแคลเซียมเปลือกล่ำไยสูงสุดถึงล่ำไยน้อยสุด (0.6-1.7 wt.%) แต่ไม่พบใน แกลบ กะลาภาแพ และซังข้าวโพด ปริมาณโพแทสเซียมเปลือกล่ำไยสูงสุดและแกลบน้อยสุด (0.4-8.0 wt.%) แต่ไม่พบในกะลาภาแพ ปริมาณฟอสฟอรัสพบเฉพาะเปลือกล่ำไยและกิ่งล่ำไย (0.6-0.7 wt.%) ส่วนซิลิกอนพบเฉพาะแกลบ 0.9 wt.% และปริมาณแมกนีเซียมพบเฉพาะเปลือกล่ำไย 0.5 wt.% (ดัง แสดงภาพที่ 54) ตามล่ำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมืองค์ประกอบแร่ธาตุของ ถ่านชีวภาพแตกต่างกัน การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาภาพ SEM นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุ ที่ได้เกิดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีว มวล แนวนวมจะคล้ายกันสำหรับเศษชีวมวลอื่น ๆ เมื่ออุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น (Al-Wabel, Al-Omran et al., 2013) จะส่งผลทำให้องค์ประกอบแร่ธาตุเพิ่มขึ้น (Lin, Zhang et al., 2021) ทำให้เกิดการกระจายเชิงพื้นที่ของสารเคมีอินทรีย์ (Chia, Gong et al., 2012) มีปริมาณของ คาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนลดลง คือที่อุณหภูมิสูงขึ้นสารระเหยจากกระบวนการไพโรไลติกจะแบ่ง ออกเป็นสารอินทรีย์และก๊าซระดับโมเลกุลที่ต่ำกว่าแทนที่จะเป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้ปริมาณ เถ้าเพิ่มขึ้น (Ma, Zhou et al., 2016 และ Reza, Afroze et al., 2020) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบ ต่อคุณสมบัติองค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ช่วยให้ พืชเจริญเติบโต และการดูดซับโลหะ ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



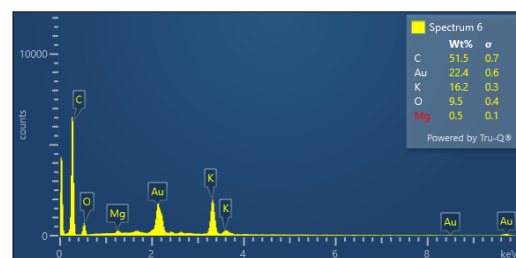
ซังข้าวโพด



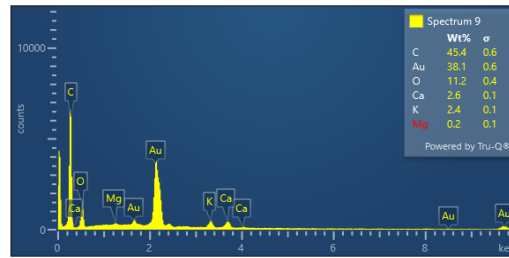
แกลบ



เปลือกล่ำไย

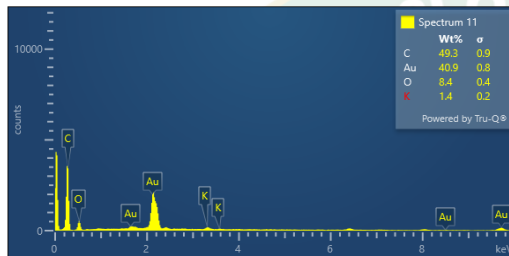


กะลาภาแพ

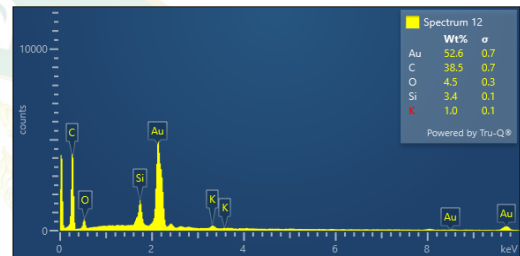


กิ่งลำไย

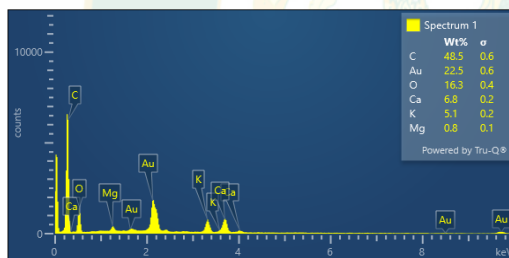
ภาพที่ 52 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลา กาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



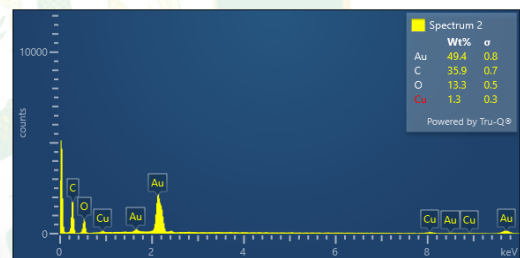
ซังข้าวโพด



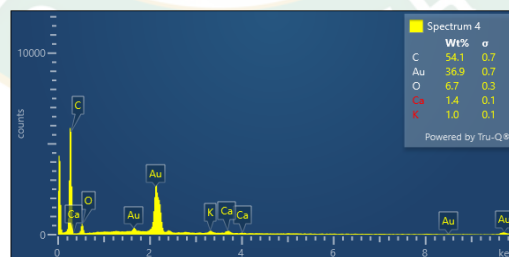
แกลบ



เปลือกลำไย

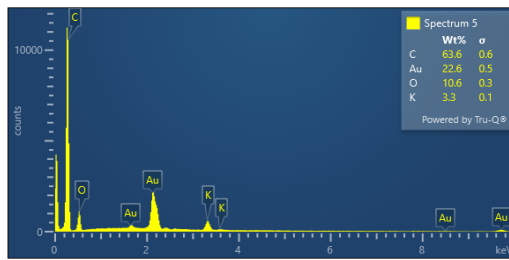


กะลา

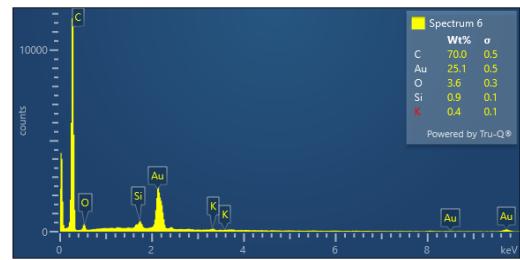


กิ่งลำไย

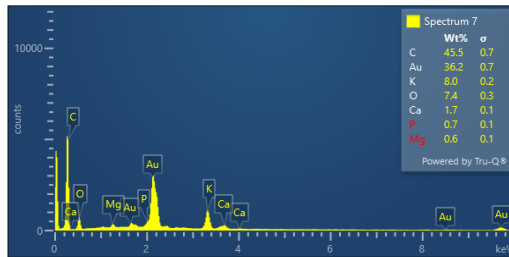
ภาพที่ 53 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลา กาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



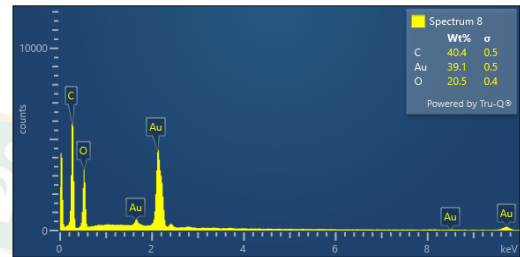
ซังข้าวโพด



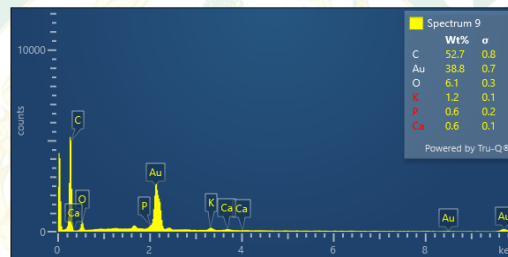
กลีบ



เปลือกลำไย



กะลากาแฟ



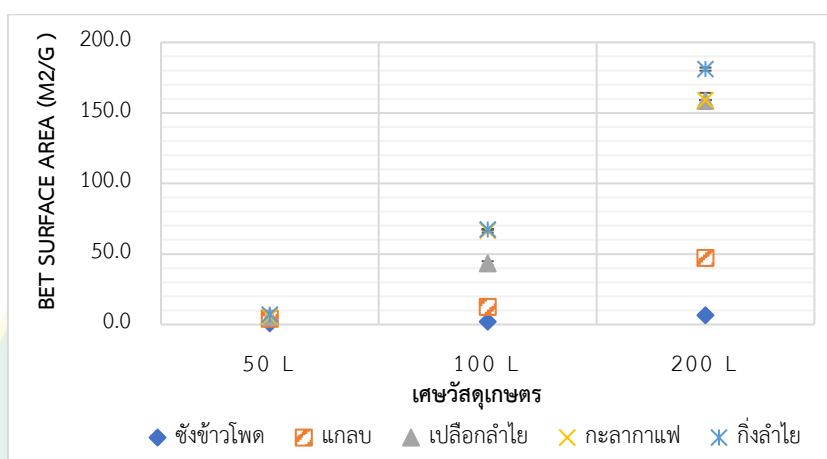
กิ่งลำไย

ภาพที่ 54 แสดง SEM-EDX spectrum ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด กลีบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง

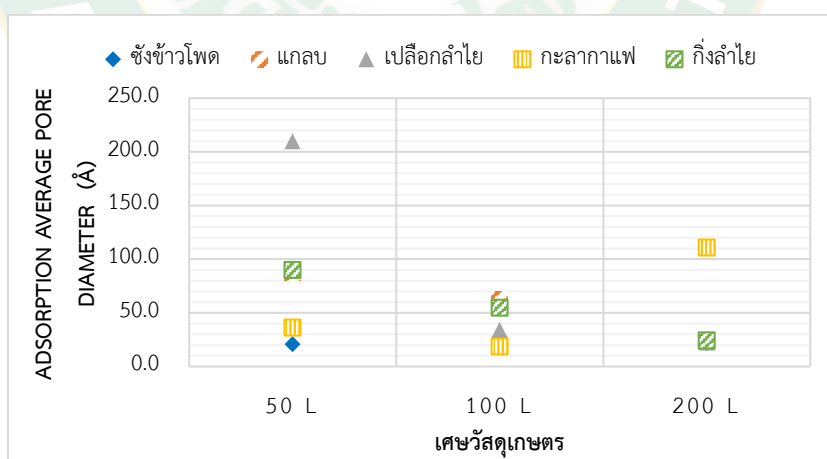
4.10 พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพ (Adsorption average pore diameter)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร กระบวนการให้ความร้อนแบบช้า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นตามกระบวนการ (Brewer, Schmidt-Rohr et al., 2009 และ Brewer., 2012) จึงได้ทำการศึกษาค่าพื้นที่ผิวความเป็นรูพรุนและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 55) พบว่าค่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพจากเตาขนาด 50 ลิตร แกลบสูงสุดและกะลากาแฟน้อยสุด ($0.4-3.1 \text{ m}^2/\text{g}$) เตาขนาด 100 ลิตร เปลือกกล้วยสูงสุดและกิ่งลำไยน้อยสุด ($1.0-31.0 \text{ m}^2/\text{g}$) และเตาขนาด 200 ลิตร เปลือกกล้วยสูงสุดและกะลากาแฟน้อยสุด ($0.5-111.5 \text{ m}^2/\text{g}$) ตามลำดับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพ (แสดงดังภาพที่ 56) พบว่าจากเตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร เปลือกกล้วยให้สูงสุดและชังข้าวโพดน้อยสุด ($20.8-209.8 \text{ \AA}$) เตาขนาด 100 ลิตร แกลบสูงสุดกะลากาแฟน้อยสุด ($18.8-62.6 \text{ \AA}$) และเตาขนาด 200 ลิตร กะลากาแฟสูงสุดชังข้าวโพดน้อยสุด ($21.6-110.8 \text{ \AA}$) ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าพื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล (Mullen, Boateng et al., 2010) องค์ประกอบปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอน เมื่อเกิดปฏิกิริยาควบแน่นแล้วก็จะทำให้เกิดการขยายตัวรูพรุน การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอินทรีย์เกิดการปล่อยก๊าซอย่างรวดเร็ว เช่น CH_4 และ H_2 เป็นต้น (Das, Ghosh et al., 2021) ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรที่แตกต่างกันนั้น จากการวิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) ชี้ให้เห็นว่าภาพที่ได้ลักษณะรูพรุน รูปร่างของรูพรุน และเซลล์โครงสร้างของถ่านชีวภาพมีความแตกต่างกันทั้งภายในและพื้นผิว อีกทั้งองค์ประกอบอัลคาไลอาจลดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน สารต่าง ๆ สามารถอุดตันรูพรุนได้ นอกจากนี้การหดตัวของถ่านชีวภาพอาจส่งผลต่อพื้นที่ผิว รูพรุน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นที่มีการขยายตัวของความรูพรุน มีการปลดปล่อยสารระเหยออกจากรูพรุนจะทำให้ค่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น (Chen, Li et al., 2016) และมีการจัดลำดับโครงสร้างต่าง ๆ ภายในของถ่านชีวภาพ จะมีการขยายรูพรุน (Angin., 2013) ซึ่งมีผลต่อการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของดินและการกักเก็บ

สารอาหาร ส่งผลทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้น ช่วยสำหรับการเจริญเติบโตและการพัฒนาทางจุลชีววิทยาของดินที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติพื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน (ดังแสดงตารางที่ 11)



ภาพที่ 55 แสดงพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 56 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (Adsorption average pore diameter) ของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนและแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

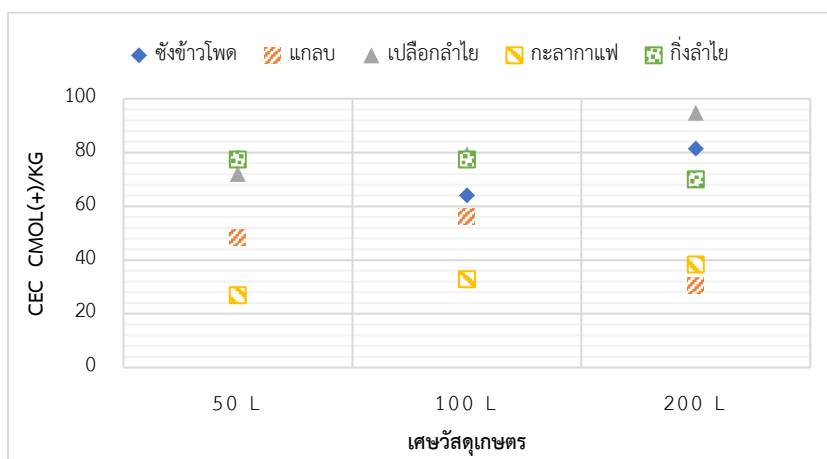
ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	BET (m ² /g)	Pore diameter (Å)	ขนาดเตา	References
ซังข้าวโพด	390-490	0.9	20.8	50 ลิตร	
	395-440	2.0	27.3	100 ลิตร	
	410-450	6.5	21.6	200 ลิตร	
แกลบ	420-465	3.1	87.5	50 ลิตร	
	410-500	10.3	62.6	100 ลิตร	
	450-530	40.6	23.6	200 ลิตร	
	355-520	1.3	209.8	50 ลิตร	
เปลือกลำไย	395-450	31.0	34.1	100 ลิตร	
	400-510	111.5	22.3	200 ลิตร	
	300-380	0.4	36.4	50 ลิตร	
กะลากาแฟ	380-405	23.0	18.8	100 ลิตร	
	400-435	0.5	110.8	200 ลิตร	
	300-365	1.2	90.0	50 ลิตร	
กิ่งลำไย	320-375	1.0	54.8	100 ลิตร	
	420-500	21.9	24.3	200 ลิตร	
	500	50.2	-		Brewer, et al. (2009)
ต้นข้าวโพด		20.9			
ไม้		19.7			
เมล็ดดอก	400	2.67	-		Angin (2013)
คำฝอย	450	3.33			
	500	4.23			
	550	3.78			
	600	3.41			

