

การพัฒนาผ่านชีวภาพโดยใช้กระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้า
สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2562

การพัฒนาอ่านชีวภาพโดยใช้กระบวนการโฟโรไลซิสแบบซ้ำ
สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาผ่านชีวภาพโดยใช้กระบวนการโฟโรไลซิสแบบซ้ำ
สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม

ประภัสสร รัตนไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาถ่านชีวภาพโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม
ชื่อผู้เขียน	นางสาวประภัสสร รัตนไพบูลย์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง

บทคัดย่อ

การใช้ถ่านชีวภาพเป็นอีกทางเลือกสำหรับนำเข้าสู่วิถีเกษตรอินทรีย์ การรักษาสีงแวดล้อมและช่วยลดวัฏจักรคาร์บอน ในภาคเกษตรการพัฒนาถ่านชีวภาพให้มีคุณภาพสูงสุด จำเป็นต้องศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอน ขนาดรูพรุนและผลผลิตของถ่านชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของประเทศไทย ประกอบด้วย แกลบ และซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 300-600 °C และระยะเวลา 30-90 min ตามลำดับ โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพถ่านชีวภาพในด้านพลังงานและคุณสมบัติทางภาคการเกษตร อัตราการใช้พลังงานในการของกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพและต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสส่งผลให้ความชื้นและสารระเหยลดต่ำลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณแฉะเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาไพโรไลซิสส่งผลให้ร้อยละผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดลดลง 36.41% และ 29.79% ตามลำดับ ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600 °C ระยะเวลา 90 min การใช้อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 30 min ให้ร้อยละผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดสูงสุด 78.37% และ 62.47% ตามลำดับ อุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้าที่ 500 °C ระยะเวลา 60 min เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิว 7.16.11 และ 8.20 m²/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพทั้งสองเท่ากับ 0.0052 และ 0.0091 cm³/g ตามลำดับ ในขณะที่ความกว้างของรูพรุนเท่ากับ 67.30 และ 65.02 Å ตามลำดับ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพเท่ากับ 18.32 และ 24.85 MJ/kg ตามลำดับ การเพิ่มออกซิเจนส่งผลให้อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นให้ค่าพลังงาน และลักษณะกายภาพมีความใกล้เคียงกับการไม่ใช้ออกซิเจนที่ 600 °C การผลิตถ่านชีวภาพมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนเฉลี่ยที่ 4.35-7.19 kWh_e/kg_{Biochar} และ 47.03-114.77 kWh_{th}/kg_{Biochar} ตามลำดับ ต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดเท่ากับ 98.80 และ 218.30 บาท/kg_{Biochar} เมื่อเพิ่มอัตราการผลิตถ่านชีวภาพสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 70.00%-

85.52% โดยมีต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดอยู่ที่ 29.65 และ 31.57 บาท/kg^{Biochar} ตามลำดับ ถ่านชีวภาพภายใต้อุณหภูมิและเวลากระบวนการไพโรไลซิสที่เหมาะสมมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.03-7.08 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าโดยมีค่าอยู่ในช่วง 29.4-33.3 $\mu\text{m}/\text{cm}$ ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 30.87-31.14 cmol/kg ความสามารถในการอุ้มน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 31.16%-31.28% และค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 70.00-74.00 โดยค่าทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของถ่านชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ในภาคเกษตรกรรม สำหรับการนำไปทดลองด้านการปลูกพืช การนำถ่านชีวภาพไปทดสอบปลูกต้นคะน้า มีแนวโน้มการเจริญเติบโตดีกว่าการไม่ใช้ถ่านชีวภาพมีค่าความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) สุดท้ายการส่งเสริมให้ชุมชนผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติที่ดี สามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพของดิน ลดปัญหาที่เกิดจากการเผาชีวมวล ช่วยรักษารักษาสิ่งแวดล้อม และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรในชุมชน

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ, ไพโรไลซิสแบบช้า, แกลบ, ซังข้าวโพด, รุพารุ่นของถ่านชีวภาพ

Title	DEVELOPMENT OF BIOCHAR USING WITH SLOW PYROLYSIS PROCESS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS
Author	Miss Praphatsorn Rattanaphaiboon
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Nigran Homdoun

ABSTRACT

The study about the use of biochar as an alternative in organic agriculture. As well as protecting the environment and reducing the carbon cycle. For the development of the highest quality of biochar the temperature and time variables that effects on amount of carbon, pore size and biochar yield. The objective of this research was producing the biochar from agricultural waste in Thailand that consist of rice husk and corn cob with slow pyrolysis process under temperatures and duration times in the range of 300-600 °C and 30-90 min respectively. The experiment analyzed chemical and physical properties of biochar in energy and agricultural properties, the energy consumption and cost of biochar production. The result found that increasing the temperature and time pyrolysis resulted in a decrease of moisture and volatile matter, while the fixed carbon and ash increased. Increasing the temperature and time pyrolysis decreased rice husk and corn cob biochar yield by 36.41% and 29.79% respectively at 600 °C and 90 min of temperature and time pyrolysis. The maximum biochar yield of rice husk and corn cob was obtained 78.37 % and 62.47% at 300 °C and 30 min. At 500 °C and 60 min of pyrolysis suitable condition for biochar yield production for both types of biomass was achicved. Biochar from rice husk and corn cob obtained a surface area of 7.16 and 8.20 m²/g respectively. The pore volume of both biochar was 0.0052 and 0.0091 cm³/g while the pore diameter of both biochar resulted in 67.30 and 65.02 Å with the heating value of 18.32 MJ/kg and 24.85 MJ/kg respectively. Increasing oxygen in the pyrolysis process caused increase of pyrolysis

temperature and energy, the physical characteristics of biochar are similar to 600 °C at unused oxygen. The average electrical and thermal consumption of biochar production was 4.35-7.19 kWh_e/kg_{Biochar} and 47.03-114.77 kWh_{th}/kg_{Biochar} respectively. The cost production of rice husk and corn cob biochar was achieved 98.80 and 218.30 Baht/kg_{Biochar} while increasing production rate cost production can be reducing between of 70.00%-85.52% which both biochar of 29.65 and 31.57 Baht/kg_{Biochar} respectively. The biochar at optimum temperature and time pyrolysis process obtained a pH in the range of 7.03-7.08 while the conductivity value was between of 29.4-33.3 µm/cm. The cation exchange capacity increases in a range of 30.87-31.14 cmol/kg. The water holding capacity increased by 31.16%-31.28% and the carbon to nitrogen ratio value was reduced by 70.00-74.00 which all the factors being standard criteria of biochar for use in agriculture sector. For experiments applied to crops, the kale tends to grow well using the biochar showing different statistics lower than 0.05 (p<0.05). Finally, encouraging communities to produce biochar from rice husk and corn cob at optimum temperature and time pyrolysis will result in good quality biochar will be able to solve soil quality problems, reduce problems from burning biomass, protect the environment and generating income for farmers in the community.

Keywords : biochar, slow pyrolysis, rice husk, corn cob, porosity of biochar

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ที่ให้เกียรติเป็นประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ มอบความรู้ ให้คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้ เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฉิ ดุษฎี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ ให้ คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภธิดา อ่างทอง อาจารย์ประจำสาขาวิชาปรัชญา ศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบความรู้ ให้คำแนะนำ และแนวทางในการวางแผนการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านการเกษตร ตลอดจนให้การสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้เล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน ในระดับ บัณฑิตศึกษา"

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ ในการ สนับสนุนทุนวัสดุสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่ตลาดเชิงพาณิชย์เพื่อสนับสนุนนักศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษาให้เป็นผู้ประกอบการ "โครงการพัฒนาหน่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการสร้างนวัตกรรม ด้านการเกษตร" ประจำปีงบประมาณ 2561

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ "โครงการการพัฒนาถ่านชีวภาพโดยใช้ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม" ประจำปีงบประมาณ 2561

ประภัสสร รัตนไพบูลย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญตารางผนวก.....	ณ
สารบัญภาพผนวก.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์.....	5
ขอบเขตการศึกษา.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและตรวจสอบเอกสาร.....	7
ชีวมวล.....	7
โครงสร้างของชีวมวล.....	11
ถ่านชีวภาพ.....	13
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ.....	14
ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ.....	14
กระบวนการไพโรไลซิส.....	15
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพในด้านพลังงาน.....	18

อินทรีย์วัตถุในดิน	23
ความสำคัญของอินทรีย์วัตถุในดิน	24
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพในด้านการเกษตร.....	25
การตรวจสอบเอกสาร.....	31
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีวิจัย.....	44
วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
วิธีการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิส.....	63
การทดสอบถ่านชีวภาพด้านพลังงาน.....	64
การทดสอบถ่านชีวภาพด้านการเกษตร.....	67
ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย.....	76
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	78
คุณสมบัติพื้นฐานชีวมวล	78
การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	80
การศึกษาความเป็นรุกรุ่นของถ่านชีวภาพ.....	91
การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพ.....	96
การศึกษาการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า.....	98
คุณสมบัติถ่านชีวภาพด้านการเกษตร.....	103
การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานการผลิตถ่านชีวภาพ	112
การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพเบื้องต้น	115
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอ	118
สรุปผลการวิจัย.....	118
ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม.....	120
ภาคผนวก.....	127

ภาคผนวก ก	128
ภาคผนวก ข	134
ภาคผนวก ค	139
ภาคผนวก ง.....	145
ประวัติผู้วิจัย.....	171



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สัดส่วนชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตชีวมวลแต่ละชนิด.....	9
ตารางที่ 2 แสดงผลการประเมินศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิด	10
ตารางที่ 3 การจำแนกระดับความเป็นกรด-ด่างของดินในน้ำ (อัตราส่วน 1:1).....	26
ตารางที่ 4 การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช.....	27
ตารางที่ 5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเนื้อดินที่ต่างกัน	28
ตารางที่ 6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน	28
ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	38
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนของชีวมวล.....	45
ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของชีวมวล	46
ตารางที่ 10 การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล (Proximate analysis).....	79
ตารางที่ 11 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวล (Ultimate analysis)	79
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวลและถ่านชีวภาพ	97
ตารางที่ 13 สภาพการนำไฟฟ้าของดินและถ่านชีวภาพในดิน.....	105
ตารางที่ 14 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน.....	108
ตารางที่ 15 การเจริญเติบโตของพืช	110
ตารางที่ 16 อัตราการใช้พลังงานผลิตถ่านชีวภาพ	113
ตารางที่ 17 ต้นทุนทางพลังงานการผลิตถ่านชีวภาพเบื้องต้น	116
ตารางที่ 18 ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อเพิ่มกำลังการผลิต.....	117

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การเสื่อมโทรมของดิน	2
ภาพที่ 2 วัฏจักรคาร์บอนของถ่านชีวภาพ	3
ภาพที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	4
ภาพที่ 4 แผนภาพแนวคิดการผลิตถ่านชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร	5
ภาพที่ 5 ชีวมวลในประเทศไทย	8
ภาพที่ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส	11
ภาพที่ 7 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	12
ภาพที่ 8 โครงสร้างของลิกนิน	13
ภาพที่ 9 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพ.....	13
ภาพที่ 10 การเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ	17
ภาพที่ 11 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน	18
ภาพที่ 12 คุณสมบัติชีวมวล	19
ภาพที่ 13 ส่วนประกอบของดิน	23
ภาพที่ 14 (ก.) ส่วนประกอบของดิน (ข.) ปริมาณน้ำที่ถูกดินยึดไว้	30
ภาพที่ 15 ลักษณะของถ่านชีวภาพชานอ้อยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
ภาพที่ 16 แกลบ	45
ภาพที่ 17 ชังข้าวโพด.....	45
ภาพที่ 18 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ.....	46
ภาพที่ 19 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด	47
ภาพที่ 20 ตะแกรงร่อนคัดขนาดชีวมวล.....	48
ภาพที่ 21 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale.....	48
ภาพที่ 22 ห้องเชื้อเพลิง.....	49

ภาพที่ 23 กระจกเชื้อเพลิง.....	49
ภาพที่ 24 แท่งสแตนเลสค้ำองกระจกเชื้อเพลิง.....	50
ภาพที่ 25 ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	50
ภาพที่ 26 ชุดระบายความร้อน	51
ภาพที่ 27 ชุดระบายความร้อน และชุดปั๊มน้ำมอเตอร์.....	51
ภาพที่ 28 เกจก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน	52
ภาพที่ 29 โรตารีเมเตอร์อากาศขนาด 100-1,000 LPH และ 0.3-3 LPM และอุปกรณ์ป้องกัน ก๊าซออกซิเจนย้อนกลับเข้าถังก๊าซ	52
ภาพที่ 30 ไดอะแกรมเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale.....	53
ภาพที่ 31 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Pilot Scale และเครื่องวัดอุณหภูมิ.....	54
ภาพที่ 32 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	54
ภาพที่ 33 เครื่องอบวิเคราะห์ความชื้น.....	55
ภาพที่ 34 เตาเผาอุณหภูมิสูง	56
ภาพที่ 35 โถดูดความชื้น.....	56
ภาพที่ 36 ถ้วยกระเบื้อง.....	57
ภาพที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง	58
ภาพที่ 38 กระจกปลุกต้นไม้.....	58
ภาพที่ 39 ถาดเพาะต้นกล้า	59
ภาพที่ 40 ดินทดสอบ.....	59
ภาพที่ 41 เครื่องวัดค่า pH และสภาพการนำไฟฟ้า	60
ภาพที่ 42 เครื่องเขย่าสารเคมี.....	60
ภาพที่ 43 เครื่องปั่นเหวี่ยง.....	61
ภาพที่ 44 เครื่องกลั่นไนโตรเจน.....	62
ภาพที่ 45 เครื่องย่อยไนโตรเจนดินและพืช	62

ภาพที่ 46 เครื่อง Bomb Calorimeter	66
ภาพที่ 47 เครื่อง CHNS/O Analyzer	66
ภาพที่ 48 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	67
ภาพที่ 49 เครื่องวัดการกระจายขนาดและรูพรุน (BET)	68
ภาพที่ 50 การเตรียมดิน	69
ภาพที่ 51 การเพาะกล้าคะน้า.....	69
ภาพที่ 52 การปลูกคะน้าลงกระถาง	70
ภาพที่ 53 ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย	77
ภาพที่ 54 ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบ.....	81
ภาพที่ 55 ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	81
ภาพที่ 56 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น.....	82
ภาพที่ 57 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย.....	83
ภาพที่ 58 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า.....	84
ภาพที่ 59 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว.....	85
ภาพที่ 60 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น	86
ภาพที่ 61 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย.....	87
ภาพที่ 62 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า.....	88
ภาพที่ 63 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว.....	89
ภาพที่ 64 สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิ และเวลาไพโรไลซิส แบบช้า	90
ภาพที่ 65 สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิ และเวลาไพโรไลซิส แบบช้า	91
ภาพที่ 66 ลักษณะสัญญาณของแกลบ (A) กำลังขยาย 50X (B) กำลังขยาย 350X.....	92
ภาพที่ 67 ลักษณะสัญญาณของซังข้าวโพด (A) กำลังขยาย 50X (B) กำลังขยาย 2,000X	92

ภาพที่ 68 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	93
ภาพที่ 69 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ	95
ภาพที่ 70 ค่าความร้อนของชีวมวลและถ่านชีวภาพ.....	98
ภาพที่ 71 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ	99
ภาพที่ 72 ผลกระทบของการก๊าซออกซิเจนต่อความชื้น.....	100
ภาพที่ 73 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อสารระเหย	101
ภาพที่ 74 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อเถ้า.....	102
ภาพที่ 75 ผลของการป้อนออกซิเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว	103
ภาพที่ 76 ความเป็นกรด-ด่างของดินและถ่านชีวภาพ	104
ภาพที่ 77 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพในดิน	106
ภาพที่ 78 ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและถ่านชีวภาพ	107
ภาพที่ 79 ดัชนีค่าน้ำที่ปลุกกับดินควบคุม.....	111
ภาพที่ 80 ดัชนีค่าน้ำที่ปลุกกับดินผสมถ่านชีวภาพกลับ	111
ภาพที่ 81 ดัชนีค่าน้ำที่ปลุกกับดินผสมถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพด.....	112
ภาพที่ 82 ไดอะแกรมอัตราการใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพ	114
ภาพที่ 83 อัตราการใช้พลังงานการผลิตถ่านชีวภาพ.....	114
ภาพที่ 84 ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ.....	116

สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความชื้นของถ่านชีวภาพ.....	135
ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์สารระเหยของถ่านชีวภาพ	136
ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์เถ้าของถ่านชีวภาพ	137
ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์คาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพ.....	138



สารบัญญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของซังข้าวโพด.....	129
ภาพผนวกที่ 2 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของแกลบ130	
ภาพผนวกที่ 3 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของไปโอชาร์ซังข้าวโพด.....	131
ภาพผนวกที่ 4 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของไปโอชาร์แกลบ	132
ภาพผนวกที่ 5 ใบรายงานผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดและรูพรุน (BET surface area).....	133
ภาพผนวกที่ 6 The 24 th Tri-University International Joint Seminar & Symposium	146
ภาพผนวกที่ 7 การประชุมวิชาการสัมมนาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10.....	153
ภาพผนวกที่ 8 The 25 th Tri-University International Joint Seminar & Symposium.	163
ภาพผนวกที่ 9 โปสเตอร์นิทรรศการแสดงผลงาน งานเกษตรแม่โจ้ 85 ปี.....	169
ภาพผนวกที่ 10 แผ่นพับนิทรรศการแสดงผลงาน งานเกษตรแม่โจ้ 85 ปี	170

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประชากรของประเทศไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากรายได้หลักส่วนใหญ่ของประเทศมาจากสินค้าทางการเกษตร (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2561) ประเทศไทยสามารถผลิตพืชอาหารเพื่อบริโภคทั้งภายในประเทศ และส่งออกภายนอกประเทศ คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 8,085,563 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2561 (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2562) มีพืชเศรษฐกิจหลัก ได้แก่ ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์ม น้ำมัน ในการเพาะปลูกดินเป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง (สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน, ม.ป.ป.) ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาดินที่เสื่อมคุณภาพ อีกทั้งประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศที่ร้อนชื้น ทำให้ปัจจัยและสภาพแวดล้อมในการเกิดดินแต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกัน เช่น ภาคใต้ดินมีลักษณะค่อนข้างชื้น เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นแหลมหรือแผ่นดินยื่นลงไปในทะเล ภาคกลางดินมีปัญหาดินเปรี้ยว ภาคเหนือเป็นพื้นที่ลาดชันมีความเสี่ยงต่อการชะล้างพังทลายสูง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เนื่องจากเนื้อดินเป็นดินทรายมีโอกาสขาดแคลนน้ำได้ง่าย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีการทำเกษตรกรรมแบบต่อเนื่อง และขาดการปรับปรุงดินที่เป็นปัจจัยในการทำให้อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในดินให้มีปริมาณลดลง และทำให้สูญเสียอินทรีย์วัตถุจากองค์ประกอบของดิน (พัชร, 2549) ประกอบกับการทำเกษตรกรรมของเกษตรกรที่มีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมากเพื่อเร่งผลผลิตปราบศัตรูพืช การปรับปรุงและบำรุงดิน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ดินเสื่อมโทรม ดังภาพที่ 1 การขาดแร่ธาตุอาหารและจุลินทรีย์ในดินทำให้ดินมีคุณภาพต่ำ ก่อให้เกิดสารเคมีตกค้าง โรคชนิดต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ในพืช ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีสารพิษตกค้าง ไม่เป็นที่ยอมรับในทางการค้า อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้จะหมดไปเมื่อเกษตรกรในชุมชนหันมาปรับปรุงดินโดยใช้สารธรรมชาติ (สารานุกรมความรู้, 2557)



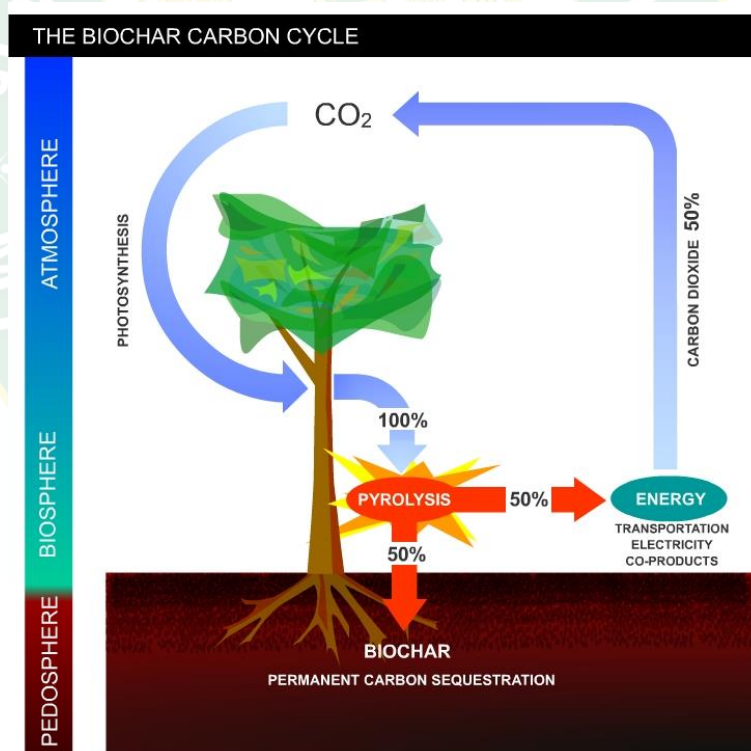
ภาพที่ 1 การเสื่อมโทรมของดิน

ที่มา: ชัชวาลย์ (2557)

ปัญหาอีกประการที่ส่งผลต่อคุณภาพดิน คือการเผาชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด และอ้อย จากข้อมูลสถิติการปลูกและผลผลิตของข้าว และข้าวโพด และอ้อย ประเทศไทยมีพื้นที่ในการเพาะปลูกทั้งหมดประมาณ 149.25 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) และมีชีวมวลคงเหลือประมาณ 54.70 ล้านตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ชีวมวลจากพืชทั้ง 3 ชนิดนี้ หลังจากการเก็บเกี่ยว เกษตรกรมักจะกำจัดด้วยการเผาทำลาย เนื่องจากการกำจัดมีต้นทุนต่ำ ซึ่งการเผาชีวมวลเหล่านี้ ก่อให้เกิดสารตกค้างจากการเผาไหม้ ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ สิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชน ตลอดจนจนอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้การพัฒนาปรับปรุงและบำรุงดินในด้านการทำเกษตรกรรมจึงจำเป็นอย่างยิ่ง การใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดินเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากถ่านชีวภาพจะทำให้ดินสามารถกักเก็บธาตุอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ ที่ช่วยในการย่อยอาหารให้แก่พืช ขณะเดียวกันผลการวิจัยพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพสามารถเร่งการเจริญเติบโตของพืชได้ (เสาวคนธ์, 2557) และยังเป็นทางเลือกส่งเสริมให้เกษตรกรทำเกษตรอินทรีย์ ลดการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตจากมวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษไม้ ใบไม้ หรือ เศษวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ตอซัง ชังข้าวโพด เปลือกถั่ว เปลือกผลไม้ หรือแม้กระทั่งมูลสัตว์ (ไวฑูมย์ และคณะ, 2557) ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุในการปรับปรุงและบำรุงคุณภาพของดิน เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน รวมทั้งเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนลงสู่ดิน จากคุณสมบัติที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงและความเป็นรูพรุน ส่งผลให้ถ่านชีวภาพสามารถกักเก็บแร่

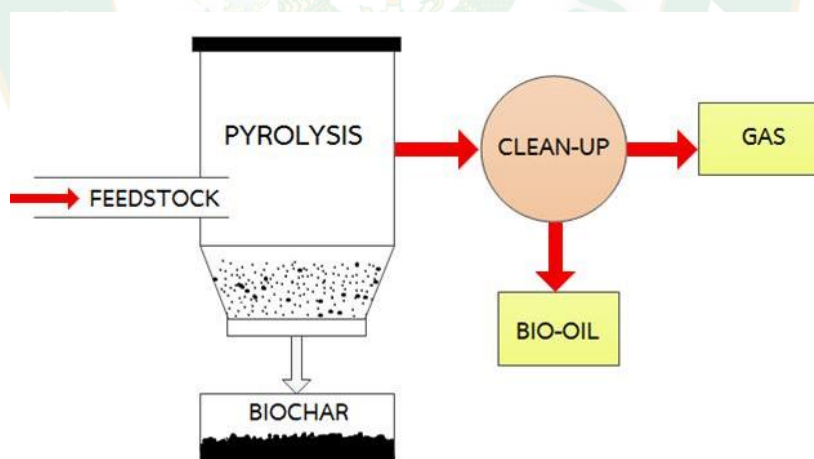
ธาตุในดิน และกักเก็บความชื้นในดินได้นาน (ทิวา และคณะ, 2559) อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินในการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดิน เพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ช่วยในการดูดซับน้ำ และแร่ธาตุอาหารในดิน ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และความสมดุลของดิน (Asli et al., 2016) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังช่วยเก็บคาร์บอนลงดิน เพื่อตัดวงจรการกลับสู่บรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งนับว่าเป็นการลดก๊าซเรือนกระจก เพราะสามารถลดการแพร่กระจายของก๊าซไนตรัสออกไซด์ ประมาณ 50%-80% จากที่ดินเพาะปลูก และช่วยขจัดก๊าซมีเทน (Singla and Inubushi, 2014) ดังภาพที่ 2 ถ่านชีวภาพเกิดจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความเค็ความร้อน (Thermochemical conversion) โดยปราศจากก๊าซออกซิเจนหรือมีก๊าซออกซิเจนในปริมาณที่จำกัด (อุศรวดี, 2558) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังให้ค่าความร้อนสูงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ในด้านพลังงานได้อีกด้วย



ภาพที่ 2 วัฏจักรคาร์บอนของถ่านชีวภาพ

ที่มา: Christoph (2006)

กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลประเภทวัสดุเหลือทิ้ง (Pyrolysis process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลโดยวิธีทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) โดยปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณจำกัด ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้สารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่แตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก (เบญจพร, 2557) กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่อยู่ในระบบปิดที่มีความแตกต่างกับกระบวนการเผาในที่โล่งแจ้ง เนื่องจากกระบวนการเผาในที่โล่งแจ้งจะเป็นกระบวนการสันดาปที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนโดยตรงกับอากาศ แต่กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเพื่อใช้เป็นพลังงานในการแยกสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านที่มีคุณภาพ (อุศราวดี, 2558) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถทำได้ 2 วิธี คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-700 °C และแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) จะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ที่อุณหภูมิ 500-1,000 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง (ถ่านชีวภาพ) ของเหลว (น้ำมันชีวภาพ) และก๊าซสังเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 3 (ไววุฒิ และคณะ, 2557) ถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งทางพลังงาน และเป็นวัสดุในการปรับปรุงและบำรุงดินได้ดี ได้รับการยอมรับในเชิงวิชาการ (Shackley et al., 2009)



ภาพที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส

จากแนวคิดในเรื่องของปัญหาชีวมวลวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และการเพิ่มคุณภาพของดิน ดังภาพที่ 4 จึงได้มีการนำเทคนิคทางด้านพลังงานคือ เทคโนโลยีไพโรไลซิสเข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยการหาอุณหภูมิ เวลา ชนิดของชีวมวลที่เหมาะสมกับการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นวัสดุในการ

ปรับปรุงและบำรุงคุณภาพของดินให้มีคุณภาพเพิ่มสูงขึ้น ผลลัพธ์นี้จะส่งผลต่อภาพรวมในการเพิ่มศักยภาพทางการเกษตรของประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีการเผาในประเทศไทยโดยเฉพาะในพื้นที่เขตภาคเหนือ ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพด มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ โดยใช้เทคนิคไพโรไลซิสในการแปลงสภาพชีวมวลที่ไร้ค่าให้มีมูลค่าสำหรับเกษตรกร การศึกษานี้จะทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในช่วงอุณหภูมิ 300-600 °C ระยะเวลาอยู่ในช่วง 30-90 min และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี รวมถึงคุณสมบัติทางการเกษตรที่สำคัญ เมื่อค้นพบอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมหลังเทคโนโลยีนี้ จะนำไปสู่การผลิตสารปรับปรุงดินที่มีคุณภาพสูง เพื่อใช้กับวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ได้อีกทางหนึ่งในอนาคต



ภาพที่ 4 แผนภาพแนวคิดการผลิตถ่านชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากเทคนิคไพโรไลซิส สำหรับนำไปพัฒนาเป็นวัสดุในการปรับปรุงดิน
2. เพื่อศึกษาตัวแปรทางด้าน ชนิดชีวมวล อุณหภูมิ และเวลา ในกระบวนการไพโรไลซิส สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ
3. เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของถ่านชีวภาพในด้านการเกษตร พลังงาน และต้นทุนเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ขอบเขตการศึกษา

1. วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ประกอบด้วย แกลบ และ ชังข้าวโพด
2. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส คือ 300-600 °C
3. ระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 30-90 min
4. กระบวนการไพโรไลซิสทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน และก๊าซไนโตรเจนผสมกับออกซิเจนไม่เกินสัดส่วนของอากาศปกติ
5. วิเคราะห์ทางด้านพลังงาน ทำการวิเคราะห์โดยประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกองค์ประกอบธาตุ และวิเคราะห์ค่าความร้อน
6. วิเคราะห์ด้านการเกษตร ทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความเป็นรุกรุนหรือพื้นที่ผิว การนำไฟฟ้าในดิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน การทดสอบกับการปลูกพืชระยะสั้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานทางด้านเกษตร
2. ได้ทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมของอุณหภูมิ และเวลา ในกระบวนการไพโรไลซิสของการผลิตถ่านชีวภาพ
3. ได้ทราบถึงข้อมูลการวิเคราะห์ทางด้านเกษตร พลังงาน และต้นทุนการผลิตเบื้องต้นในการผลิตถ่านชีวภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและตรวจสอบเอกสาร

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงชีวมวลในประเทศไทย กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ และการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพทั้งทางด้านพลังงานและทางด้านการเกษตร ซึ่งแต่ละหัวข้อแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ สามารถนำมาผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งชีวมวลอาจหมายถึงสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ พืช สัตว์ และสารอินทรีย์ของจุลชีพ ชีวมวลมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบไปด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ ในรูปของคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลส (นคร, 2553) ชีวมวลสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ เนื่องจากพืชอาศัยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานจากแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ผลิตกัมมันต์ในรูปของแป้งและน้ำตาล กักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ดังนั้นการนำพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยการนำชีวมวลมาเผาไหม้ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนและนำพลังงานนั้นมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ (อรุณี, ม.ป.ป.)

ชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แหล่ง คือ แหล่งปฐมภูมิ ได้แก่ ไม้พิน ซึ่งมีความสะดวกในการใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะชนบท และแหล่งทุติยภูมิได้จากชีวมวลเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ดังภาพที่ 5 ได้แก่ เศษกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง แหล่งชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทยมีดังนี้

- แกลบจากโรงสี
- กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาลทราย
- กากปาล์มจากการสกัดน้ำมัน
- เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา และโรงผลิตไม้อัด
- ชังข้าวโพดจากการแยกเมล็ดข้าวโพดออก ซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด
- กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว
- ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์
- กากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง



กากใยปาล์ม



ไม้ผืน



ขังข้าวโพด



เหง้ามันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

ภาพที่ 5 ชีวมวลในประเทศไทย

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (ม.ป.ป.-ก)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีศักยภาพทางด้านชีวมวล เนื่องจากภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตการเกษตรจะพบเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีสัดส่วนสูงเมื่อเทียบกับผลผลิตดังตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตชีวมวลแต่ละชนิด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ซึ่งเป็นปัญหาในการกำจัดของเกษตรกร ส่วนใหญ่กำจัดชีวมวลเหล่านี้ด้วยการเผาก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่าง ๆ หากเกษตรกรมีวิธีการกำจัดชีวมวลอย่างถูกวิธีด้วยการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หรือการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานก็จะก่อให้เกิดการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าทางการเกษตร อีกทั้งยังเป็นเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรอีกทางหนึ่ง เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพและต่อยอดทางธุรกิจได้ สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลต่างของปริมาณที่ของชีวมวลนั้น ๆ กับปริมาณการใช้ประโยชน์ของชีวมวล

ตารางที่ 1 สัดส่วนชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตชีวมวลแต่ละชนิด

ชนิดพืช	ชนิดชีวมวล	สัดส่วนชีวมวล ต่อผลผลิต (ตัน/ตันผลผลิต)
1. ข้าว	ฟางข้าว	0.49
	แกลบ	0.21
2. อ้อย	ใบ และยอดอ้อย	0.17
	ชานอ้อย	0.28
3. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ยอด ใบ และลำต้นข้าวโพด	1.84
	ชังข้าวโพด	0.24
4. มันสำปะหลัง	เหง้ามันสำปะหลัง	0.2
	กากมันสำปะหลัง	0.06
	เปลือกมันสำปะหลัง	0.28
5. ปาล์มน้ำมัน	ลำต้นปาล์มน้ำมัน	1
	ใบ และทางปาล์ม	1.41
	ทะลายปาล์มเปล่า	0.32
	เส้นใยปาล์ม	0.19
	กะลาปาล์ม	0.04
6. ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง	ยอด ใบ และลำต้น	1.177
7. ยางพารา	ตอ ราก และกิ่งก้านไม้ยางพารา	5 ตันต่อไร่
	ปลายไม้ยางพารา	12 ตันต่อไร่
	ปีกไม้ยางพารา	12 ตันต่อไร่
	ขี้เลื่อย และเศษไม้ยางพารา	3 ตันต่อไร่
8. มะพร้าว	จั่น และทะลายมะพร้าว	0.29
	เปลือก และกาบมะพร้าว	0.33
	กะลามะพร้าว	0.25

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2556)

อย่างไรก็ตามชีวมวลบางประเภทก็ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานอย่างกว้างขวางทำให้ไม่เพียงพอต่อการใช้ ดังนั้นในการเลือกใช้ชีวมวลจึงต้องพิจารณาจากชีวมวลที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์ ซึ่งมีปริมาณ 61,588,914.15 ตัน เพื่อให้เกิดความหลากหลายและความมั่นคงของการใช้ประโยชน์จากชีวมวล สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2 แสดงผลการประเมินศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งเป็นปริมาณที่มากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานโดยนำมาแปรรูปเพื่อให้เกิดคุณค่า และสามารถใช้ประโยชน์ได้ (ดุขฎิพร, 2557)

ตารางที่ 2 แสดงผลการประเมินศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิด

ชนิดชีวมวล	ปริมาณที่เกิด (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์แล้ว (ตัน)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน)
1. ฟางข้าว	19,005,628.14	8,112,801.26	10,892,826.89
2. แกลบ	8,145,269.20	8,006,283.36	138,985.84
3. ใบ และยอดอ้อย	17,016,248.08	1,845,487.74	15,170,760.34
4. ยอด ใบ และลำต้นข้าวโพด	9,315,603.52	465,780.18	8,849,823.34
5. ชังข้าวโพด	1,215,078.72	1,094,081.58	120,997.14
6. เหม้ำมันสำปะหลัง	6,045,508.40	164,196.52	5,881,311.88
7. ลำต้นปาล์มน้ำมัน	1,957,280.00	-	1,957,280.00
8. ใบ และทางปาล์ม	18,065,006.01	1,707,454.87	16,357,551.14
9. ทะลายปาล์มเปล่า	4,099,859.52	1,891,985.90	2,207,873.62
10. ใบ และลำต้นถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง	65,017.48	61,766.61	5,751.98
11. ตอ ราก และกิ่งก้านไม้ ยางพารา	1,094,365.00	875,492.00	5,751.98
รวม	86,024,864.07	24,225,330.02	61,588,914.15

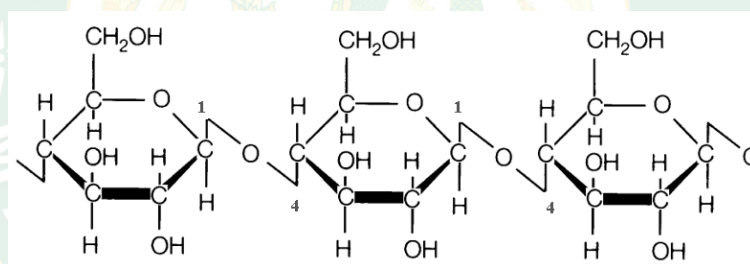
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2556)

โครงสร้างของซีวมวล

โครงสร้างของซีวมวลประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ที่เป็นโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ดังนี้

1. เซลลูโลส

เซลลูโลส หมายถึง สารจำพวกโพลีแซ็กคาไรด์พบมากในผนังเซลล์พืชเป็นสารโพลีเมอร์ที่เกิดจากดีกลูโคส (d-glucose) ต่อกันเป็นสายยาว ดังภาพที่ 6 ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรงป้องกันการแตกของเซลล์ เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสเหมือนกับแป้ง เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (β -1,4 – glycosidic bonds) เอนไซม์อะไมเลส ไม่สามารถย่อยและละลายน้ำได้ เซลลูโลสไม่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารหรือลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ยกเว้นสัตว์กินพืชเท่านั้นที่สามารถใช้เซลลูโลสเป็นพลังงานเพราะสัตว์กลุ่มนี้มีจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีเอนไซม์เซลลูเลสอยู่ในกระเพาะสำหรับย่อยเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้ เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของไม้ประมาณ 40% (อรุณี, ม.ป.ป.)