ซึ่งข้าวโพด	500	0	-	Mullen, et al.
ส่วนที่เหลือ		3.10		(2010)
จากข้าวโพด				
ต้นข้าวโพด	400	12.90	60.20%	Das, et al.
	500	23.20	62.70%	(2021)
	600	43.90	65.90%	
ต้นถั่วดำ	400	12.10	48.87%	
	500	20.40	51.37%	
	600	38.90	54.57%	
ใบหรือเข็มสน	400	12.50	46.96%	
	500	21.80	49.46%	
	600	40.20	52.66%	
ต้นวัชพืช	400	12.70	53.18%	
	500	22.10	55.68%	
	600	41.40	58.88%	
ไม้ป้อปลาร์	400-600	175.77–	-	Chen, et al.
		411.06		(2016)

4.11 คุณสมบัติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพ (Cation Exchange Capacity)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีการเพิ่มของไอออนบวก (Zhang, Voroney et al., 2015) จึงได้ทำการศึกษาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซึ่งข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 57) พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพจากเตาขนาด 50 ลิตร มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ถ่านชีวภาพจากซึ่งข้าวโพดสูงสุดและกะลากาแฟน้อยสุดอยู่ในช่วง 26.99-78.01 cmol(+)/kg เตาขนาด 100 ลิตร ถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยสูงสุดและกะลา

กาแพนน้อยสุดอยู่ในช่วง 32.94-79.50 cmol(+)/kg และเตาขนาด 200 ลิตร ถ่านชีวภาพจากเปลือก
ลำไยสูงสุดและแกลบน้อยสุดอยู่ในช่วง 30.46-94.85 cmol(+)/kg ตามลำดับ



ภาพที่ 57 แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่าน
ชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้น ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่
ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบ
ชีวมวล มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน แนวโน้มการ
เพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพนั้นคือจะมีค่า
เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอีกทั้งยังสอดคล้องกับปริมาณเถ้าและองค์ประกอบแร่ธาตุโซเดียม (Na^+)
โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^+) และแมกนีเซียม (Mg^+) (Xu, Xiao et al., 2011) และยังขึ้นอยู่กับ
องค์ประกอบของเศษวัสดุเกษตรที่นำมาทดสอบ (Gaskin, Steiner et al., 2008 และ Wu, Yang et
al. 2012) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนออกซิเดชันไอออนบวก (CEC) สามารถนำไปใช้ในการกัก
เก็บสารอาหารได้มากขึ้นในการปรับปรุงดินและช่วยให้พืชเจริญเติบโต (Major, Rondon et al.,
2010) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่าน
ชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดินและบำรุงพืช ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษา
เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

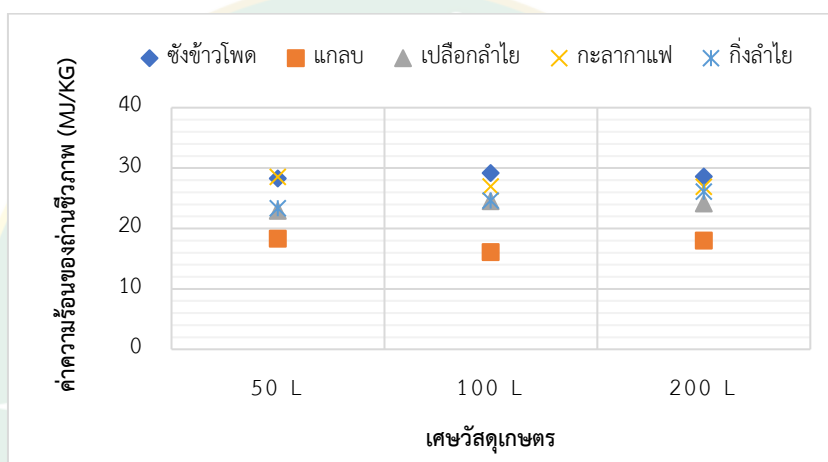
ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	CEC cmol(+)/kg	ขนาดเตา	References
ซังข้าวโพด	390-490	78.01	50 ลิตร	
	395-440	64.14	100 ลิตร	
	410-450	81.48	200 ลิตร	
แกลบ	420-465	48.29	50 ลิตร	
	410-500	56.22	100 ลิตร	
	450-530	30.46	200 ลิตร	
เปลือกกล้วย	355-520	72.07	50 ลิตร	
	395-450	79.50	100 ลิตร	
	400-510	94.85	200 ลิตร	
กะลากาแฟ	300-380	26.99	50 ลิตร	
	380-405	32.94	100 ลิตร	
	400-435	38.39	200 ลิตร	
กิ่งลำไย	300-365	77.51	50 ลิตร	
	320-375	77.51	100 ลิตร	
	420-500	70.08	200 ลิตร	
ไม้ไผ่	200	54.2		Zhang, et al. (2015)
	400	61.1		
	600	97.0		
ฟางข้าว	300	56.9		Wu, et al. (2012)
	400	61.6		
	500	32.0		
	600	23.9		
ไม้ยูคาลิปตัส	350	111.9		Major, et al. (2010)
		118.5		

		131.7	
		131.5	
ฟางโคโนล่า	350	152.1	Xu, et al. (2011)
ฟางถั่วลิสง		81.2	
ฟางถั่วเหลือง		97.8	
แกลบ		86.4	
เปลือกถั่วลิสง	400	14.2	Gaskin, et al.
	500	4.63	(2008)
เศษไม้สน	400	7.27	
	500	5.03	

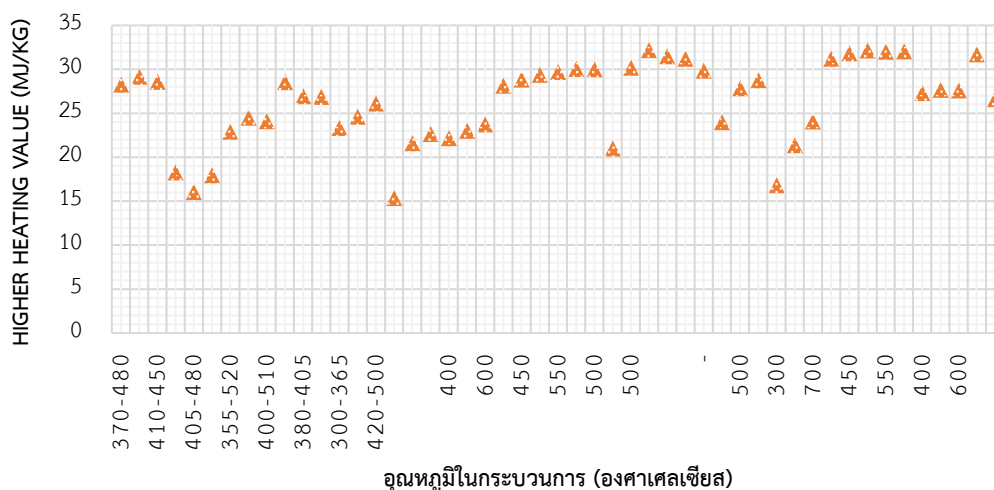
4.12 คุณสมบัติค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (Higher Heating Value)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร โดยทั่วไปนั้นคุณสมบัติค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจน เมื่อปริมาณเถ้าสูง จะส่งผลทำให้ปริมาณคาร์บอนต่ำ (Brewer, Schmidt-Rohr et al., 2009 และ Mullen, Boateng et al., 2010) จึงได้ทำการศึกษาค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชัง ข้าวโพด แกลบ เปลือกถั่วลิสง กะลากาแฟ และกิ่งถั่วลิสง โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง ผลค่าความร้อนของเศษวัสดุเกษตรอยู่ในช่วง 14.4-18.0 MJ/kg เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น (ดังแสดงภาพที่ 58) พบว่าค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเตาขนาด 50 ลิตร มีค่าความร้อนถ่านชีวภาพจากกะลากาแฟ สูงสุดและแกลบน้อยสุด (18.28-28.55 MJ/kg) เตาขนาด 100 ลิตร และเตาขนาด 200 ลิตร ถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดสูงสุดและแกลบน้อยสุด (16.08-29.18 MJ/kg), (17.97-28.61 MJ/kg) ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน เพียงเล็กน้อย ค่าความร้อนที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความร้อนทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นกันกับ (Karaosmanoglu, et al., 2000 และ Chen, Li et al., 2016) และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรที่แตกต่างกันนั้น ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน (Yousaf, Liu et al., 2017) และองค์ประกอบปริมาณคาร์บอนที่ได้และปริมาณของเถ้าที่เกิดขึ้น (Kim, Kim et al., 2013) ค่าความร้อนเกิดจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในเตา (กันยาพรและคณะ, 2559) เมื่ออุณหภูมิ

กระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น ทำให้ปริมาณคาร์บอนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากองค์ประกอบปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่สูงขึ้น แต่ค่าจะลดลงตามปริมาณของเถ้า (Angin., 2013 และ Reza, Afroze et al., 2020) ตามมาตรฐาน EBC นั้นจะต้องมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 50 wt.% ขึ้นไป (Abenavoli, Longo et al., 2016) จึงจะส่งผลทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติค่าความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน หรือการดูดซับโลหะ และใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งหมุนเวียน เป็นต้น ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 13 และภาพที่ 59)



ภาพที่ 58 แสดงค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 59 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

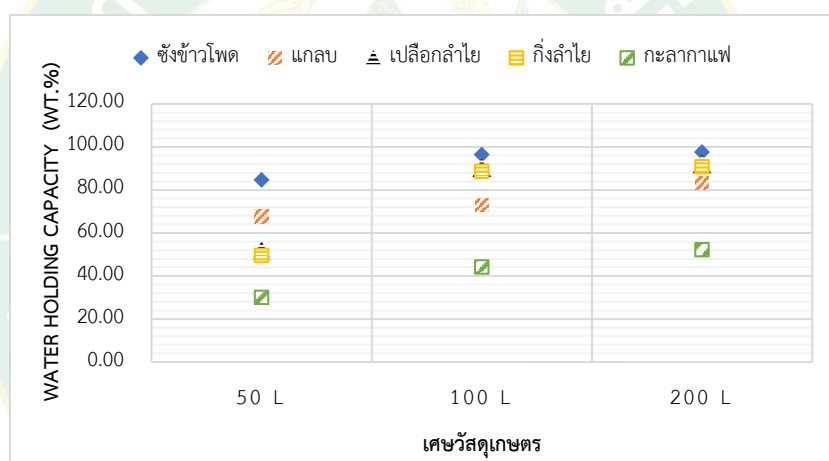
ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	HHV MJ/kg	ขนาดถัง (ลิตร)	References
ซังข้าวโพด	370-480	28.25	50 ลิตร	Brewer, et al. (2009)
	395-440	29.18	100 ลิตร	
	410-450	28.61	200 ลิตร	
แกลบ	420-465	18.28	50 ลิตร	
	405-480	16.08	100 ลิตร	
	450-530	17.97	200 ลิตร	
เปลือกกล้วย	355-520	22.91	50 ลิตร	
	395-450	24.52	100 ลิตร	
	400-510	24.12	200 ลิตร	
กะลาแกแฟ	300-380	28.55	50 ลิตร	
	380-405	26.95	100 ลิตร	
	400-435	26.89	200 ลิตร	
กิ่งลำไย	300-365	23.33	50 ลิตร	
	320-375	24.62	100 ลิตร	
	420-500	26.10	200 ลิตร	
ต้นหญ้า	500	15.37		
ต้นข้าวโพด		21.60		
ไม้		22.64		
หญ้าเนเปียร์	400	22.18		Reza, et al. (2020)
	500	23.02		
	600	23.75		
เมล็ดดอกคำฝอย	400	28.15		Angin (2013)
	450	28.86		
	500	29.39		

	550	29.71	
	600	30.06	
ซึ่งข้าวโพด	500	30.0	Mullen, et al.
ส่วนที่เหลือจาก		21.0	(2010)
ข้าวโพด			
ไม้ไผ่	500	30.2	Kim, et al. (2013)
ไม้ยูคาลิปตัส		32.2	
ดอกสน		31.5	
ไม้ซีดาร์ญี่ปุ่น		31.2	
ถ่านหินบิทูมินัส	-	29.85	Yousaf, et al.
เปลือกถั่วลิสง	300	23.99	(2017)
	500	27.85	
	700	28.79	
ฟางข้าว	300	16.82	
	500	21.37	
	700	24.07	
ซีเลื่อยไม้ป้อป	400	31.23	Chen, et al. (2016)
ถ่าน	450	31.85	
	500	32.16	
	550	32.01	
	600	32.07	
ฟางก้านผัก	400	27.32	Karaosmanoglu,
	500	27.68	et al. (2000)
	600	27.61	
ไม้มะกอก	400	31.71	Abenavoli, et al.
ไม้เฮเซลนัท		26.62	(2016)

4.13 คุณสมบัติความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพ (Water Holding Capacity)

เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชีวมวล หรือเศษวัสดุเกษตร เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดแรงยึดเกาะและแรงยึดเหนี่ยวกับความพรุน (Song and Guo., 2012) จึงได้ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water Holding Capacity: WHC) ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กิ่งลำไย และกะลากาแฟ โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง (แสดงดังภาพที่ 60) พบว่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพจากเตาทั้ง 3 ขนาด (50, 100 และ 200 ลิตร) จากชังข้าวโพดสูงสุดและกะลากาแฟน้อยสุด (30.08-84.65 wt.%), (44.16-96.43 wt.%) และ (52.29-97.62 wt.%) ตามลำดับ



ภาพที่ 60 แสดงค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพ 5 ชนิด จากเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร เวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้น สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น และเกิดการเชื่อมต่อระหว่างรูพรุน ส่งผลทำให้ค่าความพรุนสูงตาม (Zhang and You., 2013) และที่อุณหภูมิต่ำมีความเป็นรูพรุนแต่อาจจะมีขนาดเล็กกว่าที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีองค์ประกอบของน้ำมันดินและสารต่าง ๆ เคลือบอยู่อาจส่งผลทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลงเมื่อผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำ (Kameyama, Miyamoto et al., 2019 และ Reza, Afroz et al. 2020) ความสามารถในการกักเก็บน้ำในพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านชีวภาพนั้นมีประโยชน์ในการ

แลกเปลี่ยนสารอาหารในดินให้ดีขึ้น โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตพืชผลทางการเกษตร (Berndtsson., 2010) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ (ดังแสดงตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพที่ได้จากการศึกษาเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร และงานวิจัยอื่น ๆ

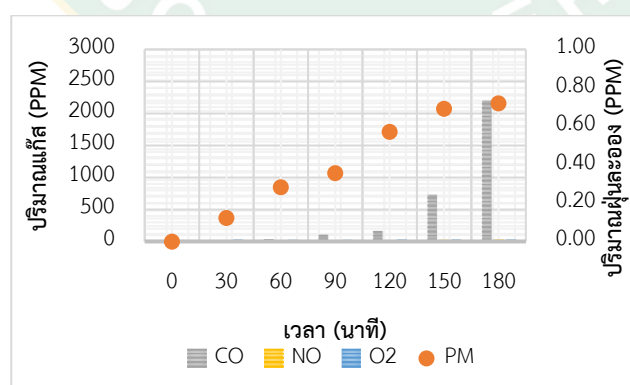
ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	WHC (wt.%)	ขนาดเตา	References
ซังข้าวโพด	390-490	84.65	50 ลิตร	Reza, et al. (2020)
	395-440	96.43	100 ลิตร	
	410-450	97.62	200 ลิตร	
แกลบ	420-465	67.80	50 ลิตร	
	410-500	73.12	100 ลิตร	
	450-530	83.24	200 ลิตร	
เปลือกลำไย	355-520	51.99	50 ลิตร	
	395-450	90.42	100 ลิตร	
	400-510	92.17	200 ลิตร	
กะลากาแฟ	300-380	49.64	50 ลิตร	
	380-405	88.75	100 ลิตร	
	400-435	90.80	200 ลิตร	
กิ่งลำไย	300-365	30.08	50 ลิตร	
	320-375	44.16	100 ลิตร	
	420-500	52.29	200 ลิตร	
หญ้าเนเปียร์	400	117		
	500	164		
	600	186		
ไม้ป้อปลาร์	450	344		Zhang และ You

ไม้สน		119	(2013)
ไม้ป้อปลาร์	550	398	
ไม้สน		137	
ซีโก้	300	88	Song และ Guo
	450	110	(2012)
ไม้ผสม	550	151	Berndtsson
			(2010)
แกลบ	400	11	Kameyama, et
	600	7	al. (2019)
ชานอ้อย	400	28	
	600	71	

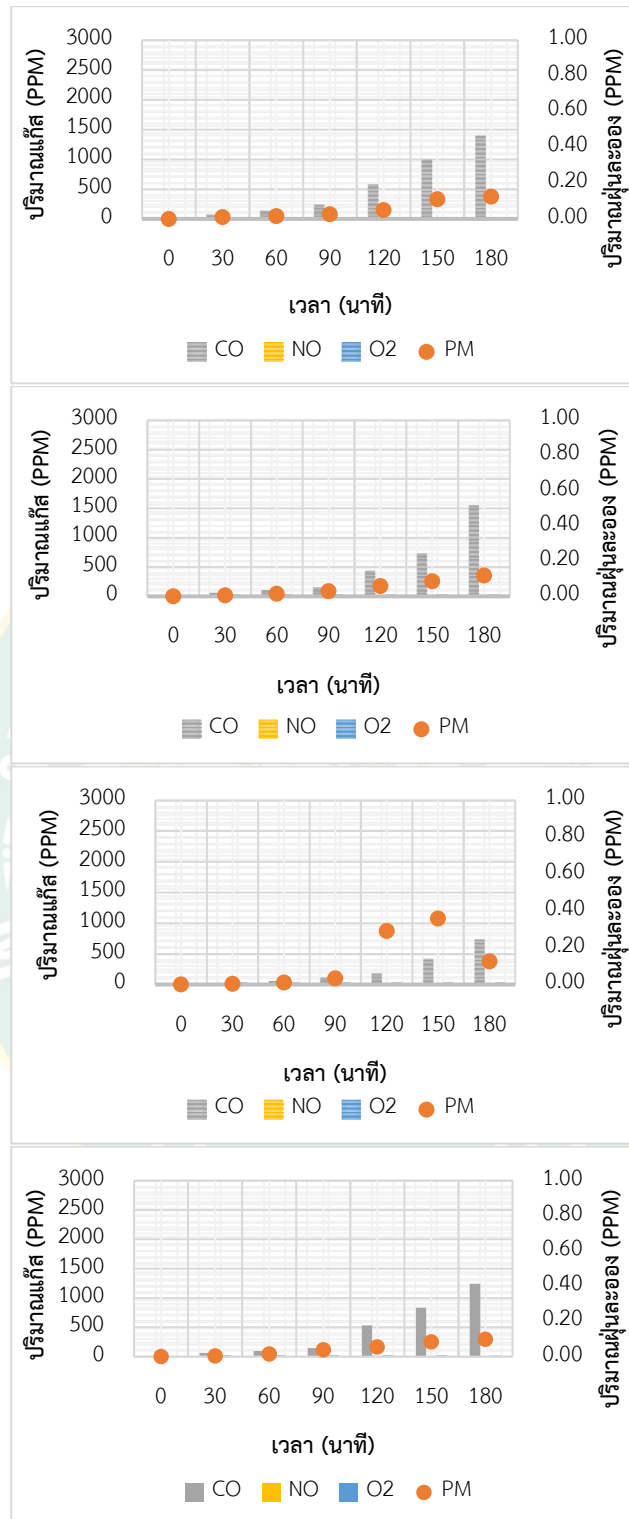
4.14 การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกพืชเศรษฐกิจกระจายทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ เกษตรกรส่วนหนึ่งมุ่งเน้นการเพิ่มปริมาณผลผลิต เลือกใช้วิธีการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรแทนวิธีการอื่น ๆ การเผาในพื้นที่เกษตรเหล่านั้นเป็นแหล่งที่มาของฝุ่นควัน ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออีกหลายด้าน ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและเกิดปัญหาในดิน จึงได้ทำการศึกษาปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลา กากแผล และกิ่งลำไย ซึ่งเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือการนำเศษวัสดุเกษตรที่เหลือทิ้งมา ก่อให้เกิดประโยชน์และนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และฝุ่นละออง เมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าเตาขนาด 50 ลิตร มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพเฉลี่ยประมาณ 217-483 PPM ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 3-6 PPM ก๊าซออกซิเจนเฉลี่ยประมาณ 17.0-17.7% และฝุ่นละอองเฉลี่ยประมาณ 0.042-0.392 PPM (ดังแสดงภาพที่ 61) ตามลำดับ เตาขนาด 100 ลิตร มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพเฉลี่ยประมาณ 420-664 PPM ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 4-8 PPM ก๊าซออกซิเจนเฉลี่ยประมาณ 17.1-17.6% และฝุ่นละอองเฉลี่ยประมาณ 0.100-0.194 PPM (ดังแสดงภาพที่ 62) ตามลำดับ และเตาขนาด 200 ลิตร มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ของ

ถ่านชีวภาพเฉลี่ยประมาณ 468-818 PPM ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 5-10 PPM ก๊าซออกซิเจนเฉลี่ยประมาณ 16.6-17.3% และฝุ่นละอองเฉลี่ยประมาณ 0.287-0.511PPM (ดังแสดงภาพที่ 63) ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตา การสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล และเชื้อเพลิงในกระบวนการที่เพิ่มขึ้นตามขนาดเตา เกิดรวมตัวฝุ่นละอองจากควัน (Smoke) ควันขาวเป็นสารไฮโดรคาร์บอน หรือน้ำมัน จากเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2558) ลักษณะของการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อนหลักจากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่ออุณหภูมิ 250-900 องศาเซลเซียสนั้น ปฏิกิริยาเผาไหม้ของแข็งจะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ฯลฯ ที่ทำพันธะกันในรูปแบบต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะประกอบด้วย H_2 , CO, H_2O , N_2 , hydrocarbons ผลิตภัณฑ์ของแข็ง ถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ของเหลว bio-oil, water (ปิยรัตน์และคณะ, 2549 และนคร, 2552) ความร้อนที่ได้จากกระบวนการจะได้แก๊สจะแพร่ไปยังรอบ ๆ จุดศูนย์กลางซึ่งจะเพิ่มความร้อนเปลวไฟสามารถนำไปทำอาหาร หรืออื่น ๆ และชีวมวลที่บรรจุในเตาจะเปลี่ยนเป็นถ่าน (Lehmann and Joseph., 2015) การศึกษาปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้และต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษทางอากาศ เมื่อเทียบกับการเผาในพื้นที่เกษตร เกิดจากการออกแบบเตาและควบคุมอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่อการผลิต ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพที่ก่อให้เกิดปริมาณฝุ่นละอองและแก๊ส เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดินและการลดการปล่อย CO_2 (Reza, Afroze et al., 2020) ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



(a)



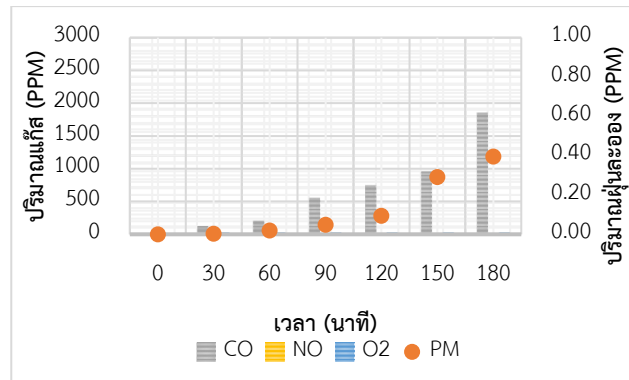
(b)

(c)

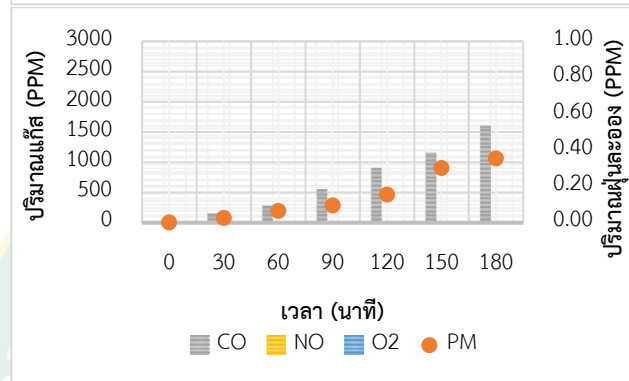
(d)

(e)

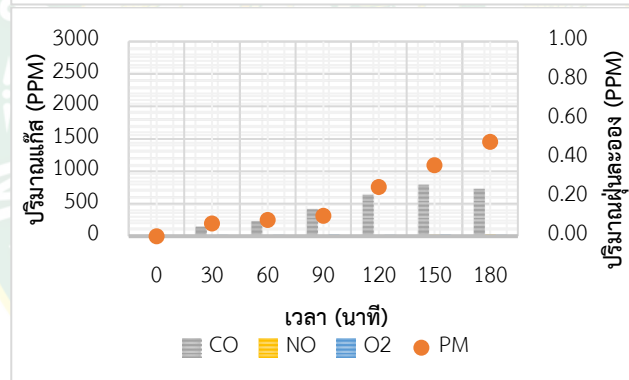
ภาพที่ 61 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกถั่ว (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งถั่ว (e) เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



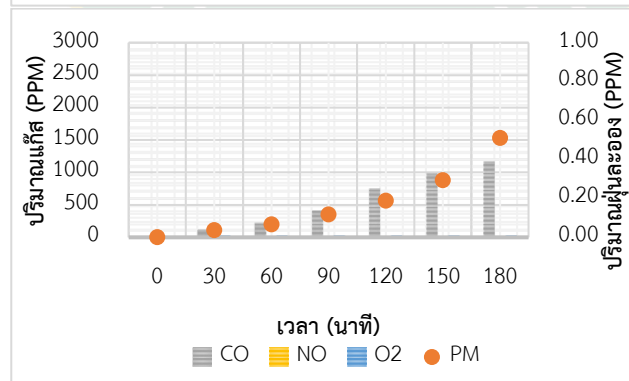
(a)



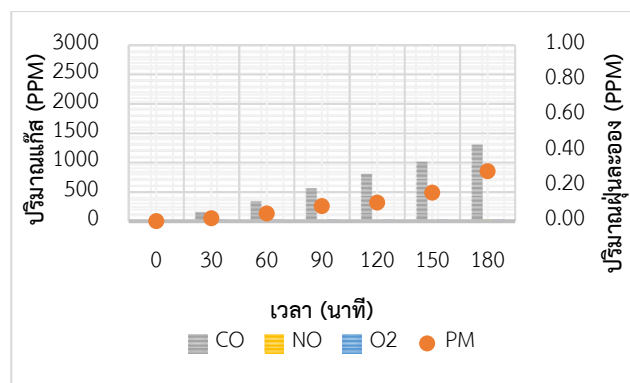
(b)



(c)

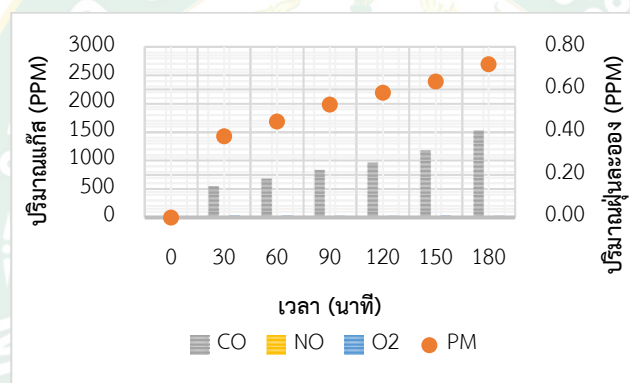


(d)

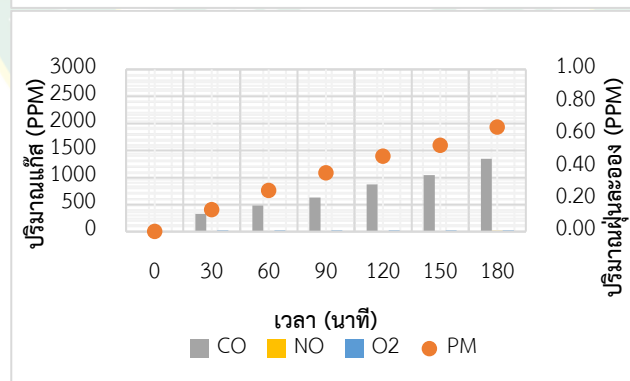


(e)

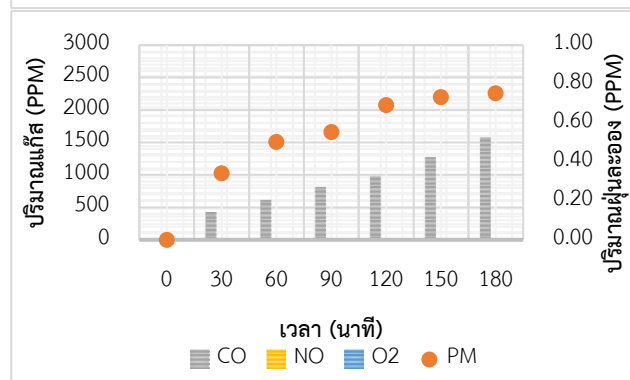
ภาพที่ 62 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกกล้วย (c) กะลากาแฟ (d) และกิ่งกล้วย (e) เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



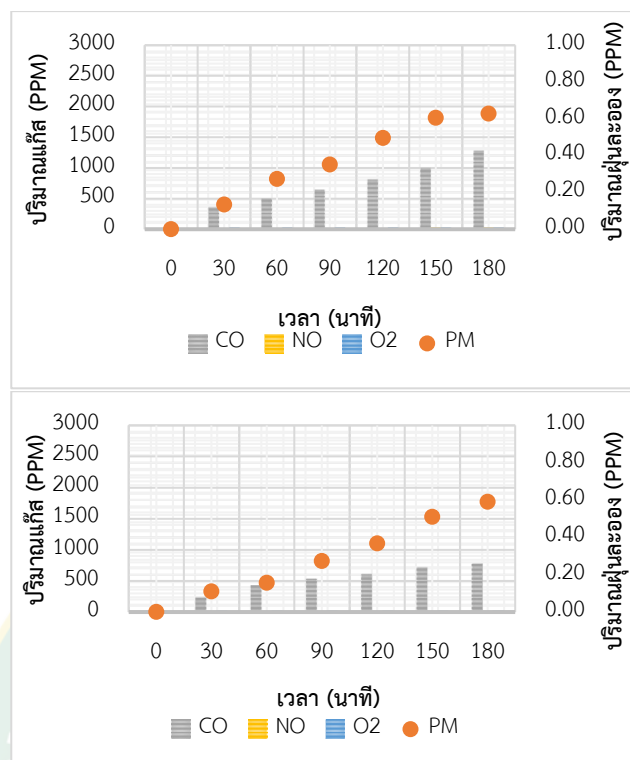
(a)



(b)



(c)



(d)

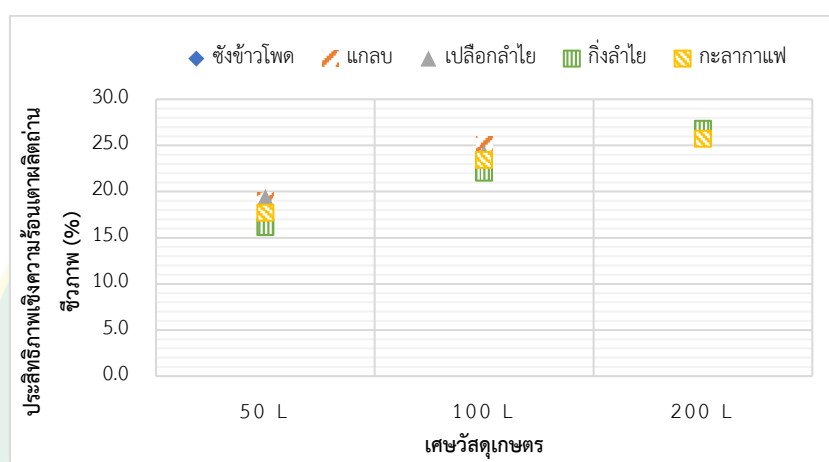
(e)