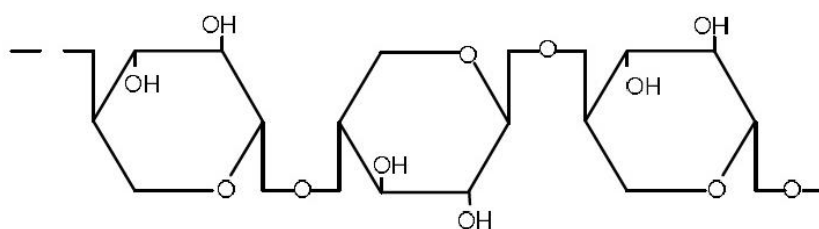
ภาพที่ 6 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: ดุษฎีพร (2557)

2. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นสารโพลีเมอร์ของพวกดีไซโลสกระจายตัวอย่างอิสระในผนังเซลล์พืช เป็นโครงสร้างอะมอฟัสที่มีความแข็งแรงน้อย เป็นกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งที่มีแขนงข้างเป็นน้ำตาลอะราบินโนสหรือน้ำตาลชนิดอื่น ๆ มีสายสั้นกว่าเซลลูโลส ดังภาพที่ 7 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส คือ ไซแลน เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเฮมิเซลลูโลสซึ่งจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของซีวมวล นอกจากไซแลนแล้วภายในเฮมิเซลลูโลสยังมีส่วนประกอบของโมเลกุลของน้ำตาล ได้แก่ ดีไซโลส (d-xylose) ดีกลูโคส (d-glucose) ดีกาแล็กโทส

(d-galactose) แอลอะลาบินโนส (l-ababinose) กรดดีกลูโคโนอิก (d-glucurmoic acid) และดีแมนโนส (d-mannose) โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสสามารถให้ผลของก๊าซมาก และมีทาร์น้อย เฮมิเซลลูโลสละลายได้ในสารละลายแอลคาไลน์อ่อน และถูกไฮโดรไลส์ (Hydrolyzed) ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจาง สำหรับปริมาณของเฮมิเซลลูโลสมีประมาณ 20%-30% ขององค์ประกอบในไม้ (ดุษฎีพร, 2557)

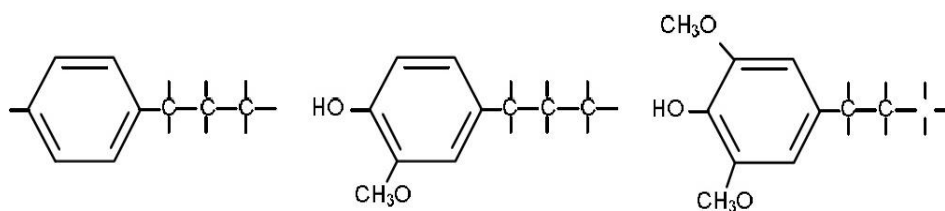


ภาพที่ 7 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: ดุษฎีพร (2557)

3. ลิกนิน

ลิกนิน เป็นสารประกอบของโพลีเมอร์อะโรมาติกที่ไม่มีรูปผลึกเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใยทำหน้าที่ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane ลิกนินไม่สามารถถูกย่อยได้โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแต่จะถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยพวกเชื้อราประเภท white rot fungi และ moulds ลิกนินเป็นพอลิเมอร์กิ่งที่มีความซับซ้อนสูงของฟีนอล โพรเพน (phenyl propane) ซึ่งประกอบไปด้วย 4-โพรพานิลฟีนอล (4-propenyl phenol) 4-โพรพีนิล-2-เมท็อกซีฟีนอล (4-propenyl-2-methoxy phenol) และ 4-โพรพีนิล-2,5-ไดเมท็อกซีฟีนอล (4-propenyl-2,5-dimethoxyl phenol) แสดงภาพที่ 8 ลิกนินเป็นส่วนที่สามที่สำคัญขององค์ประกอบของผนังเซลล์ของเนื้อไม้ชีวมวล ลิกนินมีอยู่ในเนื้ออ่อนประมาณ 18%-25% ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 25%-35%

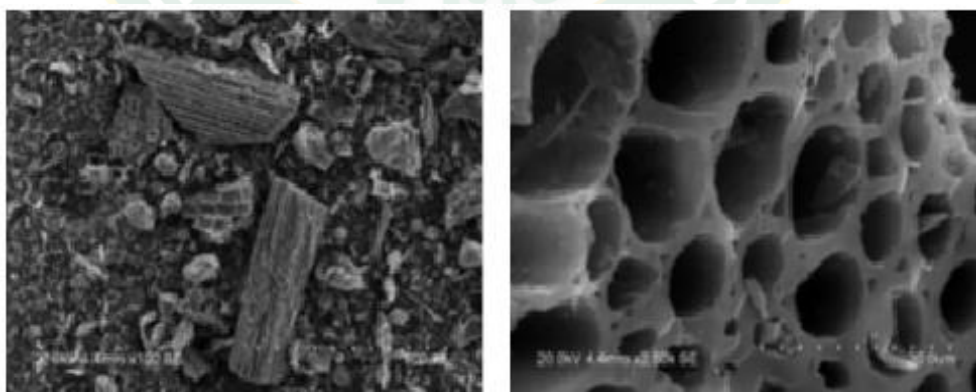


ภาพที่ 8 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: ดุษฎีพร (2557)

ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอน และมีความเป็นรูพรุนสูง ดังภาพที่ 9 ผลิตจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล (biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้ออกซิเจนน้อยมากเรียกระบวนการนี้ว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งมี 2 วิธีหลัก ๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็วและอย่างช้า การผลิตถ่านชีวภาพด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าใช้อุณหภูมิเฉลี่ย 500 °C จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 50% โดยใช้เวลาเป็นชั่วโมง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่ใช้อุณหภูมิเฉลี่ย 700 °C ซึ่งใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% ก๊าซสังเคราะห์ (syngas) ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน รวมกัน 20% และ ถ่านชีวภาพ 20% (ศิริลักษณ์, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 9 ลักษณะพื้นฐานของถ่านชีวภาพ

ที่มา: รัตถชล และคณะ (2560)

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ทำให้มีคุณสมบัติในการปรับสภาพดินมีสถานะเป็นประจุลบ สามารถดูดซับหรือจับแร่ธาตุที่เป็นประจุบวกได้ดี ช่วยทำให้ดินมีธาตุอาหารที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวภายในมากโดยมีค่าประมาณ 10-400 m²/g ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิในการเผาถ่านชีวภาพสามารถให้คาร์บอนคงตัวสูงช่วยให้ย่อยสลายได้ช้า จึงช่วยกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้นาน และไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ในดิน อีกทั้งลักษณะทางกายภาพที่มีประจุไฟฟ้าและมีความเป็นรูพรุนสูง จึงสามารถกักเก็บน้ำและเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นตัวสร้างอาหารในดินทำให้ดินชุ่มชื้นและอุดมสมบูรณ์ สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้า ๆ จึงสามารถเพิ่มคุณภาพของดินให้สูงขึ้นและเป็นการสร้างสมดุลให้กับระบบนิเวศน์ (ไววุฒิ และคณะ, 2557)

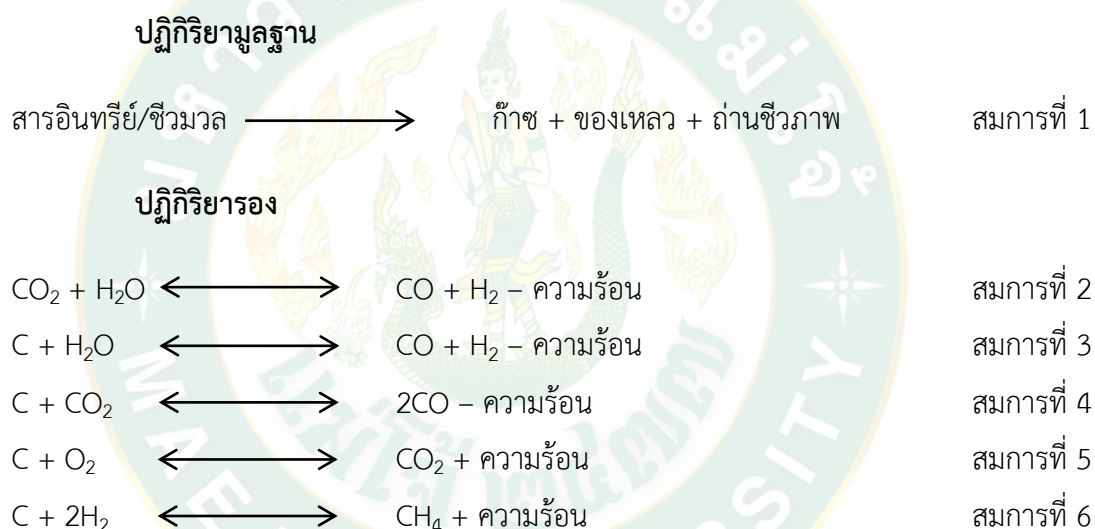
ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายไม่เฉพาะการใช้ในรูปแบบของเชื้อเพลิงแข็ง แต่ยังสามารถใช้ประโยชน์ในด้านกรกักเก็บคาร์บอนลงดินและปรับปรุงดิน ทั้งนี้เพราะการกักเก็บคาร์บอนในดินด้วยถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการแยกสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อนจะสามารถเก็บคาร์บอนได้ถึง 50% ของคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ขณะที่คาร์บอนที่ได้จากการเผาชีวมวลจะเหลือเพียง 3% และจากการย่อยสลายโดยธรรมชาติหลังจาก 5-10 ปี จะได้คาร์บอนน้อยกว่า 20% การนำถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากถ่านชีวภาพสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาวได้ด้วยการกักเก็บคาร์บอนในดิน
2. ช่วยปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เมื่อนำถ่านชีวภาพลงดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น
3. ช่วยผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากมวลชีวภาพด้วยการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการขนส่ง และในระบบอุตสาหกรรมได้
4. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นมิตรได้ (กฤษฎา และคณะ, 2556)

กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ที่ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวทางความร้อนในระบบปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนอย่างจำกัด โดยเป็นกระบวนการทำให้สารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว (Chain) แตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง หรือเป็นสายโซ่ที่สั้นลง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง (ถ่านชีวภาพ) ของเหลว (น้ำมันชีวภาพ) และก๊าซสังเคราะห์ โดยกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-700 °C (เบญจพร, 2557) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปจะเป็นดังต่อไปนี้



1. กลไกการเกิดไพโรไลซิส

กลไกการเกิดการไพโรไลซิส สามารถแบ่งประเภทออกตามอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลได้ 2 กระบวนการ คือ การไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis) และการไพโรไลซิสอย่างเร็ว (Fast pyrolysis) โดยกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการนี้มีผลต่อการแตกตัวของโครงสร้างที่ซับซ้อนของชีวมวลและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

1.1 การไพโรไลซิสอย่างช้า เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชีวมวลอย่างช้า ๆ อุณหภูมิการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 300-700 °C และอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 °C/min รักษาอุณหภูมิการไพโรไลซิสมากกว่า 5 min ขึ้นไป การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบช้าที่เกิดขึ้นในระบบสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- ช่วงอุณหภูมิ 20-100 °C ชีวมวลจะดูดซับความร้อน ความชื้นภายในชีวมวลจะถูกขับออก จากชีวมวลกลายเป็นไอน้ำ

- ช่วงอุณหภูมิ 100-250 °C เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและกรดอะซิติก

- ช่วงอุณหภูมิ 250-500 °C เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน รวมถึงของเหลวทาร์ (Liquid tar)

- ช่วงอุณหภูมิ 500 °C ขึ้นไป เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ (Biochar)

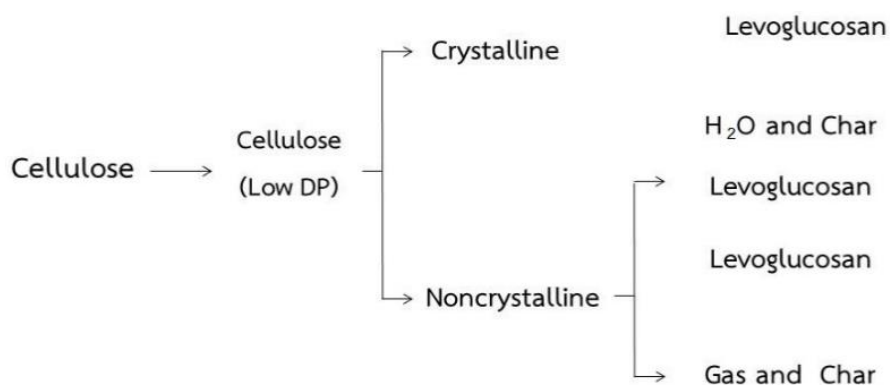
1.2 การไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว เป็นกระบวนการให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส 500-1,000 °C อัตราการให้ความร้อนในช่วง 10–100 °C/min รักษาอุณหภูมิไพโรไลซิสในช่วงระยะ สั้น ๆ กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วมักได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูง

2. กลไกการเกิดไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวล

กระบวนการไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ส่งผลให้ได้ ปริมาณผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน กลไกการเกิดไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวลดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1 กลไกการเกิดไพโรไลซิสเซลลูโลส (Cellulose pyrolysis)

- ช่วงอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 250 °C) จะเกิดจากการแตกพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ที่ ขอบระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดอันดับศูนย์ ($n=0$) โดยอัตราการ พอลิเมอร์ไรเซชันมีการลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1,000 หน่วย เหลือ 200 หน่วย โครงสร้างรูปผลึกมี การเปลี่ยนแปลงเป็นพวกลิวโกลูโคซาน (Levoglucosan) ในโครงสร้างของอสัณฐานและมีการแตก ของสายเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของ คาร์บอน และมีการตั้งอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อ ระหว่างโมเลกุล (Cross link) ได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกถ่าน (Char) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ

ที่มา: เบญจพร (2557)

- ช่วงอุณหภูมิ 250–500 °C จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) และดีไฮเดรชัน (dehydration) ทำให้เกิดการไอน้ำออกและเกิดถ่านโดยปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาของเซลลูโลส ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาการให้ความร้อน สภาพแวดล้อม ออกซิเจน น้ำ ก๊าซเฉื่อย ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ และชนิดของชีวมวล

- ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 °C ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านมากขึ้น

2.2 กลไกการเกิดไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose pyrolysis)

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซมาก และได้น้ำมันชีวภาพน้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน หากพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้สารของเฮมิเซลลูโลสสามารถควบแน่นได้จะมีลักษณะเหมือนเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน เริ่มจากการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันไปเป็นพวงสารที่สามารถละลายน้ำได้ แล้วเกิดการสลายตัวไปเป็นสารระเหย

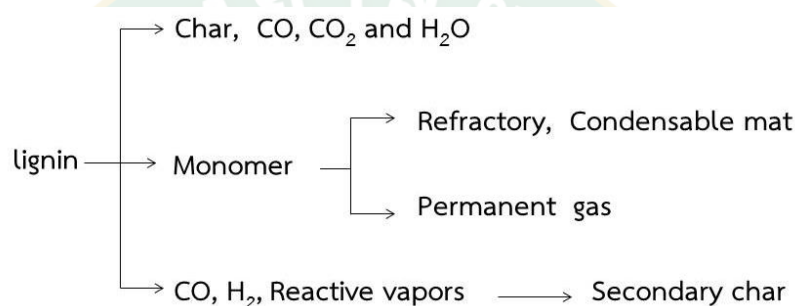
2.3 กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน (Lignin pyrolysis)

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ มาประกอบรวมกันทำให้มีโครงสร้างแข็งแรงมาก เมื่อเกิดการสลายตัวของลิกนินด้วยความร้อนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้หลากหลายแบบ และทำให้ได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาของลิกนิน แสดงได้ดังภาพที่ 11 และสามารถอธิบายการเกิดได้ดังนี้

- ช่วงอุณหภูมิ (น้อยกว่า 240 °C) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เพื่อไอน้ำออกจากปฏิกิริยาขั้นแรก แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล ได้เป็นผลิตภัณฑ์ถ่าน และก๊าซมากขึ้น

- ช่วงอุณหภูมิ 240–500 °C เกิดมอนอเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาลำดับที่ 2 หากมีความร้อนและความดันต่ำ จะทำให้เกิดมอนอเมอร์ของลิกนินได้ดี

- ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 °C จะการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ คือ มอนอเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาลำดับที่ 2 เกิดการแตกตัวกลายเป็นไอและเกิดการไพโรไลซิสได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซ (คาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ) วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ เมื่อให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 3 เกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่เป็นไอในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด ทำให้ได้ถ่านซึ่งการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวตามปฏิกิริยาลำดับที่ 3 ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง (เบญจพร, 2557)

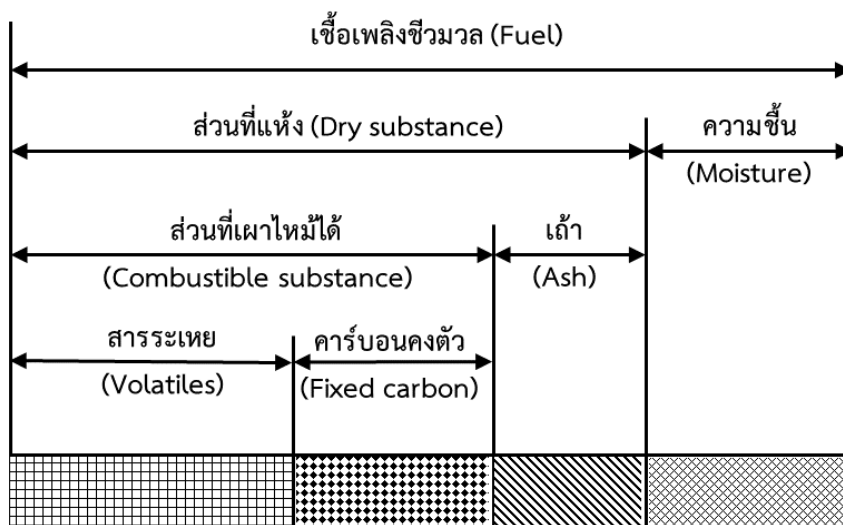


ภาพที่ 11 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน

ที่มา: เบญจพร (2557)

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพในด้านพลังงาน

คุณสมบัติของชีวมวลถือเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำชีวมวลมาแปลงเป็นพลังงาน เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในการเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงาน (Conversion process) และบ่งบอกความยากง่ายของการนำชีวมวลมาแปลงเป็นพลังงานในแต่ละกระบวนการ ซึ่งคุณสมบัติชีวมวลแสดงดังภาพที่ 12 (iEnergyGuru, 2017)



ภาพที่ 12 คุณสมบัติชีวมวล

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content: MC)

ปริมาณความชื้น เป็นสัดส่วนของความชื้นต่อมวลน้ำหนักเชื้อเพลิงทั้งหมด ค่าความชื้นถือเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงานที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการแปลงพลังงานโดยใช้ความร้อน (Thermal conversion processing) สามารถวิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 3173 (อิตินาพร, 2551) โดยนำครุชชีเบลไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ระยะเวลา 30 min แล้วนำออกมาทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 h ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างลงในครุชชีเบลประมาณ 1 g นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 h หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์ 1 h แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักหลัง คำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างได้ดังสมการที่ 7

$$MC (\%) = \frac{A-B}{A} \times 100$$

สมการที่ 7

เมื่อ	MC	คือ ปริมาณความชื้น (%)
	A	คือ น้ำหนักก่อนอบ 105 °C (g)
	B	คือ น้ำหนักหลังอบที่อุณหภูมิ 105 °C (g)

2. สารระเหย (Volatile Matter: VM)

สารระเหย เป็นร้อยละของน้ำหนักของชีวมวลที่สูญเสียไปหลังจากหักออกจากปริมาณค่าความชื้น เกิดจากการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ในการเผาไหม้ รวมกับส่วนประกอบบางตัวของพวก Mineral Matter ที่สามารถสลายตัวได้เมื่อถูกความร้อน เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาจากสารประกอบคาร์บอเนต เป็นต้น วิเคราะห์ได้จากมาตรฐาน ASTM D 3175 (อิตินาพร, 2551) โดยนำตัวอย่างใส่ลงในครุชชีเบลเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 30 min แล้วนำออกมาทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์ 1 h จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างลงในครุชชีเบลมีทำการเผาไว้แล้วประมาณ 1 g นำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6-7 min แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักหลัง คำนวณได้จากสมการ 12

$$VM (\%) = \left(\frac{A-B}{A} \times 100 \right) - MC$$

สมการที่ 8

เมื่อ	VM	คือ สารระเหย (%)
	A	คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผาที่อุณหภูมิ 950 °C (g)
	B	คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 950 °C (g)
	MC	คือ สารระเหย (%)

3. เถ้า (Ash)

เถ้า เป็นเศษที่เหลือจากการเผาไหม้ (Non Combustible Residue) เมื่อชีวมวลถูกเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 180 min ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 (อิตินาพร, 2551) ปริมาณเถ้านี้ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพวกแร่ธาตุและสารอินทรีย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13

$$Ash (\%) = \frac{B}{A} \times 100$$

สมการที่ 9

เมื่อ	Ash	คือ เถ้า (%)
	A	คือ น้ำหนักก่อนเผาที่อุณหภูมิ 650 °C (g)
	B	คือ น้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 °C (g)

4. คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon: FC)

คาร์บอนคงตัว เป็นปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยากที่คงเหลืออยู่ในของเสียหลังจากที่เผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 950 °C ในสภาวะปิด ตามมาตรฐาน ASTM D 3172 (อิตัญญาพร, 2551) ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$FC (\%) = 100 - (MC + VM + Ash) \quad \text{สมการที่ 10}$$

เมื่อ	FC	คือ คาร์บอนคงตัว (%)
	MC	คือ ความชื้น (%)
	VM	คือ สารระเหย (%)
	Ash	คือ เถ้า (%)

5. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง คือปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบโดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกสารไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ด้วยการนำเอาเชื้อเพลิงไปเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันในบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับตัวบอมบ์ โดยมีน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์และอุปกรณ์อื่น ๆ โดยรอบ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11 (บริษัท เอสซอม จำกัด, ม.ป.ป.)

$$Q = mc_p \Delta T \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ	Q	คือ ปริมาณความร้อน (kJ)
	m	คือ มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
	c _p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ 4.187 (kJ/kg K)
	ΔT	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (K)

ปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จากสมการยังไม่ใช่ความร้อนที่ถูกต้อง เพราะตัวของบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ยังสามารถดูดความร้อนบางส่วนไว้ในเชื้อเพลิง และความร้อนบางส่วนก็สูญหายไปกับบรรยากาศรอบ ๆ ใอน้ำส่วนที่เกิดจากการเผาไหม้ และกลั่นตัวไม่หมด ซึ่งใอน้ำดังกล่าวจะถูกดูดความร้อนเอาไว้ นอกจากนี้ยังมีความร้อนบางส่วนที่มาจากขดลวดขณะจุดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศของออกซิเจน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิสูงจะรวมตัวเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก จากข้างต้น เพื่อให้ทราบค่าความร้อนที่แท้จริงของเชื้อเพลิงจะต้องแก้ข้อผิดพลาดดังต่อไปนี้

1. ต้องทราบค่าน้ำสมบูรณ์ของเครื่องทดสอบ
2. อุณหภูมิของน้ำต้องต่ำกว่าบรรยากาศโดยรอบ ประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิสูงจากการเผาไหม้
3. ต้องหยดน้ำลงบนบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ เพื่อให้ใอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ
4. หาปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้ของขดลวด แล้วนำไปลบออก
5. ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงทดสอบน้อย เพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นเพียง 2-3 °C ทำให้ค่าผิดพลาดเกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด

ดังนั้นการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงใกล้เคียงความเป็นจริง ดังสมการที่ 12

$$Q = mc_p \Delta T - C_1 - C_2 - C_3$$

สมการที่ 12

เมื่อ	Q	คือ ปริมาณความร้อน (kJ)
	m	คือ มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
	c_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ 4.187 (kJ/kg K)
	ΔT	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (K)
	C_1	คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริก (kJ)
	C_2	คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟิวริก (kJ)
	C_3	คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากขดลวดไฟฟ้า (kJ)

โดยทั่วไปค่า C_1 กับ C_2 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0

ในทางปฏิบัติจริง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะคำนวณจะทำให้ค่า ΔT ที่ได้ไม่แน่นอน ดังสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้ ΔT มีค่าที่ถูกต้องจึงใช้สมการที่ 13

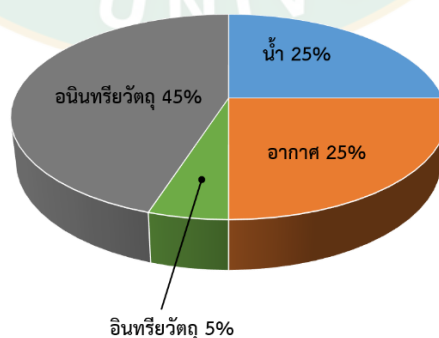
$$\Delta T = T_c - T_a - r_1(b - a) - r_2(c - b)$$

สมการที่ 13

เมื่อ	a	คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (s)
	b	คือ เวลาตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจนถึง 60% ของอุณหภูมิสูงสุด (s)
	c	คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนกระทั่งคงที่ (สูงสุด-ต่ำสุด) (s)
	T_a	คือ อุณหภูมิเริ่มการเผาไหม้ (K)
	T_c	คือ อุณหภูมิสูงสุดของการบอมบ์ (K)
	r_1	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงก่อนการเผาไหม้ (K)
	r_2	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงหลังจุดบอมบ์ (K)

อินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุในดิน หมายถึง ส่วนที่เป็นอินทรีย์สารในดิน ซึ่งประกอบด้วยเศษซากพืชและซากสัตว์ในระยะต่าง ๆ ของการสลายตัวรวมถึงเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในดิน ตลอดจนสารสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน องค์ประกอบของดินที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช โดยทั่วไปประกอบด้วยอากาศ 25% น้ำ 25% อินทรีย์วัตถุ 45% และอินทรีย์วัตถุ 5% ดังภาพที่ 13 แต่ในธรรมชาติดินที่มีอินทรีย์วัตถุถึง 5% พบได้น้อยมาก (พัชรี, 2549) อินทรีย์วัตถุในดินเป็นแหล่งสำคัญของธาตุอาหารพืช และเป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ดินโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน อีกทั้งยังเป็นส่วนที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของดินทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น โครงสร้างดิน ความร่วนซุย การระบายน้ำ การถ่ายเทอากาศ การดูดซับน้ำและธาตุอาหารของดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื่องไปถึงระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินและความสามารถในการให้ผลผลิตของดินอีกด้วย (สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน, ม.ป.ป.).



ภาพที่ 13 ส่วนประกอบของดิน

ที่มา: ปรียานุช (2554)

ความสำคัญของอินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพ ทางชีวภาพ และทางเคมี ซึ่งมีผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและการเจริญเติบโตของพืชไม่โดยตรงก็โดยทางอ้อม อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุมีผลต่อคุณสมบัติของดินทั้ง 3 ประการ ดังนี้

1. อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

อินทรีย์วัตถุมีผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างของดิน โดยวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายกลายเป็นอินทรีย์วัตถุจะแทรกอยู่ในเม็ดดิน ทำให้ดินโปร่ง ร่วนซุย ระบายรากพืชสามารถงอกไชดินได้ง่ายและไกลขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่การหาอาหารของพืช อินทรีย์วัตถุยังช่วยทำให้เกิดเม็ดดิน และช่วยให้เม็ดดินเสถียร ซึ่งเป็นผลจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ดินและมีการสังเคราะห์สารบางชนิดขึ้นมาใหม่ สารที่สังเคราะห์ที่ขึ้นมาใหม่นี้เป็นตัวเชื่อมอนุภาคดินให้เกาะกันเป็นก้อน ทำให้ดินมีช่องว่างลักษณะคล้ายฟองน้ำ และมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้มากถึง 6-20 เท่าของน้ำหนัก โดยธรรมชาติของดินเหนียวเป็นดินเนื้อละเอียด จะมีช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมากจึงอุ้มน้ำได้ดีแต่ระบายอากาศได้ช้า ขณะที่ดินทรายซึ่งเป็นดินเนื้อหยาบจะมีช่องว่างขนาดใหญ่จึงระบายอากาศได้ดีแต่อุ้มน้ำได้น้อย การเกิดเม็ดดินจึงเป็นการเพิ่มช่องว่างขนาดใหญ่ในดินเนื้อละเอียดและเพิ่มช่องว่างขนาดเล็กในดินเนื้อหยาบ ทำให้สัดส่วนของช่องว่างพอเหมาะทั้งการดูดยึดน้ำและการระบายอากาศ การเกิดเม็ดดินที่เสถียรสามารถช่วยลดการชะล้างพังทลายของดิน ในแง่ของการจัดการดินการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินเหนียวช่วยลดความหนืด และการเกาะกันของอนุภาคดินเหนียวทำให้ไถพรวนได้ง่ายขึ้น

2. อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุต่อคุณสมบัติทางชีวภาพของดิน

อินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ดิน ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมากจึงเป็นดินที่มีจุลินทรีย์มาก กิจกรรมของจุลินทรีย์ดินช่วยส่งเสริมกระบวนการที่เป็นประโยชน์ในดิน ได้แก่ การแปรสภาพอินทรีย์สารในดินจากรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จุลินทรีย์บางชนิดยังมีความสามารถพิเศษในการเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศซึ่งมีอยู่มากถึง 78% แต่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์โดยตรงไม่ได้ให้อยู่ในรูปสารประกอบไนโตรเจนที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ โดยผ่านกระบวนการตรึงไนโตรเจนซึ่งเป็นผลที่ได้จากกิจกรรมของจุลินทรีย์พวกไรโซเบียมที่ปมรากของพืชตระกูลถั่ว จุลินทรีย์ดินบางชนิดยังสามารถควบคุมปริมาณของไส้เดือนฝอยและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคพืชได้อีกด้วย

3. อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน

อินทรีย์วัตถุมีต้นกำเนิดมาจากพืชและสัตว์ จึงเป็นแหล่งธาตุอาหารที่จำเป็นอย่างครบถ้วนที่พืช และสัตว์ใช้ในการเจริญเติบโต การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินทำให้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ถูกปลดปล่อยออกมาให้พืชสามารถนำกลับไปใช้ได้ อีกธาตุที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ซึ่งอินทรีย์วัตถุในดินจัดได้ว่าเป็นแหล่งที่สำคัญของธาตุเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแหล่งปุ๋ยไนโตรเจนธรรมชาติ และที่สำคัญที่สุดอินทรีย์วัตถุมีคุณสมบัติในการช่วยควบคุมการละลายได้ของธาตุบางชนิด เช่น อะลูมิเนียม และเหล็ก โดยเฉพาะในดินที่เป็นกรดจัดหากมีธาตุทั้งสองชนิดมากเกินไปจะเป็นพิษต่อพืชได้ อินทรีย์วัตถุยังช่วยลดการเกิดศิลาแลงโดยการจับกับอะลูมิเนียมและเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จึงช่วยลดปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสจากการตกตะกอนกับธาตุทั้งสองชนิด เป็นการช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ธรรมชาติของอินทรีย์วัตถุที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง ซึ่งค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้จากประจุลบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากของอินทรีย์วัตถุ ทำให้ดินสามารถดูดซับธาตุประจุบวกได้ตามกำลังของประจุลบที่มีอยู่ ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นคุณสมบัติทางเคมีที่ทำให้อินทรีย์วัตถุมีส่วนช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น ธาตุประจุบวกไว้ในพืชได้ใช้มากขึ้น ธาตุอาหารพืชที่ละลายออกจากปุ๋ยเคมีบางส่วนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ไม่ทันก็จะถูกอินทรีย์วัตถุดูดซับเอาไว้ไม่ให้สูญหายไปจากดิน (พัชรี, 2549)

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพในด้านการเกษตร

1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด (acidity) หรือความเป็นด่าง (alkalinity) ของดินเป็นสมบัติที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมีและชีวภาพในดินมีผลต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของพืช ซึ่งจะต้องมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.6-7.3 ความเป็นกรดหรือความด่างของดินเกี่ยวข้องกับ hydrogen ion (H^+) และ hydroxyl ion (OH^-) ที่สารละลายดิน (soil solution) โดยปกติในสารละลายดินจะมีไฮดรอกไซด์ไอออนทั้งสองชนิดนี้และ

ถ้ามี $H^+ > OH^-$ ดินมีปฏิกิริยาเป็นกรด เรียกดินกรด

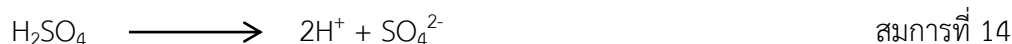
ถ้ามี $H^+ < OH^-$ ดินมีปฏิกิริยาเป็นด่าง เรียกดินด่าง

ถ้ามี $H^+ = OH^-$ ดินมีปฏิกิริยาเป็นกลาง เรียกดินเป็นกลาง

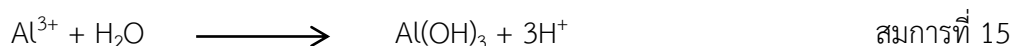
แหล่งที่มาที่สำคัญของ H^+ ซึ่งก่อให้เกิดความเป็นกรดในดิน ได้แก่

1.) H^+ จากกรดในดิน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ

ดังสมการที่ 14



2.) H^+ ที่เกิดจาก อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) และเหล็กไอออน (Fe^{3+}) ในสารละลายดิน ดังสมการที่ 15



แหล่งที่มาที่สำคัญของ OH^- ซึ่งก่อให้เกิดความเป็นด่างนั้น ได้แก่ OH^- ที่เกิดจาก basic cations เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม เมื่ออยู่ในสารละลายดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) โดยระดับความเป็นกรด-ด่าง สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจำแนกระดับความเป็นกรด-ด่างของดินในน้ำ (อัตราส่วน 1:1)

ระดับ	ช่วง pH
กรดรุนแรงมากที่สุด	น้อยกว่า 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5-4.4
กรดจัดมาก	4.5-5.0
กรดจัด	5.1-5.5
กรดปานกลาง	5.6-6.0
กรดน้อย	6.1-6.5
เป็นกลาง	6.6-7.3
ด่างอ่อน	7.4-7.8
ด่างปานกลาง	7.9-8.4
ด่างจัด	8.5-9.0
ด่างจัดมาก	มากกว่า 9.0

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

2. สภาพการนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity: EC)

สภาพการนำไฟฟ้าของดิน คือ ความสามารถของดินในการส่งผ่านหรือนำกระแสไฟฟ้า ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับสมบัติดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น เนื้อดิน ความ

เค็มของดิน (salinity หรือ salt concentration) โดยทั่วไปมักใช้ประเมินระดับความเค็มของดิน ซึ่งหมายถึงปริมาณของธาตุที่มีประจุในดิน ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินมีหน่วยเป็นไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร (mS/cm) หรือเดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) ดินที่เหมาะสม สำหรับการปลูกพืชโดยทั่วไปควรมีความเค็มไม่เกินระดับความเค็มน้อย (นันทรัตน์, 2558) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช

ค่าการนำไฟฟ้า (EC_e , dS/m)	ระดับความเค็ม	อาการของพืช
น้อยกว่า 2	ไม่เค็ม	ไม่มีผลกระทบต่อพืช
2-4	เค็มน้อย	มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตพืชไม่ทนเค็ม
4-8	เค็มปานกลาง	มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	เค็มมาก	เฉพาะพืชทนเค็มเท่านั้นจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้
มากกว่า 16	เค็มจัด	เฉพาะพืชทนเค็มจัดจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้

ที่มา: นันทรัตน์ (2558)

3. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity: C.E.C)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก หมายถึง ธาตุที่มีประจุบวกทั้งหมดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดิน ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม ไฮโดรเจน อะลูมิเนียม และโซเดียม โดยทั่วไปดินจะดูดซับแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมในปริมาณมากกว่าธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้ดินแต่ละชนิดก็มีความจุหรือความสามารถในการดูดซับ หรือแลกเปลี่ยนธาตุที่มีประจุบวกเหล่านี้แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5 และ 6 ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวสูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงกว่าดินที่มีอนุภาคทราย และดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง โดยปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินทรายจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-10 cmol/kg ดินร่วนจะมีค่าอยู่ในช่วง 10-20 cmol/kg ดินเหนียวจะมีค่าสูงกว่า 20 cmol/kg ขึ้นไป ค่าของความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินชนิดมักคงที่มีการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่ต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสารคอลลอยด์ ดังนั้นดินที่มีอินทรีย์วัตถุน้อยกว่า 3% โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่มีเนื้อหยาบหรือดินทรายควรต้องใส่ปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มเติมเพื่อให้ดินสามารถดูดซับธาตุ

อาหารจากปุ๋ยไว้ให้พืชใช้ได้มากและนานขึ้น เนื่องจากธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมมีความสัมพันธ์กันแบบปฏิปักษ์ (Antagonistic relationship) ถ้าดินมีธาตุใดธาตุหนึ่งในระดับสูงจะมีผลต่อการดูดใช้ธาตุอื่นของพืช เช่น การดูดโพแทสเซียมของรากพืชจะถูกจำกัดเมื่อดินมีแคลเซียมสูงมาก และดินที่มีโพแทสเซียมสูงก็จะจำกัดการดูดแมกนีเซียมของรากพืชโดยพืชจะแสดงอาการขาดธาตุแมกนีเซียมแม้ว่าดินจะมีแมกนีเซียมในดินอยู่สูง (นันทรัตน์, 2558)

ตารางที่ 5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเนื้อดินที่ต่างกัน

เนื้อดิน	CEC (cmol/kg)
ดินทราย	1-5
ดินร่วนปนทรายละเอียด	5-10
ดินร่วน และดินร่วนปนทรายแป้ง	5-15
ดินร่วนปนเหนียว	15-30
ดินเหนียว	มากกว่า 30

ที่มา: นันทรัตน์ (2558)

ตารางที่ 6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน

C.E.C (cmol/kg)	ความอุดมสมบูรณ์ของดิน
น้อยกว่า 6	ต่ำมาก
6-12	ต่ำ
12-25	ปานกลาง
25-40	สูง
มากกว่า 40	สูงมาก

ที่มา: นันทรัตน์ (2558)

4. สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน (carbon to nitrogen ratio: C/N ratio)

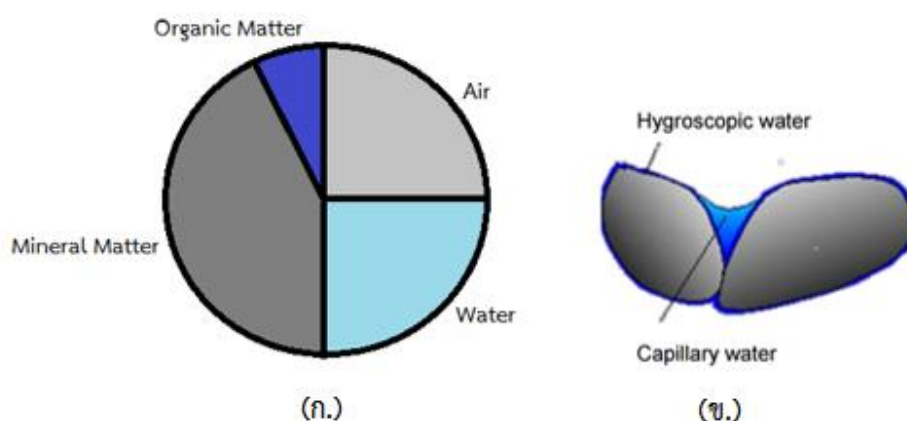
การเติมอินทรีย์วัตถุลงในดินเป็นการให้แหล่งพลังงานและคาร์บอนโดยตรงแก่สิ่งมีชีวิตในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกจุลินทรีย์ในดิน แต่พืชยังไม่ได้ประโยชน์ทันที เพราะพืชได้คาร์บอนจากอากาศ ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานส่วนใหญ่จากการสังเคราะห์แสง พืชจะได้ประโยชน์จากอินทรีย์วัตถุต่อเมื่อได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิตในดิน ทำให้ธาตุอาหารพืชถูกปลดปล่อยออกมา และธาตุอาหารที่เป็นตัวหลักใหญ่คือ ไนโตรเจน ถ้าอินทรีย์วัตถุมีไนโตรเจนอยู่ในปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการของจุลินทรีย์ ไนโตรเจนส่วนเกินจะถูกปลดปล่อยออกมาสู่ดิน ในทางกลับกันหากอินทรีย์วัตถุมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอ จุลินทรีย์จะดึงไนโตรเจนจากดินรอบข้าง ทำให้เกิดสภาพขาดไนโตรเจนสำหรับพืช ในขณะที่เดียวกันทำให้การดำเนินกิจกรรมทั้งของพืชและจุลินทรีย์ชะลอตัวลง

การขาดไนโตรเจนของดินเพราะถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้มักเป็นสภาพชั่วคราว เพราะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ดินจะเกิดได้ช้า ในกรณีที่มีปริมาณไนโตรเจนจำกัดแต่ยังเกิดได้ต่อเนื่อง โดยที่คาร์บอนจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ย่อยสลายในกระบวนการหายใจของเซลล์ และเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่ออกจากดินทำให้ปริมาณของคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุลดลง ในขณะที่ไนโตรเจนยังคงอยู่ในดิน เมื่อกระบวนการย่อยสลายดำเนินไปจนถึงที่สุด ปริมาณคาร์บอนจะลดลงมากจนกลายเป็นตัวจำกัดการดำรงชีพของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะตายลง และกิจกรรมย่อยสลายจะเกิดในอัตราที่ลดต่ำลงมาก ไนโตรเจนในขณะนั้นมีปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการใช้ของจุลินทรีย์ จึงกลายเป็นส่วนที่พืชนำไปใช้ได้ อย่างไรก็ตามแม้กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะปลดปล่อยไนโตรเจนให้ดิน แต่อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนจะไม่เร็วพอที่จะทันกับความต้องการใช้ของพืชทางการเกษตร จึงจำเป็นต้องมีการเติมไนโตรเจนในรูปของปุ๋ยเคมีโดยตรงหรือในรูปของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงพอ รวมถึงการส่งเสริมให้เกิดกระบวนการตรึงไนโตรเจนในดินของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถเฉพาะ และการปลูกพืชหมุนเวียนหรือไถกลบพืชที่มีไนโตรเจนสูง

ปริมาณคาร์บอนในเศษพืชมีอยู่ประมาณ 42% ส่วนปริมาณคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุในดินมีอยู่ 40%-58% ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนในเศษพืชมีอยู่ต่ำและผันแปรมากอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1% และไม่เกิน 6% สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญคือ เมื่อไนโตรเจนมีปริมาณต่ำซึ่งทำให้ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีระดับสูง จุลินทรีย์จะแย่งไนโตรเจนกันและไนโตรเจนกลายเป็นตัวจำกัดอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมจะอยู่ในอัตราส่วน 10:1 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงหรือต่ำกว่า 10:1 จะมีส่งผลต่อการดูดเอาไนโตรเจนจากดินนำมาใช้ทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลง (บุญแสน, ม.ป.ป.)

5. ความสามารถในการอุ้มน้ำ หรือความชื้นในดิน (Water holding capacity: W.H.C)

โดยทั่วไปดินจะประกอบไปด้วย 3 สถานะ คือส่วนที่เป็นของแข็งหรือเนื้อดินที่ประกอบไปด้วยแร่ และสารอินทรีย์วัตถุ ส่วนที่เป็นของเหลวที่ประกอบไปด้วยน้ำ และส่วนที่เป็นก๊าซที่ประกอบไปด้วยอากาศ และไอน้ำ ดังภาพที่ 14 (ก.) ดังนั้นส่วนที่เป็นของเหลวหรือน้ำในดินจะเป็นความชื้นในดิน กล่าวคือปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินกักไว้ ทำให้น้ำแทรกซึมลงไปยังดินแล้วค้างอยู่ตามช่องว่างของเนื้อดิน หรือเคลือบเป็นฟิล์มรอบอนุภาคดิน ดังภาพที่ 14 (ข.) ถ้าในส่วนของช่องว่างในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็มไม่มีก๊าซอยู่เรียกดินนั้นว่า ดินที่อึดตัวด้วยน้ำ แต่ถ้าช่องว่างของดินมีทั้งน้ำและก๊าซอยู่ จะเรียกว่า ดินที่ไม่อึดตัว โดยปกติปริมาณน้ำในดินควรอยู่ในช่วง 50%-100% ของความจุ ความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินนั้น ๆ (อนูรัตน์, ม.ป.ป.)



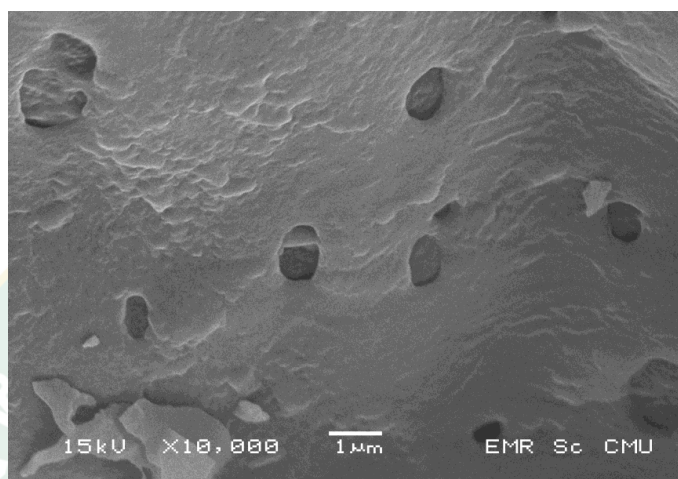
ภาพที่ 14 (ก.) ส่วนประกอบของดิน (ข.) ปริมาณน้ำที่ถูกดินยึดไว้

ที่มา: อนูรัตน์ (ม.ป.ป.)

6. ความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ

ความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ เป็นลักษณะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำ และเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นตัวสร้างสารอาหารในดินทำให้ดินชุ่มชื้นและอุดมสมบูรณ์ ทำให้ดินมีการปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้า ๆ เพิ่มคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ให้สูงขึ้น และสร้างความสมดุลให้กับระบบนิเวศน์ (ไววุฒิ และคณะ, 2557) โดยความเป็นรูพรุนสามารถวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) โดยกล้องจุลทรรศน์นี้ใช้ศึกษาการดูภาพพื้นผิวตัวอย่างทางกายภาพ ดังภาพที่ 15 โดยทั่วไปใช้ในการศึกษางานด้านวิศวกรรมศาสตร์งานทางด้านฟิสิกส์เชิงวัสดุศาสตร์ รวมถึงงานด้านเคมีพอลิเมอร์

อุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ และงานวิจัยเชิงชีวภาพ เช่น ด้านชีววิทยา และสิ่งแวดล้อมเพื่อการจัดจำแนก และระบุสิ่งมีชีวิตชนิดใหม่ ๆ ที่ยังไม่ถูกค้นพบ งานทางด้านจุลชีววิทยาเพื่อศึกษาเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ งานด้านชีวเคมีและเภสัชวิทยาในเชิงตรวจสอบฤทธิ์ของสารตัวอย่างที่มีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรครวมถึงการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่พบในสิ่งมีชีวิต (บวรกิตดี และคณะ, 2557)



ภาพที่ 15 ลักษณะของถ่านชีวภาพชานอ้อยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: เบนจพร (2557)

การตรวจสอบเอกสาร

Yan et al. (2017) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าของมูลวัวและลักษณะของถ่านชีวภาพ โดยใช้อุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสคือ 300, 400, 500 และ 700 °C เป็นเวลา 2 h นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 400 °C ยังมีการใช้เวลา 0.5 และ 1 h โดยใช้ตัวอย่าง B300, B400, B500, B700, B400-0.5 และ B400-1 จากการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพมีร้อยละผลผลิตถ่านอยู่ในช่วง 37%-58% เมื่ออุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ได้ร้อยละผลผลิตลดลง และมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบแยกธาตุที่อุณหภูมิ 700 °C มีปริมาณคาร์บอนสูงสุดคือ 52.85% โดยปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเซลลูโลสและลิกนินให้เป็นคาร์บอน ลักษณะรูพรุนของถ่านชีวภาพมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.01-1 µm พื้นที่รูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 1.29 m²/g เป็น 12.82 m²/g และมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.60 cm³/g เป็น 0.78 cm³/g ความเป็นรูพรุนจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ

เพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสอาจเป็นการทำลายลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวลดลง ซึ่งลักษณะรูพรุนนี้มีความสำคัญในการกักเก็บแร่ธาตุในดินและน้ำ เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านชีวภาพคือที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 1-2 h เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่สูงเหมาะต่อการผลิตเป็นถ่านชีวภาพ

Xin et al. (2017) ศึกษาการประเมินศักยภาพถ่านชีวภาพของของเสียจากปาล์มน้ำมันด้วยไพโรไลซิสแบบช้า โดยศึกษาลักษณะเคมีความร้อนและกลไกการเกิดไพโรไลซิส โดยใช้ส่วนผสมปาล์มน้ำมัน 3 ส่วน คือ กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และกากปาล์ม อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน พบว่ากากปาล์มมีร้อยละผลผลิตสูงสุด รองลงมาคือกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่าซึ่งมีค่า 79.16%, 37.07% และ 35.14% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพคือ 27.50, 26.18 และ 9.80 MJ/kg กะลาปาล์มมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ทะลายปาล์มเปล่า และกากปาล์ม ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีในส่วนประกอบของปาล์มประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม และซิลิกอน นอกจากนี้ยังพบแมกนีเซียม ฟอสเฟต ซัลเฟอร์ คลอไรด์ โพแทสเซียม แคลเซียม และเหล็ก เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดเถ้า ถ่านชีวภาพจากกะลาปาล์มมีคาร์บอนคงตัวสูงสุด รองลงมาได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า และกากปาล์ม ซึ่งมีค่า 59.92%, 53.78% และ 21.37% ในการศึกษาผลของการสูญเสียมวลเนื่องจากความร้อนจากการวิเคราะห์ thermogravimetric (TG) พบว่าที่อุณหภูมิ 200 °C จะมีการสูญเสียมวลจากการลดความชื้นในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C เป็นช่วงการสลายตัวของสารระเหยที่เป็นของประกอบของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 500 °C จะมีการสูญเสียมวลอย่างช้า ๆ เนื่องจากการแตกตัวของลิกนินที่เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของพันธะเคมีทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น ในการผลิตถ่านชีวภาพนี้ กะลาปาล์มและทะลายปาล์มเปล่าจึงเป็นวัสดุที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพได้ เนื่องจากมีคาร์บอนคงตัวที่สูง

Dengyu et al. (2016) ศึกษาอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีผลต่อความเสถียรภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในกระบวนการคือ 300, 400, 500, 600 และ 700 °C เป็นระยะเวลาเวลา 30 min ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ถ่านชีวภาพที่ได้มีร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง 31.8-53.62% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้ปริมาณถ่านชีวภาพลดลง จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีแบบแยกธาตุถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นจาก 48.13% เป็น 86.34% เนื่องจากการสูญเสียมวลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อุณหภูมิไพโรไลซิสจึงมีผลต่อความเสถียรภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน สังเกตได้จากอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น เกิดจากปริมาณออกซิเจนลดลงจากกลุ่มฟังก์ชันของสารประกอบทำให้มีการสูญเสียคาร์บอนจาก 16.52% เป็น 6.69% เนื่องจากการแตกตัวของสารจำพวกเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นสารระเหยและคาร์บอนที่

ไม่เสถียร อย่างไรก็ตามการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ก็เป็นการทำให้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และถ่านชีวภาพที่ได้มีความเสถียรภาพสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส

Ying et al. (2012) ศึกษาถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการดูดซับและการละลายของไนเตรท แอมโมเนียม และฟอสเฟตในดินทราย โดยใช้ซานอ้อย เปลือกถั่ว ไม้เปเปอร์บาซิล และไม้ไผ่ อุณหภูมิไพโรไลซิส 300, 450 และ 600 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ถ่านชีวภาพที่ได้มีร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง 21.7-51.5% องค์ประกอบของถ่านชีวภาพประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (56.4%-86.4%) ออกซิเจน (10.0%-36.7%) ไฮโดรเจน (1.4%-5.6%) ไนโตรเจน (0.1%-1.6%) และ ฟอสเฟต (0.03%-0.05%) ในการทดสอบการดูดซับไนเตรท แอมโมเนียม และฟอสเฟต ซานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 °C มีความสามารถดูดซับไนเตรทได้ดีที่สุด คือ 3.7% ในการดูดซับแอมโมเนียมไม้เปเปอร์บาซิลที่อุณหภูมิ 450 °C สามารถดูดซับได้ดีที่สุดคือ 15.7% และในการดูดซับฟอสเฟตซานอ้อยที่อุณหภูมิ 450 °C สามารถดูดซับได้ดีที่สุดคือ 3.1% ความสามารถในการดูดซับนี้เกิดจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวในการกักเก็บมากทำให้สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี

Asli et al. (2016) ศึกษาชนิดของวัตถุดิบและอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้ชีวมวล 4 ประเภท ได้แก่ วัสดุทางการเกษตรคือเถาว์องุ่น ของเสียที่ได้จากสัตว์คือกากน้ำชะในฟาร์มไก่ ของเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตรคือกากสับ และสาหร่าย อุณหภูมิไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 250-600 °C ระยะเวลา 30 min ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน พบว่าถ่านชีวภาพมีร้อยละผลผลิตถ่านอยู่ในช่วง 33%-56% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจะทำให้ร้อยละผลผลิตถ่านและ Energy yield ลดลง เนื่องจากการสลายตัวของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลมีปริมาณลดลง ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้นโดยเถาว์องุ่นที่อุณหภูมิ 600 °C มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือ 76.4% ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 13-27.25 MJ/kg จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเกษตร พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส เนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูง เช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าการนำไฟฟ้านี้เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงการสะสมของปุ๋ย หากมีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะเป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตพืชจากการตรึงน้ำ เกลือ และความไม่สมดุลของธาตุอาหาร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1.5 dS/m ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกซึ่งเป็นค่าที่สำคัญในแลกเปลี่ยนประจุของแร่ธาตุอาหารในดินลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 29.2-51.1 cmol/kg เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส ความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพพบว่ามีพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวรูพรุนอยู่ในช่วง 1.2-8.1 m²/g ซึ่งเกิดจากปริมาณสารระเหยลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสทำให้ได้พื้นที่ผิวรูพรุนมากขึ้น

Evita et al. (2013) ประเมินอุณหภูมิและระยะเวลากระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสีย พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อร้อยละ

ผลผลิตถ่านชีวภาพ โดยอุณหภูมิไพโรไลซิส 300 °C มีร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพสูง ในขณะที่เดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ทำการชุบ K_2CO_3 มีพื้นที่รูพรุนเพิ่มสูงขึ้น (90 m^2/g) ส่งผลให้ถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียมีศักยภาพในการปลดปล่อยโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสช่วยให้มีการปลดปล่อยโลหะหนักดีกว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ชุบสารเคมี เมื่อนำมาใช้กับดินจึงไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่การชุบ K_2CO_3 และ H_3PO_4 จะช่วยเพิ่มการละลายของโลหะหนักสามารถลดความเข้มข้นของความสกปรก ทำให้มีการปลดปล่อยโพแทสเซียม 85.7% ถ่านชีวภาพสามารถดูดซับ As(V) และ Cr(II) ส่งผลให้กำจัด Cr(II) ได้ 70% ในขณะที่กำจัด As(V) ได้ 30% ดังนั้นถ่านชีวภาพจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดประจุบวกมากกว่าประจุลบในสารละลาย

Jie et al. (2015) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสต่อร้อยละผลผลิตถ่านและลักษณะพื้นฐานของถ่านชีวภาพจากฟางข้าว และลิกโนเซลลูโลส พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้ค่า pH ปริมาณเถ้า คาร์บอนเสถียร และปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณของไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ของสารระเหยลดลง การศึกษาจากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดพบว่าถ่านชีวภาพมีรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนแก่ชนิดวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน และไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

Estela et al. (2018) ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงดินทรายที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่ำ โดยใช้ชีวมวลจากของเสีย ได้แก่ เปลือกมะพร้าว เปลือกส้ม ทะลายปาล์ม กากอ้อย ผักตบชวา และเศษผงถ่าน โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 350 °C ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 45%-60% รูพรุนของถ่านชีวภาพมีความกว้างน้อยกว่า 10 μm ซึ่งความเป็นรูพรุนนี้มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการอุ้มน้ำ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพช่วยให้มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเพิ่มสูงขึ้น

Ioanna et al. (2016) ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากสภาพไพโรไลซิสของชีวมวลปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสโดยจุลินทรีย์ที่กักเก็บฟอสฟอรัสให้แก่พืชเพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช โดยใช้ชีวมวลจาก แกลบ กากองุ่น และกิ่งตัดแต่งจากต้นมะกอก อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 และ 500 °C เมื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้กับดินพบว่าที่มีค่า pH ต่างกัน จากการศึกษาพบว่าดินที่ผสมถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากถ่านชีวภาพอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับดินควบคุม โดยกากองุ่น และแกลบที่เผาที่ 500 °C มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ 300 °C ในขณะที่ถ่านชีวภาพจากกิ่งตัดแต่งต้นมะกอกของทั้ง 2 อุณหภูมิของไพโรไลซิสมีแนวโน้มคล้ายกัน ดังนั้นการใช้ถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงหน้าที่เป็นแหล่งของกักเก็บฟอสฟอรัสสามารถใช้งานทางการเกษตร และปรับปรุงการเจริญเติบโตของพืชได้

Dilek (2013) ศึกษาอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่อผลผลิต คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และสัญญาณวิทยาของชีวเคมีจากเมล็ดดอกคำฝอยโดยอุณหภูมิที่ไพโรไลซิสที่ 400, 450, 500, 550 และ 600 °C ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น (80.70%) คาร์บอน (73.75%) และค่าความร้อนที่สูงขึ้น (30.27 MJ/kg) เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น เกิดจากสารระเหยลดลง (9.80%) ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวลดลง (1.89–4.23 m²/g) ถ่านชีวภาพนี้สามารถใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงและเป็นถ่านกัมมันต์ในการบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์ได้

เบญจพร (2557) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยใช้ชีวมวลจากกากเมล็ดมะเขายาหิน ชานอ้อย และผักตบชวา อุณหภูมิไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 400-650 °C ระยะเวลา 1-3 h ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 1 h สามารถผลิตถ่านชีวภาพจากกากเมล็ดมะเขายาหินได้สูงสุดคือ 53.33% และสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้ 57.80% โดยน้ำหนัก ค่าความร้อนสูงสุดคือ 35.83 MJ/kg ปริมาณคาร์บอนคงตัวคือ 21.30% การทดสอบหาค่าเลขไอโอดีน พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากผักตบชวามีค่าเลขไอโอดีนสูงสุดคือ 330.0 mg เนื่องจากถ่านชีวภาพมีโครงสร้างทางจุลภาคที่มีความพรุนสูง ในการพิจารณาเชิงการนำไปใช้เป็นพลังงาน การผลิตถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดมะเขายาหินมีความเหมาะสมมากที่สุด เพราะสามารถผลิตถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพได้ปริมาณมากที่สุด อีกทั้งต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดมะเขายาหินซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,585.99 Baht·kg/year คิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยประมาณ 136.61 Baht/kg ซึ่งมีการเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่าชีวมวลอีก 2 ชนิด

กันยาพร และสิทธิบุรณ์ (2559) วิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยใช้อุณหภูมิ 300-600 °C เป็นระยะเวลา 1-2.5 h ขนาดของวัตถุดิบในช่วง น้อยกว่า 2 cm ระหว่าง 2-3 cm และช่วงมากกว่า 3 cm ขึ้นไป จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ 26.33%-61.33% การพิจารณาความเหมาะสมของการนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานโดยการวิเคราะห์ค่า Energy recovery พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 400 °C วัตถุดิบขนาด 1-2 cm และการรักษาช่วงเวลาของช่วงอุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 2.5 h จะให้ค่า Energy Recovery สูงถึง 51.54% ความเหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยพิจารณาจากผลด้านการปรับปรุงคุณภาพของดินจากสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการดูดซับไนโตรเจนในดิน และการพิจารณาความสามารถด้านการกักเก็บคาร์บอนในดิน โดยพิจารณาสัดส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพจากค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน และคาร์บอนคงตัว พบว่าการผลิตในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสช่วง 600 °C โดยใช้ขนาดของวัตถุดิบที่เลือกใช้ประมาณ 1-2 cm และเวลาในการรักษาช่วงอุณหภูมิ

สุดท้ายประมาณ 1 h จะทำให้ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำที่สุด และให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด ประมาณ 90.42% เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นช่วงการควบคุมการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน รวมถึงการกักเก็บคาร์บอนในดินอีกด้วย

กฤตญา และคณะ (2556) ทดสอบเตาไพโรไลซิสแบบช้าสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ อุณหภูมิทดสอบอยู่ในช่วง 250-400 °C โดยใช้ชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด เปลือกกาแฟ และกระบก พบว่าที่อุณหภูมิ 250 °C กระบกจะให้ปริมาณถ่านสูงที่สุด รองลงมาคือ เปลือกกาแฟ และชังข้าวโพด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 80, 62 และ 60 เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพพบว่าที่ 400 °C จะให้ค่าความร้อนมากที่สุด โดยกระบกจะมีค่าความร้อนมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชังข้าวโพด และเปลือกกาแฟ มีค่าเท่ากับ 9,049.90, 4,333.43 และ 3,599.76 kcal/kg ตามลำดับ การตรวจวัดค่าการดูดซับปริมาณไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านชีวภาพ ที่บ่งบอกถึงความสามารถการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก หรือลักษณะความพรุนของถ่านชีวภาพ ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้าพบว่า ถ่านทั้ง 3 ชนิดมีค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดและกระบก

อุศราวดี (2558) ศึกษาการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้จากการกระบวนการแยกสลายชังข้าวโพดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเทอร์รี่แพกซ์ 300 °C อุณหภูมิไพโรไลซิส 450, 500 และ 550 °C ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน พบว่าที่อุณหภูมิ 450 °C ระยะเวลา 30 min เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพซึ่งให้ร้อยละผลผลิตถ่าน 32.2% ปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 66.95% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้ปริมาณถ่านลดลง ค่าความร้อนที่ได้จากถ่านชีวภาพมีค่าอยู่ระหว่าง 23.12–29.91 MJ/kg ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่สูงเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับ 2.42 m²/g ซึ่งไม่เหมาะต่อการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ แต่สามารถใช้ผสมกับปุ๋ยเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กที่มีรัศมีขนาดเล็กกว่า 5,390.9 Å และมีปริมาณรูพรุน 0.01147 cc/g นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 30 min จะทำให้ได้ของเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณถ่านลดลง ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการไพโรไลซิสจึงเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

เสาวคนธ์ (2557) ศึกษาการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินเพื่อปรับปรุงดินในนาข้าว เพื่อศึกษาผลของการใส่ถ่านต่อการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของข้าว รวมทั้งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน โดยปลูกข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในเรือนทดลอง วิธีในการทดลองประกอบด้วย 4 วิธี ได้แก่ 1) ดินอย่างเดียว 2) ปุ๋ยเคมี 3) ถ่านไม้ผุ และ 4) ถ่านแกลบ ซึ่งถ่านไม้ผุและแกลบได้จากการเผาถ่านของเตา 200 L มีอุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 80-440 °C จากการศึกษาพบว่าถ่าน

ไม้ไผ่มีค่า pH สูงกว่าถ่านแกลบ ในขณะที่ค่า CEC ต่ำกว่าถ่านแกลบ เนื่องจากถูกเผาด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ข้าวเมื่ออายุ 30 วันหลังปักดำ พบว่าถ่านแกลบให้น้ำหนักแห้งของข้าวสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมี ($p < 0.01$) เมื่ออายุ 60 วันหลังปักดำ การใส่ปุ๋ยเคมีมีความสูงจำนวนหน่อตอกอ และน้ำหนักแห้งของข้าวสูงกว่าการใส่ถ่านไม้ไผ่ และถ่านแกลบ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยเคมีในนาข้าวจะถูกใช้ช่วงหลังจาก 30 วันหลังปักดำ เมื่อระยะเก็บเกี่ยว พบว่าการวิธีที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีน้ำหนักแห้งต้นข้าว และน้ำหนักแห้งทั้งหมดสูงสุด แต่ไม่มีความแตกต่างของผลผลิตข้าวในระหว่างวิธีการทดสอบ อย่างไรก็ตามค่า HI และ NUE ในการใส่ถ่านไม้ไผ่ และถ่านแกลบสูงกว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยเคมี ($p < 0.01$) จากผลการศึกษานี้มีแนวโน้มให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีที่เหมาะสมจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และผลผลิตข้าวได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีในนาข้าวเพียงอย่างเดียว



ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัย	ชีวมวล	เทคนิคโวลีย์	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	การวิเคราะห์	ร้อยละผลผลิต (%)	การใช้งาน
Yan et al. (2017)	มูลวัว	เตาปฏิกรณ์	300-700	120	-	- คุณสมบัติทางเคมี - ความเป็นรูปพรุน - หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ	37-58	ภาคเกษตร
Xin et al. (2017)	กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า กากปาล์ม	เตาปฏิกรณ์	500	-	N ₂	- ความเป็นรูปพรุน (SEM) - ส่วนประกอบของลิกโน- เซลลูโลส - การวิเคราะห์โดยประมาณ - ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ - ค่าความร้อน - การวิเคราะห์ทางเคมี - หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ (FTIR) - ผลของอัตราความร้อนของ กราฟ TG และ DTG - กลไกของปฏิกิริยาไพโรไลซิส	35.14-79.16	พลังงาน

ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

นักวิจัย	ชีวมวล	เทคนิคโวลีย์	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	การวิเคราะห์	ร้อยละ ผลผลิต (%)	การใช้งาน
Dengyu et al. (2016)	ไม้ไผ่	เตาปฏิกรณ์	300-700	30	N ₂	- ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ - องค์ประกอบทางเคมี - หมู่ฟังก์ชันสารประกอบ (FTIR) - ความเสถียรภาพปฏิกิริยา ออกซิเดชันของถ่านชีวภาพ	31.8-53.62	-
Ying et al. (2012)	ชานอ้อย เปลือกถั่ว ไม้แปเปอร์บาคิล ไม้ไผ่	เตาปฏิกรณ์	300-600	30-90	N ₂	- คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี - การดูดซับไนเตรท แอมโมเนียม และฟอสเฟต - การปลดปล่อยสารอาหารในดิน	21.7-51.5	ภาคเกษตร
Asli et al. (2016)	เถาว์อู่น กากน้ำชะฟาร์มไก่ กากสัสม สาหร่าย	เตาปฏิกรณ์	250-600	30	N ₂	- คุณสมบัติทางกายภาพ - ความเสถียรภาพของคาร์บอน - pH - EC - CEC - พื้นที่รูพรุน (BET)	33-56	ภาคเกษตร

ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

นักวิจัย	ชีวมวล	เทคนิคโบลี	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	การวิเคราะห์	ร้อยละผลผลิต (%)	การใช้งาน
Evita et al. (2013)	กากตะกอนน้ำเสีย	เตาปฏิกรณ์	300-500	30-90	N ₂	- ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ - คุณสมบัติทางกายภาพ - การวิเคราะห์โลหะหนัก - คุณสมบัติทางเคมี - พื้นที่รูพรุน (BET)	14.60-35.20	-
Jie et al. (2015)	ฟางข้าวสาลี ลิกโนเซลโฟเซต	เตาปฏิกรณ์	200-600	60-240	-	- ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ - คุณสมบัติทางกายภาพ - องค์ประกอบทางเคมี - pH - ความเป็นรูพรุน SEM	30.89-84.95	-
Estela et al. (2017)	เปลือกมพร้าว เปลือกส้ม ทะเลลายปาล์ม กากอ้อย ผักตบชวา เศษผงถ่าน	เตาปฏิกรณ์	350	60	-	- องค์ประกอบทางเคมี - pH - ความสามารถในการอุ้มน้ำ - CEC - พื้นที่รูพรุน (SEM)	-	ภาคเกษตร

ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

นักวิจัย	ชื่อรวม	เทคโนโลยี	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	การวิเคราะห์	ร้อยละผลผลิต (%)	การใช้งาน
Ioanna (2016)	กากองุ่น จากโรงไวน์	เตาปฏิกรณ์	300-500	60	N ₂	- pH - EC - คาร์บอนของถ่านชีวภาพ - ไนโตรเจนของถ่านชีวภาพ - แร่ธาตุในดิน	-	ภาคเกษตร
Dilek (2013)	เมล็ดดอก คำฝอย	เตาปฏิกรณ์	400-600	-	-	- ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ - คุณสมบัติทางกายภาพ - ความเป็นรูพรุน (BET และ SEM) - องค์ประกอบธาตุ - ค่าความร้อน	29.70-34.14	-
เบญจพร (2557)	กากเมล็ดมะเข่า หิน ขาน้อย ฝักตบชวา	เตาปฏิกรณ์	400-650	60-180	N ₂	- วิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี - ความเป็นรูพรุน (SEM) - ค่าการดูดซับไอโอดีน - ค่าความร้อน	สูงสุด 53.33	พลังงาน

ตารางที่ 7 การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

นักวิจัย	ชีวมวล	เทคนิคโบลี	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	การวิเคราะห์	ร้อยละผลผลิต (%)	การใช้งาน
กันยาพร และสิทธิบูรณ์ (2559)	ซังข้าวโพด	เตาปฏิกรณ์	300-600	60-210	N ₂	- การวิเคราะห์โดยประมาณ - ค่าความร้อน - ความหนาแน่น - pH - C/N ratio	31.33	พลังงาน ภาคเกษตร
กฤษฎา และคณะ (2556)	ซังข้าวโพด กะลากาแฟ กระบอก	เตาปฏิกรณ์	250-400	-	-	- การวิเคราะห์ทางกายภาพ - ค่าความร้อน - การดูดซับไอโอดีน	60-80	พลังงาน ภาคเกษตร
อุศราวดี (2558)	ซังข้าวโพด	เตาปฏิกรณ์	450-550	30-120	N ₂	- การวิเคราะห์ทางกายภาพและ ทางเคมี - ความเป็นรูพรุน (BET) - ค่าความร้อน	32.2	พลังงาน
เสาวคนธ์ (2557)	ไม้ไผ่ แกลบ	เตา 200 L	440	-	-	- pH - C.E.C. - C/N ratio - การเติบโตของพืช	-	ภาคเกษตร

การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 7 พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตร อุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 250-700 °C ระยะเวลาที่ใช้อยู่ในช่วง 30-240 min จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการไพโรไลซิสส่งผลให้ร้อยละผลผลิตถ่านลดลง เนื่องจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในขณะเดียวกันก็ทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านกายภาพ ด้านเคมี ค่าความร้อน ส่วนในด้านการเกษตร ได้ทำการวิเคราะห์ความเป็นรุกรานของถ่าน ความเป็นกรด-ด่าง ค่าการดูดซับไนเตรท แอมโมเนียม ฟอสเฟต และไอโอดีน นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์การปลดปล่อยสารอาหารในดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำ การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ค่าการนำไฟฟ้าของดิน และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน สำหรับแก้ปัญหาให้ดินเสื่อมโทรม โดยนำชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นสาเหตุการเผาและปัญหาหมอกควันมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม อีกทั้งยังได้ศึกษาคุณสมบัติทางของถ่านชีวภาพทั้งทางด้านพลังงาน และด้านการเกษตร โดยมีรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ แสดงดังต่อไปนี้

วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยชีวมวล ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพด อุปกรณ์และเครื่องมือ ได้แก่ เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบและแบบละเอียด ตะแกรงร่อน เครื่องไพโรไลซิสแบบ Lab Scale เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนําร่อง (Pilot Scale) และอุปกรณ์วิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพทางด้านพลังงาน และทางด้านเกษตร รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชีวมวล

ชีวมวลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย แกลบ และซังข้าวโพด ดังภาพที่ 16 และ 17 ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณสูงในเขตภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบด้วยแกลบ และซังข้าวโพดมีคุณสมบัติความชื้นอยู่ในช่วง $6.38 \pm 0.05\%$ - $11.45 \pm 0.16\%$ สารระเหยอยู่ในช่วง $69.58 \pm 2.28\%$ - $83.23 \pm 2.19\%$ เถ้าอยู่ในช่วง $2.40 \pm 0.66\%$ - $17.92 \pm 0.36\%$ และคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง $2.502.66\%$ - $6.122.01\%$ จากการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ในด้านค่าความร้อนแกลบและซังข้าวโพดมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 14.96 ± 33.00 - 16.86 ± 35.00 MJ/kg ตามลำดับ รายละเอียดดังตารางที่ 8 ในการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของแกลบและซังข้าวโพด มีสัดส่วนปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง $39.60 \pm 0.17\%$ - $44.76 \pm 0.04\%$ ปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง $38.53 \pm 0.10\%$ - $43.99 \pm 0.41\%$ ปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วง $0.35 \pm 0.00\%$ - $0.52 \pm 0.00\%$ และมีปริมาณไฮโดรเจนอยู่ในช่วง $5.29 \pm 0.02\%$ - $5.89 \pm 0.02\%$ รายละเอียดดังตารางที่ 9