ภาพที่ 63 แสดงปริมาณแก๊สและฝุ่นละอองในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (a) แกลบ (b) เปลือกกล้วย (c) กะลาจากแพ (d) และกิ่งลำไย (e) เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

4.15 ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ (Water Boiling Test)

ในปัจจุบันมีวิธีการผลิตถ่านชีวภาพหลากหลายรูปแบบ (Pituya, Sriburi et al., 2017, รัตถชลและคณะ, 2560 และอรสา, 2553) มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตหลายปัจจัยด้วยกัน จึงได้ทำการศึกษาเตาประเภทแอนนิลา (Anila) คือจะใช้กระบอบกศูนย์กลางสองเส้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ชีวมวลถูกวางไว้ระหว่างกระบอบที่สองและใช้เชื้อเพลิงจุดไฟตรงกลาง ความร้อนที่ได้จากกระบวนการจะได้แก๊สจะแพร่ไปยังรอบ ๆ ซึ่งจะเพิ่มเปลวไฟสามารถนำไปทำอาหาร และชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นไบโอชาร์ (Lehmann and Joseph., 2015 และ IBI Biochar., 2561) และจากการศึกษาเตาเผาแบบธรรมดาทั่วไปใช้สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพใช้ระยะเวลานานกว่า 7 ชั่วโมง อุณหภูมิในกระบวนการไม่เท่ากัน และอีกทั้งสิ้นเปลืองการใช้แหล่งความร้อนจำนวนมาก มีประสิทธิภาพการผลิตค่อนข้างต่ำ จึงได้มีการศึกษาเตาต้นแบบขนาด 50 ลิตร (Wongsiriamnuay, Khamdaeng et al., Intagun, Khamdaeng et al., 2018, และ Panyoyai, Petchaihan et al., 2019) เพื่อออกแบบและศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิต (Petchaihan, Panyoyai et al., 2020) โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร แบบหุ้มฉนวน และทำการศึกษ

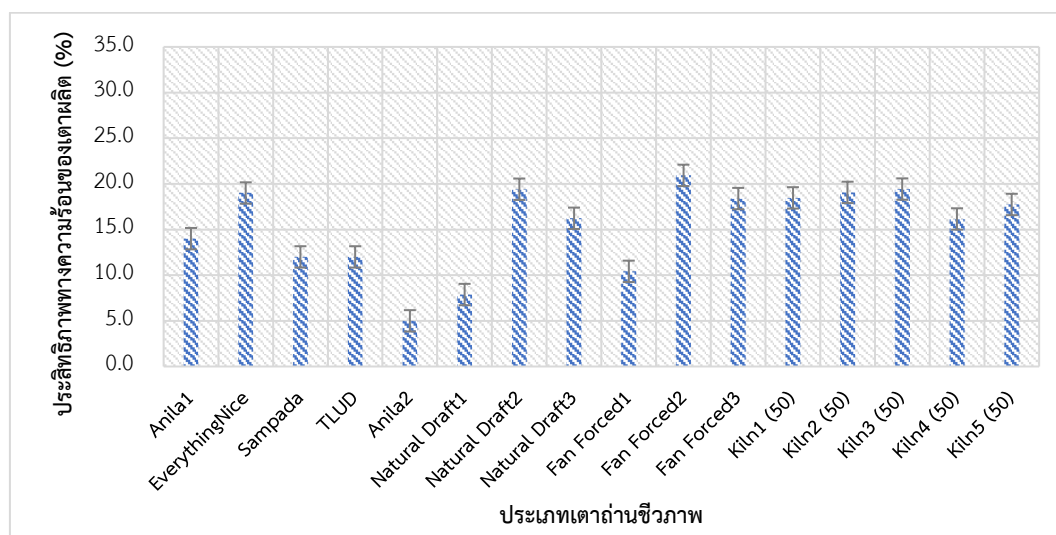
ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพตามมาตรฐานนานาชาติ VITA โดยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) (VITA., 1985) จากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลาปากาแฟ และกิ่งลำไย ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ เตาขนาด 50 ลิตร และ เปลือกลำไยสูงสุดและกิ่งลำไยน้อยสุด (16.2-19.4%) เตาขนาด 100 ลิตร แกลบสูงสุดและกิ่งลำไยน้อยสุด (22.1-25.1%) และเตาขนาด 200 ลิตร กิ่งลำไยสูงสุดและกะลาปากาแฟน้อยสุด (25.8-26.8%) ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 64)



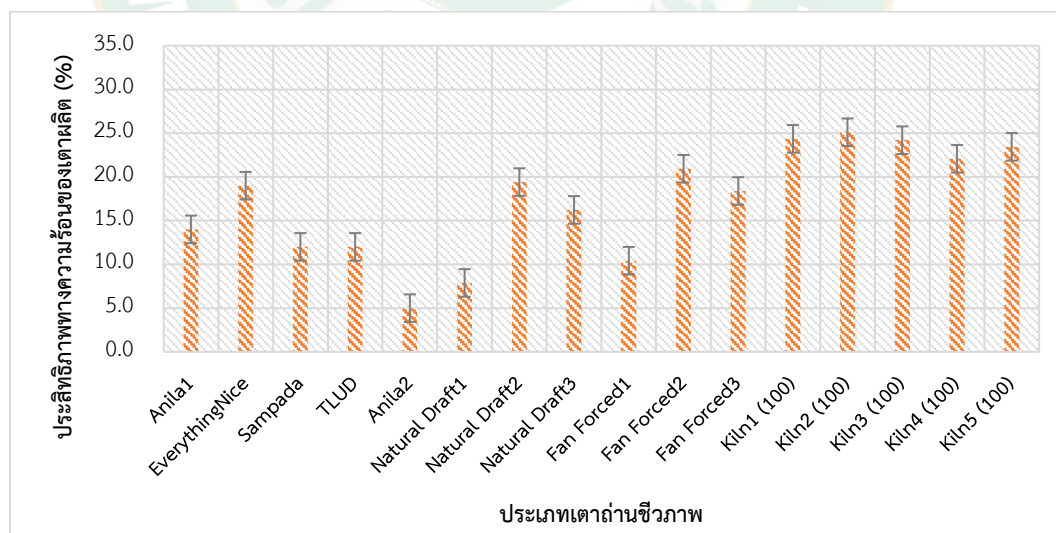
ภาพที่ 64 แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 3 ขนาด โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแตกต่างกัน ค่าทางความร้อนที่ได้เกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ (Carter and Shackley., 2011 และกันยาพรและคณะ, 2559) (แสดงดังภาพที่ 65, 66 และ 67) พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพค่อนข้างสูง เนื่องจากหลายปัจจัยที่ส่งเสริม เช่น คุณสมบัติองค์ประกอบชีวมวลจากเศษวัสดุเกษตรล้วนส่งผลค่าทางความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิการกระจายความร้อน ระยะเวลาในการผลิต อัตราส่วนเชื้อเพลิง รวมไปถึงวัสดุและอุปกรณ์ในการออกแบบเตาต่าง ๆ และจากการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์เพื่อนำความร้อนที่เกิดขึ้นไปใช้ในการต้มน้ำ (นคร ธนศิษฐ์ และคณะ, 2553) สามารถต่อยอดการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ อย่างเช่น การนำความร้อนไปใช้การอบแห้ง ไปใช้ทดแทนและเพิ่มพลังงานด้านไฟฟ้าได้ ดังนั้น

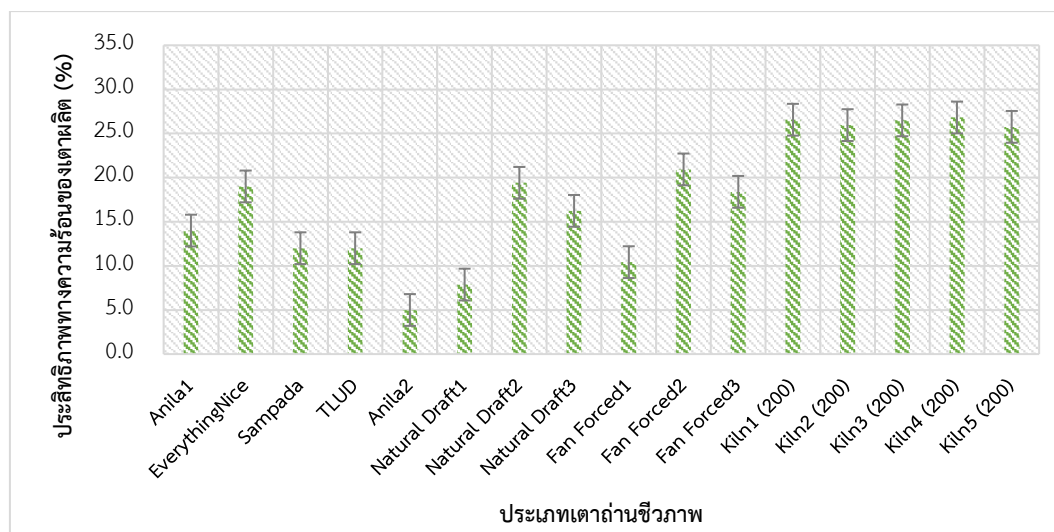
ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบเตาถ่านชีวภาพเพื่อให้มีประสิทธิภาพ ล้วนมีหลายปัจจัยเมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



ภาพที่ 65 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกกล้วย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลากาแฟ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 66 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกกล้วย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลากาแฟ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

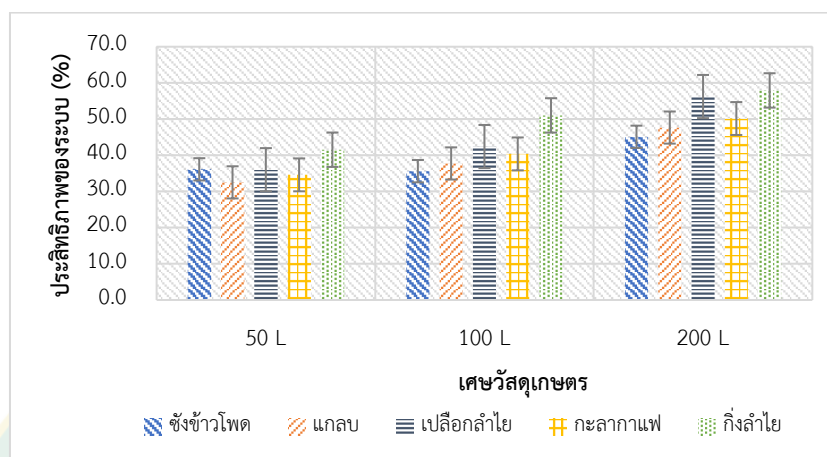


ภาพที่ 67 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรกับงานวิจัยอื่น ๆ โดยเตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร (Kiln1=ซังข้าวโพด) (Kiln2=แกลบ) (Kiln3=เปลือกลำไย) (Kiln4=กิ่งลำไย) และ (Kiln5=กะลากาแฟ) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

4.16 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ

ในปัจจุบันมนุษย์มีความสะดวกสบายมากขึ้นด้วยการพัฒนาเทคโนโลยี แต่การใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น มีการใช้ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีมากขึ้นในทุกด้านของชีวิต เช่นเดียวกับในประเทศอื่น ๆ เนื่องด้วยจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นในประเทศ การใช้พลังงานก็เพิ่มขึ้นอย่างมากเช่นกัน ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในประเทศมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื่องจากในประเทศพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศเป็นอย่างมาก จึงได้ศึกษาชีวมวล เศษวัสดุ หรือสารอินทรีย์ สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานทดแทนได้ และเพื่อศึกษาปัจจัยของเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีต่อกระบวนการผลิต จึงได้มีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทางพลังงานของเตาผลิตถ่านชีวภาพ เตาขนาด 50 ลิตร กิ่งลำไยสูงสุดและแกลบน้อยสุด (32.5-41.5%) เตาขนาด 100 ลิตร และเตาขนาด 200 ลิตร กิ่งลำไยสูงสุดและซังข้าวโพदन้อยสุด (35.6-51.0%) และ (45.1-57.9%) ตามลำดับ (แสดงดังภาพที่ 68) พบว่าประสิทธิภาพทางพลังงานของเตาผลิตถ่านชีวภาพค่อนข้างสูง ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรยังช่วยก่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยงการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น เป็นการนำเศษวัสดุที่เหลือทิ้งมาก่อให้เกิดประโยชน์ ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเศรษฐกิจ อีกทั้งยังปกป้องสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ

นำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน หรือการดูดซับโลหะ ลดกระทบก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน และใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งหมุนเวียนได้ เป็นต้น



ภาพที่ 68 แสดงความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบของเตาผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 3 ชนิด โดยเตาถ่านชีวภาพ 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

4.17 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนในการผลิต และมูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้

ได้ทำการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนในการผลิต และมูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้ ของถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลาจากาแฟ และกิ่งลำไย โดยเตาผลิตขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลาในกระบวนการผลิต 3 ชั่วโมง โดยรวบรวมข้อมูลบางส่วนจาก (Lehmann and Joseph., 2009) เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบราคาจากต่างประเทศและราคาในประเทศไทย (แสดงดังตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 แสดงรายการบางส่วนในการการวิเคราะห์ต้นทุน (Lehmann and Joseph, 2009)

ข้อมูล	หน่วย	ปีที่				
		1	2	3	4	5
Biochar from kiln	(t yr ⁻¹)	0.50	0.83	0.83	0.83	0.83
wood stock	(t yr ⁻¹)	109.20	109.20	109.20	109.20	109.20
Increase in maize	(t yr ⁻¹)	10.17	28.64	47.12	65.60	84.08

Labor rate	(US\$ day ⁻¹)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Price maize	(US\$ t ⁻¹)	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
Costs	(US\$)	780	780	780	780	780
Kiln labor						
Charcoal sales	(US\$)	1050	1456	1456	1456	1456

ตารางที่ 16 แสดงต้นทุนคงที่ระยะเวลาการใช้งานเครื่องจักร 5 ปี

ต้นทุนคงที่ ระยะเวลาการใช้งานเครื่องจักร 5 ปี						
ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคา (หน่วย)	ราคา (บาท)	
1	ชุดผลิตไบโอชาร์ขนาด 50 ลิตร	เตา	20	1,000	20,000	
2	ชุดผลิตไบโอชาร์ขนาด 100 ลิตร	เตา	20	1,500	30,000	
3	ชุดผลิตไบโอชาร์ขนาด 200 ลิตร	เตา	5	8,500	17,000	
4	ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (wisco analog)	ชุด	4	20,000	40,000	5 ปี
5	ค่าเสื่อมราคา				14,400	
6	ฉนวนกันความร้อน	ม้วน	20	1,996	39,920	
	รวม				354,320	

ตารางที่ 17 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตรต่อรอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด					
ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคา (kg)	ราคา (บาท)
1	เชื้อเพลิงไม้ลำไย	กิโลกรัม	25	3	75
2	ซังข้าวโพด	กิโลกรัม	11	1.5	16.5
3	แกลบ	กิโลกรัม	6	2	12
4	เปลือกลำไย	กิโลกรัม	6	1	6
5	กะลาตากาแฟ	กิโลกรัม	6	1	6
6	กิ่งลำไย	กิโลกรัม	6	1	6
7	ค่าไฟฟ้า			23	23
	รวม				145

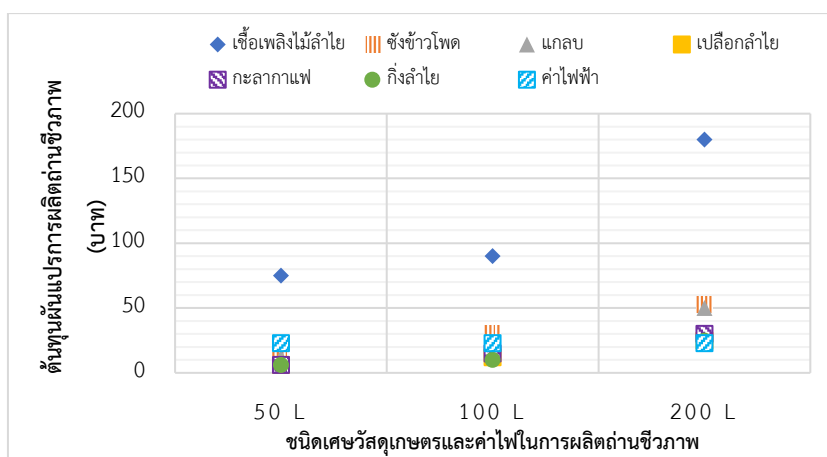
ตารางที่ 18 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพ ขนาด 100 ลิตรต่อรอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด					
ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคา (kg)	ราคา (บาท)
1	เชื้อเพลิงไม้ลำไย	กิโลกรัม	30	3	90
2	ซังข้าวโพด	กิโลกรัม	20	1.5	30
3	แกลบ	กิโลกรัม	12	2	24
4	เปลือกลำไย	กิโลกรัม	12	1	12
5	กะลาตากาแฟ	กิโลกรัม	15	1	15
6	กิ่งลำไย	กิโลกรัม	10	1	10