ภาพที่ 16 แกลบ



ภาพที่ 17 ชั่งข้าวโพด

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนของชีวมวล

การวิเคราะห์	แกลบ	ชั่งข้าวโพด
ความชื้น (%)	6.38±0.05	11.45±0.16
สารระเหย (%)	69.58±2.28	83.23±2.19
เถ้า (%)	17.92±0.36	2.40±0.66
คาร์บอนคงตัว (%)	6.12±2.01	2.91±2.66
ค่าความร้อน (MJ/kg)	14.96±33.00	16.86±35.00

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของชีวมวล

การวิเคราะห์	แกลบ	ซังข้าวโพด
คาร์บอน (%)	39.60±0.17	44.76±0.04
ออกซิเจน (%)	38.53±0.41	43.99±0.41
ไนโตรเจน (%)	0.35±0.00	0.52±0.00
ไฮโดรเจน (%)	5.29±0.02	5.89±0.02
ซัลเฟอร์	0.03±0.00	0.04±0.00

2. เครื่องมือสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ

2.1 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ ดังภาพที่ 18 เป็นเครื่องบดย่อยชีวมวลประเภทที่มีความแข็งแรงและเป็นเส้นใย ประเภทซังข้าวโพด ต้นข้าวโพด ฟางข้าว เป็นต้น ในขั้นตอนการบดชีวมวลจะถูกป้อนจากด้านบนลงสู่ในส่วนของกรบดย่อย โดยภายในส่วนของกรบดย่อยจะมีใบมีด 4 ใบ ในการบด สับ ผสม และตีชีวมวลให้เป็นชิ้นเล็ก หลังจากการบดย่อยชีวมวลจะผ่านตะแกรงขนาด 10 mm เพื่อคัดกรองให้ชีวมวลมีขนาดเล็กก่อนที่ชีวมวลจะออกจากเครื่องบดย่อย โดยเครื่องบดย่อยนี้ได้รับกำลังมาจากสายพานแบบร่อนวี มีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 1.1 hp แรงดันไฟฟ้า 220 V



ภาพที่ 18 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบหยาบ

2.2 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด

เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด ดังภาพที่ 19 ใช้สำหรับบดย่อยชีวมวลที่มีขนาดเล็กกว่า 3 mm ชีวมวลที่ผ่านเครื่องบดย่อยนี้จะมีขนาด 0.5-3.0 mm เครื่องบดย่อยนี้ใช้สำหรับบดย่อยชีวมวลที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพดที่ผ่านการบดย่อยแบบหยาบแล้ว เครื่องบดย่อยแบบหยาบนี้มีมอเตอร์ขนาด 2.2 hp แรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้สานพานในการส่งกำลัง ภายในเครื่องบดย่อยมีชุดตีและบดชีวมวลทั้งหมด 4 ชุด สามารถเปลี่ยนตะแกรงกรองชีวมวลได้ 2 ขนาด คือ ขนาด 3 mm และ 1 mm



ภาพที่ 19 เครื่องบดย่อยชีวมวลแบบละเอียด

2.3 ตะแกรงร่อนคัดขนาดชีวมวล

ตะแกรงร่อนคัดขนาดชีวมวล ดังภาพที่ 20 ตะแกรงร่อนคัดขนาดชีวมวล ทำจากอะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ความกว้าง 550 mm ความยาว 700 mm และความสูง 100 mm และมีรูตะแกรงขนาด 3 mm สามารถคัดขนาดชีวมวลที่อยู่ในช่วง 0-3 mm



ภาพที่ 20 ตะแกรงร่อนคัดขนาดชีวมวล

2.4 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale

เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale หรือเครื่องทดสอบกระบวนการไพโรไลซิส ดังภาพที่ 21 มี 4 ส่วน ประกอบด้วย ชุดห้องเชื้อเพลิง ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดระบบความร้อน และชุดป้อนก๊าซ ไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งก๊าซจะถูกป้อนเข้าด้านบนสุดของท่อสแตนเลส และไหลลงสู่ด้านล่างของท่อสแตนเลส ดังภาพที่ 30 ไดอะแกรมเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale แสดงดังรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 21 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale

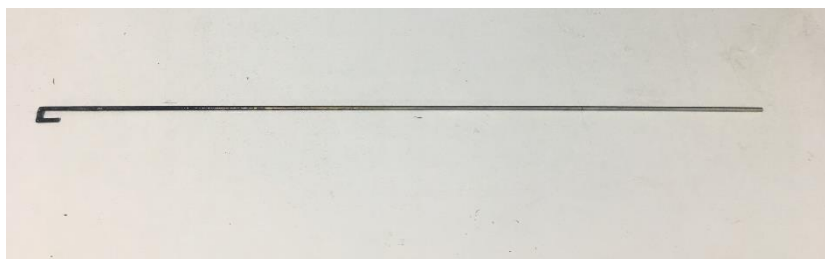
2.4.1 ชุดห้องเชื้อเพลิง ภายในความกว้าง 28 cm ยาว 15 cm สูง 36 cm ภายนอกกว้าง 52 cm ยาว 33 cm สูง 56 cm ทำจากปูนซีเมนต์และฉนวนใยแก้ว ภายในห้องเชื้อเพลิงมีขดลวดในการให้ความร้อน และมีท่อสแตนเลสอยู่กึ่งกลางห้องเชื้อเพลิงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.15 cm ภายนอก 7.98 cm ยาว 80 cm ดังภาพที่ 22 ภายในมีกระบอบบรรจุเชื้อเพลิงเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm ยาว 17.8 cm และหูจับยาว 9.5 cm ดังภาพที่ 23 คล้องกับแท่งสแตนเลสยาว 102 cm ใช้สำหรับเลื่อนระดับกระบอบเชื้อเพลิงขึ้น-ลง ภายในห้องเผาไหม้ ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 22 ห้องเชื้อเพลิง



ภาพที่ 23 กระบอบเชื้อเพลิง



ภาพที่ 24 แท่งสแตนเลสคล้องกระบอกล้อเชื้อเพลิง

2.4.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังภาพที่ 25 เป็นควบคุมไฟฟ้าในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดห้องเผาไหม้ โดยมี Power Regulator เป็นตัวควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้า input ได้ 4-20 A และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K วัดอุณหภูมิภายในท่อสแตนเลส



ภาพที่ 25 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

2.4.3 ชุดระบายความร้อน เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนของเครื่อง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกขนาด 7.15 cm และ 10 cm ตามลำดับ มีความยาว 30 cm มีสายยางทางน้ำเข้าอยู่ด้านบน และน้ำออกอยู่ด้านล่าง ดังภาพที่ 26 ด้วยปั๊มน้ำขนาดมอเตอร์ 0.5 hp แรงดันไฟฟ้า 220 V จากแทงก์น้ำไปยังชุดระบายความร้อน ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 26 ชุดระบายความร้อน



ภาพที่ 27 ชุดระบายความร้อน และชุดป้อนน้ำมอเตอร์

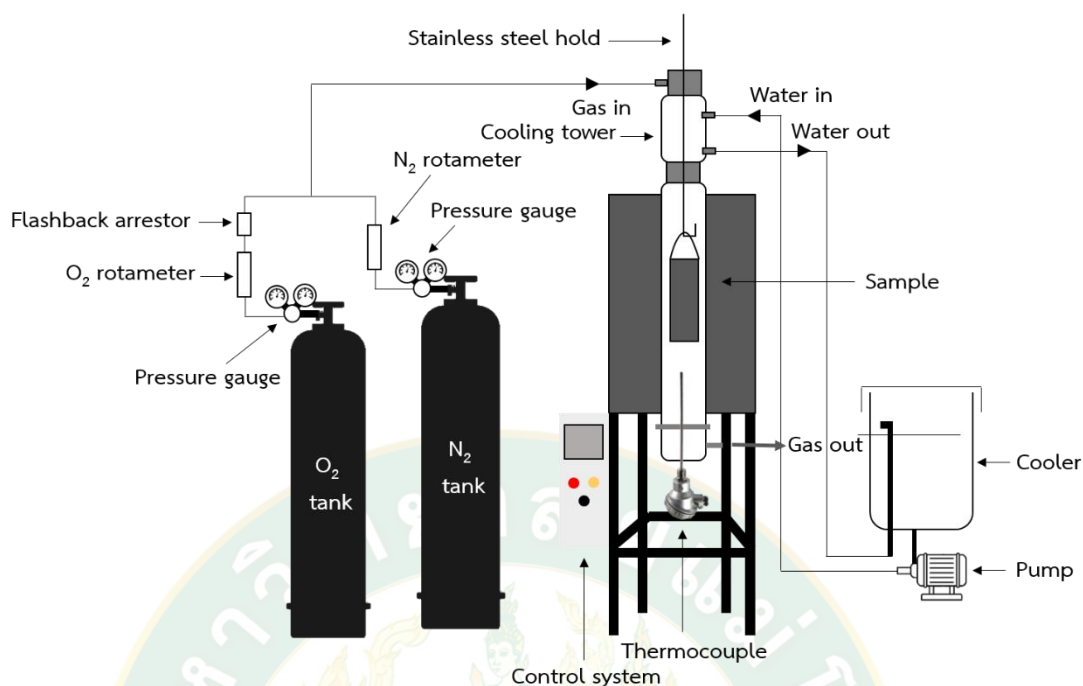
2.4.4 ชุดป้อนก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน ประกอบด้วย ถังก๊าซไนโตรเจนควบคุมแรงดันออกจากถังด้วยเกจไนโตรเจน ก๊าซถังออกซิเจนควบคุมแรงดันออกจากถังด้วยเกจออกซิเจน ดังภาพที่ 28 โดยใช้โรตารีเตอร์อากาศขนาด 100-1,000 LPH ยี่ห้อ K-Well สำหรับควบคุมปริมาณก๊าซให้มีอัตราการไหลก๊าซไนโตรเจนที่ 5 L/min และโรตารีเตอร์อากาศขนาด 0.3-3 LPM ยี่ห้อ K-Well สำหรับควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนให้มีอัตราการไหลก๊าซออกซิเจนที่ 0.5 L/min ในการป้อนก๊าซออกซิเจนจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันก๊าซออกซิเจนย้อนกลับเข้าถังก๊าซ (FLASHBACK ARRESTOR) ขนาด 9/16 แรงดัน 210 psi ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 เกจก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน



ภาพที่ 29 โรตاميเตอร์อากาศขนาด 100-1,000 LPH และ 0.3-3 LPM และอุปกรณ์ป้องกัน
ก๊าซออกซิเจนย้อนกลับเข้าถังก๊าซ



ภาพที่ 30 ไดอะแกรมเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Lab Scale

2.5 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนำร่อง (Pilot Scale)

เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนำร่อง (Pilot Scale) ดังภาพที่ 31 ใช้สำหรับวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานและต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้หลักการการให้ความร้อนจากภายนอกในสถานะจำกัดก๊าซออกซิเจน โดยใช้ก๊าซหุงต้มที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเวิร์ดแก๊ส (world gas) ขนาด 15 kg เป็นแหล่งความร้อน ในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเชื้อเพลิงจะได้รับความร้อนพร้อมทั้งมีการหมุนของห้องเผาไหม้ โดยได้รับกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 0.75 hp แรงดันไฟฟ้า 220 V อัตราการหมุน 1,430- 1,720 rpm ด้านหน้าของห้องเผาไหม้จะติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ (Data Logger Thermometer) ยี่ห้อ LT Lutron รุ่น TM-947SD สำหรับอ่านอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K พร้อมทั้งติดตั้งชุดป้อนก๊าซไนโตรเจน เพื่อป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าไปยังห้องเผาไหม้ ข้อดีของเครื่องนี้คือ ชีวมวลได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและสามารถเป็นต้นแบบในการนำไปขยายการผลิตถ่านชีวภาพในอนาคตได้



ภาพที่ 31 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบ Pilot Scale และเครื่องวัดอุณหภูมิ

2.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนัก เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ CST รุ่น CDR-30 ดังภาพที่ 32 สามารถชั่งน้ำหนักสูงสุดได้ 30 kg ค่าความละเอียด 1 g อุณหภูมิใช้งานที่ 5-40 °C ดังภาพที่ 32 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลเพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 32 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3. อุปกรณ์ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพทางด้านพลังงาน

3.1 เครื่องอบวิเคราะห์ความชื้น

เครื่องอบวิเคราะห์ความชื้น ดังภาพที่ 33 เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าความชื้นของชีวมวล และถ่านชีวภาพ ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UFB500 มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 kW สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดได้ 300 °C ตัวเตาทำจากสแตนเลส ขนาดเครื่องอบภายนอกมีความกว้าง 710 mm ความยาว 550 mm และมีความสูง 760 mm ภายในเครื่องอบมีความกว้าง 560 mm ความยาว 400 mm และมีความสูง 480 mm มีน้ำหนัก 69 kg และมีปริมาตรทั้งหมด 108 L



ภาพที่ 33 เครื่องอบวิเคราะห์ความชื้น

3.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง

เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ CHAVACHOTE ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล และถ่านชีวภาพ ตัวเตาเป็นแบบปิดทำจากอิฐทนความร้อนและครอบด้วยเหล็ก สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุด 1,200 °C ภายนอกมีความกว้าง 450 mm ความยาว 500 mm และมีความสูง 530 mm ภายในมีความกว้าง 170 mm ความยาว 500 mm และมีความสูง 160 mm มีขดลวดเป็นแหล่งให้ความร้อน และมีเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ภายในเตา ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.3 โถดูดความชื้น

โถดูดความชื้น (desiccator) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 30 cm พร้อมฝาปิด เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตมาจากแก้ว ภายในมีแผ่นเซรามิกสำหรับวางตัวอย่าง และมีสารซิลิกาเจลอยู่ด้านล่างของโถดูดความชื้น ซึ่งเป็นสารที่ใช้สำหรับดูดความชื้นออกจากตัวอย่างในการวิเคราะห์ ทำให้ตัวอย่างไม่มีความชื้นหรือน้ำเจือปน ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 โถดูดความชื้น

3.4 ถ้วยกระเบื้อง

ถ้วยกระเบื้อง (crucible porcelain) เป็นถ้วยกระเบื้องเซรามิกพร้อมฝาปิดทรงสูง ปริมาตร 40 ml ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ความสูง 50 mm ดังภาพที่ 36 สามารถทนความร้อนได้ถึง 1,000 °C ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างในการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า



ภาพที่ 36 ถ้วยกระเบื้อง

3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA214 เป็นเครื่องชั่งที่มีความละเอียดตตินิยม 4 ตำแหน่ง พิกัด 210 g ค่าความละเอียด 0.0001 g ภายในมีจานชั่งน้ำหนักขนาด 9 cm ดังภาพที่ 37 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลในการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ และการวิเคราะห์โดยประมาณ หรือการวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียดสูง



ภาพที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

4. อุปกรณ์ทดสอบและเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพทางด้านการเกษตร

4.1 ภาชนะปลูกต้นไม้

ภาชนะปลูกต้นไม้ทำมาจากพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 27 cm สูง 22 cm ใช้สำหรับปลูกต้นคะน้า เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ภาชนะปลูกต้นไม้

4.2 ถาดเพาะต้นกล้า

ถาดเพาะต้นกล้าทำมาจากพลาสติกจำนวน 104 หลุม ใช้สำหรับเพาะต้นกล้าคะน้าก่อนนำไปลงภาชนะ ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ถาดเพาะต้นกล้า

4.4 ดินทดสอบ

ในการทดสอบได้ที่ใช้ดินในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เมื่อตากจนแห้งแล้วดินจะมีลักษณะเป็นสีขาว เนื้อดินมีลักษณะปนทรายมีค่า pH อยู่ที่ 6.76 และค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 29.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ดินทดสอบ

4.5 เครื่องวัดค่า pH และสภาพการนำไฟฟ้า

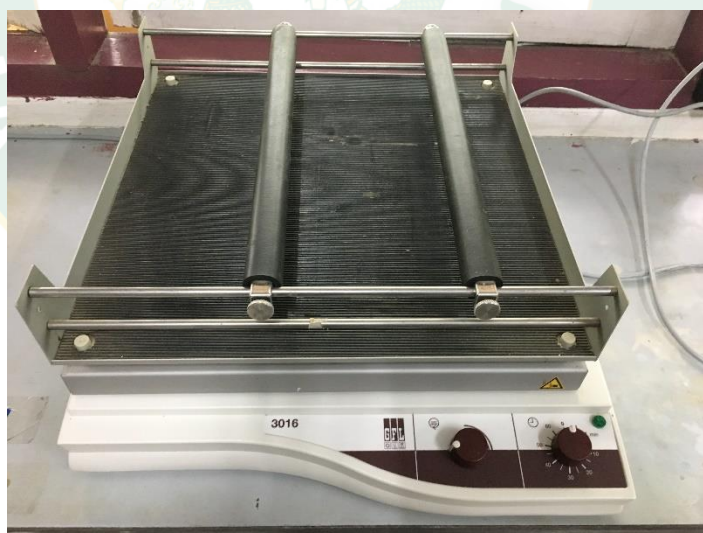
เครื่องวัดค่า pH และสภาพการนำไฟฟ้า (multi-parameter analysis) ยี่ห้อ Consort รุ่น C1010 ใช้สำหรับวัดค่า pH และค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น mS/cm และ $\mu\text{S}/\text{cm}$ โดยใช้หัววัดแยกออกจากกัน ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 เครื่องวัดค่า pH และสภาพการนำไฟฟ้า

4.6 เครื่องเขย่าสารเคมี

เครื่องเขย่าสารเคมี (Shakers) ยี่ห้อ GFL รุ่น 3016 ดังภาพที่ 42 ใช้สำหรับเขย่าดินในการวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเครื่องมีความกว้าง 380 mm ความยาว 510 mm และความสูง 140 mm พิกัดน้ำหนัก 8 kg มีความเร็วรอบ 20-300 rpm



ภาพที่ 42 เครื่องเขย่าสารเคมี

4.7 เครื่องปั่นเหวี่ยง

เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ HERMLE รุ่น Z206A ดังภาพที่ 43 ใช้สำหรับสำหรับเหวี่ยงสารละลายให้ตกตะกอน ควบคุมการทำงานด้วย Microprocessor ผ่านหน้าจอ LED สามารถปรับความเร็วรอบได้ 6,000 rpm สามารถใส่หลอดปั่นได้ 6 หลอด ตัวเครื่องมีความกว้าง 28 cm สูง 26 cm และลึก 37 cm



ภาพที่ 43 เครื่องปั่นเหวี่ยง

4.8 เครื่องกลั่นไนโตรเจน

เครื่องกลั่นไนโตรเจน ยี่ห้อ KJELTEC SYSTEM รุ่น 1002 Distilling Unit ใช้สำหรับกลั่นปริมาณไนโตรเจนโดยใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนแก่สารละลาย เพื่อแยกและกลั่นไนโตรเจนออกมาใช้ในขั้นตอนวิเคราะห์ความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุบวก และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน สำหรับการวิเคราะห์สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 เครื่องกลั่นไนโตรเจน

4.9 เครื่องย่อยไนโตรเจนดินและพีช

เครื่องย่อยไนโตรเจนดินและพีช เป็นเตาเผาที่มีลักษณะเป็นหลุมทำจากปูนซีเมนต์ สามารถใส่หลอดย่อยได้ 56 หลุมแต่ละหลุมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm และลึก 5 cm ตัวเตามีความกว้าง 50 cm ยาว 80 cm และสูง 25 cm มีขดลวดเป็นแหล่งให้ความร้อน และมีเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ภายในเตา ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 เครื่องย่อยไนโตรเจนดินและพีช

วิธีการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิส

การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า เพื่อผลิตถ่านชีวภาพสำหรับใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรม โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่างชีวมวล

การเตรียมตัวอย่างชีวมวลเริ่มจากการนำเอาชีวมวลมาลดขนาดด้วยเครื่องบดย่อยแบบหยาบ และบดย่อยอีกครั้งด้วยเครื่องบดย่อยแบบละเอียด จากนั้นนำชีวมวลมาคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาด 3 mm เพื่อให้ชีวมวลมีขนาดสม่ำเสมอ และจัดเก็บชีวมวลในพื้นที่แห้งเพื่อเตรียมสำหรับทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

2. การทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าใน Lab Scale

เงื่อนไขการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า มีเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

1. เงื่อนไขตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ใช้ชีวมวลที่ประกอบด้วย แกลบประมาณ 60 g/ครั้ง และซังข้าวโพดประมาณ 30 g/ครั้ง
2. เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ใช้อุณหภูมิ ทดสอบทั้งหมด 4 อุณหภูมิ คือ 300, 400, 500 และ 600 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/min
3. เงื่อนไขของระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ใช้ทั้งหมด 3 ระยะเวลา คือ 30, 60 และ 90 min
4. เงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนต่อออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีทั้งหมด 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ 5 L/min และเงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซออกซิเจน 10% ของก๊าซไนโตรเจน โดยก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนใช้อัตราการไหลที่ 5 และ 0.5 L/min ตามลำดับ

3. การทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าด้วยเครื่องไพโรไลซิสแบบนาร่อง

เงื่อนไขการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า มีเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

1. เงื่อนไขตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ใช้ชีวมวลที่ประกอบด้วย แกลบประมาณ 2 kg/ครั้ง และซังข้าวโพดประมาณ 1 kg/ครั้ง
2. เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ใช้อุณหภูมิ 500 °C ที่อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 4-6 °C/min
3. เงื่อนไขของระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า 60 min

4. เงื่อนไขการป้อนก๊าซไนโตรเจนใช้อัตราการไหลของก๊าซ 5 L/min

การทดสอบถ่านชีวภาพด้านพลังงาน

การทดสอบคุณสมบัติถ่านชีวภาพทางด้านพลังงาน ประกอบด้วย การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (Mass yield) การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน (High Heat Value: HHV)

1. การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (Mass yield)

การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (Mass yield) เป็นสัดส่วนของปริมาณถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยร้อยละผลผลิตนี้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และระยะเวลาของกระบวนการ (Velevil et al., 2016) คำนวณได้จากสัดส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพต่อชีวมวลเริ่มต้น ร้อยละผลผลิตถ่านจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการพิจารณาเลือกเงื่อนไขของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมของชีวมวลแต่ละชนิด รวมถึงเลือกเงื่อนไขในการนำถ่านชีวภาพมาใช้ประโยชน์ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 16

$$\text{Mass yield (\%)} = \frac{\text{mass of biochar}}{\text{mass of raw sample}} \times 100$$

สมการที่ 16

2. การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ การวิเคราะห์ความชื้น สารระเหย ปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัว (อิตัญพร, 2551) เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิง ทำให้สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงนั้นได้เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความชื้น

การวิเคราะห์ความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173 เริ่มจากการนำถ่านที่บรรจุในภาชนะไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 30 min เพื่อทำความสะอาดถ่านที่บรรจุ เมื่อเผาเสร็จแล้วนำถ่านที่บรรจุไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น 1 h หรือทิ้งไว้จนเย็น จากนั้นนำถ่านที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 g นำเข้าไปอบในเครื่องอบวิเคราะห์ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C โดยเปิดภาชนะที่บรรจุ เป็นระยะเวลา 3 h หรือชั่งจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ โดยก่อนการชั่งน้ำหนัก

จะต้องนำตัวอย่างมาพักเก็บไว้ในโถดูดความชื้น 1 h หรือทิ้งไว้จนเย็น แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังการอบ สามารถคำนวณความชื้นได้ดังสมการที่ 7

2.2 สารระเหย

การวิเคราะห์สารระเหยตามมาตรฐาน ASTM D 3175 ทำได้โดยใช้ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ความชื้นที่น้ำหนักเริ่มต้น 1 g มาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยปิดฝาด้วยกระเบื้องเพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้เป็นเวลา 6-7 min จากนั้นนำด้วยกระเบื้องที่เผาเสร็จมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น 1 h หรือทิ้งไว้จนเย็น จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังการเผา แล้วจึงคำนวณหาสารระเหยตามสมการที่ 8

2.3 เถ้า

การวิเคราะห์เถ้าตามมาตรฐาน ASTM D 3174 ทำได้โดยใช้ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ความชื้นและสารระเหยที่น้ำหนักเริ่มต้น 1 g มาเผาที่อุณหภูมิ 650 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง เป็นเวลา 3 h โดยเปิดฝาด้วยกระเบื้องเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ หลังการเผาไหม้จะเหลือสารอนินทรีย์ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ที่เรียกว่าเถ้า จากนั้นนำด้วยกระเบื้องที่เผาเสร็จมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น 1 h หรือทิ้งไว้จนเย็น จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังการเผา แล้วจึงคำนวณหาปริมาณเถ้าตามสมการที่ 9

2.4 คาร์บอนคงตัว

คาร์บอนคงตัวตามมาตรฐาน ASTM D 3172 เป็นค่าที่แสดงถึงส่วนที่เผาไหม้ได้ของตัวอย่างหลังจากที่กำจัดความชื้น สารระเหย ออกแล้ว ซึ่งหาได้โดยนำเปอร์เซ็นต์ความชื้น สารระเหย และเถ้าลบออกจาก 100 ตามสมการที่ 10 ทุกค่าต้องอยู่ในสถานะความชื้นเดียวกัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวนี้มี ความสำคัญมากต่อการแบ่งระดับชั้นของเชื้อเพลิง ถ้ามีค่ามากขึ้นความเป็นเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

3. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อน จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตามมาตรฐาน ASTM D5865 ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (Bomb) รุ่น C5000 (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, ม.ป.ป.) ดังภาพที่ 46 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดพลังงานความร้อนของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM โดยใช้หลักการการเผาไหม้วัสดุด้วยออกซิเจนจะให้ความร้อนออกมา โดยใช้แท่งน้ำเป็นตัวรับความร้อน แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนจากวัสดุได้ สามารถวัดค่าพลังงานตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง และของเหลว เช่น แกลบ น้ำมัน กะลาปาล์ม ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ เป็นต้น



ภาพที่ 46 เครื่อง Bomb Calorimeter

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ (ม.ป.ป.)

4. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยผู้ใช้เครื่อง CHNS/O Analyzer (CHNS/O) รุ่น FlashEA 1112 (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, ม.ป.ป.) ดังภาพที่ 47 ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และ ออกซิเจน สำหรับตัวอย่างทั้งของแข็งและของเหลว โดยอาศัยหลักการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นก๊าซผสม โดยตัวอย่างจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น สารเคมี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ยาง พอลิเมอร์ และดินตะกอน เป็นต้น



ภาพที่ 47 เครื่อง CHNS/O Analyzer

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ (ม.ป.ป.)

การทดสอบถ่านชีวภาพด้านการเกษตร

การทดสอบคุณสมบัติถ่านชีวภาพทางการเกษตร ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช ค่าความเป็นกรด-ด่าง สภาพการนำไฟฟ้าของดิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความสามารถในการอุ้มน้ำ และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

1. ความเป็นรูพรุนของถ่าน

1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของสถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังภาพที่ 48 เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค สามารถดูภาพพื้นผิวตัวอย่างทางกายภาพที่มีรายละเอียดที่เล็กสุดประมาณ 0.2 μm และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000-100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ตั้งแต่ 3-100 nm อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



ภาพที่ 48 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2. ปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวรูพรุนด้วย เครื่องวัดการกระจายขนาดและรูพรุน (BET) จากสำนักวิจัยและและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวท.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2060 ดังภาพที่ 49 เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) และความพรุน (Pore size distribution) ของอนุภาคโดยอัตโนมัติ ใช้หลักการวัดปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคแบบ STATIC VOLUMETRIC GAS ADSORPTION METHOD) สามารถใช้กับงานทางด้าน Pharmaceuticals, Ceramics, Activated Carbons, Carbon Black, Catalyst, Paints and Coatings, Projectile Propellant, Medical Implants, Electronics, Cosmetics, Aerospace, Geoscience, Nanotubes และ Fuel Cells เป็นต้น



ภาพที่ 49 เครื่องวัดการกระจายขนาดและรูพรุน (BET)

ที่มา: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2558)

2. การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช

1. การเตรียมดิน ดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากดินมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยเริ่มเตรียมการจากชุดดินที่ความลึก 15 cm นำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 1 cm เพื่อคัดแยกเศษหิน และหญ้าออกจากดิน จากนั้นตากไว้ในที่ร่มเป็นระยะเวลา 7 วัน หรือรอจนดินเป็นสีขาว ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 การเตรียมดิน

2. การเพาะกล้าคะน้า เริ่มจากการนำดินมาใส่ในถาดเพาะ จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์มาหยอดลงในถาดเพาะ หลุมละ 2-3 เม็ด กลบดินผิวหน้า แล้วรดน้ำจนชุ่ม จากนั้น 3-4 วันเมล็ดคะน้าจะงอก ทำการรดน้ำทุกวัน วันละ 1 ครั้ง รอนคะน้ามีอายุ 15-20 วันจึงทำการย้ายไปปลูกในกระถาง ดังภาพที่ 51 (ศิริลักษณ์, 2556)



ภาพที่ 51 การเพาะกล้าคะน้า



ภาพที่ 51 การเพาะกล้าคะน้า (ต่อ)

3. การปลูกคะน้าลงกระถางและการวิเคราะห์การเจริญเติบโต มี 3 เงื่อนไข ได้แก่ ไม้ใส่ถ่านชีวภาพ ใส่ถ่านชีวภาพแกลบ และใส่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด โดยใช้ดินน้ำหนัก 7 kg ใส่ลงกระถาง และใส่ถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 1,000 kg/ไร่ (เกศศิริพันธ์ และคณะ, 2560) โดยซังถ่านชีวภาพกระถางละ 22.44 g ใส่ลงในดิน โดยคิดจากความหนาแน่นดินที่ $1,300 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งเป็นความหนาแน่นของดินทั่วไปโดยใช้ดินน้ำหนักดิน 312,000 kg/ไร่ เมื่อใส่ถ่านลงในดินแล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วนำกล้าคะน้าลงปลูกในกระถาง และรดน้ำให้ชุ่ม ดังภาพที่ 52 สำหรับการวิเคราะห์การเจริญเติบโตได้ทำการวัดความยาวราก เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของต้น ความกว้างและความยาวของใบ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งที่ผ่านอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 h ภายหลังจากเก็บเกี่ยวต้นคะน้าที่ระยะเวลา 60 วัน และวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของชุดข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS Statistics



ภาพที่ 52 การปลูกคะน้าลงกระถาง

3. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (จำเป็น, 2545)

1. ชั่งตัวอย่าง 5.00 g ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก
2. เติมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไป 50 mL
3. ปิดฝาและเขย่า 1 min หลังจากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 30 min วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในส่วนที่เป็นน้ำใส ด้วยเครื่องวัดค่า pH

4. การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (จำเป็น, 2545)

1. ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ในหลอดเหวี่ยง
2. เติมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไป 50 mL
3. ปิดฝาและเขย่าด้วยมือ ทิ้งไว้ประมาณ 30 min นำไปวัดสภาพการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในส่วนที่เป็นน้ำ

5. การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (จำเป็น, 2545)

การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) 1 M pH 7 โดยการผสมกรดอะซิติก (CH_3COOH) 99.5% w/w 114 mL ในน้ำปราศจากไอออนประมาณ 1,500 mL วางไว้จนเย็นแล้วเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) 25% w/w ลงไป 136 mL และปรับ pH โดยใช้ 20 v/v ของกรดอะซิติกหรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ก่อนปรับปริมาตรเป็น 2 L
2. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 10% w/v ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% w/w โดยการละลายโซเดียมคลอไรด์ 200 g ในน้ำกลั่น 1 L เติมกรดไฮโดรคลอริกลงไป 8 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 2 L
3. สารละลายเอธานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 80% w/w โดยการผสมเอธานอล 850 mL ลงในน้ำกลั่น 150 mL
4. สารแขวนลอยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 10% w/v โดยการชั่งแมกนีเซียมออกไซด์ 20 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไป 200 mL แล้วเขย่า
5. อินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator) โดยการละลายเมธิลเรด (Methyl red) 0.066 g และโบรโมกรีนซอลกรีน (Bromocresol green) 0.099 g ในเอธานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 95% w/w ประมาณ 80 ml แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยเอธานอลเป็น 100 mL
6. กรดบอริกผสมอินดิเคเตอร์ โดยการเตรียมสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 40 g ในน้ำร้อน 1,800 mL รอจนเย็นจึงเติมอินดิเคเตอร์ลงไปประมาณ 2 mL จะได้สารละลายสีม่วงแดง (หากเป็นสี

ชมพูให้ค่อย ๆ ปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ประมาณ 2.5-3.0 ml) จากนั้นจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 2 L

7. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.01 M ชั้นแรกเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมา 55.4 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็น 1 L จากนั้นจึงเจือจางเป็น 100 เท่า

วิธีการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

1. ขั้นตอนการแทนที่ประจุบวก

- 1.1 ชั่งดิน 5.00 g สำหรับถ่านชีวภาพใช้ 2.00 g ใส่ในหลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 mL
- 1.2 เติมแอมโมเนียมอะซิเตต 1 M ลงไป 30 mL
- 1.3 นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าสารเคมี 30 min
- 1.4 นำเข้าไปเครื่องปั่นเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min กรองเฉพาะส่วนที่ใส่ผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 1 ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 mL
- 1.5 ทำซ้ำในข้อ 1.2-1.4 อีก 2 ครั้ง แต่เขย่าด้วยมือประมาณ 1 min

2. ขั้นตอนการล้างแอมโมเนียม

- 2.1 เติมสารละลายเอธานอล (80% w/w) 30 ml ลงในหลอดที่ยังมีดินจากข้อที่ 1.5 เขย่าด้วยมือ 1min
- 2.2 นำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเช่นเดียวกับข้อ 1.4 และเทเฉพาะสารละลายส่วนที่ใสทิ้งไป
- 2.3 ทำตามข้อ 2.1-2.2 ประมาณ 3 ครั้ง

3. ขั้นตอนการไล่แอมโมเนียมที่ถูกดูดซับ

- 3.1 เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 30 ml ลงในหลอดจากข้อ 2.3 เขย่าด้วยมือ 1 min
- 3.2 นำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเช่นเดียวกับข้อ 1.4 และเทเฉพาะส่วนที่ใสลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL โดยไม่ต้องกรอง
- 3.3 ทำตามข้อ 3.1-3.2 อีก 2 ครั้ง แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ไล่แอมโมเนียม 100 mL

4. การกลั่นหาแอมโมเนียม

- 4.1 ดูดสารละลายในข้อ 3.3 มา 20 mL เติมสารแขวนลอยแมกนีเซียมออกไซด์ลงไป 10 mL
- 4.2 กลั่นแอมโมเนียมโดยมีกรดบอริก 5 mL เป็นตัวรองรับจนได้ปริมาตร 30 mL
- 4.3 นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานของกรดซัลฟิวริก 0.01 M
- 4.4 นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Blank) ไปกลั่นเช่นเดียวกับตัวอย่าง และคำนวณหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ได้ดังสมการที่ 17

$$\text{C.E.C (cmol/kg)} = \frac{N_1 \times (V_3 - V_B) \times 100}{W \times \frac{V_1}{V_2}} \times 200$$

สมการที่ 17

เมื่อ	C.E.C	คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cmol/kg)
	N_1	คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.01 M)
	V_B	คือ ปริมาตรโซเดียมคลอไรด์แบลงค์ (Blank) ที่ใช้ (mL)
	V_1	คือ ปริมาตรแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับด้วยโซเดียมคลอไรด์ในสภาพกรด (mL)
	V_2	คือ ปริมาตรแอมโมเนียมที่ดูดไปกลั่น (mL)
	V_3	คือ ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (mL)
	W	คือ น้ำหนักดิน หรือถ่านชีวภาพ (g)

6. การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ

การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและถ่านชีวภาพ โดยนำดินหรือถ่านชีวภาพใส่ภาชนะทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ น้ำระบายออก 30 min แล้วชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักดินเปียก จากนั้นนำดินไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 h แล้วนำดินใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 15 min ชั่งดินหลังการอบแห้งแล้วคำนวณหาความสามารถในการอุ้มน้ำของดินดังสมการที่ 18 (พิณทิพย์ และคณะ, 2531)

$$\text{W.H.C (%) = } \frac{\text{mass of soil wet (g)} - \text{mass of soil dry (g)}}{\text{mass of soil dry (g)}} \times 100$$

สมการที่ 18

7. การวิเคราะห์สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน (carbon to nitrogen ratio: C/N ratio)

การวิเคราะห์สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินได้มีการวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอนในดินและไนโตรเจนทั้งหมดในดิน หาได้จากสมการที่ 19 ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

$$\text{C/N ratio} = \frac{\text{Organic carbon (\%)}}{\text{Total N (\%)}}$$

สมการที่ 19

การวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอนในดิน (จำเป็น, 2545)

การเตรียมสารละลาย

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 0.167 M (1 N) โดยการละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 49.04 g ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 °C ประมาณ 3 h มาแล้ว ใส่น้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรเป็น 1 L
2. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกไฮเดรต (FAS) 1 M (1 N) โดยละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซไฮเดรต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) 196.07 g ในน้ำร้อนที่ปราศจากไอออนประมาณ 400 mL วางให้เย็นแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 15 mL และปรับปริมาตรเป็น 500 mL
3. กรดซัลฟิวริก H_2SO_4 เข้มข้นอย่างน้อย 96%
4. เพอร์อินดิเคเตอร์ โดยละลายฟีนานโทรีนโมโนไฮเดรต 1.485 g ในน้ำที่ปราศจากไอออน และเติม FAS 1 M 8 mL ก่อนปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 mL

วิธีการทดสอบสารอินทรีย์วัตถุในดิน

1. ชั่งดิน 1 g สำหรับถ่านชีวภาพใช้ 0.10 g ใสลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 ml
2. ใช้ปิเปตดูดโพแทสเซียม 10 mL เติมลงไปในช่วงและแกว่งให้ผสมเข้ากับดิน ในขั้นตอนนี้ให้ทำแบลนค์ (blank) โดยเติมโพแทสเซียมไดโครเมต 10 mL ลงในขวดที่ไม่มีดิน
3. นำไปเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 mL ภายใต้ตู้ดูดควัน โดยค่อย ๆ เทกรดด้านข้างขวด แล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 min
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 ml แล้วหยดเพอร์อินดิเคเตอร์ไป 3-4 หยด แกว่งให้เข้ากัน
5. นำไปไทเทรตด้วย FAS (ควรไทเทรตแบลนค์ก่อน) จนกระทั่งถึงจุดยุติ โดยสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวเป็นสีน้ำตาล บันทึกปริมาตร FAS ที่ใช้ และคำนวณหาสารอินทรีย์คาร์บอน และอินทรีย์วัตถุได้ดังสมการที่ 20-22 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

$$\text{Organic carbon (\%)} = \frac{(T_1 - T_2) \times N \times 0.003 \times \text{of} \times 100}{W} \quad \text{สมการที่ 20}$$

$$\text{Organic matter (\%)} = \frac{(T_1 - T_2) \times N \times 0.003 \times \text{of} \times 100}{W} \quad \text{สมการที่ 21}$$

$$\text{หรือ Organic matter (\%)} = \text{Organic carbon (\%)} \times 1.724 \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อ	T ₁	คือ ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (mL)
	T ₂	คือ ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (mL)
	N	คือ ความเข้มข้นของ FAS (ในกรณีที่ความเข้มข้นไม่ใช่ 1.0 N)
	Of	คือ Oxidation factor (ค่าที่นิยมใช้คือ 1.3)
	W	คือ น้ำหนักดิน หรือถ่านชีวภาพที่ใช้ (g)

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (จำเป็น, 2545)

การเตรียมสารละลาย

1. กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 98%
2. สารผสมเร่งปฏิกิริยา โดยผสมโพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) อัตราส่วน 100:10:1 โดยน้ำหนัก
3. อินดิเคเตอร์ผสม โดยละลายเมธิลเรด 0.66 g และโบรโมกรีนซอลกรีน 0.099 g ในเอทานอล ความเข้มข้น 95% w/w ประมาณ 80 mL แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยเอทานอลเป็น 100 mL
4. กรดบอริกผสมอินดิเคเตอร์ โดยละลายกรดบอริก (H₃BO₃) 40 g ในน้ำร้อนประมาณ 1,800 mL รอให้เย็นจึงเติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไปประมาณ 20 mL จะได้สารผสมสีม่วงแดง (หากเป็นสีชมพูให้ค่อย ๆ ปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ประมาณ 2.5-3 ml จากนั้นจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 2 L
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 40% w/v โดยค่อย ๆ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 400 g ในน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรเป็น 1 L
6. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) 0.005 M ชั้นแรกเตรียมกรดซัลฟิวริก 1 M โดยตวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% ในข้อ 1 มา 55.4 mL และปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเจือจางเป็น 200 เท่า แล้วนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดยนำไปไทเตรทกับสารละลายทริสไฮดรอกซีเมธิลอะมีโนมีเทน 0.02 M จำนวน 5 ml ไทเตรทจนสีของอินดิเคเตอร์ผสมในสารละลาย (THAM) เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพู

วิธีการทดสอบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

1. ขั้นตอนการย่อย
 - 1.1 ชั่งดิน 1.00 g สำหรับถ่านชีวภาพใช้ 0.2 g ใส่ในหลอดย่อยขนาด 100 mL
 - 1.2 ตักสารเร่งปฏิกิริยาผสมลงไปประมาณ 1 g
 - 1.3 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 mL ภายในตู้ดูดควัน โดยค่อย ๆ เทกรดด้านข้างขวด และเขย่าผสมกับดิน

1.4 นำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยไนโตรเจนโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 380 °C จนตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมฟ้า และดินมีสีขาว

1.5 ทำแปลงค์โดยนำหลอดไปเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและกรดซัลฟิวริก และย่อยเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

2. ขั้นตอนการกลั่น

2.1 จัดเตรียมเครื่องกลั่นไนโตรเจนให้พร้อมใช้งาน และเติมน้ำกลั่นลงไปในตัวอย่างประมาณ 10 mL เขย่าจนตกตะกอน

2.2 เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป 15 mL ลงในหลอดกลั่น และนำหลอดกลั่นใส่เครื่องกลั่นไนโตรเจน

2.3 ตวงสารละลายกรอบอริกที่ผสมอินดิเคเตอร์ 5 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL นำไปวางรองรับก๊าซแอมโมเนียมาจากการกลั่น

2.4 กลั่นจนได้ปริมาตรประมาณ 30 mL จึงหยุด และฉีดล้างปลายคอนเดนเซอร์ด้วยน้ำกลั่น

3. ขั้นตอนการไทเทรต

3.1 เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.005 M ลงในบิวเรตและจัดบิวเรตให้พร้อมไทเทรต

3.2 นำสารละลายที่กลั่นได้ซึ่งมีสีเขียวไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจนเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง และคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินได้ดังสมการที่ 23

$$\text{Total N (\%)} = \frac{0.014 \times (V_1 - V_B) \times N \times V_2 \times 100}{W}$$

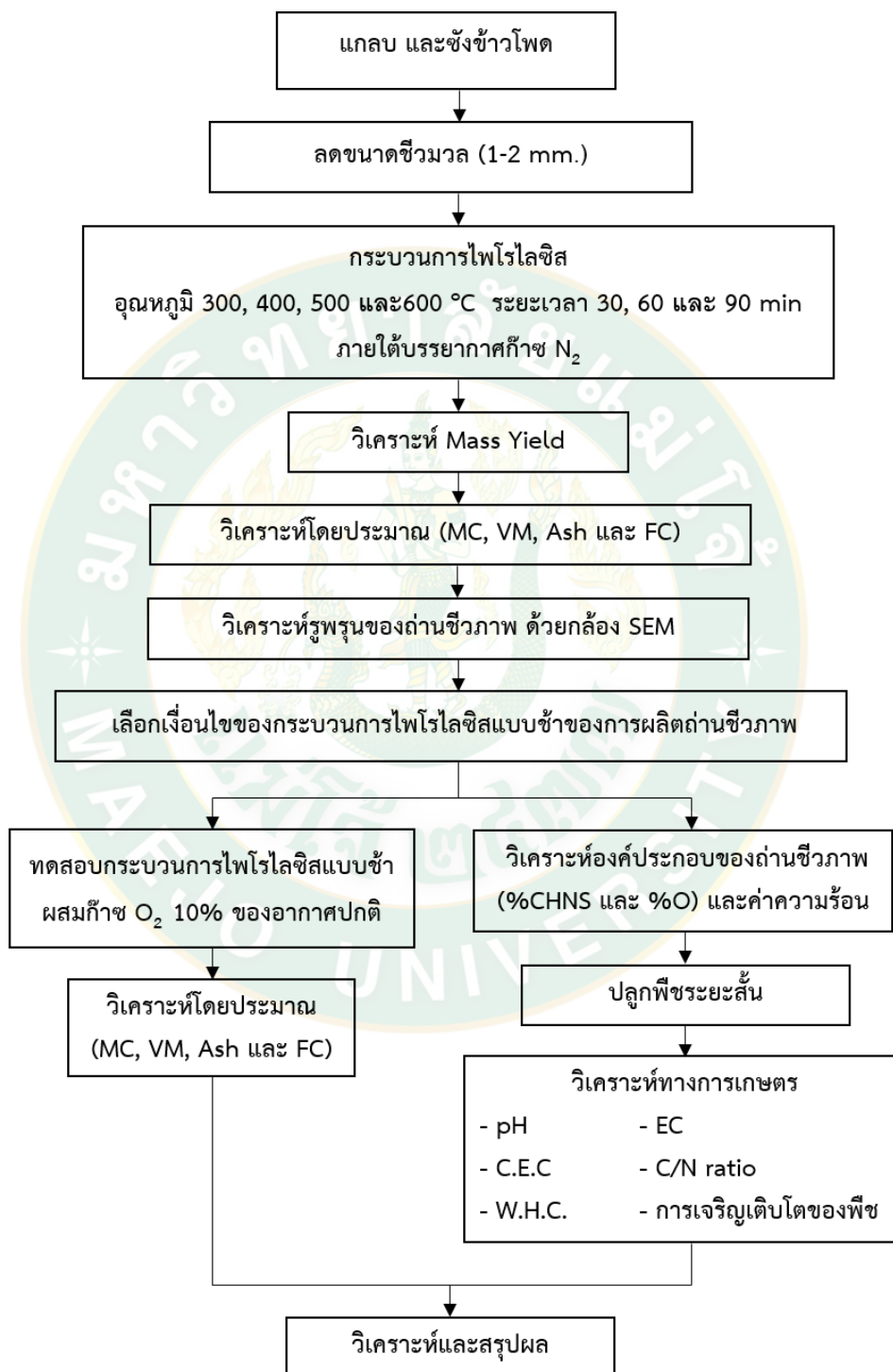
สมการที่ 23

เมื่อ	V_1	คือ ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (mL)
	V_2	คือ ปริมาตรที่ปรับด้วยน้ำกลั่นของก่อนการกลั่น (mL)
	V_B	คือ ปริมาตรแปลงค์ (mL)
	N	คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.005 M)
	W	คือ น้ำหนักดินหรือถ่านชีวภาพ (g)

ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

ภาพที่ 53 แสดงไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการเตรียม แกลบ และ ชังข้าวโพด นำมาลดขนาดชีวมวลนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 °C ระยะเวลา 30, 60 และ 90 min วิเคราะห์ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ วิเคราะห์โดยประมาณ และวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ จากนั้นนำมาเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืชระยะสั้น และศึกษาผลกระทบของปริมาณออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ สำหรับด้านการศึกษา

ได้ทำการการวิเคราะห์ pH สภาพการนำไฟฟ้า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความสามารถในการอุ้มน้ำ การเจริญเติบโตของพืช และสรุปผลการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 53 ไดอะแกรมภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ในบทนี้ได้นำเสนอและการอภิปรายผลการทดลอง ในด้านพลังงานและคุณสมบัติที่นำไปใช้ภาคเกษตร สำหรับการวิเคราะห์ด้านพลังงาน ประกอบด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ได้แก่ การวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า การวิเคราะห์โดยประมาณ ค่าความร้อน และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านชีวภาพ การศึกษาลักษณะพื้นฐานความเป็นรูปพรุนของถ่านชีวภาพ ผลกระทบของการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ อัตราการใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพ และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ สำหรับการวิเคราะห์ในด้านการเกษตร ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง สภาพการนำไฟฟ้า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนบวก ความสามารถในการอุ้มน้ำ และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน รวมถึงได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกพืชระยะสั้น ซึ่งรายละเอียดการทดสอบมีดังต่อไปนี้

คุณสมบัติพื้นฐานชีวมวล

การผลิตถ่านชีวภาพ ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวล ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพด โดยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์

การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วง $6.38 \pm 0.05\%$ - $11.45 \pm 0.16\%$ ปริมาณความชื้นบ่งบอกถึงปริมาณไอน้ำที่ชีวมวลดูดซับไว้ โดยในกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะต้องเลือกชีวมวลที่มีความชื้นไม่เกิน 30% หากมีความชื้นสูงจะทำให้สูญเสียพลังงานเพื่อกำจัดความชื้น และส่งผลให้ได้ปริมาณถ่านน้อย (Tripathi et al., 2016) สารระเหยของชีวมวลมีค่าอยู่ในช่วง $69.58 \pm 2.28\%$ - $83.23 \pm 2.19\%$ โดยทั่วไปชีวมวลจะมีสารระเหยสูงกว่า 80% ซึ่งสารระเหยนี้จะสลายตัวกลายเป็นก๊าซเมื่อได้รับความร้อน (มากกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ในส่วนของสัดส่วนปริมาณเถ้ามีค่าอยู่ในช่วง $2.40 \pm 0.66\%$ - $17.92 \pm 0.36\%$ โดยเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในชีวมวลไม่สามารถระเหยและติดไฟได้เมื่อได้รับความร้อน โดยทั่วไปชีวมวลมีสัดส่วนเถ้าประมาณ 1%-3% ยกเว้นแกลบและฟางข้าวที่มีสัดส่วนปริมาณเถ้าประมาณ 10%-20% ซึ่งเป็นปัญหาต่อการเผาไหม้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.-ช)

และคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุล ชีวมวลทั่วไปมีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง $2.91 \pm 2.66\% - 6.12 \pm 2.01\%$ สำหรับค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าอยู่ในช่วง $14.96 \pm 33.00 - 16.86 \pm 35.00$ MJ/kg รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 10

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวล พบว่าซังข้าวโพดมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนและออกซิเจนสูงกว่าแกลบ ในขณะที่ไนโตรเจน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น (Xin et al., 2017) ซังข้าวโพดและแกลบมีคาร์บอนอยู่ในช่วง $39.60 \pm 0.17\% - 44.76 \pm 0.04\%$ ออกซิเจนอยู่ในช่วง $38.53 \pm 0.41\% - 43.99 \pm 0.41\%$ ไนโตรเจนอยู่ในช่วง $0.35 \pm 0.00\% - 0.52 \pm 0.00\%$ ไฮโดรเจน $5.29 \pm 0.02\% - 5.89 \pm 0.02\%$ และซัลเฟอร์ $0.03 \pm 0.00\% - 0.04 \pm 0.00\%$ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล (Proximate analysis)

Proximate analysis	แกลบ	ซังข้าวโพด
ความชื้น (%)	6.38 ± 0.05	11.45 ± 0.16
สารระเหย (%)	69.58 ± 2.28	83.23 ± 2.19
เถ้า (%)	17.92 ± 0.36	2.40 ± 0.66
คาร์บอนคงตัว (%)	6.12 ± 2.01	2.91 ± 2.66
ค่าความร้อน MJ/kg)	14.96 ± 33.00	16.86 ± 35.00

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวล (Ultimate analysis)

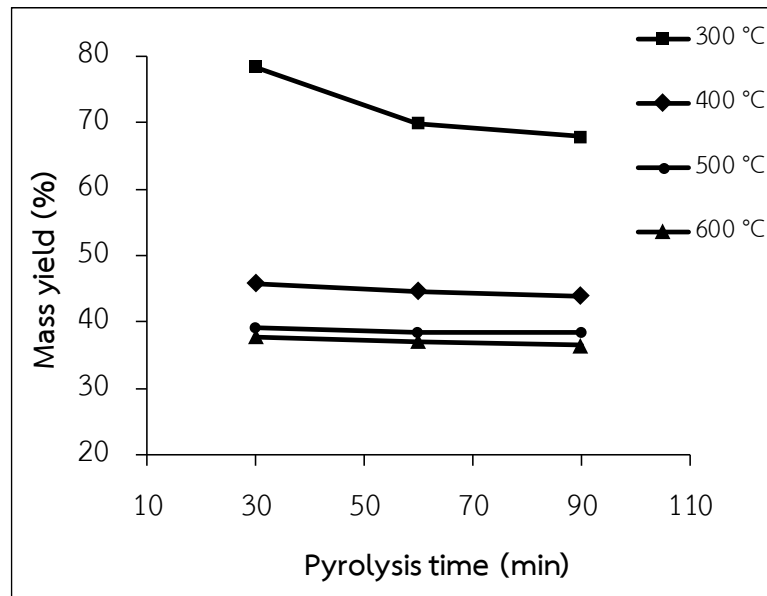
Ultimate analysis	แกลบ	ซังข้าวโพด
คาร์บอน (%)	39.60 ± 0.17	44.76 ± 0.04
ออกซิเจน (%)	38.53 ± 0.41	43.99 ± 0.41
ไนโตรเจน (%)	0.35 ± 0.00	0.52 ± 0.00
ไฮโดรเจน (%)	5.29 ± 0.02	5.89 ± 0.02
ซัลเฟอร์ (%)	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00

การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

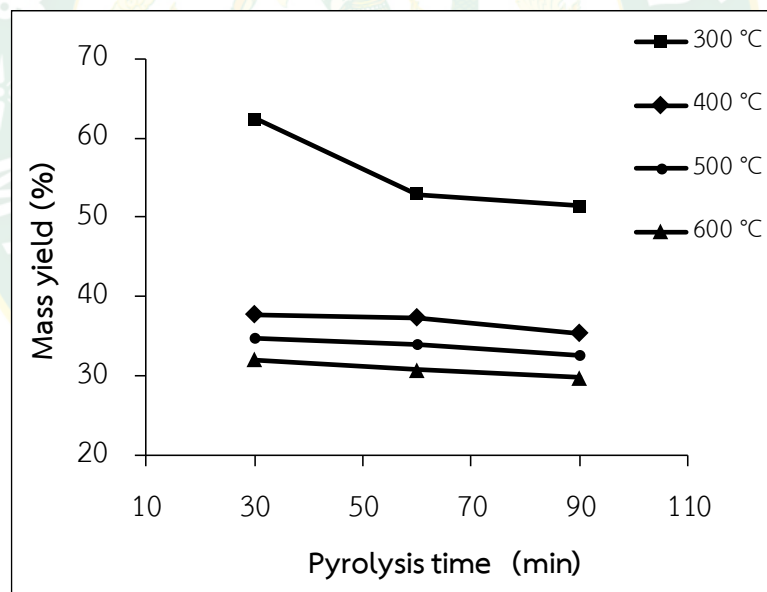
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมในด้านลักษณะและรูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยการผลิตทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน ดังนั้นคุณสมบัติพื้นฐานที่มีความจำเป็นต่อการวิเคราะห์ถ่านชีวภาพ ประกอบด้วย ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

1. ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ (Mass yield) พบว่าถ่านชีวภาพแกลบที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300, 400, 500 และ 600 °C มีร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบอยู่ที่ 67.87%-78.37%, 43.90%-45.81%, 38.45%-39.07% และ 36.41%-37.71% ตามลำดับ ขณะที่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีร้อยละผลผลิตถ่านอยู่ที่ 51.46%-62.47%, 35.41%-37.79%, 32.50%-34.83% และ 29.79%-32.07% ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้มีแนวโน้มร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพลดลง เนื่องจากการสลายตัวของสารชีวเคมีที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 300-400 °C ซึ่งทำให้ที่อุณหภูมิ 300 °C ได้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพสูง ในขณะที่ในช่วงอุณหภูมิ 400-700 °C จะเกิดการสลายตัวของลิกนิน ทำให้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C มีปริมาณร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพต่ำ (Dengyu et al., 2016) ดังภาพที่ 54 และ 55 ในส่วนของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ของการไพโรไลซิสแบบช้า การเพิ่มเวลาจาก 30, 60 และ 90 min ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดการสลายตัวของสารชีวเคมีได้ช้า ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นอุณหภูมิสูงทำให้สารชีวเคมีสลายตัวได้เร็ว ภายในระยะเวลา 30 min สารชีวเคมีก็สลายตัวเสร็จสิ้น ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพไม่แตกต่างกัน (Evita et al., 2013)



ภาพที่ 54 ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบ



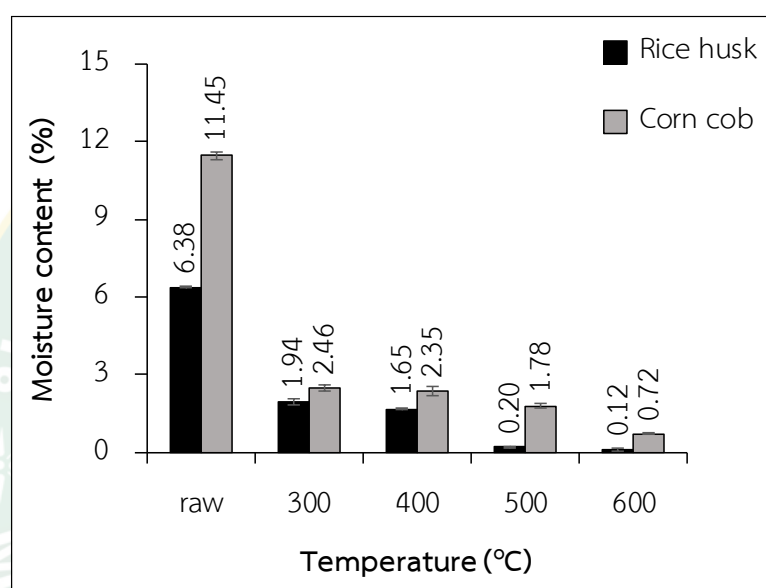
ภาพที่ 55 ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพขังข้าวโพด

2. ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น

ผลการศึกษาความชื้นของชีวมวลและถ่านชีวภาพ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้ความชื้นของถ่านชีวภาพลดลง โดยทั่วไปการระเหยของไอน้ำในชีวมวลจะ

เริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C (เบญจพร, 2557) อย่างไรก็ตามยังมีความชื้นบางส่วนที่ไม่ระเหยออกจากถ่านชีวภาพ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้าจึงส่งผลให้ความชื้นของถ่านชีวภาพลดลง โดยถ่านชีวภาพจากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีความชื้นน้อยกว่า 10% (Xin et al., 2017) จากภาพที่ 56 สังเกตได้ว่าเมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้ถ่านชีวภาพลดลงได้ 93.71%-98.12% ที่อุณหภูมิ 600 °C โดยถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 600 °C ของแกลบและซังข้าวโพดมีความชื้นเหลือเพียง $0.12 \pm 0.06\%$ และ $0.72 \pm 0.05\%$ ตามลำดับ

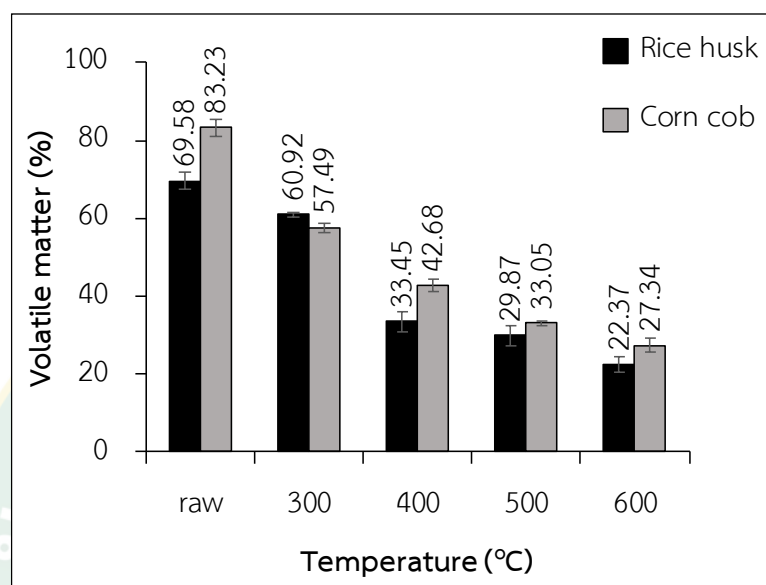


ภาพที่ 56 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย

การเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ส่งผลให้สารระเหยของถ่านชีวภาพมีแนวโน้มลดลง โดยสารระเหยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 °C มีปริมาณต่ำสุด ซึ่งสารระเหยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีค่าเฉลี่ย $27.34 \pm 1.76\%$ ขณะที่สารระเหยถ่านชีวภาพแกลบเฉลี่ยอยู่ที่ $22.37 \pm 2.03\%$ โดยทั่วไปสารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง (คีต และคณะ, 2562) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารชีวเคมีที่อยู่ในชีวมวลเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนระเหยกลายเป็นก๊าซ (McKendry, 2002) จากภาพที่ 57 สังเกตได้ว่าสารระเหยของแกลบและถ่านชีวภาพแกลบที่อุณหภูมิ 300 °C มีปริมาณสารระเหยสูงกว่าซังข้าวโพด เนื่องจากแกลบมีลิกนินสูงจึงกว่าซังข้าวโพด จึงทำให้มีปริมาณสารระเหยสูง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400-600 °C ส่งผลให้สารระเหยของถ่านชีวภาพแกลบมีสารระเหยต่ำกว่าสารระเหยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ

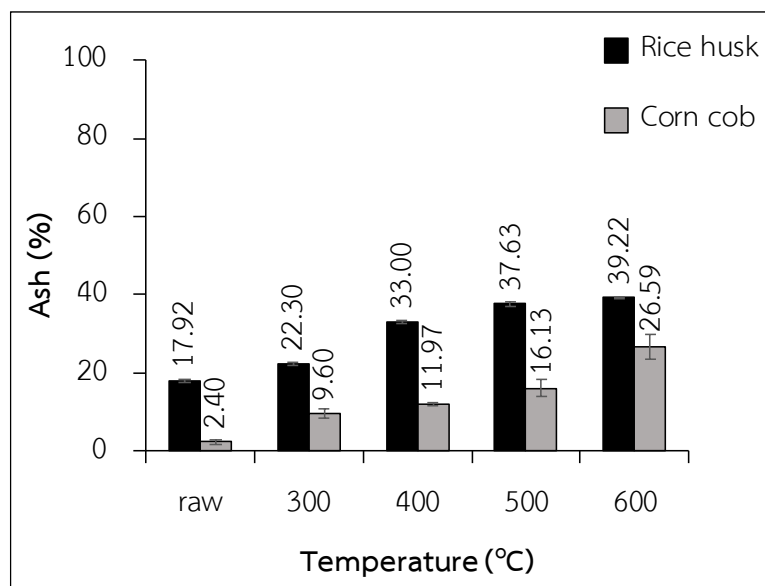
ลิกนินเพิ่มสูงขึ้น (Wannapeera et al., 2008) ดังนั้นสารระเหยถ่านชีวภาพแกลบอูณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C จึงมีปริมาณต่ำกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพด กระบวนการไพโรไลซิสนี้ทำให้สารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวลลดลงได้ 67.15%-67.97%



ภาพที่ 57 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย

2.3 ผลของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า

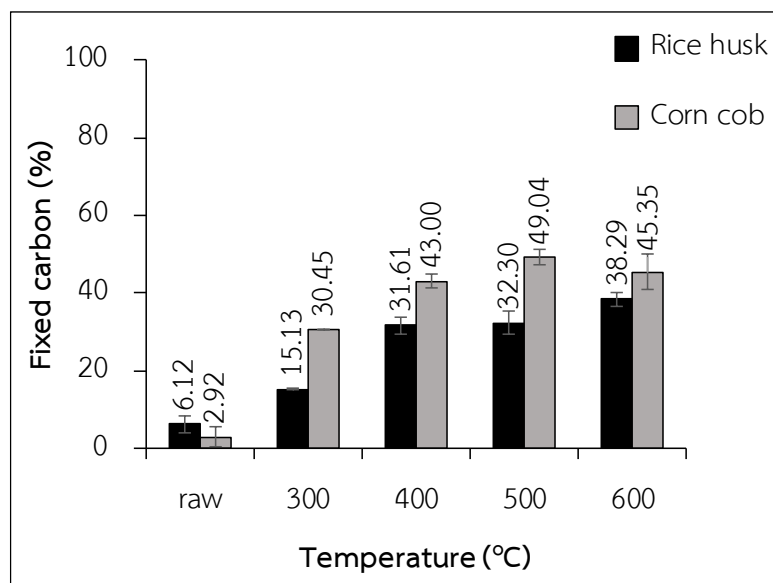
จากภาพที่ 58 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้สัดส่วนเถ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากความเข้มข้นของแร่ธาตุในถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการการสลายตัวของสารชีวเคมีที่ถูกทำลายเพิ่มขึ้น ในขณะที่ยังมีสารบางจำพวกที่ไม่สามารถระเหยได้และจุดติดไฟได้ยังคงหลงเหลืออยู่ในชีวมวลแม้อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น (Jie et al., 2015) โดยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 °C มีสัดส่วนเถ้าของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดสูงสุดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 39.22 ± 0.29 และ $26.59\pm 3.17\%$ ตามลำดับ ซึ่งทำให้เถ้าของถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น 54.31% และ 90.97% ตามลำดับ



ภาพที่ 58 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า

2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว

ภาพที่ 59 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการลดลงของความชื้นและสารระเหยเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้าเพิ่มสูงขึ้น (Xin et al., 2017) อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 600 °C ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวลดลง เนื่องจากสัดส่วนเถ้าเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ดังนั้นคาร์บอนคงตัวจึงมีความสัมพันธ์กับความชื้น สารระเหย และเถ้า (Asli et al., 2016) จากภาพสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิที่ 600 °C ถ่านชีวภาพแกลบมีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดเฉลี่ย $38.29 \pm 1.77\%$ ในขณะที่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 500 °C มีสัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดเฉลี่ย $49.04 \pm 1.98\%$



ภาพที่ 59 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว

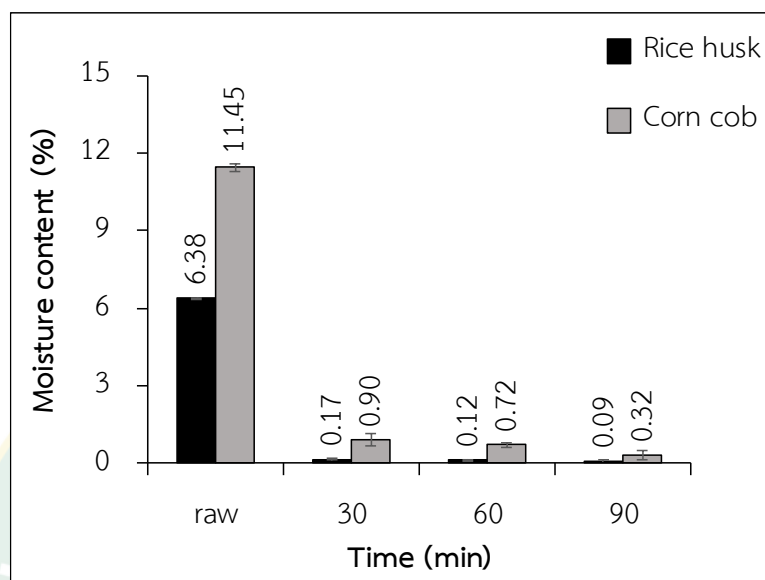
3. ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ระยะเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ซึ่งระยะเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะส่งต่อการใช้พลังงานในการให้ความร้อนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยในการศึกษานี้ได้นำเงื่อนไขอุณหภูมิ 600 °C มาศึกษาซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น

ภาพที่ 60 แสดงผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น ที่เวลา 30, 60 และ 90 min พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง $0.09 \pm 0.09\%$ - $0.17 \pm 0.03\%$ และ $0.32 \pm 0.06\%$ - $0.09 \pm 0.15\%$ ตามลำดับ จากภาพสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นมีอัตราลดลง ซึ่งความชื้นของแกลบมีอัตราการลดลง 97%-98% ในขณะที่ซังข้าวโพดมีอัตราความชื้นลดลง 92%-97% แสดงให้เห็นว่าระยะเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้อัตราความชื้นลดลง ซึ่งเกิดจากช่วงอุณหภูมิแรกของช่วงกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลจะดูดซับความร้อน ทำให้ความชื้นภายในชีวมวลจะถูกขับออกจากชีวมวลกลายเป็นไอน้ำ (เบญจพร, 2557) ซึ่งไอน้ำนี้เกิดที่ผิวของชีวมวล เมื่อปริมาณไอน้ำที่ผิวชีวมวลแห้ง ความชื้นภายในชีวมวลก็จะลดลง และความชื้นที่ผิว

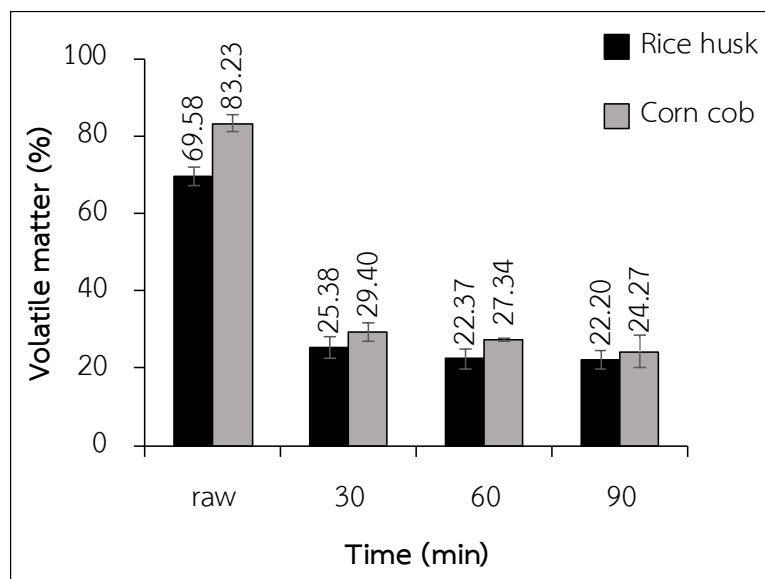
ชีวมวลจะระเหยกลายเป็นไอน้ำเข้าไปในเนื้อชีวมวลสูงขึ้น ดังนั้นความชื้นของชีวมวลจึงลดลงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการ (กชกร, 2540)



ภาพที่ 60 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อความชื้น

3.2 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย

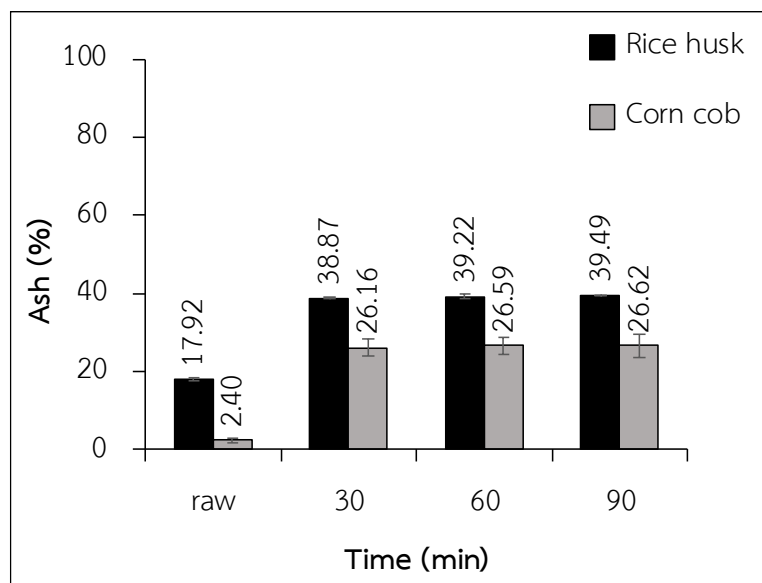
ภาพที่ 61 แสดงผลของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย พบว่าสารระเหยมีปริมาณลดลงโดยถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีสารระเหยอยู่ในช่วง $22.20 \pm 3.1\%$ - $25.38 \pm 1.35\%$ และ $24.27 \pm 0.80\%$ - $29.40 \pm 1.76\%$ ตามลำดับ การเพิ่มระยะเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่ 30, 60 และ 90 min ส่งผลให้สารระเหยของแกลบลดลงเฉลี่ย $25.38 \pm 1.35\%$, $22.37 \pm 2.03\%$ และ $22.20 \pm 3.17\%$ ตามลำดับ ขณะที่สารระเหยของซังข้าวโพดลดลงเฉลี่ย $29.40 \pm 5.21\%$, $27.34 \pm 1.76\%$ และ $24.27 \pm 0.08\%$ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารชีวเคมี ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ เมื่อเพิ่มระยะเวลากระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้สารระเหยลดลง อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่สูงทำให้สารชีวเคมีสลายตัวได้เร็วภายในระยะเวลา 30 min จึงทำให้สารระเหยลดลงไม่แตกต่างกัน (Evita et al., 2013)