7	ค่าไฟฟ้า	23	23
	รวม		204

ตารางที่ 19 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรต่อการอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด					
ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคา (kg)	ราคา (บาท)
1	เชื้อเพลิงไม้ลำไย	กิโลกรัม	60	3	180
2	ซังข้าวโพด	กิโลกรัม	35	1.5	52.5
3	แกลบ	กิโลกรัม	25	2	50
4	เปลือกลำไย	กิโลกรัม	25	1	25
5	กะลากาแฟ	กิโลกรัม	30	1	30
6	กิ่งลำไย	กิโลกรัม	25	1	25
7	ค่าไฟฟ้า			23	23
	รวม				386



ภาพที่ 69 แสดงต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ต้นทุนผันแปรการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชั่งข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กะลากาแฟ และกิ่งลำไย เตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าต้นทุนผันแปรรวมในการผลิตอยู่ระหว่าง 145-386 บาทต่อรอบการผลิต (แสดงดังภาพที่ 69) และโดยเตาขนาด 50 และ 100 ลิตร มีค่าแรงงานคนผลิตจำนวน 2 คน เท่ากับ 24,000 บาทต่อเดือน และเตาขนาด 200 ลิตร แรงงานคนผลิตจำนวน 4 คน เท่ากับ 48,000 บาทต่อเดือนตามลำดับ

ตารางที่ 20 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรต่อรอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 50 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด

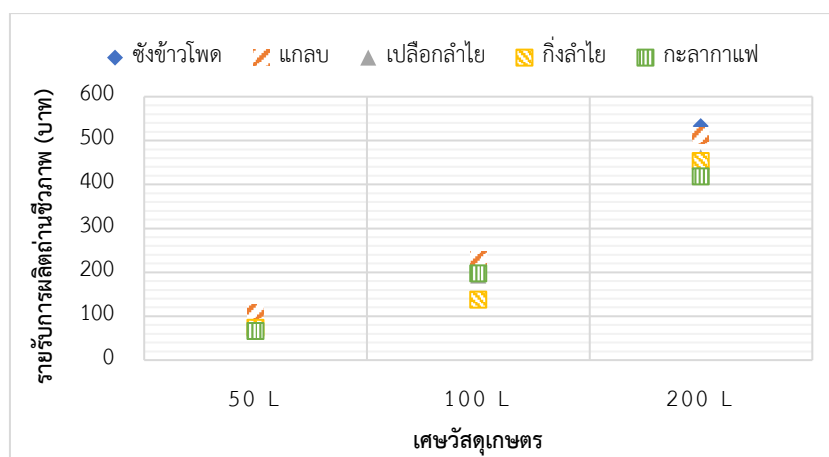
ลำดับ	รายการรายรับ	หน่วย	จำนวน	ราคา	ราคา (บาท)
				(kg)	
1	ถ่านชีวภาพชั่งข้าวโพด	กิโลกรัม	2.07	40	82.8
2	ถ่านชีวภาพแกลบ	กิโลกรัม	2.74	40	109.6
3	ถ่านชีวภาพเปลือกลำไย	กิโลกรัม	1.89	40	75.6
4	ถ่านชีวภาพกิ่งลำไย	กิโลกรัม	1.84	40	73.6
5	ถ่านชีวภาพกะลากาแฟ	กิโลกรัม	1.66	40	66.4
	รวม				408

ตารางที่ 21 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรต่อรอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 100 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด					
ลำดับ	รายการรายรับ	หน่วย	จำนวน	ราคา (kg)	ราคา (บาท)
1	ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	กิโลกรัม	5.76	40	230.4
2	ถ่านชีวภาพแกลบ	กิโลกรัม	5.72	40	228.8
3	ถ่านชีวภาพเปลือกลำไย	กิโลกรัม	4.81	40	192.4
4	ถ่านชีวภาพกิ่งลำไย	กิโลกรัม	3.45	40	138.0
5	ถ่านชีวภาพกะลาकाแพ	กิโลกรัม	4.94	40	197.6
รวม					987

ตารางที่ 22 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด เตาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรต่อรอบการผลิต

เตาถ่านชีวภาพ 200 ลิตร 3 ชั่วโมง เศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด					
ลำดับ	รายการรายรับ	หน่วย	จำนวน	ราคา (kg)	ราคา (บาท)
1	ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	กิโลกรัม	13.32	40	532.8
2	ถ่านชีวภาพแกลบ	กิโลกรัม	12.78	40	511.2
3	ถ่านชีวภาพเปลือกลำไย	กิโลกรัม	11.55	40	462.0
4	ถ่านชีวภาพกิ่งลำไย	กิโลกรัม	11.33	40	453.2
5	ถ่านชีวภาพกะลาकाแพ	กิโลกรัม	10.47	40	418.8
รวม					2,378



ภาพที่ 70 แสดงรายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

รายรับการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ ชั่งข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กะหล่ำปลี และกิ่งกล้วย เตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ามีรายรับรวมในการผลิตอยู่ระหว่าง 408-2,378 บาทต่อรอบการผลิต (แสดงดังภาพที่ 70) ตามลำดับ

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรตามผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ระยะเวลา (เดือน)	ต้นทุน (บาท)	รายรับ (บาท)	กำไร (บาท)
1	195,660	48,960	- 146,700
2	237,000	97,920	- 139,080
3	278,340	146,880	- 131,460
4	319,680	195,840	- 123,840
5	361,020	244,800	- 116,220
6	402,360	293,760	- 108,600
7	443,700	342,720	- 100,980
8	485,040	391,680	- 93,360
9	526,380	440,640	- 85,740
10	567,720	489,600	- 78,120
11	609,060	538,560	- 70,500
12	650,400	587,520	- 62,880

13	691,740	636,480	-	55,260
14	733,080	685,440	-	47,640
15	774,420	734,400	-	40,020
16	815,760	783,360	-	32,400
17	857,100	832,320	-	24,780
18	898,440	881,280	-	17,160
19	939,780	930,240	-	9,540
20	981,120	979,200	-	1,920
21	1,022,460	1,028,160		5,700
22	1,063,800	1,077,120		13,320
23	1,105,140	1,126,080		20,940
24	1,146,480	1,175,040		28,560

ตารางที่ 24 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 100 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

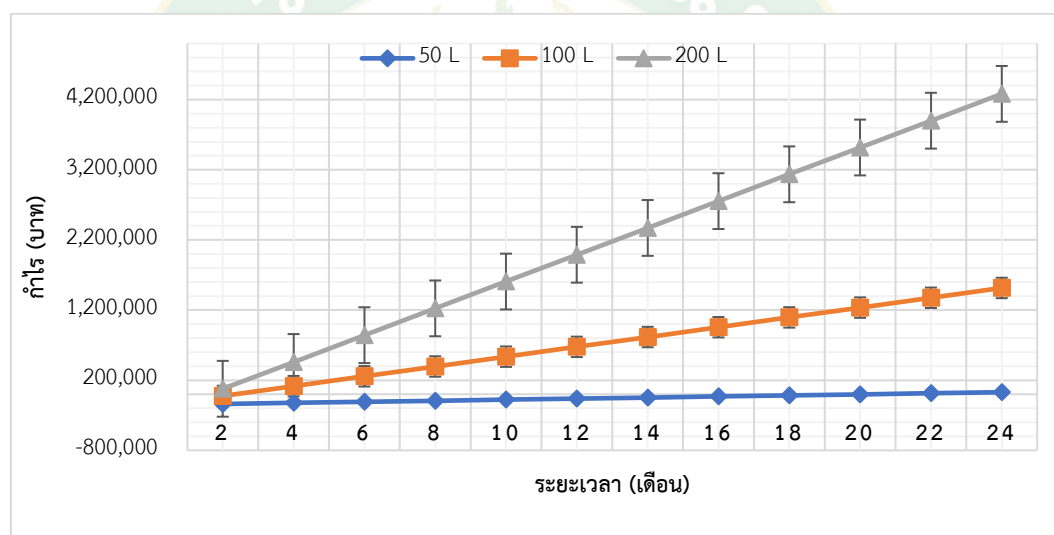
ระยะเวลา (เดือน)	ต้นทุน (บาท)	รายรับ (บาท)	กำไร (บาท)
1	212,800	118,464	- 94,336
2	261,280	236,928	- 24,352
3	309,760	355,392	45,632
4	358,240	473,856	115,616
5	406,720	592,320	185,600
6	455,200	710,784	255,584
7	503,680	829,248	325,568
8	552,160	947,712	395,552
9	600,640	1,066,176	465,536
10	649,120	1,184,640	535,520
11	697,600	1,303,104	605,504
12	746,080	1,421,568	675,488
13	794,560	1,540,032	745,472

14	843,040	1,658,496	815,456
15	891,520	1,776,960	885,440
16	940,000	1,895,424	955,424
17	988,480	2,013,888	1,025,408
18	1,036,960	2,132,352	1,095,392
19	1,085,440	2,250,816	1,165,376
20	1,133,920	2,369,280	1,235,360
21	1,182,400	2,487,744	1,305,344
22	1,230,880	2,606,208	1,375,328
23	1,279,360	2,724,672	1,445,312
24	1,327,840	2,843,136	1,515,296

ตารางที่ 25 การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรเตาผลิตถ่านชีวภาพ ขนาด 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ระยะเวลา (เดือน)	ต้นทุน (บาท)	รายรับ (บาท)	กำไร (บาท)
1	398,580	285,360	- 113,220
2	492,840	570,720	77,880
3	587,100	856,080	268,980
4	681,360	1,141,440	460,080
5	775,620	1,426,800	651,180
6	869,880	1,712,160	842,280
7	964,140	1,997,520	1,033,380
8	1,058,400	2,282,880	1,224,480
9	1,152,660	2,568,240	1,415,580
10	1,246,920	2,853,600	1,606,680
11	1,341,180	3,138,960	1,797,780
12	1,435,440	3,424,320	1,988,880
13	1,529,700	3,709,680	2,179,980
14	1,623,960	3,995,040	2,371,080
15	1,718,220	4,280,400	2,562,180

16	1,812,480	4,565,760	2,753,280
17	1,906,740	4,851,120	2,944,380
18	2,001,000	5,136,480	3,135,480
19	2,095,260	5,421,840	3,326,580
20	2,189,520	5,707,200	3,517,680
21	2,283,780	5,992,560	3,708,780
22	2,378,040	6,277,920	3,899,880
23	2,472,300	6,563,280	4,090,980
24	2,566,560	6,848,640	4,282,080



ภาพที่ 71 แสดงจุดพอตีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรตามผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร จากเศษวัสดุเกษตร ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่าเตาทั้ง 3 ขนาดนั้นมีการวิเคราะห์จุดพอตีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรในการผลิตถ่านชีวภาพแตกต่างกัน (แสดงดังภาพที่ 71) จุดพอตีทุนคือ ปริมาณขายถ่านชีวภาพอันจะทำให้ราคาขายเท่ากับต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการผลิตและในการจำหน่ายถ่านชีวภาพ การขายตามปริมาณขาย ณ จุดพอตีทุนนี้จะไม่ทำให้งิการขาดทุน โดยการคำนวณผลิตและขายได้ทั้งหมด ต้นทุนคงที่ทั้งหมด 354,320 บาท รายจ่ายเตาทั้ง 3 ขนาดมีการผลิต 4 รอบการผลิตต่อวัน และภายใน 1 เดือน ระยะเวลาผลิต 30 วัน รายจ่ายเท่ากับ (41,340), (48,480) และ (94,260) บาทต่อเดือน ตามลำดับ รายรับที่ได้จะเท่ากับ (48,960), (118,464) และ (285,360) บาทต่อเดือน ตามลำดับ พบว่าเตาขนาด 50 ลิตร ในเดือนที่ 21 หรือ

ระยะเวลา 1 ปี 9 เดือน จะได้กำไร 5,700 บาท เตาขนาด 100 ลิตร ในเดือนที่ 3 หรือระยะเวลา 3 เดือน จะได้กำไร 45,632 บาท ผลผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรสามารถสร้างกำไรได้ถึง 418,096 บาทต่อปี และเตาขนาด 200 ลิตร ในเดือนที่ 2 หรือระยะเวลา 2 เดือน จะได้กำไร 77,880 บาท ผลผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรสามารถสร้างกำไรได้ถึง (28,560), (1,515,296) และ (4,282,080) บาท ระยะเวลาภายใน 2 ปี



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตร ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเตา ขนาดรูเจาะ จำนวนแถวรูเจาะ และเศษวัสดุเกษตรที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบโดยเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการผลิตและความร้อนภายในเตาเผาถ่านชีวภาพ ประกอบด้วยผลการทดสอบ เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรให้มีคุณสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ที่ได้มาตรฐานสำหรับการนำไปใช้ในการปรับปรุงดิน อีกทั้งยังเป็นการกำจัดขยะ หรือวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร และลดการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร มาเปลี่ยนสภาพเป็นสารปรับปรุงดิน ลดการใช้สารเคมี และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร รวมไปถึงการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนการผลิต มูลค่าของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพของระบบ

5.1 สรุปผลวิจัย

การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและผลิตถ่านถ่านชีวภาพกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ผลจากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในกระบวนการ และเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิและผลผลิตปริมาณถ่านชีวภาพดีที่สุดโดยเตาทั้ง 3 ขนาด และเมื่อนำเศษวัสดุเกษตรไปทดสอบในเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น พบว่าเศษวัสดุเกษตรจากกล้วยให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุด 51.1 wt.% จากช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 352.9±529.0 องศาเซลเซียส และส่วนปริมาณแก๊สจากกิ่งลำไยสูงที่สุด 54.7 wt.% โดยเตาขนาด 200 ลิตร เพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม ส่งผลให้มีกำลังการผลิตและประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของถ่านชีวภาพ ผลจากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในกระบวนการ และเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าความเป็นต่าง (pH) ของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเตาขนาด 200 ลิตร ซึ่งข้าวโพดมีค่าสูงสุด pH 8.66 ตามมาตรฐาน EBC นั้นจะต้องมีค่าความเป็นกรดต่างไม่เกิน 10.0 เพื่อที่จะได้แปลงธาตุอาหารให้พืชดูดซึมได้ง่ายและการใช้ถ่านชีวภาพที่ปริมาณแถมมากอาจทำให้ค่า pH ของดินสูงเกินไปและอาจทำให้พืชขาดจุลธาตุได้

ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของถ่านชีวภาพ ผลจากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในกระบวนการ และเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเตาขนาด 200 ลิตร เปลือกกล้วยมีค่าสูงสุด 0.90 dS m⁻¹ มีค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพที่ได้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการปรับปรุงดินในพื้นที่แห้งแล้ง ช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ อีกทั้งจะช่วยเพิ่มการซึมน้ำ ลดการสะสมเกลือที่ชั้นบนดิน ทำให้เกลือสามารถถูกชะออกจากชั้นดินได้มากขึ้น และช่วยลดการระเหยน้ำจากผิวน้ำดิน

องค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านชีวภาพ (XRF) ประกอบด้วย Si, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sb, Ba, Th, U, และ Al ผลจากการทดสอบพบว่าระยะเวลาในกระบวนการ และเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้องค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเตาขนาด 200 ลิตร ธาตุอาหารพืชที่สำคัญ อย่างเช่น โพแทสเซียม (K), ฟอสฟอรัส (P), แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น จากเปลือกกล้วยมีค่าสูงสุดมีคุณสมบัติองค์ประกอบแร่ธาตุสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน และการดูดซับโลหะได้

ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) ประกอบด้วยปริมาณความชื้น (moisture content) 5.43 wt.% ปริมาณเถ้า (ash content) 3.74 wt.% ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter: VM) 20.95 wt.% และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) 69.87 wt.% ผลจากการทดสอบพบว่าเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณกลุ่มสารของถ่านชีวภาพทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ปริมาณความชื้นและสารระเหยของถ่านชีวภาพลดลง ปริมาณเถ้าและปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น จากกระบวนการผลิตโดยเตาขนาด 200 ลิตร ซึ่งข้าวโพดมีภาพรวมคุณสมบัติปริมาณกลุ่มสารดีมาก ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพถ่านชีวภาพได้

องค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate analysis) ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium จะต้องมียปริมาณคาร์บอนมากกว่า 50% ผลจากการทดสอบพบว่าเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้องค์ประกอบแร่ธาตุเศษวัสดุเกษตรจากเปลือกกล้วยมีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุด ผลิตโดยเตาขนาด 200 ลิตร ประกอบด้วย ปริมาณคาร์บอน (C) 67.24% ปริมาณไฮโดรเจน (H) 1.82% กำมะถัน (S) 0.03% ปริมาณออกซิเจน (O) 13.65% ปริมาณไนโตรเจน (N) 1.40% ปริมาณ Gross Heating Value 5,552% และ Net Heating Value 5,459% เนื่องจากเศษวัสดุเกษตรมีปริมาณไนโตรเจนน้อย หากนำไปใช้ในการบำรุงดิน หรือบำรุงพืชต้องมีการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการช่วยตรึงไนโตรเจนเพื่อให้พืชดูดซึมได้ดีขึ้น ปริมาณ Gross Heating Value และ Net Heating Value จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านชีวภาพ ส่วนกำมะถันมีปริมาณน้อยมาก ๆ นั้น สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ อีกทั้งจากการศึกษาคุณสมบัติองค์ประกอบแร่ธาตุ (Ultimate) ของถ่านชีวภาพจะช่วยลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนด้วยการเพิ่มและกักเก็บคาร์บอนในดิน อัตราส่วน C/N จากกะลาเผาสูงสุดเท่ากับ 287 อัตราส่วน (C/N+O/C) แสดงถึงกลุ่มฟังก์ชันที่มีชีวในถ่านชีวภาพในการตรึงแร่ธาตุในดิน ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium อัตราส่วน O/C จะต้องไม่เกิน 0.4 และ H/C จะต้องไม่เกิน 0.7

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon) ผลจากการทดสอบพบว่าเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ผลิต

โดยเตาขนาด 200 ลิตร ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดเปลือกกล้วยสูงสุดเท่ากับ 617 mg/kg และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมซึ่งข้าวโพดสูงสุดเท่ากับ 607 mg/kg ตามมาตรฐาน EBC Biochar base และ EBC Biochar Premium อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนอินทรีย์รวม (H/C_{org}) จะต้องไม่เกิน 0.7 จากเปลือกกล้วยเท่ากับ 0.36 ปริมาณคาร์บอนและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) จากกระบวนการผ่านเกณฑ์ค่ากำหนดสูงสุดตามมาตรฐานความเป็นพิษ โดยมาตรฐานนานาชาติ และเมื่อนำถ่านชีวภาพไปใช้ปรับปรุงดินจะช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมในดิน ลดการสลายตัวของมวลรวมของดิน อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ส่งผลทำให้ผลิตพืชได้ดียิ่งขึ้น

การวิเคราะห์สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และ Origin Pro ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้สัณฐานถ่านชีวภาพ (SEM) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของรูพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเตาขนาด 200 ลิตร กำลังการขยาย 200 500 1500 และ 5000 เท่า ซึ่งข้าวโพดสูงสุดเท่ากับ $91.77 \mu m$ มีโครงสร้างของถ่านชีวภาพ พื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จะมีลักษณะความขรุขระแต่ไม่มีรูพรุน การจัดลำดับโครงสร้างทั้งภายในและพื้นที่ผิวถ่านชีวภาพจากซึ่งข้าวโพด ลักษณะรูพรุนมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ รูปร่างที่เกิดขึ้นมีหลากหลายรูปแบบ ทำให้ปริมาตรรูพรุนพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โครงสร้างถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติที่ดี ซึ่งมีผลต่อการพัฒนาลักษณะทางกายภาพของดินและธาตุอาหารให้พืช

การวิเคราะห์สัณฐานและองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพ (SEM-EDX spectrum) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร มีองค์ประกอบแร่ธาตุถ่านชีวภาพสูงสุดประกอบด้วย C, O, Ca, K, P, Si และ Mg เป็นต้น

พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET Surface Area) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพ (Adsorption average pore diameter) ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนจากเปลือกกล้วยสูงสุดเท่ากับ $111.5 m^2/g$ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยจากกะลาตากแห้งสูงสุดเท่ากับ 110.8 \AA การจัดลำดับโครงสร้างต่าง ๆ ภายในของถ่านชีวภาพจะมีการขยายรูพรุน ซึ่งมีผลต่อการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของดินและการกักเก็บสารอาหาร ส่งผลทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้น ช่วยสำหรับการเจริญเติบโตและการพัฒนาทางจุลชีววิทยาของดินที่เป็นประโยชน์

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของถ่านชีวภาพ ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) เปลือกกล้วยสูงสุดเท่ากับ $94.85 \text{ cmol}(+)/kg$ ความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนออกซิเดชันไอออนบวก (CEC) สามารถนำไปใช้ในการกักเก็บสารอาหารได้มากขึ้นในการปรับปรุงดินและช่วยให้พืชเจริญเติบโต

ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (HHV) ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร ค่าความร้อนซึ่งข้าวโพดสูงสุดเท่ากับ 28.61 MJ/kg สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน หรือการดูดซับโลหะ และใช้เป็นเชื้อเพลิงของแข็งหมุนเวียน

ความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพ (WHC) ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร ความสามารถในการกักเก็บน้ำของถ่านชีวภาพจากซึ่งข้าวโพดสูงสุดเท่ากับ 97.62 wt.% ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างรูพรุน ส่งผลทำให้ค่าความพรุนสูงตาม ความสามารถในการกักเก็บน้ำในพื้นที่รูพรุนของถ่านชีวภาพนั้นมีประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนสารอาหารในดินให้ดีขึ้น โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตพืชผลทางการเกษตร

ปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สในกระบวนการเผาไหม้ ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร จากเปลือกถั่วมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 813 PPM ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 9 PPM ก๊าซออกซิเจนเฉลี่ยเท่ากับ 17.3% และฝุ่นละอองเฉลี่ยเท่ากับ 0.511 PPM การศึกษาปริมาณฝุ่นละอองและแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้และต่ำกว่ามาตรฐานการปล่อยมลพิษทางอากาศ เมื่อเทียบกับการเผาในพื้นที่เกษตร เกิดจากการออกแบบเตาและควบคุมอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่อการผลิต

ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ (Water Boiling Test) ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร จากกิ่งถั่วสูงสุดเท่ากับ 26.8% ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตถ่านชีวภาพ สามารถนำไปต่อยอดการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ อย่างเช่น การนำความร้อนไปใช้การอบแห้ง ไปใช้ทดแทนและเพิ่มพลังงานด้านไฟฟ้า

ความคุ้มค่าทางพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ ผลจากการทดสอบเศษวัสดุเกษตรแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยเตาขนาด 200 ลิตร กิ่งถั่วสูงสุดเท่ากับ 51.0% ช่วยก่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยงการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น เป็นการนำเศษวัสดุที่เหลือทิ้งมาก่อให้เกิดประโยชน์ ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเศรษฐกิจ อีกทั้งยังปกป้องสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ

เศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตถ่านชีวภาพ ต้นทุนในการผลิต และมูลค่าของถ่านชีวภาพที่ได้ โดยเตาขนาด 200 ลิตร ต้นทุนคงที่ 304,320 บาท ต้นทุนผันแปร 94,260 บาทต่อเดือน และมูลค่าของ

ถ่านชีวภาพที่ได้ 285,360 บาทต่อเดือน การวิเคราะห์จุดพอดีทุนและการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ และกำไรในการผลิตถ่านชีวภาพ พบว่าในเดือนที่ 2 หรือระยะเวลา 2 เดือน จะได้กำไร 77,880 บาท ผลผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเกษตรสามารถสร้างกำไรได้ถึง 4,282,080 บาท ระยะเวลาภายใน 2 ปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาเวลาในการทดสอบ โดยอาจจะศึกษาในช่วง 2 3 และ 4 ชั่วโมง เพื่อดูคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ ซึ่งอาจจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง รวมถึงการนำเศษวัสดุเกษตรอื่น ๆ มาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการศึกษาเตาผลิตถ่านชีวภาพ ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเตา ขนาดรูเจาะ จำนวนแถวรูเจาะ เชื้อเพลิงในการผลิต หรือศึกษาเปรียบเทียบเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบเติมเชื้อเพลิงและการเติมอากาศในกระบวนการ เพื่อให้เตาประหยัดเชื้อเพลิง ใช้งานง่ายมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและกำลังการผลิตสูง

5.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุในการออกแบบและศึกษาขนาดเตาผลิตถ่านชีวภาพที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ศึกษาการกระจายอุณหภูมิ และกระจายความร้อน เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

5.3.4 นำข้อมูลการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของเศษวัสดุเกษตรจากงานวิจัยนี้ ไปทำแบบจำลองทางวิศวกรรม หรือสมการทำนายผลผลิต และคุณสมบัติของถ่านชีวภาพต่าง ๆ ได้ และสามารถศึกษาคุณสมบัติเศษวัสดุชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงกระบวนการและคุณภาพถ่านชีวภาพ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีเยี่ยมในการใช้ปรับปรุงดินและบำรุงพืชทั้งภายในประเทศและสามารถส่งออกต่างประเทศได้

5.3.5 ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือนจนถึงระดับอุตสาหกรรม ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเศรษฐกิจ ลดค่าใช้จ่ายในชีวิตประจำวันเรื่องการนำความร้อนจากเตามาใช้ รวมไปถึงการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ลดการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตและสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในการผลิตพืชอินทรีย์ได้

5.3 ปัญหาที่พบในการศึกษา

5.3.1 สภาพอากาศ ถ้าหากเกิดมีฝนตก หรือลมแรง มีผลต่อความชื้นของเศษวัสดุเกษตร และความชื้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการ

5.3.2 การเตรียมเศษวัสดุเกษตรและคัดแยกถ่านชีวภาพ หรือปริมาณไบโอชาร์



ภาคผนวก

ก. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตและการวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพ



ภาคผนวกที่ 1 เตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 50 ลิตรและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



ภาคผนวกที่ 2 เตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 100 ลิตรและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



ภาคผนวกที่ 3 เตาผลิตถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตรและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



ภาคผนวกที่ 4 ถ้วยบดซีววมวลและไปโอซาร์



ภาคผนวกที่ 5 เครื่องเขย่า สำหรับเขย่าตัวอย่าง เพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC)



ภาคผนวกที่ 6 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)



ภาคผนวกที่ 7 เครื่องวัดแก๊สและฝุ่นละออง (testo 330-2 LL)



ภาคผนวกที่ 8 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานและโครงสร้างภายในของไบโอชาร์



ภาคผนวกที่ 9 อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ



ภาคผนวกที่ 10 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) เพื่อใช้ในการลดความชื้นชีวมวลและไบโอชาร์

ข. การนำเสนอผลงานวิชาการ

การประชุมงานวิชาการ ระดับนานาชาติ “International Conference on Sustainable Energy and Green Technology 2019” หรือ SEGT ซึ่งงานประชุมได้จัดขึ้น ณ Millennium Hilton Bangkok, Bangkok Thailand ในระหว่างวันที่ 11-14 ธันวาคม 2562

เรื่องที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการ “Test of a modified small-scale biochar kiln”



PAPER • OPEN ACCESS

Test of a modified small-scale biochar kiln

To cite this article: Lalita Petchaihan *et al* 2020 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **463** 012004

View the [article online](#) for updates and enhancements.

Test of a modified small-scale biochar kiln

Lalita Petchaihan¹, Numpon Panyoyai¹, Tipapon Khamdaeng¹ and Thanasit Wongsiriamnuay^{1*}

¹Division of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, 63 Chiangmai-Phrao Road, Nonghan, Sansai, Chiangmai, 50290, Thailand.

E-mail: t.wongsiriamnuay@gmail.com

Abstract. The conventional kilns were used for biochar production, but it took more than 7-9 hours for processing, and its process temperature was not uniform because some of the material could be converted into biochar and used lots of heat source input resulting in low production efficiency. Then the objective of this research was to improve the biochar production by using modified biochar kiln by reducing the temperature distribution. A 50-liter kiln with a modified core was needed in this research. This core was heating source for the pyrolysis process. The heat source came from the combustion of biomass. The core pipe was core puncture diameter for releasing product gas between a process, and it was core puncture diameter in 3 sizes (i.e., 3.18 mm, 4.76 mm and 6.35 mm). Seven kilograms of corncob rice husk and longan peel were loaded in the biochar kiln using three kilograms of fuel. The physical and chemical properties of biochar were analyzed such as water content, pH, electrical conductivity (EC) using scanning electron microscope (SEM), and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The element and mineral compositions were also analyzed, including C, N, O, K, and P. It was found that most of the materials were converted into biochar at uniform temperature with the modified core. The temperature inside a kiln with the heat insulation the modified core was around 400-600 °C better than the common core (100-700 °C) and it took only 3 hours for the process. In terms of products obtained from pyrolysis condition, the average temperature positions inside the kiln were found to be 430 ± 583 °C, 271 ± 512 °C, and 189 ± 503 °C and consisted of biochar yield were found to be 45.7, 34.3 and 31.4 wt.% for rice husk, corncob, and longan peel, respectively. Gas yields were found to be 68.6, 68.6, and 48.6 wt.% for longan peel, corncob, and rice husk, respectively. Ash yields were found to be 10.0, 5.7, and 5.7 wt.%, for longan peel, corncob, and rice husk, respectively. The biochar properties from corncob rice husk and longan peel were beneficial, resulting in being useful for the soil amendment. It had suitable properties for improving the deteriorated soil structure conditions.

1. Introduction

Biochar is produced from biomass, or decomposed organic matter derived from nature such as wood waste, leaves or scraps of agricultural residue such as corncobs, bean stalks, nuts, fruit peel, [1], wheat straw, bagasse, [2], pine tree biomass, willow biomass, maize cobs, rice husk, rice straw and miscanthus biomass [3-11]. These natural materials go through a minimum combustion process with temperature and air controls which is Pyrolysis. There are two methods of separation: Slow Pyrolysis

and Fast Pyrolysis. Slow thermal decomposition is slow burning by decomposition of organic matter in hours and uses to the temperature between 350-600 °C in an anaerobic condition.

Biochar yield from corn cobs, corn and maize cobs [5, 9, 12]. Rice husk physiochemical properties were analysed under slow pyrolysis at different temperatures 300-700 °C [13]. The results indicated that porosity, ash content, electrical conductivity (EC), and pH value [4-8, 10, 11, 14] of both EFB and RH biochars were increased with temperature; however, yield, cation exchange capacity (CEC) [4, 8, 9], SEM, H, C, and N contents were decreased with increasing pyrolysis temperatures. The Fourier transforms IR spectra [15]. The physical and chemical properties of biochar had an alkaline reaction (pH 7.0 –7.8) and could be used for neutralization of acid soils, which account for 45% in Poland [16]. The mineralization occurs when C/N ratio in the decayed organic substance is 20–30/1, whereas nitrogen content ranged from 1.2 to 1.8% [17]. The analysis of the content of carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N) and sulphur (S) and the different characterization techniques including BET, FTIR, XRD, SEM [4], and TGA were done Briefly, BTS exhibited heterogeneous surface structures and comparatively larger specific surface area [18]. The nanostructures of the longan seed and mangos teen skin derived porous carbons were investigated by the field emission scanning electron microscope (FE SEM, ZEISS Ultra.) [19].