ภาพที่ 61 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อสารระเหย

3.3 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า

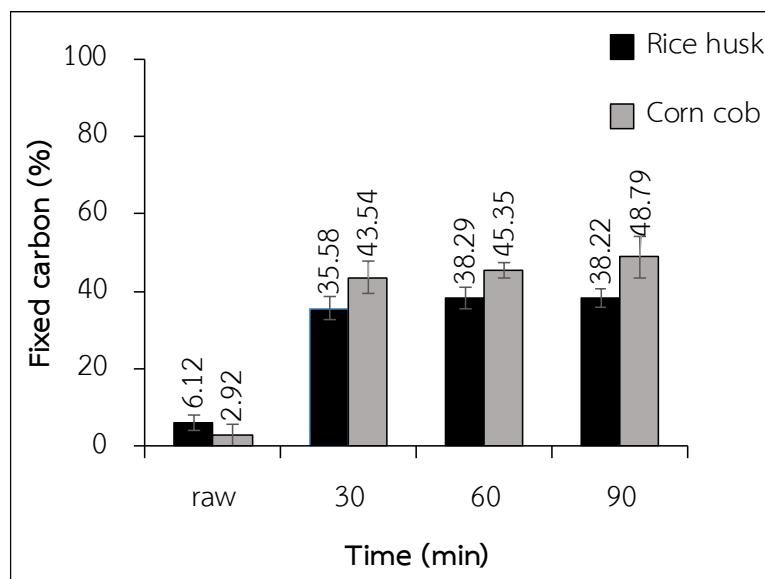
ภาพที่ 62 แสดงผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า พบว่าสัดส่วนเถ้าของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาไพโรไลซิส เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นแร่ธาตุหรือสารระเหยที่ไม่สามารถระเหยได้ยังคงหลงเหลืออยู่ในชีวมวล (Jie et al., 2015) การเพิ่มระยะเวลาจึงส่งผลให้สัดส่วนเถ้าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเถ้าของแกลบที่เวลา 30, 60 และ 90 min มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $38.87 \pm 0.24\%$, $39.22 \pm 0.29\%$ และ $39.49 \pm 0.47\%$ ตามลำดับ ในขณะที่ซังข้าวโพดมีสัดส่วนเถ้าต่ำกว่าคือ $26.16 \pm 1.48\%$, $26.59 \pm 3.17\%$ และ $26.62 \pm 2.80\%$ ตามลำดับ



ภาพที่ 62 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า

3.4 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว

ภาพที่ 63 แสดงผลของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว พบว่าคาร์บอนคงตัวมีสัดส่วนใกล้เคียง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิ 600 °C เป็นอุณหภูมิที่สูงทำให้สารชีวเคมีสลายตัวได้เร็วภายในระยะเวลา 30 min คาร์บอนคงตัวจึงไม่แตกต่างกัน (Evita et al., 2013) อย่างไรก็ตาม คาร์บอนคงตัวของแกลบเวลา 90 min มีสัดส่วนลดลง เนื่องจากเถ้าของแกลบมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลสัดส่วนคาร์บอนคงตัวลดลง 0.18% คาร์บอนคงตัวของแกลบที่เวลา 30, 60 และ 90 min มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $35.58 \pm 1.37\%$, $38.29 \pm 1.77\%$ และ $38.22 \pm 2.62\%$ ตามลำดับ ขณะที่ซึ่งข้าวโพดมีคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 43.45 ± 4.23 , $45.35 \pm 4.65\%$ และ $48.79 \pm 2.54\%$ ตามลำดับ



ภาพที่ 63 ผลกระทบของเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อคาร์บอนคงตัว

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คาร์บอนคงตัวที่แปรผันกับอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสแบบช้า

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอล (empirical model) ทำนายค่าคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพด โดยใช้ระเบียบวิธีถดถอยได้สมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) โดยใช้ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองสมการทั้งหมด 12 ชุดข้อมูล จากภาพที่ 64 แสดงคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบเมื่อแปรผันอุณหภูมิและเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสสูงสุดส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 56.31%-74.20% สำหรับการเพิ่มเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 7.61%-44.61% การใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้าที่ 600 °C เวลา 60 min ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบสูงสุดเฉลี่ย 38.29±1.77% ผลจากการทดสอบสัดส่วนคาร์บอนคงตัวทั้งหมด 12 ข้อมูล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอลที่ได้ดังสมการที่ 24 โดยมีค่า R-square คือ 0.9585 และมีค่า Standard Error of Estimate (see) คือ 2.4641

ภาพที่ 65 แสดงค่าคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิและเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 37.965-49.43% เมื่อเพิ่มเวลากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.00%-27.17% เงื่อนไขที่มีคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือ อุณหภูมิ 500 °C เวลากระบวนการไพโรไลซิส 60 min มีค่าคาร์บอนคงตัวเฉลี่ย 49.04±1.98% ผลจากการ

ทดสอบสัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดทั้งหมด 12 ข้อมูล สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอลได้ตั้งสมการที่ 25 โดยมีค่า R-square คือ 0.9286 และมีค่า Standard Error of Estimate (see) คือ 2.8442

$$FC_{RH} = (-0.0003T^2) + (-0.0013t^2) + 0.3440T + 0.2401t + (-70.5822) \quad \text{สมการที่ 24}$$

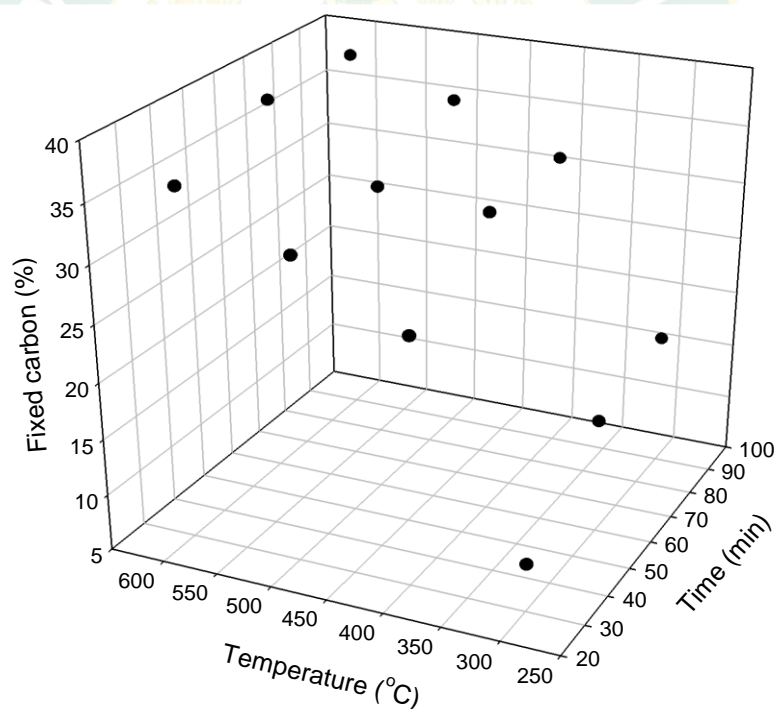
$$FC_{CC} = (-0.0004T^2) + (-0.0017t^2) + 0.4350T + 0.2588t + (-73.1188) \quad \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ FC_{RH} คือ สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบ (%)

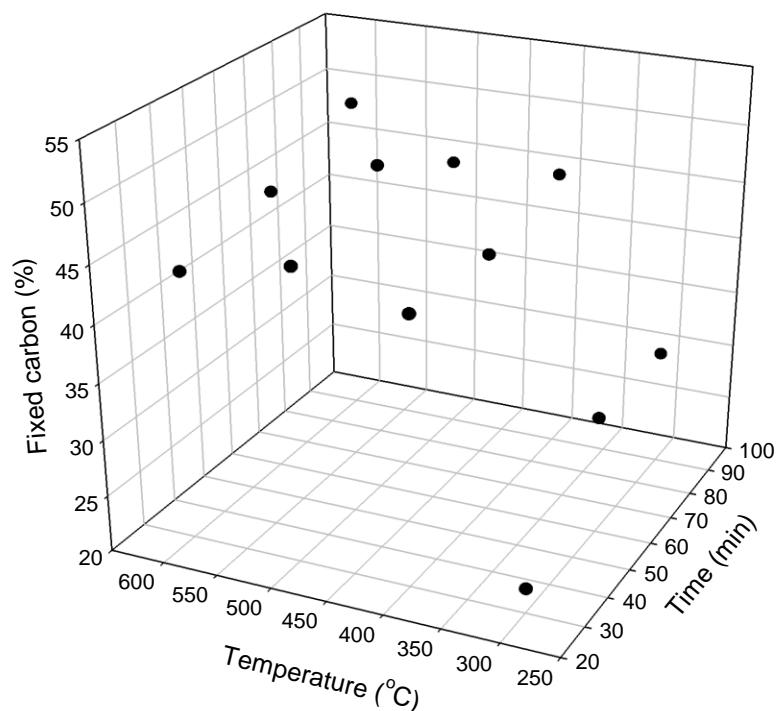
FC_{CC} คือ สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (%)

T คือ อุณหภูมิไพโรไลซิสแบบช้า (°C)

t คือ เวลาไพโรไลซิสแบบช้า (min)



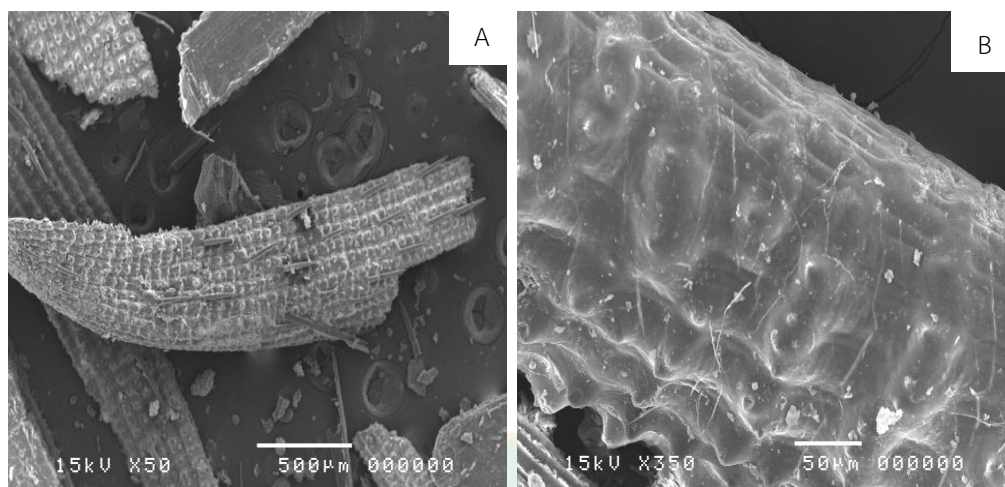
ภาพที่ 64 สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสแบบช้า



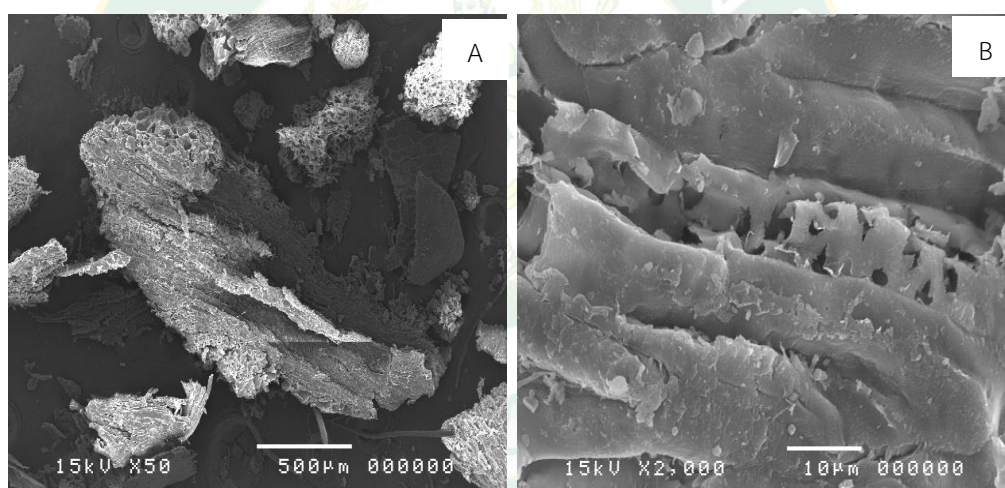
ภาพที่ 65 สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดเมื่อแปรผันกับอุณหภูมิ และเวลาไฟไลซิสแบบช้า

การศึกษาความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์รูพรุนของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) จากภาพที่ 66 และ 67 แสดงลักษณะพื้นฐานของแกลบและซึ่งข้าวโพด พบว่า ชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มีโครงสร้างลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยแกลบมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ดังภาพที่ 66 (A) กำลังขยาย 50 เท่า เมื่อเพิ่มกำลังขยาย 350X จะเห็นได้ว่าที่บริเวณผิวของแกลบจะมีเส้นใย เกาะอยู่บนผิวดังภาพที่ 66 (B) ในขณะที่ซึ่งข้าวโพดมีลักษณะพื้นฐานที่เป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำที่กำลังขยาย 50X ดังภาพที่ 67 (A) ในขณะที่กำลังขยาย 2,000 เท่า จะพบรูพรุนที่บริเวณผิวเล็กน้อย ดังภาพที่ 67 (B)



ภาพที่ 66 ลักษณะสัณฐานของแกลบ (A) กำลังขยาย 50X (B) กำลังขยาย 350X

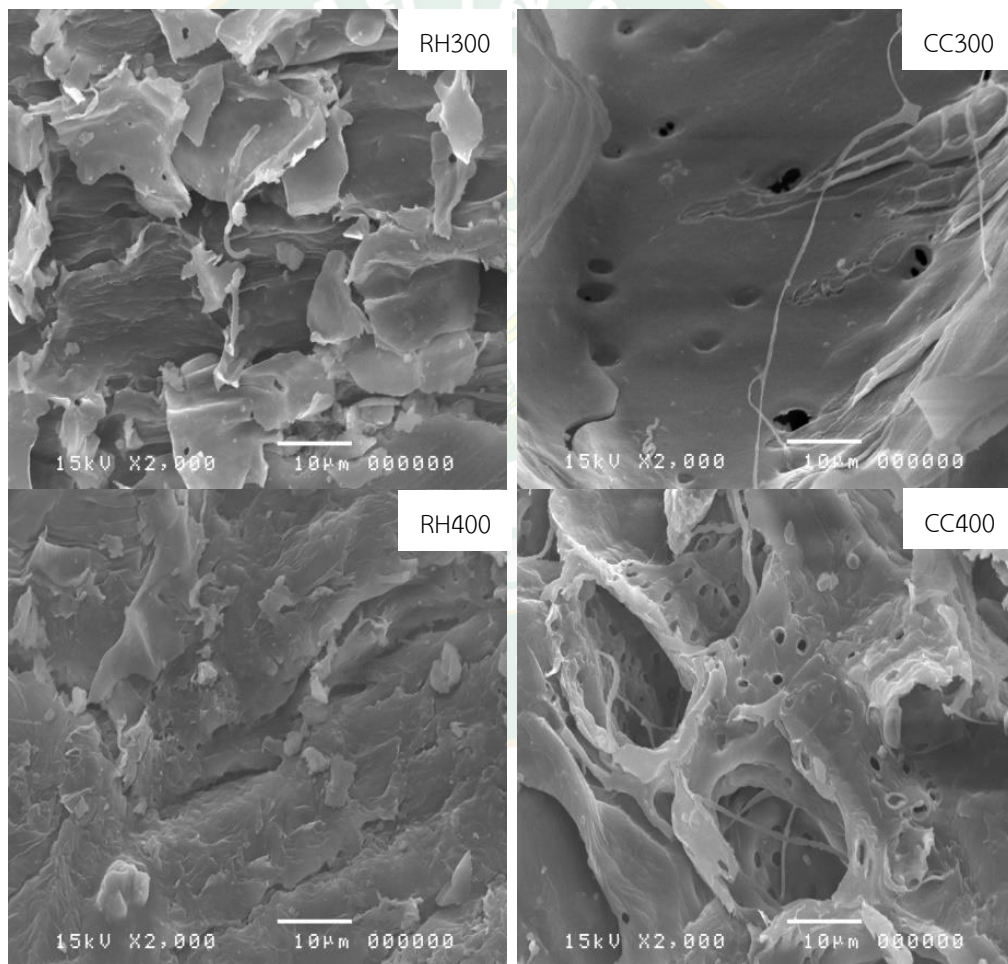


ภาพที่ 67 ลักษณะสัณฐานของซังข้าวโพด (A) กำลังขยาย 50X (B) กำลังขยาย 2,000X

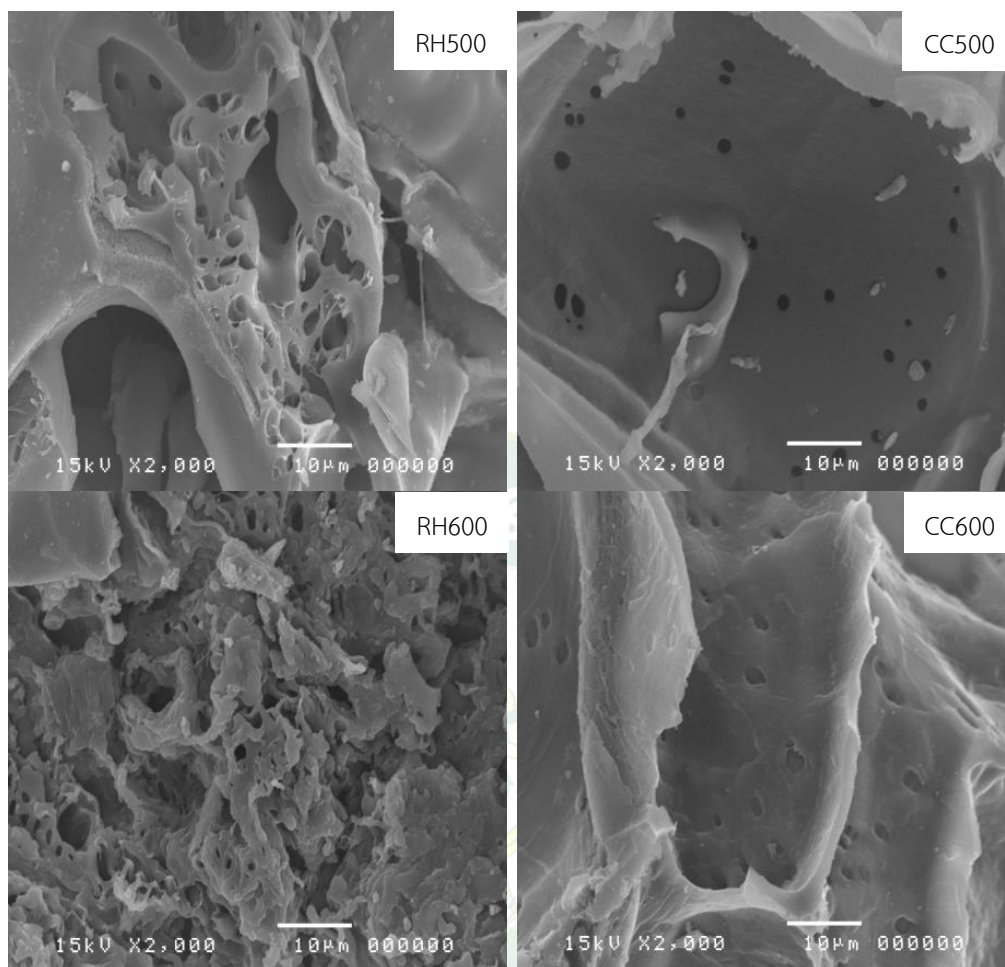
1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อรูพรุนถ่านชีวภาพ

ภาพที่ 68 แสดงลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพแกลบที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 °C (RH300, RH400, RH500 และ RH600 ตามลำดับ) และซังข้าวโพด (CC300, CC400, CC500 และ CC600 ตามลำดับ) พบว่าอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีผลต่อปริมาณของรูพรุน ซึ่งเกิดจากสารชีวเคมีในชีวมวลจำพวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเกิดการสลายตัว เกิดการแตกร้างทำให้รูพรุนซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกันเพิ่มสูงขึ้น (Estela et al., 2018) ในขณะเดียวกันรูพรุนบางส่วนก็มีเส้นใยหรือพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นชั้น ซ้อนทับรูพรุน ซึ่งเกิดจากการคงเหลือของสารระเหยที่ไม่สามารถหลุดออกได้ (Purevsuren et al., 2003) เห็นได้ชัดจากลักษณะ

พื้นผิวของถ่านชีวภาพแกลบที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นชั้นซ้อนทับกันอยู่ ในขณะที่ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจะปรากฏรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งที่อุณหภูมิ 500 °C ของถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิด จะปรากฏรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยรูพรุนของถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิดมีความกว้างประมาณ 0.71-1.43 μm ซึ่งรูพรุนนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถการดูดซับ และการควบคุมการปล่อยแร่ธาตุรวมถึงน้ำในดินได้ดี ซึ่งขนาดรูพรุนที่เหมาะสมต่อการกักเก็บแร่ธาตุและน้ำควรมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 0.5-50 μm (Estela et al., 2018) อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงทำให้โครงสร้างรูพรุนเสียหายส่งผลให้มีพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพลดลง ซึ่งจะทำให้การกักเก็บอุ้มน้ำและจุลินทรีย์ลดลง (Yan et al., 2017)



ภาพที่ 68 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ

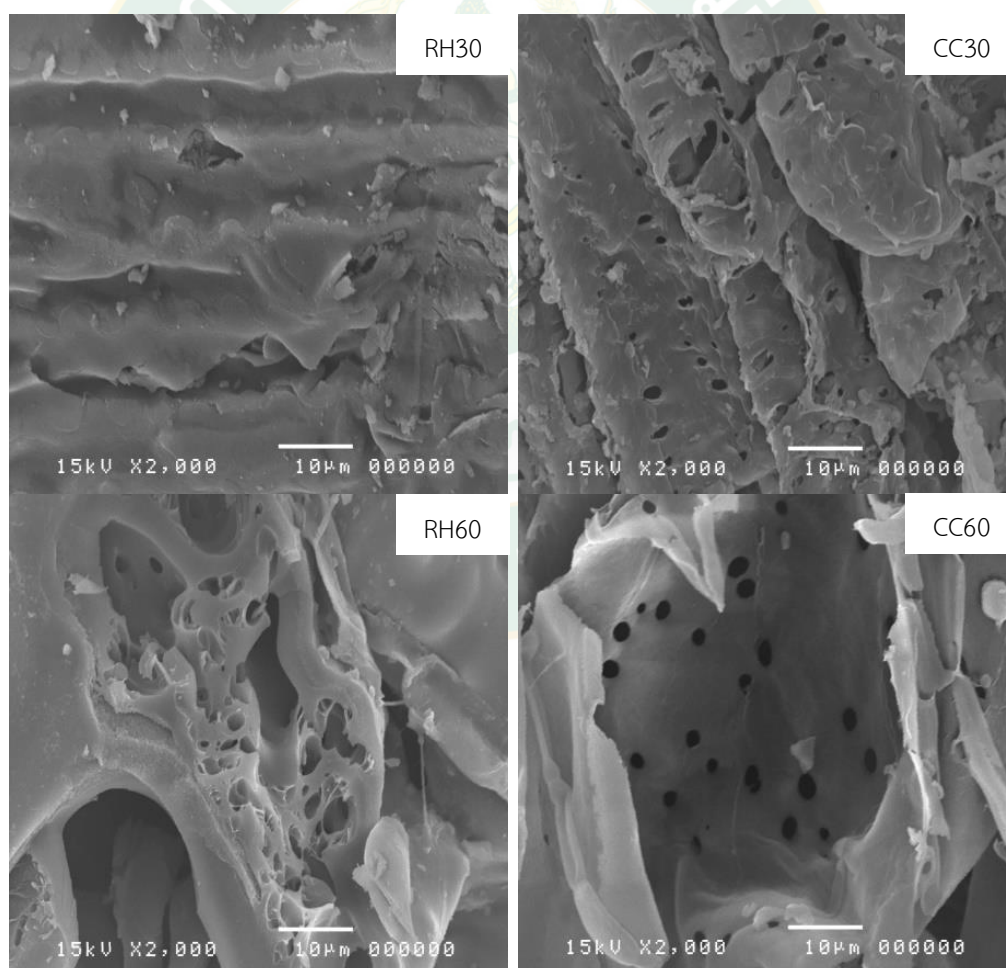


ภาพที่ 68 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

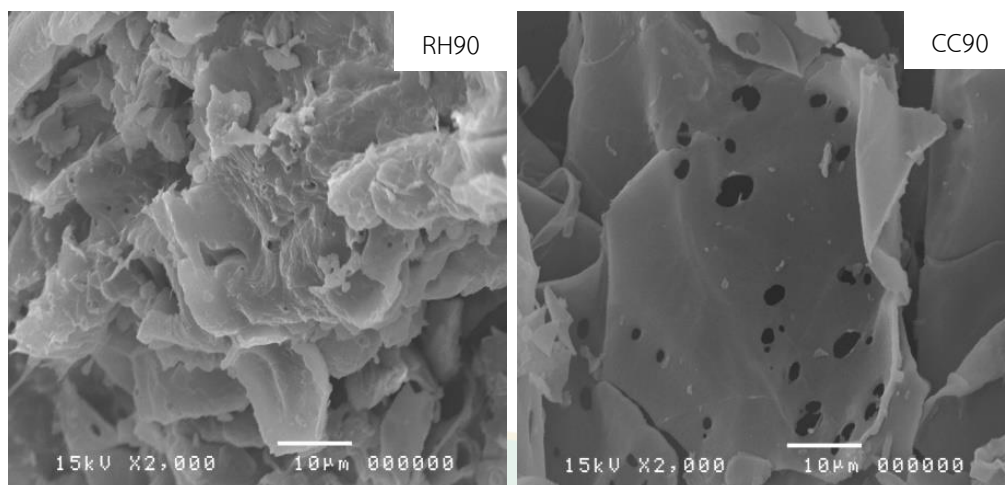
2 ผลกระทบของเวลาต่อรูพรุนถ่านชีวภาพ

การศึกษาระยะเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่มีผลกระทบต่อความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ ได้นำเงื่อนไขอุณหภูมิ 500 °C ของถ่านชีวภาพแกลบที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 min (RH30, RH60 และ RH90 ตามลำดับ) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CC30, CC60 และ CC90 ตามลำดับ) เกิดรูพรุนรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของรูพรุนเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 69 สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการกระจายขนาดและรูพรุน (BET surface area) พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิว 7.16.11 และ 8.20 m²/g ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุน 0.0052 และ 0.0091 cm³/g ตามลำดับ เนื่องจากซังข้าวโพดมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่เป็นเซลลูโลสสูงกว่าแกลบทำให้ผนังเซลล์ไม่แข็งแรงเหมือนแกลบที่มีโครงสร้างเป็นลิกนินสูงทำให้ซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีการแตกตัวของอนุภาคโครงสร้างชีวเคมีสูงกว่าแกลบจึงส่งผลให้มีการกระจายของ

พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงกว่าแคลบ (Wannapeera et al., 2008) โดยถ่านชีวภาพแคลบและซังข้าวโพดมีความกว้างของรูพรุนคือ 67.30 และ 65.02 Å ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มเวลาที่ 90 min รูพรุนเกิดความเสียหาย โดยรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างพื้นที่ผิวลดลง (Yan et al., 2017) ซึ่งเกิดจากการการหลุดออกของสารระเหยที่เพิ่มสูงขึ้น (Purevsuren et al., 2003) จากภาพสังเกตได้ว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณรูพรุนสูงกว่าแคลบเนื่องจากซังข้าวโพดมีองค์ประกอบของเซลลูโลสสูงกว่าแคลบ เมื่อทำการไพโรไลซิสเซลลูโลสในซังข้าวโพดสามารถสลายตัวได้ง่าย ทำให้โครงสร้างรูพรุนยังคงเดิม ในขณะที่แคลบมีความเป็นรูพรุนน้อยเป็นเพราะแคลบมีโครงสร้างของลิกนินสูง โดยลิกนินเป็นสารชีวเคมีที่สลายตัวได้ยาก ภายหลังจากกระบวนการไพโรไลซิสจึงมีลักษณะเป็นก้อน และมีรูพรุนน้อยดังเงื่อนไขของแคลบที่ระยะเวลา 90 min (RH90)



ภาพที่ 69 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ



ภาพที่ 69 ลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพ

การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพ ได้นำผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์โดยประมาณ และความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของการผลิตถ่านชีวภาพของแกลบและซังข้าวโพดมีอุณหภูมิไฟโรไลซิสอยู่ที่ 500 °C ระยะเวลา 60 min เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาที่มีการสลายตัวของชีวเคมีที่เหมาะสม ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูง และสัดส่วนเถ้าไม่สูง มีการกระจายของรูพรุนสูง และขนาดรูพรุนเหมาะสมต่อการกักเก็บแร่ธาตุและน้ำในดิน (Estela et al., 2018) ซึ่งหากใช้อุณหภูมิและระยะเวลาสูงมีผลทำให้ได้สัดส่วนเถ้าสูงส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้รูพรุนเกิดความเสียหาย ทำให้โครงสร้างพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการหลุดออกของสารระเหยที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนหลุดออก จากถ่านชีวภาพไปด้วย เมื่อได้ทำการคัดเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของการผลิตถ่านชีวภาพแล้ว ได้นำถ่านชีวภาพวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวลและถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นคือ $52.59 \pm 0.13\%$ และ $71.41 \pm 0.11\%$ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 25.16% และ 37.32% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีปริมาณลดลงอยู่ที่ $7.45 \pm 0.22\%$ และ $10.26 \pm 0.09\%$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 12 เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงของกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารลิกนิน ทำให้ไฮโดรเจน

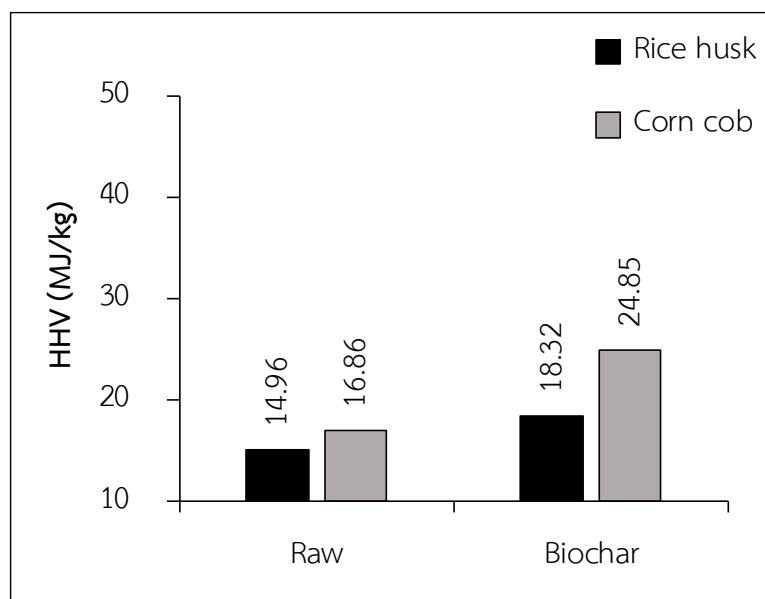
และออกซิเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามคาร์บอนของถ่านชีวภาพก็ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล (Yan et al., 2017) ซึ่งจากตารางที่ 12 จะเห็นว่าซังข้าวโพดมีคาร์บอนสูงกว่าแกลบ จึงส่งผลให้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีคาร์บอนสูงกว่าถ่านชีวภาพแกลบ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนนี้เป็นคาร์บอนเสถียร หรือเป็นคาร์บอนที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ เกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกที่มีความเสถียรของคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น (Asli et al., 2016)

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

Ultimate analysis	ชีวมวล		ถ่านชีวภาพ	
	แกลบ	ซังข้าวโพด	แกลบ	ซังข้าวโพด
คาร์บอน (%)	39.36±0.17	44.76±0.47	52.59±0.13	71.41±0.11
ออกซิเจน (%)	38.53±0.49	43.99±0.41	7.45±0.22	10.26±0.09
ไนโตรเจน (%)	0.35±0.00	0.52±0.00	0.49±0.12	0.85±0.02
ไฮโดรเจน (%)	5.29±0.02	5.89±0.02	2.21±0.05	3.06±0.01
ซัลเฟอร์ (%)	0.03±0.00	0.04±0.00	0.02±0.00	0.03±0.00

2. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

แกลบและซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชีวภาพ เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่ามีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 18.33%-32.18% ซึ่งค่าความร้อนนี้มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นและสัดส่วนเถ้า (Jonsson, 2016) อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนนี้ยังเกิดมาจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอน เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะทำให้คาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของถ่านชีวภาพสูงขึ้น (Frederik et al., 2013) ดังภาพที่ 70 สังเกตได้ว่าซังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูงกว่าแกลบ เนื่องจากซังข้าวโพดมีปริมาณเถ้าที่ต่ำกว่าแกลบ เมื่อชีวมวลทั้ง 2 ชนิดมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจึงส่งผลให้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูงกว่าแกลบตามไปด้วย โดยถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าความร้อนอยู่ที่ 18.32 และ 24.85 MJ/kg ตามลำดับ



ภาพที่ 70 ค่าความร้อนของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

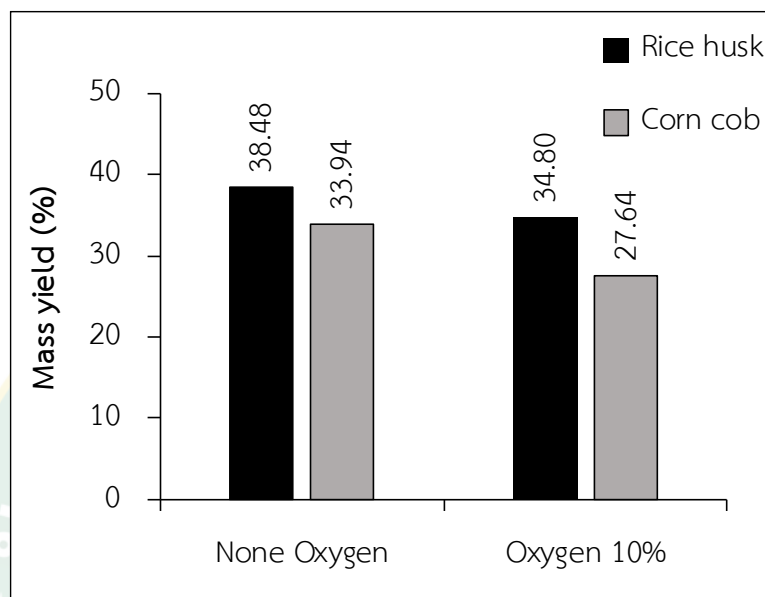
การศึกษาการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

การศึกษาการใช้ออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า เพื่อนำไปสู่การผลิตถ่านชีวภาพระดับชุมชนหรืออุตสาหกรรม เนื่องจากในการผลิตถ่านชีวภาพในระดับชุมชนเป็นการผลิตค่อนข้างใหญ่ หากมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนมีราคาสูงซึ่งส่งผลให้ราคาต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพสูงตามไปด้วย ในขณะที่ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมการใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพอาจควบคุมก๊าซปริมาณไนโตรเจนได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาผลของก๊าซออกซิเจนหรืออากาศที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส โดยในการทดสอบนี้ได้ใช้ปริมาณก๊าซออกซิเจน 10% ของไนโตรเจน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 4-6 °C/min วิเคราะห์ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพและการวิเคราะห์โดยประมาณ ประกอบด้วยการวิเคราะห์ความชื้น สารระเหย ปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัว โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์ผลก๊าซออกซิเจนต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ (Mass yield) พบว่าร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าลดลงอยู่ที่ 34.80% และ 27.64% ตามลำดับ ซึ่งการใช้ ออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นการเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบวนการ

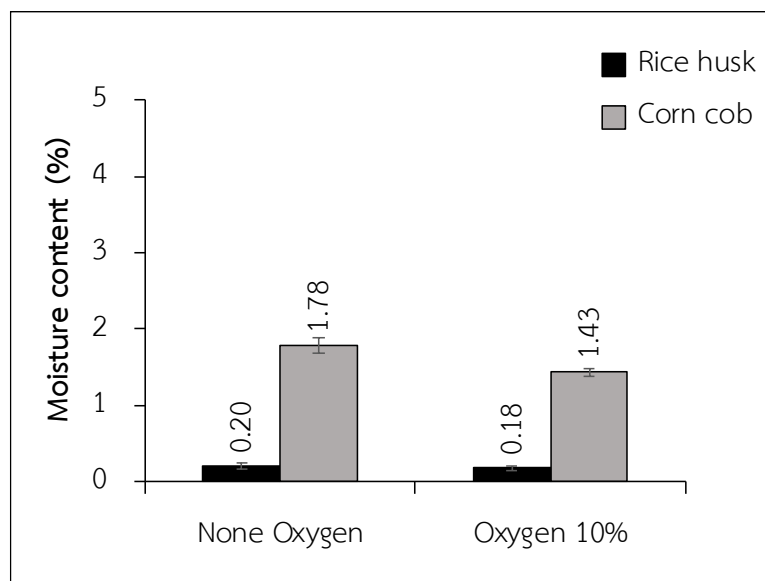
ไฟโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการคลายความร้อนภายในชีวมวล (Shevchenko et al., 2019) ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพลดลงดังภาพที่ 71 ซึ่งร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขอุณหภูมิไฟโรไลซิสแบบซ้ำที่ 600 °C