Biochar was added to soil using. The concept for obtaining an organic fertilizer containing biochar and its application in the processes of biological transformation of waste was presented. [20].

The Anila stove is a simple technology for converting biomass to char at household level. The stove has been designed and built. The stove consists of two metal barrels. The outer barrel is filled up with biomass and the inner is with firewood. [9]

Currently, there are various methods of production char. There are many factors that affect the production. And the key factor in the production of biochar is the kiln design, designed to be used in the process of slow pyrolysis is a modification of the iron tank. By using engineering principles in design. The objective of this work was to study on the production from agricultural residue, the physical and chemical properties of biochar and testing of a modified small-scale biochar kiln core puncture 3 sizes (3.18, 4.76 and 6.35 mm) and agricultural residue from corncob rice husk and longan peel.. Changes in the physical and chemical characteristics of biochar that suitable properties for soil improvement.

2. Materials and methods

2.1. Biochar feedstocks

Agricultural residues used in this research were corncob, rice husk, and longan peel which were obtained from Chiang Mai, Thailand. They were dried until their moisture contents were less than 10% [21].

2.2. Design biochar kiln

Developed from Anila-type (IBI Biochar) the biochar kiln was made of carbon steel with a dimension of 500 mm × 380 mm (height × diameter) and had a unit capacity of 50 L (Figure 1.). The lid and bottom of the kiln were cut at its centre with the diameter of 115 mm. The core of the biochar kiln was located at the centre of the kiln. The core was made of carbon steel pipe with thickness of 2.5 mm, inner diameter of 115 mm, height of 470 mm, and core puncture diameter of 3.18, 4.76, and 6.35 mm. The dimension of the core and the locations of the core puncture were detailed.

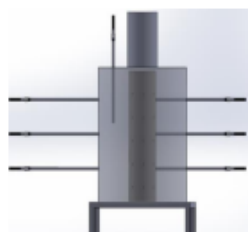


Figure 1. Biochar kiln unit capacity of 50 L.

2.3. Production Biochar

Seven kilograms of feedstock was loaded in the biochar kiln around the core for each experiment. The lid was tightly closed with the heat insulation and the thermocouples were set in (Figure 1.) The biochar kiln was placed on the sieve platform before fuel was loaded in the core. The three kilograms of fuel was used. Fuel was divided into three equal portions and was slowly filled for each hour. The fuel was ignited from the top of the core. The combustion of fuel continued for 3 h. Following the process of slow pyrolysis, the feedstock was thermo-chemically decomposed and transformed into biochar. After the process finished, the outputs (i.e., biochar, non-biochar, and ash) were sorted out.

2.4. Characterization of biochar

Biochar yield were calculated form Balance of mass. Wherewith W_f and W_o are the amount of dry weight of the biochar and biomass, respectively [22].

$$\text{Yield Biochar (\%)} = (W_f/W_o) * 100 \quad (1)$$

Where W_o is the initial weight of the raw material and W_f is the mass of either bio-char.

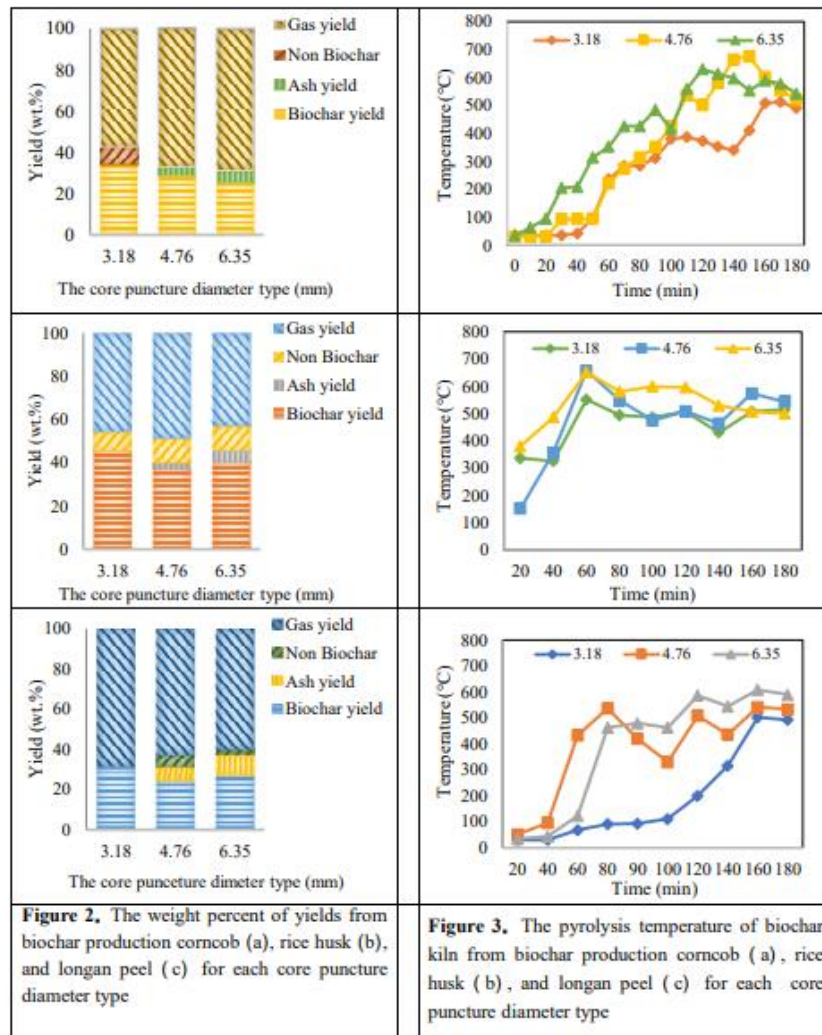
The moisture content of biochar could be done by analysing according to ASTM D1762-84 standard at 105 °C temperature for 2 hours [23], then measured acid-base (pH) using the analysis according to DIN ISO 10390 with 1:5 (W:V) biochar to 0.01 M CaCl_2 -solution, 60 min shaking, measuring directly in the suspension and electrical conductivity (EC) analysis by DIN ISO 11265, adding 1:10 (W:V) H_2O to the sample, shaking for 60 min, followed by filtration of the solution. (According to EBC standard). Surface morphology Scanning electron microscope (SEM) and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

3. Results and discussions

3.1. The effect of core punctures diameter type on the biochar yield

The biochar yield of core puncture diameter type in the biochar production from different agricultural residue was measured, Figure 2. It was found that the core puncture diameter of 3.18 mm would result in the greatest amount of yield. The results showed that biochar yield from rice husk gave the highest yield of 45.7 wt.% while those from corncob and longan peel were 34.3 wt.% and 31.4 wt.%, respectively. Increasing the temperature caused the amount of biochar to be reduced, and the reduction of biochar due to the breakdown of compounds such as cellulose and hemicellulose, as well as the burning of organic materials at increased pyrolysis temperatures. [24]. However, the result also depended on the density of agricultural residues that were also tested. The result showed that the amount of gas yield from longan peel had the highest gas yield of 68.6 wt.% while those from

corn cob and rice husk were 68.6 wt.% and 48.6 wt.%, respectively. The results of ash yield from longan peel gave the highest yield of 10.0 wt.% while those from corn cob and rice husk were 5.7 wt.% and 5.7 wt.%, respectively.



3.2. The effect of core punctures diameter type on the pyrolysis temperature
 The results of the temperature distribution test were obtained from testing at the midpoint inside the biochar kiln which was the temperature radiation between fuel to agricultural residue or biomass

around the core in Figure 3. The above results, the core puncture diameter type, would affect the temperature distribution within the biochar kiln. Showed that the core puncture diameter of 3.18 mm resulted in the best temperature distribution as specified in the theory of pyrolysis in the production of biochar in the range 350-600 °C [1]. The production of biochar by slow pyrolysis method, the maximum average temperature was not more than 500 °C. For organic materials, after heat processing or combustion process, biochar with chemical composition obtained but could be changed according to the type of raw materials used to make biochar was for improving soil conditions [25]. Generally, plant growth was the highest with addition of biochar produced at a pyrolysis temperature of 500 °C [20]. The results from the test would be in the average temperature range according to the test duration of 3 hours, the highest temperature of biochar production from 3 types of agricultural residue (i.e. corncobs, rice husk and longan peel) were 512 °C, 583 °C, and 503 °C respectively. Therefore, when designing a larger core puncture diameter, the temperature inside the biochar kiln increased as the result of the core puncture diameter of 76.4 mm which gave the ranges 675 °C, 674 °C, and 604 °C, respectively. While the core puncture diameter of 35.6mm gave the temperatures in the range of 630 °C, 652 °C, and 685 °C respectively. As mentioned above, when the temperature, it affected the properties of biochar yield and gas yield. [26].

3.3. Characterization of biochar

The results showed that the pH increased as the temperature increased in the pyrolysis process, mainly due to the separation of alkaline salts from organic substances, [27]. The pH properties of agricultural residue were shown in Table 1. corn cob biochar, (3.18, 4.76, and 6.35 mm), rice husk (6.35 mm), and longan peel (4.76 mm and 6.35 mm) gave pH between 7.07-8.79 which were suitable properties for acid soil improvement. Biochar sachets from rice husk (3.18 mm and 4.76 mm) and biochar from longan peel (3.18 mm) gave pH values between 6.42-6.93, which was suitable for alkaline soil improvement.

The EC test results Table 1, from the production of biochar at different core puncture diameter had an effect on the volume which was increased with the increased temperature. According to the tests, longan peel biochar had the highest EC value (0.11, 0.79, and 0.99 ds m⁻¹), followed by corncob biochar (0.15, 0.37, and 0.41 ds m⁻¹) and bio-charcoal from rice husk (0.21, 0.27, and 0.39 ds m⁻¹), respectively [28], which were considered suitable for soil improvement.

The morphology of a biochar using high definition scanning electron microscope 15 kV electron beam energy was identified This is caused by the interaction of atoms between the electrons of the beam and the sample of biomass [29]. A morphological study using a scanning microscope with magnification of 10 µm or 2000X showed that the core puncture diameter type affected the porosity in biochar are shown in Figure 6, 7 and 8, respectively porosities in the biochars from corncob biochar, rice husk and longan peel.

Table 1 Comparison properties of biochar for the core puncture diameter type

Biochar	The core puncture diameter type (mm)	Biochar yield (wt.%)	Water Content (wt.%)	pH	EC (ds m ⁻¹)
Corncob	-	-	5.41	5.18	0.15
	3.18	34.3	1.51	7.07	0.37
	4.76	28.9	2.07	8.40	0.41
	6.35	25.7	2.27	8.79	0.64
Rice husk	-	-	7.665	5.81	2.44
	3.18	45.7	2.930	6.42	0.21
	4.76	37.1	3.130	6.59	0.27

Biochar	The core puncture diameter type (mm)	Biochar yield (wt.%)	Water Content (wt.%)	pH	EC (ds m^{-2})
	6.35	40.0	2.987	7.21	0.39
Longan peel	-	-	9.490	6.05	2.45
	3.18	31.4	2.820	6.93	0.11
	4.76	24.3	2.856	7.20	0.79
	6.35	27.1	2.896	7.67	0.99

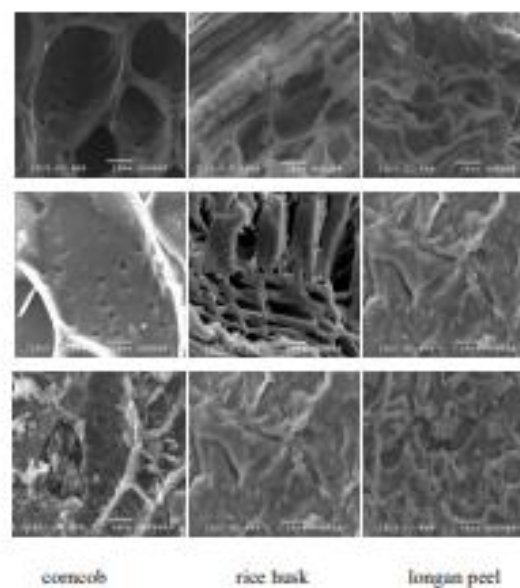


Figure 4. SEM biochar results 2000X of corneob, rice husk, and longan peel.

The results showed that different the core puncture diameters had effects from the temperature in the production of biochar, resulting in the biochar having increased porous area characteristics when the temperature increased. As the temperature increased, the amount of pore increased with the size of the core puncture diameter (6.35, 4.76, and 3.18 mm) respectively. As the porous biochar increased, it became was more suitable for the soil improvement [30], and also resulted increased carbon content (C) When comparing the amount of minerals from Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) such as element content of C, N, O, K, P, etc., it was found that the core puncture diameter of 3.18 mm could give suitable amounts of element for soil improvement.

Table 2. EDX biochar results of corncob, rice husk and longan peel. (Weight%)

Element	The core puncture (mm)	C K	N K	O K	K K	P K
Corncob	3.18	75.24	11.11	8.85	0.16	0.13
	4.76	91.01	1.98	11.34	0.34	0.15
	6.35	85.59	3.53	7.86	0.11	0.04
Rice husk	3.18	39.60	16.89	38.97	0.11	-
	4.76	27.47	10.52	52.62	-	-
	6.35	31.71	4.54	56.33	0.07	0.10
Longan peel	3.18	49.65	31.58	17.66	0.02	0.13
	4.76	64.60	3.97	27.47	0.79	0.51
	6.35	79.06	0.45	17.27	0.96	0.12

4. Conclusions

The result of testing the design of different core puncture diameters and agricultural residue shows that 3.18 mm diameter had the highest temperature of biochar from rice husk, corncob, and longan peel in the ranges of 583 °C, 512 °C, and 503 °C respectively.

The temperature distributions in biochar kiln with different agricultural residues the order that rice husk > corncobs > longan peel giving biochar yields were of 45.7, 34.3 and 31.4 wt.% respectively and The amount of gas yield from the biochar production gave the order that longan peel > corncobs > rice husk giving gas yields of 68.6, 68.6, and 48.6 wt.% respectively.

References

- [1] Collison, M., et al., 2009. Biochar and carbon sequestration: a regional perspective. *Low Carbon Innovation Centre*, UEA, Norwich, UK.
- [2] Qiu, Q., et al., 2019. A comparative investigation on direct carbon solid oxide fuel cells operated with fuels of biochar derived from wheat straw, corncob, and bagasse. *Biomass and Bioenergy*. **121**: p. 56-63.
- [3] Ściółowska, M., et al., 2015. Biochar to improve the quality and productivity of soils. *Journal of Ecological Engineering*. **16**(3).
- [4] Peng, X., et al., 2011. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*. **112**(2): p. 159-166.
- [5] Deal, C., et al., 2012. Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass and Bioenergy*. **37**: p. 161-168.
- [6] Özçimen, D. and A. Ersoy-Meriçboyu, 2010. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy*. **35**(6): p. 1319-1324.
- [7] Novak, J.M., et al., 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*.
- [8] Gaskin, J.W., et al., 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*. **51**(6): p. 2061-2069.
- [9] Mengesha, T.T. and A.V. Ramayya, Heat Transfer Validation and Comparative Evaluation of Biochar Yield from Pyrolysis Cook Stove.
- [10] Manyà, J.J., 2012. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*. **46**(15): p. 7939-7954.
- [11] Lee, Y., et al., 2013. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. *Bioresour. technology*. **148**: p. 196-201.
- [12] Mullen, C.A., et al., 2010. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and bioenergy*. **34**(1): p. 67-74.

- [13] Sukiran, M.A., et al., 2011. Production and characterization of bio-char from the pyrolysis of empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences*. **8**(10): p. 984.
- [14] Wu, W., et al., 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and bioenergy*. **47**: p. 268-276.
- [15] Clauston, N., et al., 2014. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. *Waste Management & Research*. **32**(4): p. 331-339.
- [16] Zarzycki, R., M. Imbierowicz, and M. Stelmachowski, 2007. Wprowadzenie do inżynierii i ochrony środowiska: Fizykochemiczne podstawy inżynierii środowiska. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*.
- [17] Kacprzak, M., 2007. Wspomaganie procesów remediacji gleb zdegradowanych. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*.
- [18] Yihua, E.W., et al., 2019. Preparation, characterization and cost analysis of activated biochar and hydrochar derived from agricultural waste: a comparative study. *SN Applied Sciences*. **1**(8): p. 873.
- [19] Wang, H., et al., Effects of atmospheric ageing under different temperatures on surface properties of sludge-derived biochar and metal/metalloid stabilization. *Chemosphere*, 2017. **184**: p. 176-184.
- [20] Czekala, W., A. Jeżowska, and D. Chelkowski, 2019. The use of biochar for the production of organic fertilizers. *Journal of Ecological Engineering*. **20**(1): p. 1-8.
- [21] Enders, A. and J. Lehmann, 2012. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in soil science and plant analysis*. **43**(7): p. 1042-1052.
- [22] Azami-Niya, A., et al., 2012. Optimization of synthesis and characterization of palm shell-based bio-char as a by-product of bio-oil production process. *BioResources*. **7**(1): p. 0246-0264.
- [23] Enders, A., et al., 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresour. technology*. **114**: p. 644-653.
- [24] Al-Wabel, M.I., et al., 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from cococarpus wastes. *Bioresour. technology*. **131**: p. 374-379.
- [25] Sun, Y., et al., 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*. **240**: p. 574-578.
- [26] Chen, D., et al., 2015. Bamboo pyrolysis using TG-FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields. *Fuel*. **148**: p. 79-86.
- [27] Yuan, J.-H., R.-K. Xu, and H. Zhang, 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresour. technology*. **102**(3): p. 3488-3497.
- [28] Jung, K.-W., et al., 2016. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and phosphate adsorption capability of biochar derived from waste-marine macroalgae (*Undaria pinnatifida* roots). *Bioresour. technology*. **200**: p. 1024-1028.
- [29] Ahiduzzaman, M. and A.S. Islam, 2016. Preparation of porous bio-char and activated carbon from rice husk by leaching ash and chemical activation. *SpringerPlus*. **5**(1): p. 1248.
- [30] Rajkovich, S., et al., 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*. **48**(3): p. 271-284.

Acknowledgements

This research was supported by Maejo University's Graduate school Scholarship and Faculty of Engineering and Agro-industry Maejo University and Research and Researcher for Industries (IRR Contract no. MSD620058)

บรรณานุกรม

- Abenavoli, L. M., et al. (2016). "Characterization of biochar obtained from olive and hazelnut prunings and comparison with the standards of European Biochar Certificate (EBC)." Procedia-Social and Behavioral Sciences 223: 698-705.
- Al-Wabel, M. I., et al. (2013). "Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes." Bioresource technology 131: 374-379.
- Angin, D. (2013). "Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake." Bioresource technology 128: 593-597.
- APSRDO, D., Combustion Carbon /Titrant และ ICP-OES (2551). การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ CENTRAL LAB THAI.
- Assirey, E. A. and L. R. Altamimi (2021). "Chemical analysis of corn cob-based biochar and its role as water decontaminants." Journal of Taibah University for Science 15(1): 111-121.
- ASTM (1980). Standard Test Method for Collection and Measurement of Test Method for Smoke Density in the Flue Gases: from Burning Distillate Fuels. . American Society for Testing and Material (ASTM) International.
- ASTM (2004). Standard Test Method for Collection and Measurement of Dust fall (Settle able Particulate Matter). American Society for Testing and Material (ASTM) International.
- ASTM (D1762-84). ค่าความชื้นของไบโอชาร์

- Berndtsson, J. C. (2010). "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review." Ecological engineering 36(4): 351-360.
- Binh, Q. A. and P. Kajitvichyanukul (2019). "Adsorption mechanism of dichlorvos onto coconut fibre biochar: the significant dependence of H-bonding and the pore-filling mechanism." Water Science and Technology 79(5): 866-876.
- Biochar, IBI. (2561). เต่าแอนิลา.
- Brewer, C. E. (2012). Biochar characterization and engineering, Iowa State University.
- Brewer, C. E., et al. (2009). "Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems." Environmental Progress & Sustainable Energy: An Official Publication of the American Institute of Chemical Engineers 28(3): 386-396.
- Carter, S. and S. Shackley (2011). "Biochar Stoves: an innovation studies perspective." UK Biochar Research Centre, University of Edinburgh.
- Chaiyaraksa, C., et al. (2017). "Durian and angosteen Shell-Derived Biochar Amendment on the Removal of Zinc, Lead and Cadmium." Thammasat Int. J. Sci. Technol 22: 88-97.
- Chaiyaraksa, C., et al. (2017). "Durian and mangosteen shell-derived biochar amendment on the removal of zinc, lead and cadmium." Science & Technology Asia: 87-97.
- Chatterjee, R., et al. (2020). "Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties and acoustic-based amination of biochar for efficient CO₂ adsorption." Frontiers in Energy Research 8: 85.

- Chen, D., et al. (2016). "Pyrolysis polygeneration of poplar wood: Effect of heating rate and pyrolysis temperature." Bioresource technology 218: 780-788.
- Chen, D., et al. (2015). "Bamboo pyrolysis using TG-FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields." Fuel 148: 79-86.
- Chia, C. H., et al. (2012). "Imaging of mineral-enriched biochar by FTIR, Raman and SEM-EDX." Vibrational Spectroscopy 62: 248-257.
- Claoston, N., et al. (2014). "Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars." Waste Management & Research 32(4): 331-339.
- Collison, M., et al. (2009). "Biochar and carbon sequestration: a regional perspective." Norwich, UK: The Low Carbon Innovation Centre, University of East Anglia. (A report prepared for East of England Development Agency (EEDA), DA1 Carbon Reduction Ref. No: 7049).
- Das, S. K., et al. (2021). "Compositional heterogeneity of different biochar: effect of pyrolysis temperature and feedstocks." Journal of environmental management 278: 111501.
- Deal, C., et al. (2012). "Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics." Biomass and bioenergy 37: 161-168.
- Dong, X., et al. (2016). "Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions." Journal of soils and sediments 16(5): 1481-1497.
- Duku, M. H., et al. (2011). "Biochar production potential in Ghana-a review." Renewable

and Sustainable Energy Reviews 15(8): 3539-3551.

EBC (DIN ISO 10390). การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: EC).

EBC (DIN ISO 10390). การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่าง (pH)

EBC (E DIN ISO 14238). Water holding capacity: WHC.

Fox, R. L. and E. Kamprath (1971). "Adsorption and leaching of P in acid organic soils and high organic matter sand." Soil Science Society of America Journal 35(1): 154-156.

Gaskin, J., et al. (2008). "Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use." Transactions of the ASABE 51(6): 2061-2069.

Intagun, W., et al. (2018). "Effect of core puncture diameter on bio-char kiln efficiency." International Journal of Biotechnology and Bioengineering 12(11): 435-439.

Jung, K.-W., et al. (2016). "Influence of pyrolysis temperature on characteristics and phosphate adsorption capability of biochar derived from waste-marine macroalgae (*Undaria pinnatifida* roots)." Bioresource technology 200: 1024-1028.

Kameyama, K., et al. (2019). "The preliminary study of water-retention related properties of biochar produced from various feedstock at different pyrolysis temperatures." Materials 12(11): 1732.

Karaosmanoglu, F., et al. (2000). "Biochar from the straw-stalk of rapeseed plant." Energy & Fuels 14(2): 336-339.

Kim, K. H., et al. (2013). "Comparison of physicochemical features of biooils and biochars produced from various woody biomasses by fast pyrolysis." Renewable

Energy 50: 188-195.

Kotula, P. G., et al. (2003). "Automated analysis of SEM X-ray spectral images: A powerful new microanalysis tool." Microscopy and Microanalysis 9(1): 1-17.

Lakhdar, A., et al. (2009). "Effectiveness of compost use in salt-affected soil." Journal of hazardous materials 171(1-3): 29-37.

Lam, S. S., et al. (2018). "Pyrolysis production of fruit peel biochar for potential use in treatment of palm oil mill effluent." Journal of environmental management 213: 400-408.

Lee, Y., et al. (2013). "Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 C." Bioresource technology 148: 196-201.

Lehmann, J., et al. (2003). "Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments." Plant and soil 249(2): 343-357.

Lehmann, J. and S. Joseph (2009). Biochar for environmental management, Earthscan London.

Lehmann, J. and S. Joseph (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation, Routledge.

Li, Y., et al. (2020). "A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass." Bioresource technology 312: 123614.

Lin, J., et al. (2021). "Effect of pyrolysis temperature on pyrolysis of pine saw dust and application of bio-char." International Journal of Environmental Science and

Technology: 1-8.

Liu, X., et al. (2014). "Characterization of corncob-derived biochar and pyrolysis kinetics in comparison with corn stalk and sawdust." Bioresource technology 170: 76-82.

Liu, Z. and R. Balasubramanian (2013). "A comparison of thermal behaviors of raw biomass, pyrolytic biochar and their blends with lignite." Bioresource technology 146: 371-378.

Lu, Q., et al. (2008). "Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 82(2): 191-198.

Ma, X., et al. (2016). "Study of biochar properties by scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX)." Communications in Soil Science and Plant Analysis 47(5): 593-601.

Major, J., et al. (2010). "Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol." Plant and soil 333(1): 117-128.

Mengesha, T. T. and A. V. Ramayya "Heat Transfer Validation and Comparative Evaluation of Biochar Yield from Pyrolysis Cook Stove."

Mohanty, P., et al. (2013). "Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: effects of heating rate." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 104: 485-493.

Mullen, C. A., et al. (2010). "Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis." Biomass and bioenergy 34(1): 67-74.

Nattaporn, P., et al. (2013). "The Effects of Pyrolysis Conditions on the Chemical and Physical Properties of Rice Husk Biochar." International Journal of Material

Science 3(3): 98-103.

Panyoyai, N., et al. (2019). "Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types." Engineering Access 5(2): 59-64.

Petchaihan, L., et al. (2020). Test of a modified small-scale biochar kiln. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.

Pituya, P., et al. (2017). "Optimization of biochar preparation from acacia wood for soil amendment." Engineering Journal 21(2): 99-105.

Pituya, P., et al. (2017). "Properties of biochar prepared from acacia wood and coconut shell for soil amendment." Engineering Journal 21(3): 63-75.

Qiu, Q., et al. (2019). "A comparative investigation on direct carbon solid oxide fuel cells operated with fuels of biochar derived from wheat straw, corncob, and bagasse." Biomass and bioenergy 121: 56-63.

RC22, W. I. I. (2561). USB to RS-232/RS-485/422 Converter Standard Test Method for Temperature.

Reza, M. S., et al. (2020). "Biochar characterization of invasive *Pennisetum purpureum* grass: effect of pyrolysis temperature." Biochar 2(2): 239-251.

Scisłowska, M., et al. (2015). "Biochar to improve the quality and productivity of soils." Journal of Ecological Engineering 16(3).

Sjostrom, E. (1993). Wood chemistry: fundamentals and applications, Gulf professional publishing.

Song, W. and M. Guo (2012). "Quality variations of poultry litter biochar generated at

different pyrolysis temperatures." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 94: 138-145.

Sukiran, M. A., et al. (2011). "Production and characterization of bio-char from the pyrolysis of empty fruit bunches." American Journal of Applied Sciences 8(10): 984.

Sun, J., et al. (2017). "Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types." Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science 67(1): 12-22.

Sun, Y., et al. (2014). "Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties." Chemical engineering journal 240: 574-578.

Tian, S.-Q., et al. (2019). "Enhanced permanganate oxidation of sulfamethoxazole and removal of dissolved organics with biochar: formation of highly oxidative manganese intermediate species and in situ activation of biochar." Environmental science & technology 53(9): 5282-5291.

Turan, V., et al. (2018). "Promoting the productivity and quality of brinjal aligned with heavy metals immobilization in a wastewater irrigated heavy metal polluted soil with biochar and chitosan." Ecotoxicology and environmental safety 161: 409-419.

VITA (1985). The Water Boiling Test Version 4.2.3 Cook stove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting.

Vu, N.-T. and K.-U. Do (2021). "Insights into adsorption of ammonium by biochar derived from low temperature pyrolysis of coffee husk." Biomass Conversion and Biorefinery: 1-13.

- Wongsiriamnuay, T., et al. (2019). "Thermal Properties and Agricultural Products of Biochar Production."
- Wu, W., et al. (2012). "Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment." Biomass and bioenergy 47: 268-276.
- Xu, R.-k., et al. (2011). "Adsorption of methyl violet from aqueous solutions by the biochars derived from crop residues." Bioresource technology 102(22): 10293-10298.
- Yousaf, B., et al. (2017). "Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass-and biochar-coal co-combustion systems." Applied Energy 208: 142-157.
- Yu, T., et al. (2020). "Steam gasification of biochars derived from pruned apple branch with various pyrolysis temperatures." International Journal of Hydrogen Energy 45(36): 18321-18330.
- Zhang, H., et al. (2017). "Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy." Biomass and bioenergy 105: 136-146.
- Zhang, H., et al. (2015). "Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations." Soil Biology and Biochemistry 83: 19-28.
- Zhang, J. and C. You (2013). "Water holding capacity and absorption properties of wood chars." Energy & Fuels 27(5): 2643-2648.
- Zhang, X., et al. (2020). "Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar." Bioresource

technology 296: 122318.

กมลชนก เจริญศรี วรชาติ วิศวกพัฒนา ทิมทอง ดรณสนธยา และณัฐพร ประคองเก็บ (2561). "อิทธิพลของถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชและการละลายของฟอสฟอรัสในดินนาเปรี้ยวจัด." วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร: 270-283.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2552). "ชีวมวล (Biomass)". จาก <http://www.dede.go.th>.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2560). "สถานการณ์พลังงานทดแทนของประเทศไทย." จาก <http://www.dede.go.th>.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม (2558).

ปิยรัตน์ วีระชาญชัย ชัยยศ ตั้งสถิตยกุลชัย และมาลี ตั้งสถิตยกุลชัย (2549) คุณลักษณะของน้ำมันชีวภาพจากการสลายมวลชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส."

เตาแอนนิลา (2561). "Anila-type ". จาก <https://biochar-international.org>.

นคร ทิพย์าวงศ์. (2558). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นคร ทิพย์าวงศ์, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย และภาสกร อินทาสาร (2553). พลังงานหมุนเวียนจากการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อน: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ Renewable energy from thermochemical biomass conversion, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

ภราภรณ์ เหล็กสูงเนิน วรชาติ วิศวกพัฒนา และดาวจรัส เกตุโรจน์ (2560). "ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบต่อสภาพการละลายของจุลธาตุอาหารพืชและการเจริญเติบโตของข้าว ที่ปลูกในดินเหนียว." วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์: 65-74

รัตถล อ่างมณี กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ และอรรมพ หอมจันทร์ (2560). "สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพดและศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน." VRU Research and Development Journal Science and Technology 12(1): 53-63.

พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์ (2560). "การพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายในเขตเงาฝนด้วยถ่านชีวภาพ." VRU Research and Development Journal Science and Technology 12(3).

กันยาพร ไชยวงศ์และสิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย "การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า."

กันยาพร ไชยวงศ์ ญัฐพล วิชาญ อาริยะ แสนทวิสุข จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และธัญศิภรณ์ จันทร์หอม. (2559). "ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร." วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 1(1): 37-42.

เสาวคนธ์ เหมวงษ์ (2557). "ผลของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และแกลบต่อผลผลิตและประสิทธิภาพการดูดใช้ในโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1." วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 16(1): 69-75.

อรุณี ศุภสินสาธิต (2561). "พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง." วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 16 เล่มที่ 2.

คชินท์ สายอินทวงศ์ (2561). "แกลบ." จาก <http://siamfrit.blogspot.com>.

สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ (2561). "ซังข้าวโพด." จาก <https://www.opsmoac.go.th>.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2561). "พืชเศรษฐกิจของประเทศ." จาก <http://www.oae.go.th>.

ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์ และพิทยา บวรพัฒนา (2558). "การประยุกต์ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร." วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ (Journal of Social Sciences and

Humanities) 4(2): 212.

อรสา สุภสว่าง (2553). เตาผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อน.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ลลิตา เพชรใจหาญ
เกิดเมื่อ	17 เมษายน 2539
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2561 ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2557 ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีราชินูทิศ อุดรธานี พ.ศ. 2551 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนหนองบัวพิทยาคม หนองบัวลำภู
ประวัติการทำงาน	-