ภาพที่ 71 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ

2. ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อความชื้น

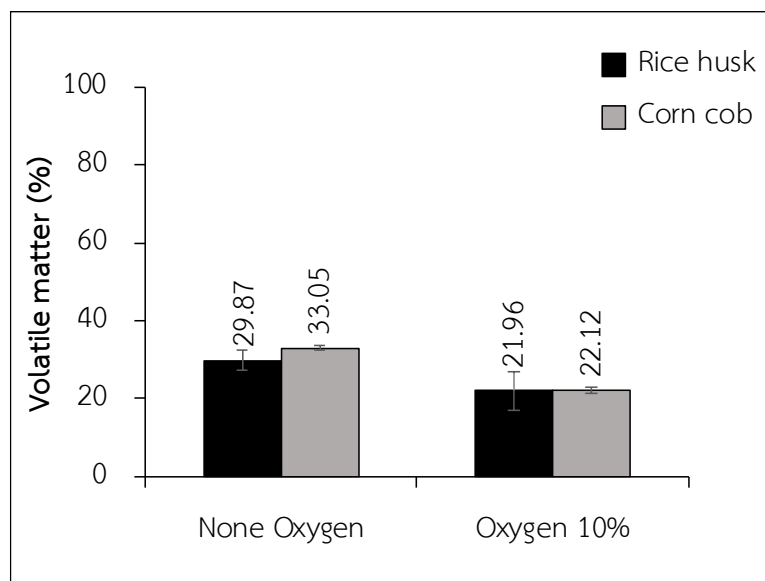
ผลการศึกษาการใช้ก๊าซออกซิเจนต่อปริมาณความชื้นของถ่านชีวภาพ พบว่าการเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการไฟโรไลซิสแบบซ้ำส่งผลให้ความชื้นต่ำกว่าการไม่ใช้ออกซิเจน โดยการเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการไฟโรไลซิสแบบซ้ำจะส่งผลให้ชีวมวลเกิดการออกซิเดชันกับอากาศเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความร้อนในกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น (Shevchenko et al., 2019) และส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ในชีวมวลระเหยได้สูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มออกซิเจนทำให้ความชื้นของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดลดลงคือ $1.78 \pm 0.10\%$ และ $1.43 \pm 0.06\%$ แสดงดังภาพที่ 72



ภาพที่ 72 ผลกระทบของการกำซอกซิเจนต่อความชื้น

3. ผลกระทบของกำซอกซิเจนต่อสารระเหย

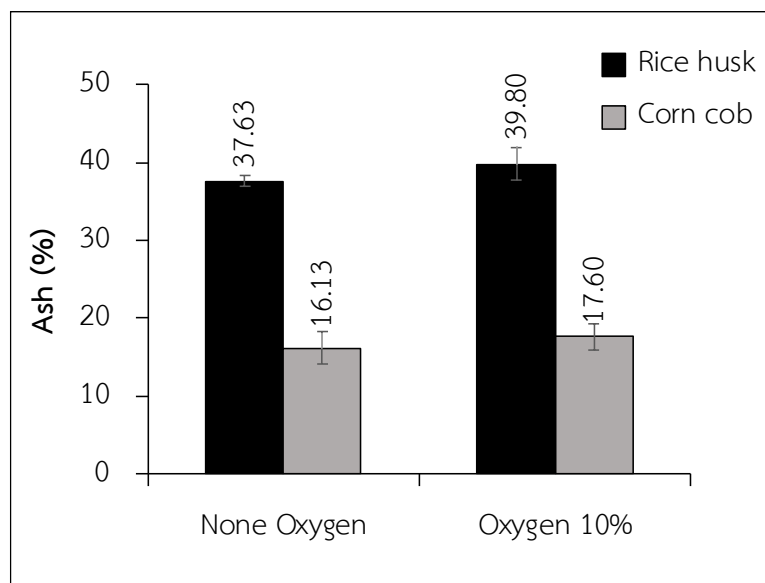
ผลกระทบของการเพิ่มออกซิเจนต่อสารระเหย พบว่าการเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าส่งผลให้สารระเหยของถ่านชีวภาพของแกลบและซังข้าวโพดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เพิ่มออกซิเจน ซึ่งการเพิ่มออกซิเจนส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้สารระเหยสลายตัวได้เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณสารระเหยของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง $21.96 \pm 5.08\%$ - $22.12 \pm 0.81\%$ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณสารระเหยของกรณีไม่เพิ่มออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง $29.87 \pm 2.52\%$ - $33.05 \pm 0.52\%$ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 73



ภาพที่ 73 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อสารระเหย

3. ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อเถ้า

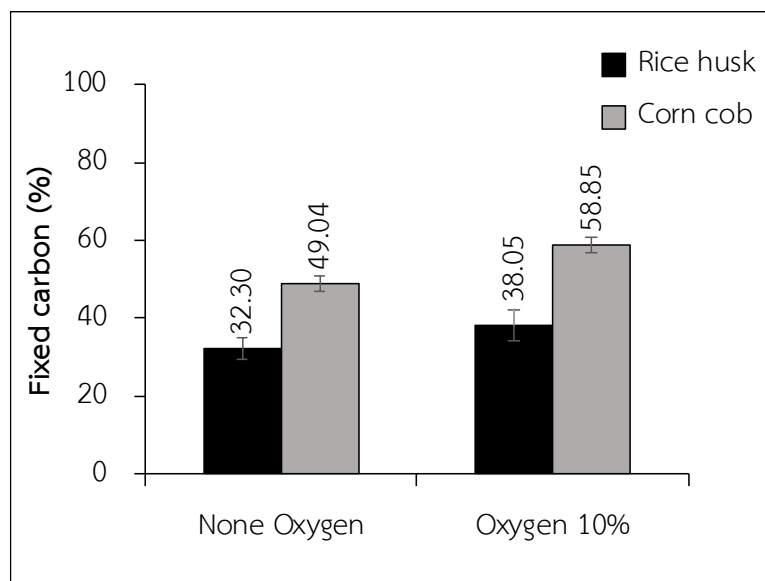
ภาพที่ 74 ผลของการใช้ก๊าซออกซิเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าต่อเถ้า พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีสัดส่วนเถ้าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยคือ $39.80 \pm 2.15\%$ และ $17.60 \pm 1.76\%$ ตามลำดับ ในขณะที่การไม่เพิ่มออกซิเจนจะมีสัดส่วนเถ้า $37.63 \pm 0.65\%$ และ $16.13 \pm 2.06\%$ ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น 5.45% และ 8.35% ตามลำดับ ซึ่งเถ้าที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการสลายตัวของสารระเหยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารระเหยบางชนิดที่ไม่สามารถระเหยได้ยังคงหลงเหลืออยู่ในชีวมวล (Jie et al., 2015)



ภาพที่ 74 ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนจากต่อถั่ว

3. ผลกระทบของก๊าซออกซิเจนต่อคาร์บอนคงตัว

ภาพที่ 75 แสดงผลของการป้อนออกซิเจนจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเข้าสู่ต่อคาร์บอนคงตัว พบว่าสัดส่วนคาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นคือ $38.05 \pm 3.90\%$ และ $58.85 \pm 2.02\%$ ตามลำดับ ในขณะที่การไม่เพิ่มออกซิเจนจะมีคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าการใช้ออกซิเจนคือ $32.30 \pm 2.84\%$ และ $49.04 \pm 1.98\%$ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวเกิดจากสัดส่วนของสารระเหยและความชื้นถูกกำจัดออกไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อน (Jonsson, 2016) และความเป็นรูปพรุนของถ่านชีวภาพ (Estela et al., 2018)



ภาพที่ 75 ผลของการบ้อนอกชีจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบข้าต่อคาร์บอนคงตัว

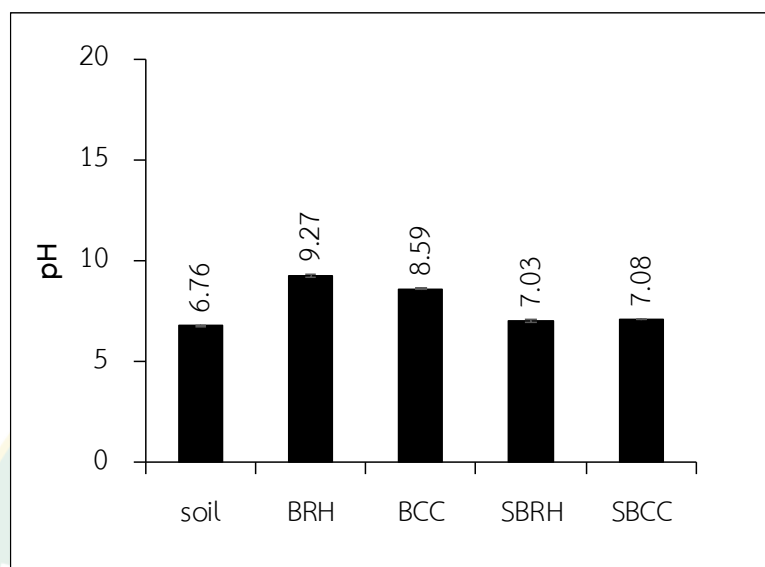
คุณสมบัติถ่านชีวภาพด้านการเกษตร

การนำถ่านชีวภาพมาใช้งานด้านเกษตรกรรม ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง สภาพการนำไฟฟ้าของดิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความสามารถในการอุ้มน้ำ และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน เพื่อประยุกต์ใช้กับดิน (soil) โดยใช้ถ่านชีวภาพแกลบ (BRH) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (BCC) ได้ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ (SBRH) และดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (SBCC) ในอัตราส่วนถ่านชีวภาพ 1,000 kg/ไร่ รวมถึงได้ทดสอบกับการปลูกพืชระยะสั้น รายละเอียดการวิเคราะห์งานวิจัยด้านการเกษตรมีดังต่อไปนี้

1. ความเป็นกรด-ด่าง pH ของดินและถ่านชีวภาพ

ภาพที่ 76 แสดงค่า pH ของดินและถ่านชีวภาพ พบว่าดินมีค่า pH เฉลี่ยอยู่ที่ 6.76 ± 0.02 ถือว่าดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าความเป็นกลางทางกรด-ด่าง ซึ่งดินที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชจะต้องมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.6-7.3 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) สำหรับถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่า pH เฉลี่ยคือ 9.27 ± 0.06 และ 8.59 ± 0.04 ตามลำดับ โดยทั่วไปค่า pH ของถ่านชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสแบบข้าสูง ซึ่งเกิดจากเกลืออัลคาไลหรือปริมาณเถ้ายังคงเหลืออยู่ในถ่านชีวภาพแม้อุณหภูมิไพโรไลซิสจะสูงก็ตาม (Asli et al., 2016) เมื่อนำดินผสมกับถ่านชีวภาพ พบว่าค่า pH ของดินมีค่าความเป็นกลางยิ่งขึ้นโดยดินผสมถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่า

pH เฉลี่ยอยู่ที่ 7.03 ± 0.06 และ 7.08 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในดินซึ่งมีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 7 (Johannes et al., 2011)



ภาพที่ 76 ความเป็นกรด-ด่างของดินและถ่านชีวภาพ

2. สภาพการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพในดิน

ตารางที่ 13 แสดงสภาพการนำไฟฟ้าของดินและถ่านชีวภาพในดิน พบว่าดินมีสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ $29.47 \pm 0.50 \mu\text{S/cm}$ โดยสภาพการนำไฟฟ้านี้ใช้ประเมินระดับความเค็มของดินหรือปริมาณธาตุที่มีประจุในดินโดยทั่วไปควรมีความเค็มไม่เกินระดับความเค็มน้อยคือ 4 dS/m หรือ $4,000 \mu\text{S/cm}$ (นันทรัตน์, 2558) ซึ่งดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าน้อยกว่าระดับความเค็มน้อยที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ สำหรับถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ $270 \pm 23.58 \mu\text{S/cm}$ และ $1,340 \pm 10.00 \mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับความเค็มสูงกว่าดิน โดยสภาพการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากอนุภาคของกระบวนการไพโรไลซิสในการเพิ่มคาร์บอน ทำให้เกิดเกลืออัลคาไลในถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น (Tasneem et al., 2017) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพการนำไฟฟ้านี้แสดงถึงสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากมีระดับความเค็มสูง ดังนั้นการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินจึงต้องใช้อัตราส่วนถ่านชีวภาพที่เหมาะสม เนื่องจากระดับความเค็มจะแปรผันตรงกับการเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพ (Asli et al., 2016) จากการทดสอบนี้ พบว่าการนำถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมาใช้กับดินมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยคือ 30.87 ± 1.31 และ $31.14 \pm 0.23 \mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงความเค็มไม่เค็ม จึงไม่มีผลกระทบต่ออาการของพืช

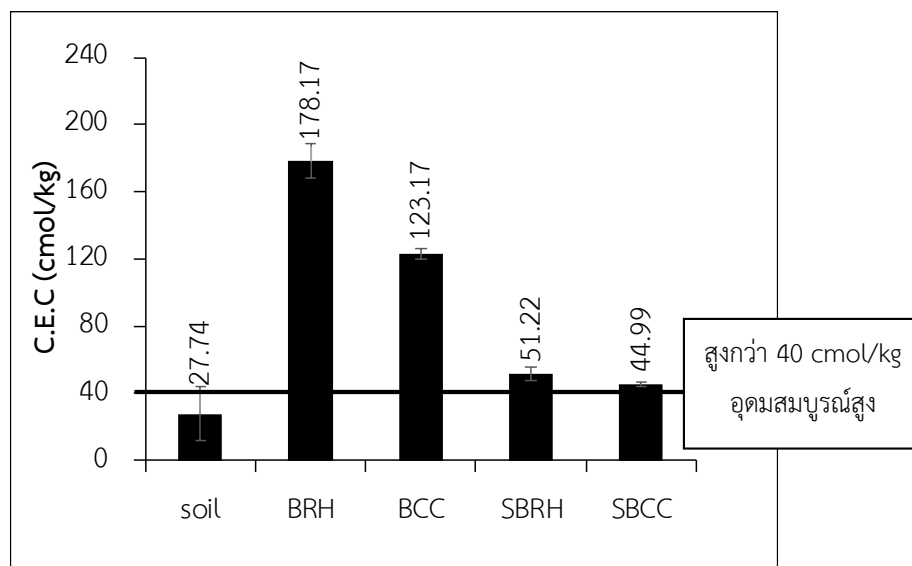
ตารางที่ 13 สภาพการนำไฟฟ้าของดินและถ่านชีวภาพในดิน

เงื่อนไข	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ดิน	29.47 \pm 0.50
ถ่านชีวภาพแกลบ	270.00 \pm 23.58
ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	1,340.00 \pm 10.00
ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ	30.87 \pm 1.31
ดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	31.14 \pm 0.23
อาการของพืช*	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ไม่มีผลกระทบต่อพืช	น้อยกว่า 2,000 (ไม่เค็ม)
มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตพืชไม่ทนเค็ม	2,000-4,000 (เค็มน้อย)
มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด	4,000-8,000 (เค็มปานกลาง)
เฉพาะพืชทนเค็มเท่านั้นจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้	8,000-16,000 (เค็มมาก)
เฉพาะพืชทนเค็มจัดจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้	มากกว่า 16,000 (เค็มจัด)

* ทิมา นันทรรัตน์ (2558)

3. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพในดิน

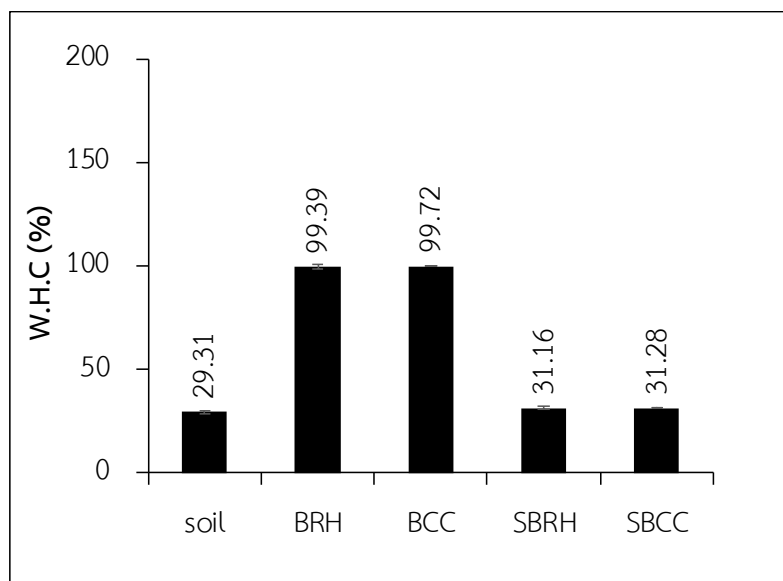
ภาพที่ 77 แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพในดินเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน จากการทดสอบพบว่าดินมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเฉลี่ยอยู่ที่ 27.74 \pm 16.17 cmol/kg ซึ่งถือว่าดินที่ใช้ในการทดสอบมีความอุดมสมบูรณ์สูง โดยมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงกว่า 25-40 cmol/kg (นันทรรัตน์, 2558) ในขณะที่ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเฉลี่ยอยู่ที่ 178.71 \pm 10.41 cmol/kg และ 123.17 \pm 2.86 cmol/kg ตามลำดับ จากภาพเห็นได้ชัดว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพมีค่าสูง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีปริมาณเถ้าสูงซึ่งส่งผลให้มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงตามไปด้วย (Asli et al., 2016) เมื่อนำดินผสมกับถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดส่งผลให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 51.22 \pm 4.23 และ 44.99 \pm 1.15 cmol/kg การผสมถ่านชีวภาพลงในดินนั้นทำให้ถ่านชีวภาพทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดินเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เพิ่มประจุลบสุทธิ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจึงเพิ่มขึ้น (เสาวคนธ์, 2556)



ภาพที่ 77 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของถ่านชีวภาพในดิน

4. ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและถ่านชีวภาพ

ภาพที่ 78 แสดงความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและถ่านชีวภาพ พบว่าดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำ $29.31 \pm 0.88\%$.ในขณะที่ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีความสามารถในการอุ้มน้ำ $99.39 \pm 0.92\%$ และ $99.72 \pm 0.19\%$ ตามลำดับ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติความเป็นรูพรุนที่ช่วยในการกักเก็บน้ำและแร่ธาตุ (Yan et al., 2017) ดังนั้นเมื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้ประโยชน์กับดิน โดยใช้ถ่านชีวภาพ 1,000 kg/ไร่ ส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ผสมถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยคือ $31.16 \pm 0.84\%$ และ $31.28 \pm 0.25\%$ ตามลำดับ



ภาพที่ 78 ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินและถ่านชีวภาพ

5. สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน

การวิเคราะห์สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน พบว่าดินมีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ย 85.55 ในขณะที่ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำคือ 19.27 และ 15.06 ซึ่งสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนในดิน และความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนในดิน (กันยาพร และสิทธิบุรณ์, 2559) เมื่อนำถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิดมาใช้กับดินพบว่าดินมีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงคือ 70.00 และ 74.00 เนื่องจากถ่านชีวภาพมีบทบาทต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการลดลงของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนนี้ ส่งผลให้พืชสามารถดูดซับไนโตรเจนในดินได้เพิ่มขึ้น (เสาวคนธ์, 2557) รายละเอียดสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ถ่านชีวภาพ และการผสมระหว่างดินกับถ่านชีวภาพ ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน

เงื่อนไข	Organic C (%)	Total N (%)	C/N ratio
ดิน	0.77±0.02	0.009±0.50	85.55±0.01
ถ่านชีวภาพแกลบ	2.12±0.23	0.11±4.77	19.27±0.05
ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	2.56±0.57	0.17±7.76	15.06±0.06
ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ	0.77±0.03	0.01±0.49	70.00±0.10
ดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด	0.74±0.02	0.01±0.38	74.00±0.04

6. การเจริญเติบโตของพืชเมื่อใช้ถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช พบว่ามีการเจริญโตของต้นคะน้าที่อายุ 60 วัน ที่ปลูกด้วยดินควบคุม ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ และดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 15 พบว่าคะน้ามีความยาวรากเฉลี่ยแตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยรากของคะน้าที่ปลูกกับดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีรากยาวสุดคือ 8.67 ± 0.76 cm รองลงมาได้แก่ ดินควบคุม และดินผสมถ่านชีวภาพแกลบโยมีความยาวรากเฉลี่ย 7.17 ± 0.58 และ 7.50 ± 0.50 cm ตามลำดับ

การเจริญเติบโตของลำต้นคะน้า พบว่าต้นคะน้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ซึ่งการปลูกด้วยดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นสูงสุดคือ 0.83 ± 0.15 cm ในขณะที่การปลูกด้วยถ่านชีวภาพแกลบมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดคือ 0.68 ± 0.08 cm อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสูงของต้นคะน้าที่ปลูกด้วยถ่านชีวภาพแกลบมีความสูงสูงกว่าการปลูกด้วยดินควบคุมและดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเฉลี่ย 27.00 ± 0.87 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างกัน ($p < 0.05$)

การเจริญเติบโตของใบคะน้า พบว่าต้นคะน้ามีความกว้างและความยาวเฉลี่ยของใบเฉลี่ยแตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยต้นคะน้าที่ปลูกด้วยดินผสมถ่านชีวภาพแกลบมีความกว้างเฉลี่ยสูงสุดคือ 9.60 ± 0.53 cm รองลงมาได้แก่ ดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดและดินควบคุมมีความกว้างของใบเฉลี่ย 8.43 ± 0.60 และ 8.03 ± 0.72 cm ตามลำดับ ในขณะที่ต้นคะน้าที่ปลูกด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีความยาวเฉลี่ยสูงสุดคือ 10.83 ± 0.76 รองลงมาได้แก่ ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบและดินควบคุมมีความยาวใบเฉลี่ย 10.77 ± 1.17 และ 10.00 ± 0.87 cm ตามลำดับ

การวิเคราะห์น้ำหนักสดและแห้งของต้นคะน้า พบว่าต้นคะน้ามีน้ำหนักสดเฉลี่ยแตกต่างกัน ($p < 0.05$) การปลูกด้วยดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดให้น้ำหนักสดของต้นคะน้าสูงสุดเฉลี่ย

25.67±4.93 g รองลงมาได้แก่ การปลูกด้วยดินผสมถ่านชีวภาพแกลบและดินควบคุมมีน้ำหนักสดเฉลี่ย 23.00±3.00 และ 20.33±3.06 g ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) โดยการปลูกด้วยถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดให้มือน้ำหนักแห้งสูงสุดเฉลี่ย 1.79±0.29 g รองลงมาได้แก่ ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบและดินควบคุมมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 1.44±0.25 และ 1.17±0.10 g ตามลำดับ

การเจริญเติบโตของต้นคะน้าเมื่อใช้ดินผสมถ่านชีวภาพมีแนวโน้มการเจริญเติบโตดีกว่าดินควบคุมในด้านของความยาวราก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของต้น ความกว้างและความยาวของใบ และน้ำหนักสด โดยที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามในด้านน้ำหนักแห้งไม่มีค่าความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากดินยังขาดแร่ธาตุอาหารที่สำคัญต่อต้นคะน้า ส่งผลให้ต้นคะน้ามีน้ำหนักแห้งของดินผสมถ่านชีวภาพไม่แตกต่างจากดินควบคุม จากภาพที่ 79-81 สังเกตได้ว่าต้นคะน้าที่ปลูกด้วยดินควบคุมและดินผสมถ่านชีวภาพมีลักษณะทางกายภาพไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการทดสอบระยะสั้น ส่งผลให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของดิน แต่ยังไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ต้นคะน้าจึงมีการเจริญเติบโตของน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้การใช้ถ่านชีวภาพจะต้องมีการใช้ร่วมกับปุ๋ยเพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตให้กับพืช (จาวภา และคณะ, 2560) อีกทั้งในการทดสอบนี้ไม่ได้มีการใส่ปุ๋ยซึ่งทำให้ดินอาจมีแร่ธาตุอาหารในดินไม่เพียงพอต่อพืช ทำให้การเจริญเติบโตของคะน้าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการจะทำให้ต้นคะน้ามีผลผลิตดีจึงต้องมีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยโดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน (เสาวคนธ์, 2556) อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านชีวภาพเป็นการปรับปรุงทำให้ดินมีโครงสร้างดีขึ้นเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ช่วยในการปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืช ซึ่งจะส่งผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืช (เกษฎา และคณะ, 2561) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan et al. (2017), Estela et al. (2018) และ Tasneem et al. (2017)

ตารางที่ 15 การเจริญเติบโตของพืช

เงื่อนไข	ความยาวราก		ลำต้น			ใบ			น้ำหนัก	
	(cm)	ขนาดลำต้น (cm)	สูง (cm)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สด (g)	แห้ง (g)			
ดินควบคุม	7.50±0.50	0.73±0.12	25.00±2.18	8.03±0.72	10.00±0.87	20.33±3.06	1.17±0.10			
ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ	7.17±0.58	0.68±0.08	27.000.87	9.60±0.53	10.77±1.17	23.00±3.00	1.44±0.25			
ดินผสมถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพด	8.67±0.76	0.83±0.15	26.17±0.58	8.43±0.60	10.83±0.76	25.67±4.93	1.79±0.29			
ANOVA (Oneway)	0.057*	0.355*	0.285*	0.051*	0.526*	0.296*	0.045**			

* มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความน่าจะเป็น $p \leq 0.05$

** ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความน่าจะเป็น $p > 0.05$



ภาพที่ 79 ต้นคะน้าที่ปลูกกับดินควบคุม



ภาพที่ 80 ต้นคะน้าที่ปลูกกับดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ



ภาพที่ 81 ต้นคะน้ำที่ปลูกกับดินผสมถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานการผลิตถ่านชีวภาพ

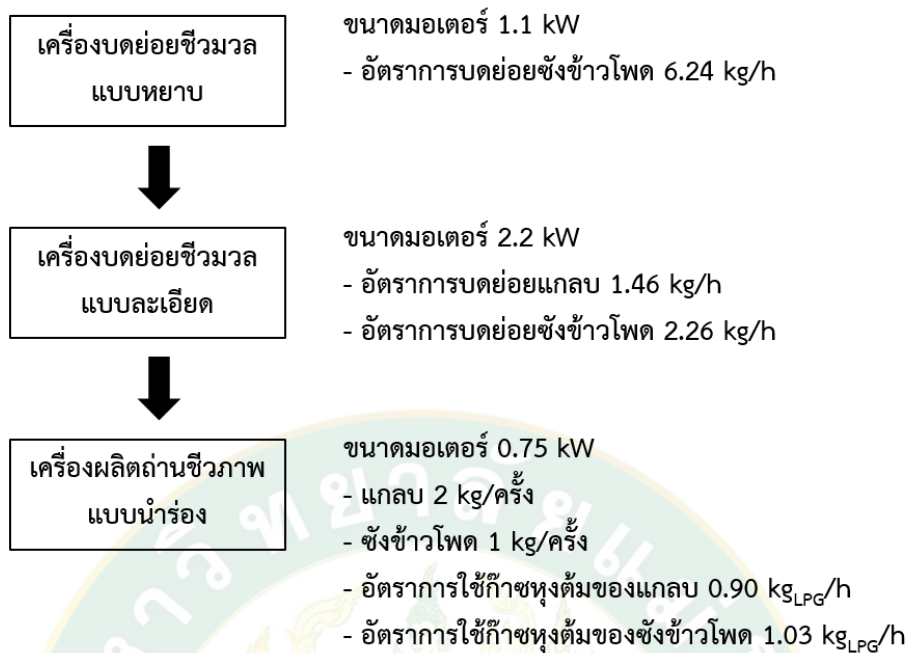
การอัตราการใช้พลังงานสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ ได้นำเงื่อนไขอุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 60 min ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพนำมาทดสอบในระดับ Pilot scale อัตราการป้อนความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-6 °C/min โดยใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพจากไฟฟ้า และความร้อน ซึ่งพลังงานไฟฟ้าได้ใช้ในกระบวนการบดย่อยชีวมวล และกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ ดังภาพที่ 82 แสดงไดอะแกรมอัตราการใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนําร่องมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของกรรมพลาแกนไพโรไลซิสเพื่อให้ชีวมวลได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงจากก๊าซหุงต้ม (LPG) ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า และอัตราการใช้พลังงานความร้อน จากตารางที่ 16 พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพแกลบมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดคือ 4.35 และ 7.19 kWh_e/kg_{Biochar} ตามลำดับ เนื่องจากถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีผลผลิตถ่านชีวภาพที่ต่ำกว่าถ่านชีวภาพแกลบ คือ 0.30 และ 0.77 kg_{Biochar} ตามลำดับ ส่งผลให้มีอัตราการพลังงานไฟฟ้าสูง เช่นเดียวกับการใช้พลังงานความร้อนสังเกตได้ว่าการผลิตถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีอัตราการใช้พลังงานความร้อนสูงกว่าถ่านชีวภาพแกลบคือ 114.77 และ 47.03 kWh_{th}/kg_{Biochar} ตามลำดับ โดยมีอัตราการใช้ก๊าซหุงต้มอยู่ในช่วง 0.90-1.03 kg_{LPG}/h จากภาพที่ 83

สังเกตได้ว่าการผลิตถ่านชีวภาพมีอัตราการใช้พลังงานความร้อนสูงกว่าพลังงานไฟฟ้า 90.75%-93.76% เนื่องจากในการผลิตถ่านชีวภาพนี้มีการใช้ความร้อนเพื่อเป็นแหล่งความร้อนในการแปรสภาพชีวมวลสูงกว่าการใช้ไฟฟ้า ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานความร้อนสูงกว่าพลังงานไฟฟ้า 90.75%-93.76%

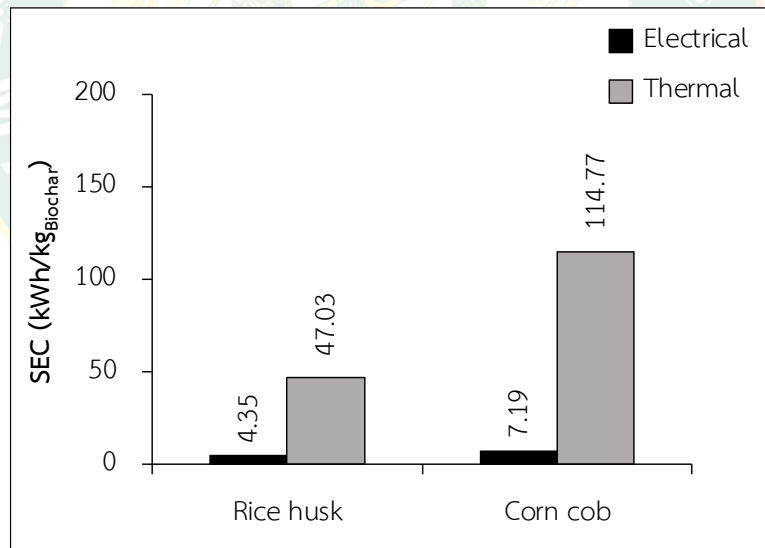
ตารางที่ 16 อัตราการใช้พลังงานผลิตถ่านชีวภาพ

รายละเอียด	แกแลบ	ซังข้าวโพด
ชีวมวล ($\text{kg}_{\text{Biomass}}$)	2	1
ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ ($\text{kg}_{\text{Biochar}}$)	0.77	0.30
ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต (h)	2.92	2.42
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ($\text{kWh}_e/\text{kg}_{\text{Biochar}}$)	4.35	7.19
เครื่องบดย่อยแบบหยาบ (มอเตอร์ขนาด 1.1 kW)		
- อัตราการบดย่อย ($\text{kg}_{\text{Biomass}}/\text{h}$)	-	6.24
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ($\text{kWh}_e/\text{kg}_{\text{Biomass}}$)	-	0.18
เครื่องบดย่อยแบบละเอียด (มอเตอร์ขนาด 2.2 kW)		
- อัตราการบดย่อย ($\text{kg}_{\text{Biomass}}/\text{h}$)	1.46	2.26
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ($\text{kWh}_e/\text{kg}_{\text{Biomass}}$)	1.51	0.97
เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนําร่อง (มอเตอร์ขนาด 0.75 kW)		
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh_e)	2.19	1.81
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ($\text{kWh}_e/\text{kg}_{\text{Biochar}}$)	2.84	6.04
อัตราการใช้พลังงานความร้อน ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{kg}_{\text{Biochar}}$)	47.03	114.77
ปริมาณก๊าซหุงต้มเฉลี่ย (kg_{LPG})	2.62	2.49
อัตราการใช้ก๊าซหุงต้ม ($\text{kg}_{\text{LPG}}/\text{h}$)	0.90	1.03
ค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{LPG}}$)	49,71.12*	49,71.12*
อัตราการใช้พลังงานความร้อน (kWh_{th})	36.21	34.43

* ที่มา บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) (2555)



ภาพที่ 82 ไดอะแกรมอัตราการใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพ



ภาพที่ 83 อัตราการใช้พลังงานการผลิตถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพเบื้องต้น

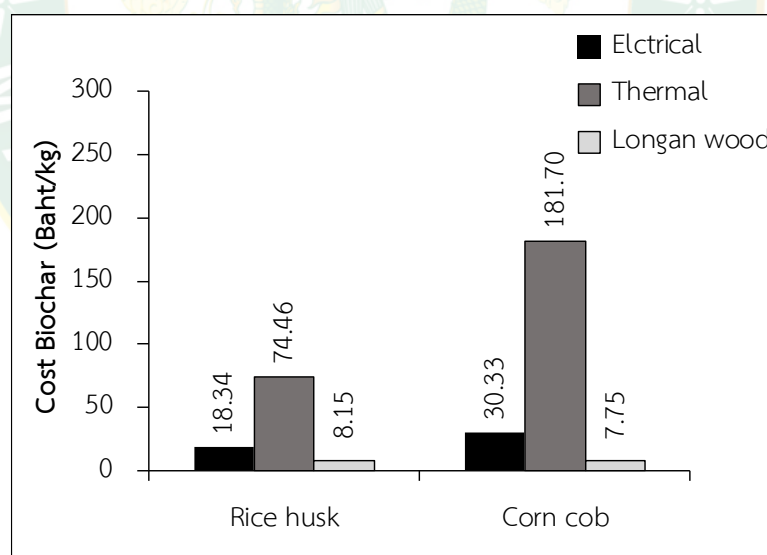
การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านพลังงานสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพของชีวมวลแต่ละประเภท ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราการใช้พลังงานเครื่องบดย่อยแบบหยาบและแบบละเอียด การใช้พลังงานของเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนําร่องสามารถวิเคราะห์ได้เป็นต้นทุนทางพลังงานไฟฟ้าและต้นทุนพลังงานความร้อน โดยการอัตราการใช้พลังงานสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ รายละเอียดดังภาพที่ 83 ประกอบด้วยอัตราการใช้พลังงานเครื่องบดย่อยแบบหยาบและแบบละเอียด ซึ่งเครื่องบดย่อยทั้ง 2 ชนิด มีขนาดมอเตอร์คือ 1.1 kW และ 2.2 kW ตามลำดับ สำหรับเครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนําร่อง (Pilot scale) มอเตอร์มีขนาด 0.75 kW ใช้ในการหมุนเพลลาแกนชุดไฟโรไลซิสเพื่อให้ชีวมวลได้รับความร้อนจากก๊าซหุงต้ม (LPG) ได้อย่างทั่วถึง การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานจึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อน ดังตารางที่ 17 และภาพที่ 84 พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.35 และ 7.19 kWh_e/kg_{Biochar} ตามลำดับ อัตราการใช้พลังงานความร้อนเฉลี่ยคือ 47.03 และ 114.77 kWh_{th}/kg_{Biochar} ส่งผลให้การผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีต้นทุนทางพลังงานโดยรวมเฉลี่ย 98.80 และ 218.30 Baht/ kg_{Biochar} ซึ่งมีต้นทุนใกล้เคียงกับงานวิจัยของ เบญจพร (2557) คือ 136.61 บาท/หน่วย (อัตราการผลิต 50 kg/วัน) และค่าแรง 300 บาท/วัน) ดังตารางที่ 18 โดยทั่วไปถ่านชีวภาพมีราคาต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพอยู่ในช่วง 10-35 Baht/kg (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารสำนักประชาสัมพันธ์เขต 3 จังหวัดเชียงใหม่, 2562; NanaGarden, 2014) ต้นทุนเฉลี่ยราคาถ่านชีวภาพของทั่วโลกมีค่าอยู่ที่ 81.36 Baht/kg (\$2.65 kg⁻¹) (Ahmed et al., 2016) ดังนั้นการผลิตถ่านชีวภาพในการทดสอบนี้จึงมีราคาต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบขนาดเล็กซึ่งใช้มวลของชีวมวลในการผลิตถ่านชีวภาพน้อยจึงส่งผลให้มีต้นทุนที่สูง อย่างไรก็ตามในการผลิตระดับชุมชนเป็นการผลิตที่ใช้มวลชีวมวลในการผลิตสูงอาจส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง หรือหากมีการนำชีวมวลประเภทไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนก็จะสามารถลดต้นทุนทางพลังงานความร้อนในการผลิตถ่านชีวภาพลงได้ ซึ่งมีต้นทุนทางด้านพลังงานความร้อนคือ 8.15 และ 7.75 บาท/ kg_{Biochar} สามารถลดต้นทุนทางด้านพลังงานความร้อน 89.05%-95.73% ดังภาพที่ 84 ส่งผลให้ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีต้นทุนเหลือเพียง 32.49 และ 44.08 บาท/kg_{Biochar} สามารถลดต้นทุนถ่านชีวภาพได้ 67.12%-79.81%

ตารางที่ 17 ต้นทุนทางพลังงานการผลิตถ่านชีวภาพเบื้องต้น

รายละเอียด	แกลบ	ซังข้าวโพด
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ($kWh_e/kg_{Biochar}$)	4.35	7.19
ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWh)	4.22*	4.22*
ต้นทุนไฟฟ้า (บาท/ $kg_{Biochar}$)	18.34	30.33
อัตราการใช้พลังงานความร้อน ($kWh_{th}/kg_{Biochar}$)	47.03	114.77
ราคาก๊าซหุงต้ม (บาท/ kg_{LPG})	24.2**	24.2**
ต้นทุนความร้อน (บาท/ $kg_{Biochar}$)	74.46	181.70
ค่าแรงงาน (บาท/ $kg_{Biochar}$)	6.00	6.00
ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ (บาท/ $kg_{Biochar}$)	98.80	218.30

* ที่มา สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) (2562ข)

** ที่มา สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) (2562ก)



ภาพที่ 84 ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ

จากข้อมูลข้างต้น พบว่าต้นทุนถ่านชีวภาพค่อนข้างสูงเนื่องจากการผลิตขนาดเล็กส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพสูง เมื่อพิจารณาการใช้ชีวมวลสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ พบว่าซังข้าวโพดสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ต่ำกว่าแกลบ เนื่องจากซังข้าวมีอัตราการผลิตต่ำ ในขณะที่มี

การใช้พลังงานความร้อนโดยมีการใช้ก๊าซหุงต้มใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.49-2.62 kg_{LPG}/ครั้ง ดังนั้นหากมีการขยายระบบการผลิตให้ใหญ่ขึ้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตถ่านลดลง 70.00%-85.52% โดยมีต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดอยู่ที่ 29.65 และ 31.57 บาท/kg_{Biochar} ตามลำดับ ซึ่งเป็นต้นทุนราคาที่อยู่ในช่วงเดียวกับราคาถ่านชีวภาพในตลาดโลกคือ 81.36 Baht/kg (\$2.65 kg⁻¹) (Ahmed et al., 2016)

ตารางที่ 18 ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อเพิ่มกำลังการผลิต

แกลบ	2 kg	5 kg	10 kg
ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ (kg _{Biochar})	0.77	1.93	3.85
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh _e /kg _{Biochar})	4.35	2.64	2.07
ต้นทุนไฟฟ้า (บาท/kg _{Biochar})	18.34	11.15	8.76
อัตราการใช้พลังงานความร้อน (kWh _{th} /kg _{Biochar})	47.03	18.81	9.41
ต้นทุนความร้อน (บาท/kg _{Biochar})	74.46	29.78	14.89
ค่าแรงงาน (บาท/kg _{Biochar})	6.00	6.00	6.00
ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ (บาท/kg _{Biochar})	98.8	46.93	29.65
ซังข้าวโพด	1 kg	5 kg	10 kg
ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ (kg _{Biochar})	0.30	1.50	3.00
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh _e /kg _{Biochar})	7.19	2.36	1.75
ต้นทุนไฟฟ้า (บาท/kg _{Biochar})	30.33	9.95	7.40
อัตราการใช้พลังงานความร้อน (kWh _{th} /kg _{Biochar})	114.77	22.95	11.48
ต้นทุนความร้อน (บาท/kg _{Biochar})	181.70	36.34	18.17
ค่าแรงงาน (บาท/kg _{Biochar})	6.00	6.00	6.00
ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ (บาท/kg _{Biochar})	218.03	51.95	31.57

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอ

สรุปผลการวิจัย

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ ภายใต้เงื่อนไขการควบคุม อุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 300-600 °C และ 30-90 min ตามลำดับ ผลกระทบของ อุณหภูมิไพโรไลซิสและระยะเวลาส่งผลให้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดลดลง 36.41% และ 29.79% ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไพโรไลซิส 600 °C ระยะเวลา 90 min ในขณะที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 °C ระยะเวลา 30 min ให้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพแกลบและ ซังข้าวโพดสูงสุดคือ 78.37% และ 62.47% ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาของ กระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนและปริมาณเถ้าสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นและ ปริมาณสารระเหยลดลง ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 7.16-8.20 m²/g รูพรุนมีความ กว้าง 65.02-67.30 Å นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดเพิ่ม สูงขึ้น 18.32 และ 24.85 MJ/kg ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านชีวภาพทั้งในด้านผลผลิตทางมวลและขนาดรูพรุนที่ เหมาะสม การเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้อุณหภูมิภายในกระบวนการไพโรไลซิส เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้น และปริมาณสารระเหยลดลง ซึ่งได้คุณสมบัติของถ่านชีวภาพใกล้เคียงกับการทดสอบอุณหภูมิ 600 °C

การผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.35-7.19 kWh_e/kg_{Biochar} อัตราการใช้พลังงานความร้อน 47.03-114.77 kWh_{th}/kg_{Biochar} ส่งผลให้ต้นทุนในการ ผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดคิดเป็น 98.80 และ 218.30 บาท/kg_{Biochar} หากมีการนำชีวมวล ประเภทไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการให้ความร้อนจะสามารถลดต้นทุนทางพลังงานความร้อน ในการผลิตถ่านชีวภาพลงได้ สามารถลดต้นทุนทางด้านพลังงานความร้อนลงเหลือเพียง 32.49 และ 44.08 บาท/kg_{Biochar} ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตในระบบที่ใหญ่ขึ้นก็ส่งผลให้ต้นทุนการ ผลิตถ่านชีวภาพลดลง 70.00%-85.52% โดยมีต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดอยู่ที่ 29.65 และ 31.57 บาท/kg_{Biochar} ตามลำดับ

การนำถ่านชีวภาพมาใช้ในงานในภาคเกษตร ถ่านชีวภาพสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของดิน ได้โดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.03-7.08 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน ค่าสภาพการนำไฟฟ้าโดยมีค่าอยู่ในช่วง 29.4-33.3 μm/cm ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุ

บวกรวมค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 30.87-31.14 cmol/kg ความสามารถในการอุ้มน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 31.16%-31.28% และค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงขึ้นอยู่ในช่วง 70.00-74.00 การนำเอาถ่านชีวภาพไปใช้ทดสอบปลูกพืชเป็นระยะเวลา 60 วัน กับต้นคะน้ามีลักษณะแนวโน้มการเจริญเติบโตที่ดีกว่าไม่ใช้ถ่านชีวภาพในการร่วมปลูกมีค่าความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าทั้งหมดที่ได้จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของถ่านชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ในการเกษตรของไทย

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของชีวมวลอื่นที่มีศักยภาพของประเทศไทย เพื่อเป็นทางเลือกและเป็นประโยชน์ต่อความสามารถเข้าถึงของเกษตรกรในการนำถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์
2. ผลการด้านการลดต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพได้มาจากผลปฏิบัติการในระดับนำร่องเท่านั้น ดังนั้นถ้าได้มีการศึกษากับระบบการผลิตที่มีขนาดใหญ่ขึ้นน่าจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพต่ำลง
3. จากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนในการผลิตถ่านชีวภาพทดแทนก๊าซหุงต้มซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าน่าจะทำให้ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพลดลง และมีความเป็นไปได้กับชุมชนที่สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้

บรรณานุกรม

- เกศศิริรินทร์ แสงมณี, จิตรยา จารุจิตร และ พิษย์ชัย ทองนวรรตน์. (2560). **การศึกษาชนิดและอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดิน การเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพกระเจียบเขียวที่ปลูกในพื้นที่เปรี้ยวจัด**. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
- เจษฎา กาญจนเกษร, ชงชัย ซาติเผือก, อิศระ ตั้งสุวรรณ และ เกศศิริรินทร์ แสงมณี. 2561. ผลของถ่านชีวภาพจากแกลบและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในพื้นที่ดินกรด. **ว. วิทยาศาสตร์เกษตร**, 49(1), 194-198.
- เบญจพร เครือทะนันทไชย. 2557. **การวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2556. ถ่านชีวภาพ: การกักเก็บคาร์บอน และความอุดมสมบูรณ์ของดิน. **วารสารเกษตรพระจอมเกล้า**, 31(1), 104-113.
- _____. 2557. ผลของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และแกลบต่อผลผลิต และประสิทธิภาพการดูดใช้ในโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 16(1), 69-75.
- ไวฑูมย์ ภูทอง, สายฝน สิ้นสมุทรไทย, นัยนา พรหมอุดม, ปัญญารัตน์ สิงห์พยัคฆ์, ภัทรมาศ มากมูล, กิติพัทธ์ โพธิ์ศรี, ศุภกร คำงาม และ จริญญา เพชรแก้ว. 2557. **เอกสารองค์ความรู้เรื่อง ถ่านชีวภาพ**. เพชรบุรี: ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
- กชกร จันใจมศึก. 2540. **การศึกษากราฟอัตราการอบแห้งสับปรดแช่อิ่ม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี**. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.
- _____. 2559. **การศึกษาทางดินในประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://oss101.ldd.go.th/web_soils_for_youth/s_thailand2.htm (30 เมษายน 2560).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2556. **ชีวมวล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html (28 เมษายน 2560).

- _____ . ม.ป.ป.-ก. **พลังงานชีวมวล**. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพลังงาน
- _____ . ม.ป.ป.-ข. **พลังงานชีวมวล**. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนกระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2558. **เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุนำส่งยาขนาดนาโน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.stdb.most.go.th/equipment_detail.aspx?id=2866 (7 สิงหาคม 2562).
- _____ . 2560. **เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.mhesi.go.th/main/th/165-knowledge/practical-rad/7497-wood-pellets> (10 มิถุนายน 2562).
- กฤษฎา เซตุเหมือน, อธิธิ ขอตเตชะ และ เอกพันธ์ ทนะวังศรี. 2556. **การทดสอบเตาไพโรไลซิสแบบซ้ำสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- กันยาพร ไชยวงศ์ และ สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย. 2559. การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบซ้ำ. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**, 2016(23), 85-92.
- คีต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมพู, รังสินันท์ ณ รังษี และ จารุวัตร เจริญสุข. 2562. ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสาร. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33**, 33.
- จาวภา มะนาวนอก, สันติไมตรี ก้อนคำดี, เกษสุดา เดชภิมล, วรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพินิจ และ ดรุณี โชติษฐยากร. 2560. ถ่านชีวภาพ: ผลต่อคุณภาพของดินและการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านตม (การทดสอบในสภาพกระถาง). **แก่นเกษตร**, 45(2), 209-220.
- จำเป็น อ่อนทอง. 2545. **คู่มือ การวิเคราะห์ดินและพืช**. สงขลา: ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชัชวาลย์ ชิงชัย. (2557). **ปัญหาดินเสื่อมโทรมและแนวทางแก้ไข**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ศุขฉวีพร สิทธิกุล. 2557. **คุณสมบัติของชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชั่น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปกร.

- ทิวา ตันสถิตย์, สุธรรม โจรจนเมฆา และ รณกร เทพวงษ์. 2559. การผลิตไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าวเพื่อการอุ้มน้ำในดิน. **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1**, 2559(1), 401-410.
- นคร ทิพย์าวงศ์. 2553. **เทคโนโลยีการเปลี่ยนสภาพชีวมวล**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นันทรัตน์ ศุภกานี. 2558. **การจัดการดินและปุ๋ยสำหรับพืชสวน**. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร.
- บริษัท เอสซอม จำกัด. ม.ป.ป. **คู่มือการใช้และการทดลอง Art.2060/2070 เครื่องทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ASTM D240 D4809**. กรุงเทพฯ: บริษัท เอสซอม จำกัด.
- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2555. **ค่าความร้อน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.pttplc.com/th/Media-Center/Energy-Knowledge/Pages/Gasoline-and-Cooking-Gas.aspx> (8 สิงหาคม 2562).
- บวรกิตติ์ พันธุ์เสถียร, บุญส่ง กองสุข และ วิชาน เตียเจริญ. 2557. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope). **จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น**, 1(2), 4.
- บุญแสน เตียวบุญอุทธธรรม. ม.ป.ป. **อินทรีย์วัตถุในดิน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://elearning.nsruc.ac.th/web_elearning/soil/lesson_6_2.php (2 พฤษภาคม 2560).
- ปรียานุช สิงขรบรรจง. 2554. **ลักษณะทางปฐพีวิทยา**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://iteem24.wordpress.com/> (1 พฤษภาคม 2560).
- พัชรี ธีรจินดาจกร. 2549. ดินดีเมื่อมีอินทรีย์วัตถุ. **วารสารศูนย์บริการวิชาการ**, 14(3), 11-16.
- พิณทิพย์ ธิติโรจนะวัฒน์, วีระ พุกจรรยา, วินิจ ภูเนาวรัตน์, สมาน รวยสูงเนิน และ รัตนา อ่อนสนธิ. (2531). **สมรรถนะการอุ้มน้ำและความพรุนรวมของดิน บริเวณลุ่มน้ำสุ**. ชัยภูมิ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- รัตถชล อ่างมณี, กัญจน์นรี ช่างฉ่ำ และ อรรณพ หอมจันทร์. 2560. สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพด และศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระราชูปถัมภ์**, 12(1), 53-63.
- ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์. 2556. **การพัฒนาการเรียนรู้ การประยุกต์ผ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- _____. ม.ป.ป. **ถ่านชีวภาพ คืออะไร**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://pirun.ku.ac.th/~fsocoss/whatchar.html> (29 เมษายน 2560).

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์. ม.ป.ป. **เคมีประยุกต์ ทดสอบหาปริมาณธาตุและค่าความร้อน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://www.sec.psu.ac.th/th/equipment.php?p=chemi_g5#

(10 กรกฎาคม 2562)

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารสำนักประชาสัมพันธ์เขต 3 จังหวัดเชียงใหม่. 2562. **รถกำจัดหมอกควัน พลิกเศษวัสดุเป็นถ่านชีวภาพ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

<https://region3.prd.go.th/ct/news/viewnews.php?ID=190727124703>

(3 สิงหาคม 2562).

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. (2562). **สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ ปี 2561**. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สารานุกรมความรู้. 2557. **ต้นเหตุของดินเสื่อม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

<http://articlescool.org/> (30 เมษายน 2560).

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี ๒๕๖๑**. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.). 2562ก. **โครงสร้างราคาขายปลีกน้ำมัน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/lpg?issearch=1&isc=1&category_id=412,938&xf_6=18&start=36 (15 กรกฎาคม 2562).

_____. 2562ข. **อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค**. [ระบบออนไลน์].

แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/electricity-bill/pea-rate> (15 กรกฎาคม 2562).

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2561). **สรุปผลการสำรวจภาวะการทำงานของประชากร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม.

สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน. ม.ป.ป. **องค์ประกอบของดิน และดินที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://oss101.ddd.go.th/web_soils_for_youth/s_compo2.htm

(1 พฤษภาคม 2560).

อติธยาพร สิงห์ชัย. 2551. **การประเมินความน่าจะเป็นในการเกิด Slagging และ Fouling โดยการใช้ข้อมูลทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- อนุรัตน์ ศฤงคารภษิต. ม.ป.ป. **ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.arcims.tmd.go.th/Research_files/ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช.pdf (25 มิถุนายน 2560).
- อรุณี ศฤงคารภษิต. ม.ป.ป. พลังงานจากชีวมวลที่มีเซลลูโลสสูง. **วารสารสิ่งแวดล้อม**, 16(2), 36-43.
- อุศราวดี ชื่นทิม. 2558. **การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแยกสลายซังข้าวโพดด้วยความร้อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Ahmed Mohammad Boshir, Zhou John L., Ngo Huu Hao and Guo Wenshan 2016. Insight into biochar properties and its cost analysis. **Biomass and Bioenergy**, 84(2016), 76-86.
- Asli Toptas Tag, Gozde Duman, Suat Ucar and Jale Yanik. 2016. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2016(120), 200-206.
- Christoph, Steiner. 2006. **BIOCHAR CARBON SEQUESTRATION**. [Online]. Available http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=67&Itemid=7 (18 July 2017).
- Dengyu Chen, Xinzhi Yu, Chao Song, Ziaoil Pang, Jing Huang and Yanjun Li. 2016. Effect of Pyrolysis Temperature on The Chemical Oxidation Stability of Bamboo Biochar. **Bioresource Technology**, 2016(218), 1303-1306.
- Dilek Angin. 2013. Effect of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on Biochar Obtained from Pyrolysis of Safflower Seed Press Cake. **Bioresource Technology**, 128(2013), 593-597.
- Estela M. C. C. Batista, Juliana Shultz, Tassya T. S. Matos, Mayara R. Fornari, Thuany M. Ferreira, Bruno Szpoganicz, Rilton A. de Freitas and Antonio S. Mangrich. 2018. Effect of Surface and Porosity of Biochar on Water Holding Capacity Aiming Indirectly at Preservation of The Amazon Biome. **SCIENTIFIC REPORTS**, 2018(8), 1-9.
- Evita Agrafioti, George Bouras, Dimitrios Kalderis and Evan Diamadopoulos. 2013. Biochar Production by Sewage Sludge Pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 101, (72-78).

- Frederik Ronsse, Sven Van Hecke, Dane Dickinson and Wolter Prins. 2013. Production and Characterization of Slow Pyrolysis Biochar: Influence of Feedstock Type and Pyrolysis Conditions. **GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY**, 2013(5), 104-115.
- iEnergyGuru. 2017. **Properties of Biomass Sources** [Online]. Available <https://ienergyguru.com/2015/09/properties-of-biomass-sources/> (29 April 2017).
- Ioanna I. Manolikaki, Argirios Mangolis and Evan Diamadopoulos. 2016. The Impact of Biochars Prepared from Agricultural Residues on Phosphorus Release and Availability in Two Fertile Soils. **Journal of Environmental Management**, 181(2016), 536-543.
- Jie Zhang, Jia Lui and Rongle Lui. 2015. Effect of Pyrolysis Temperature and Heating Time on Biochar Obtained from The Pyrolysis of Straw and Lignosulfonate. **Bioresource Technology**, 176(2015), 288-291.
- Johannes Lehmann, Matthias C. Rillig, Janice Thies, Caroline A. Masiello, William C. Hockaday and David Crowley. 2011. Biochar Effects on Soil Biota-A Review. **Soil Biology & Biochemistry**, 43(2011), 1812-1836.
- Jonsson Erik. 2016. **Slow pyrolysis in Brista**. Sweden: Brista.
- McKendry Peter 2002. Energy Production from biomass (part 1): Overview of Biomass **Bioresource Technology**, 83(2002), 37-46.
- NanaGarden. 2014. **Biochar**. [Online]. Available <https://www.nanagarden.com/search/ไบโอสถาว์> (3 August 2019).
- Purevsuren B., Avid B., Tesche B. and Davaajav YA. 2003. A Biochar from Casein and Its Properties. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, 38(2003), 2347-2351.
- Shackley Simon, Sohi Saran, Haszeldine Stuart, Manning David and Masek Ondrej. (2009). **Biochar, reducing and removing CO₂ while improving soils: A significant and sustainable response to climate change**. Netherlands.
- Shevchenko A L, Petrov A E, Sytchev G A and Zaichenko V M 2019. Oxygen Influence on The Process of Low-Temperature Pyrolysis of Biomass. **Journal of Physics: Conference Series**, 1147(2019), 1-3.

- Singla Ankit and Inubushi Kazuyuki. 2014. Effect of Biochar on CH₄ and N₂O Emission from Soils Vegetated with Paddy. **Paddy Water Environ**, 2014(12), 239-243.
- Tasneem Shah, Sara and Zahir Shah. 2017. Soil Respiration, pH and EC as Influenced by Biochar. **Soil Environ**, 36(1), 77-83.
- Tripathi Manoj, Sahu J.N. and Ganesan P. 2016. Effect of Proces Sparameters on Production of Biochar From Biomass Waste Through Pyrolysis: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 55, (467-481).
- Velebil J., Mala Āák J. and Bradna J. 2016. MASS YIELD OF BIOCHAR FROM HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF SUCROSE. **Res. Agr. Eng.**, 62(4), 179-184.
- Wannapeera Janewit, Worasuwannarak Nakorn and Pipatmanomai Suneerat. 2008. Product Yields and Characteristics of Rice Husk, Rice Straw and Corncob During Fast Pyrolysis in A Drop-Tube/Fixed-Bed Reactor. **Songklanakarinn Journal of Science ans Technology**, 30(3), 394-404.
- Xin Jiat Lee, Lai Yee Lee, Suyin Gan, Suchithra, Thangalazhy-Gopakumar and Hoon Kiat Ng. 2017. Biochar Potential Evaluation of Palm Oil Wastes Through Slow Pyrolysis: Thermochemical Characterization and Pyrolytic Kinetic Studies. **Bioresource Technology**, 2017(236), 155-163.
- Yan Yue, Qimei Lin, Yunqing Xu, Guitong Li and Xiaorong Zhao. 2017. Slow Pyrolysis as a Measure for Rapidly Treating Cow Manure and The Biochar Characteristics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2017(124), 355-361.
- Ying Yoa, Bin Gao, Ming Zhang, Mandu Inyang and Andrew R. Zimmerman. 2012. Effect of Biochar Amendment on Sorption And Leaching of Nitrate, Ammonium, and Phosphate in a Sandy Soil. **Chemosphere**, 2012(89), 1467-1471.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของชีวมวลและถ่านชีวภาพ



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 07428 6904-7, 07428 6910, 089734 2482, 084407 1732
อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

F-RES-033 ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 03/04/62

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2225/62_1	หน้า:	1/1
วันที่ออกรายงาน:	09 กรกฎาคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	18 มิถุนายน 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	2727/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	ซังข้าวโพด		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ซีมวล		
วันที่ทำการทดสอบ:	19 มิถุนายน 2562 - 28 มิถุนายน 2562		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือวิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis)	kcal/kg	In-housed method based on ASTM D5865	4,025 \pm 35
2.	ซัลเฟอร์ (S) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.036 \pm 0.002
3.	คาร์บอน (C) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	44.755 \pm 0.037
4.	ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	5.894 \pm 0.024
5.	ไนโตรเจน (N) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.522 \pm 0.000
6.	ออกซิเจน (O) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	43.991 \pm 0.409

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 2727/62

- H.H.V: Higher Heating Value (Gross heating value)

- ตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน, บทความก่อนการทดสอบ

- SD = Standard Deviation


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฬาลักษณ์ พัฒนศักดิ์คุณ) 
 ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
 ๙ กรกฎาคม 2562

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นที่แจ้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 1 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
ของซังข้าวโพด



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 07428 6904-7, 07428 6910, 089734 2482, 084407 1732
อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

F-RES-033 ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 03/04/62

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2225/62_2	หน้า:	1/1
วันที่ออกรายงาน:	09 กรกฎาคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	18 มิถุนายน 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	2727/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	แกลบ		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ซีมวล		
วันที่ทำการทดสอบ:	19 มิถุนายน 2562 - 28 มิถุนายน 2562		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis)	kcal/kg	In-housed method based on ASTM D5865	3,572 \pm 33
2.	ซัลเฟอร์ (S) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.030 \pm 0.001
3.	คาร์บอน (C) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	39.359 \pm 0.167
4.	ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	5.286 \pm 0.019
5.	ไนโตรเจน (N) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.347 \pm 0.002
6.	ออกซิเจน (O) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	38.534 \pm 0.410

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 2727/62

- H.H.V.: Higher Heating Value (Gross heating value)

- ตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน, บดตัวอย่างก่อนการทดสอบ

- SD = Standard Deviation


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฬาลักษณ์ พิศนาคกุลปัญญา)
ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
๑ กรกฎาคม 2562

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 2 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
ของแกลบ



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 07428 6904-7, 07428 6910, 089734 2482, 084407 1732
อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

F-RES-033 ฉบับที่ 6 ใช้งานใช้ 03/04/62

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2225/62_3	หน้า:	1/1
วันที่ออกรายงาน:	09 กรกฎาคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	18 มิถุนายน 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	2727/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	ไบโอชาร์ซังข้าวโพด		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ไบโอชาร์		
วันที่ทำการทดสอบ:	19 มิถุนายน 2562 - 28 มิถุนายน 2562		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis)	kcal/kg	In-housed method based on ASTM D5865	5,935 \pm 426
2.	ซัลเฟอร์ (S) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.025 \pm 0.001
3.	คาร์บอน (C) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	71.491 \pm 0.105
4.	ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	3.059 \pm 0.006
5.	ไนโตรเจน (N) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.854 \pm 0.015
6.	ออกซิเจน (O) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	10.264 \pm 0.093

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 2727/62

- H.H.V: Higher Heating Value (Gross heating value)

- ตัวอย่างไม้เป็นเนื้อเดียวกัน, บดตัวอย่างก่อนการทดสอบ

- SD = Standard Deviation

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฬาลักษณ์ วัฒนศักดิ์บุญโญ)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

9 กรกฎาคม 2562

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 3 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
ของไบโอชาร์ซังข้าวโพด



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 07428 6904-7, 07428 6910, 089734 2482, 084407 1732
อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

F-RES-033 ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 03/04/62

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2225/62_4	หน้า:	1/1
วันที่ออกรายงาน:	09 กรกฎาคม 2562	วันที่รับตัวอย่าง:	18 มิถุนายน 2562
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	2727/62		
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	ไบโอชาร์แกลบ		
สภาพตัวอย่าง:	ผง		
รายละเอียดตัวอย่าง:	ไบโอชาร์		
วันที่ทำการทดสอบ:	19 มิถุนายน 2562 - 28 มิถุนายน 2562		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V.) (As air dried basis)	kcal/kg	In-housed method based on ASTM D5865	4,674 \pm 62
2.	ซัลเฟอร์ (S) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.017 \pm 0.000
3.	คาร์บอน (C) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	52.593 \pm 0.134
4.	ไฮโดรเจน (H) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	2.210 \pm 0.047
5.	ไนโตรเจน (N) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	0.494 \pm 0.012
6.	ออกซิเจน (O) (As air dried basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	7.445 \pm 0.222

- ผลการทดสอบยังอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 2727/62

- H.H.V: Higher Heating Value (Gross heating value)

- ตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน, บทความก่อนการทดสอบ

- SD = Standard Deviation

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฬาลักษณ์ ทัศนศักดิ์ดิษฐ์)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

๑ กรกฎาคม 2562

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน
ยกเว้นทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาพผนวกที่ 4 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ
ของไบโอชาร์แกลบ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทรศัพท์ 0-2470-9671-3, 0-2470-9664-7 โทรสาร 0-2428-3374 <http://www.kmutt.ac.th>

ที่ สวท./62432

11 กันยายน 2562

เรื่อง แจ้งผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของตัวอย่าง Rice husk 500/60 และ Corn cob 500/60 จำนวน 2 ชุดตัวอย่าง


เรียน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้


สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบทดสอบคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของตัวอย่าง Rice husk 500/60 และ Corn cob 500/60 จำนวน 2 ชุดตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยทำการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องวัดการกระจายขนาดและรูพรุน (BET surface area) ดังผลในเอกสารแนบท้าย

ลำดับที่	รายการตัวอย่าง	ผลการทดสอบ		
		BET surface area, m ² /g	BJH adsorption cumulative volume, cm ³ /g	BJH adsorption average pore width, A ^o
1	Rice husk 500/60	7.1611	0.005176	67.298
2	Corn cob 500/60	8.1990	0.009134	65.022

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ


(นายอ่อนสา นนทิพะละ)
ผู้วิเคราะห์/หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดสอบ


(รศ.เอนก สิริพานิชกร)
ผู้อำนวยการ
สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รายงานผลที่สมบูรณ์จะต้องมีประทับตราของมหาวิทยาลัยและลายมือชื่อจริงของผู้มีอำนาจ
รายงานนี้ใช้ได้กับงานที่ผ่านการทดสอบเท่านั้น ผลการทดสอบตามรายการนี้ใช้ได้กับวัสดุอื่น หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ แม้จะผลิตจากบริษัทเดียวกัน

ภาพผนวกที่ 5 ใบรายงานผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดและรูพรุน (BET surface area)



ภาคผนวก ข

ตารางผลการวิเคราะห์ถ่านชีวภาพ

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความชื้นของถ่านชีวภาพ

ชีวมวล	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	เวลา (min)	ความชื้น (%)
แกลบ	300	30	2.13±0.08
		60	1.94±0.10
		90	1.80±0.05
	400	30	1.74±0.09
		60	1.65±0.03
		90	1.29±0.05
	500	30	1.29±0.03
		60	0.20±0.04
		90	0.17±0.08
	600	30	0.17±0.03
		60	0.12±0.06
		90	0.09±0.09
ซังข้าวโพด	300	30	2.54±0.09
		60	2.46±0.12
		90	22.39±0.18
	400	30	2.35±0.10
		60	2.35±0.17
		90	2.25±0.17
	500	30	1.86±0.24
		60	1.78±0.10
		90	1.62±0.19
	600	30	0.90±0.15
		60	0.72±0.05
		90	0.32±0.06

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์สารระเหยของถ่านชีวภาพ

ชีวมวล	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	เวลา (min)	สารระเหย (%)
แกลบ	300	30	69.13±1.53
		60	60.92±0.44
		90	57.48±1.25
	400	30	39.58±2.39
		60	33.45±2.59
		90	30.15±1.16
	500	30	30.13±2.81
		60	29.87±2.52
		90	26.30±2.43
	600	30	25.38±1.35
		60	22.37±2.03
		90	22.20±3.17
ซังข้าวโพด	300	30	67.80±4.59
		60	57.49±1.28
		90	56.44±1.78
	400	30	43.26±2.61
		60	42.68±1.70
		90	37.30±3.08
	500	30	36.50±2.31
		60	33.05±0.52
		90	32.29±4.18
	600	30	29.40±5.21
		60	27.34±1.76
		90	24.27±0.08

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์เถ้าของถ่านชีวภาพ

ชีวมวล	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	เวลา (min)	เถ้า (%)
แกลบ	300	30	19.49±0.20
		60	22.30±0.36
		90	24.02±0.34
	400	30	32.02±0.33
		60	33.00±0.38
		90	36.92±0.09
	500	30	37.06±0.35
		60	37.63±0.65
		90	38.10±0.14
	600	30	38.87±0.24
		60	39.22±0.29
		90	39.49±0.47
ซังข้าวโพด	300	30	7.47±0.97
		60	9.60±1.15
		90	10.90±1.44
	400	30	10.94±2.00
		60	11.97±0.43
		90	15.36±0.77
	500	30	16.05±2.22
		60	16.13±2.06
		90	21.32±2.87
	600	30	26.16±1.48
		60	26.59±3.17
		90	26.62±2.80

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์คาร์บอนคงตัวของถ่านชีวภาพ

ชีวมวล	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	เวลา (min)	คาร์บอนคงตัว (%)
แกลบ	300	30	9.25±1.35
		60	15.13±0.17
		90	16.70±0.97
	400	30	26.66±2.63
		60	31.61±2.19
		90	31.64±1.24
	500	30	31.52±2.89
		60	32.30±2.84
		90	35.43±2.46
	600	30	35.58±1.37
		60	38.29±1.77
		90	38.22±2.62
ซังข้าวโพด	300	30	22.19±3.66
		60	30.45±0.09
		90	30.27±1.64
	400	30	43.45±2.74
		60	43.00±1.74
		90	45.09±2.19
	500	30	45.59±4.16
		60	49.04±1.98
		90	44.77±5.51
	600	30	43.54±4.23
		60	45.35±4.65
		90	48.79±2.54



ภาคผนวก ค

การคำนวณคุณสมบัติถ่านชีวภาพ

1. การคำนวณร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ = 30.00 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ = 11.55 g

การคำนวณร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ

จากสมการ $\text{Mass yield (\%)} = \frac{\text{mass of biochar}}{\text{mass of raw sample}} \times 100$

จะได้ว่า $= \frac{11.55}{30.00} \times 100$

ดังนั้น $\text{Mass yield} = 38.48\%$

2. การคำนวณหาความชื้น

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ (A) = 1.0007 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (B) = 0.9985 g

จากสมการ $\text{MC (\%)} = \frac{A - B}{A} \times 100$

จะได้ว่า $= \frac{1.0007 - 0.9985}{1.0007} \times 100$

ดังนั้น $\text{MC} = 0.21\%$

3. การคำนวณหาสารระเหย

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ (A) = 0.9908 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (B) = 0.6667 g

จากสมการ
$$VM (\%) = \left(\frac{A - B}{A} \times 100 \right) - MC$$

จะได้ว่า
$$= \left(\frac{0.9908 - 0.6667}{0.6667} \times 100\% \right) - 0.21\%$$

ดังนั้น
$$VM = 29.61\%$$

4. การคำนวณหาปริมาณเถ้า

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ (A) = 0.9862 g

น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (B) = 0.3745 g

จากสมการ
$$Ash (\%) = \frac{B}{A} \times 100$$

จะได้ว่า
$$= \frac{0.9862}{0.3745} \times 100$$

ดังนั้น
$$Ash (\%) = 37.97\%$$

5. การคำนวณหาคาร์บอนคงตัว

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้ ความชื้น (MC) = 0.21%

สารระเหย (VM) = 29.61%

เถ้า (Ash) = 37.97%

จากสมการ
$$FC (\%) = 100 - (MC + VM + Ash)$$

จะได้ว่า
$$= 100 - (0.21 + 29.61 + 37.97)$$

ดังนั้น
$$FC (\%) = 32.21\%$$

6. การคำนวณหาค่า C.E.C

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิโพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (M_1)	= 0.01 M
	ปริมาตรโซเดียมคลอไรด์แบลงค์ (Blank) ที่ใช้ (B)	= 0.27 ml
	ปริมาตรแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับด้วยโซเดียมคลอไรด์ในสภาพกรด (V_1)	= 100 ml
	ปริมาตรแอมโมเนียมที่ดูดไปกลับ (V_2)	= 50 ml
	ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (V_3)	= 3.9 ml
	น้ำหนักถ่านชีวภาพ (W)	= 2 g

จากสมการ C.E.C (cmol/kg) =
$$\frac{N_1 \times ((V_3 - B) \times 100) \times 200}{W \times \frac{V_1}{V_2}}$$

จะได้ว่า
$$= \frac{0.01 \times ((3.9 - 0.27) \times 100) \times 200}{2 \times \frac{100}{50}}$$

ดังนั้น C.E.C = 181.5 cmol/kg

7. การคำนวณหาค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิโพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้	น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ	= 36.7267 g
	น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ	= 18.3787 g

จากสมการ W.H.C (%) =
$$\frac{\text{mass of soil wet (g)} - \text{mass of soil dry (g)}}{\text{mass of soil dry (g)}} \times 100$$

จะได้ว่า
$$= \frac{36.7267}{18.3787} \times 100$$

ดังนั้น W.H.C (%) = 99.83%

8. การคำนวณหาค่าสารอินทรีย์คาร์บอน

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้	ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (T_1)	= 9.57 ml
	ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (T_2)	= 8.9 ml
	ความเข้มข้นของ FAS (N)	= 1 N
	Oxidation factor (ค่าที่นิยมใช้คือ 1.3) (of)	= 1.30
	น้ำหนักถ่านชีวภาพที่ใช้ (W)	= 0.12 g

จากสมการ Organic carbon (%) = $\frac{(T_1 - T_2) \times N \times 0.003 \times \text{of} \times 100}{W}$

จะได้ว่า = $\frac{(9.57 - 8.9) \times 1 \times 0.003 \times \text{of} \times 100}{0.12}$

ดังนั้น Organic carbon = 2.18 (%)

9. การคำนวณหาค่าไนโตรเจนทั้งหมด

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้	ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (V_1)	= 4.0 ml
	ปริมาตรที่ปรับด้วยน้ำกลั่นของก่อนการกลั่น (V_2)	= 13 ml
	ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไตเตรท Blank (B)	= 0.53 ml
	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (N)	= 0.005 M
	น้ำหนักดินหรือถ่านชีวภาพ (W)	= 0.22 g

จากสมการ Total N (%) = $\frac{0.014 \times (V_1 - B) \times N \times V_2 \times 100}{W}$

จะได้ว่า = $\frac{0.014 \times (4 - 0.53) \times 0.005 \times 13 \times 100}{0.22}$

ดังนั้น Total N = 0.11 (%)

10. การคำนวณสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

กรณี ถ่านชีวภาพแกลบ ณ สภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 °C ระยะเวลา 60 min

กำหนดให้	Organic carbon	= 2.18 (%)
	Total N	= 0.11 (%)

จากสมการ C/N ratio = $\frac{\text{Organic carbon (\%)}}{\text{Total N (\%)}}$

จะได้ว่า = $\frac{2.18}{0.11}$

ดังนั้น C/N ratio = 19.81



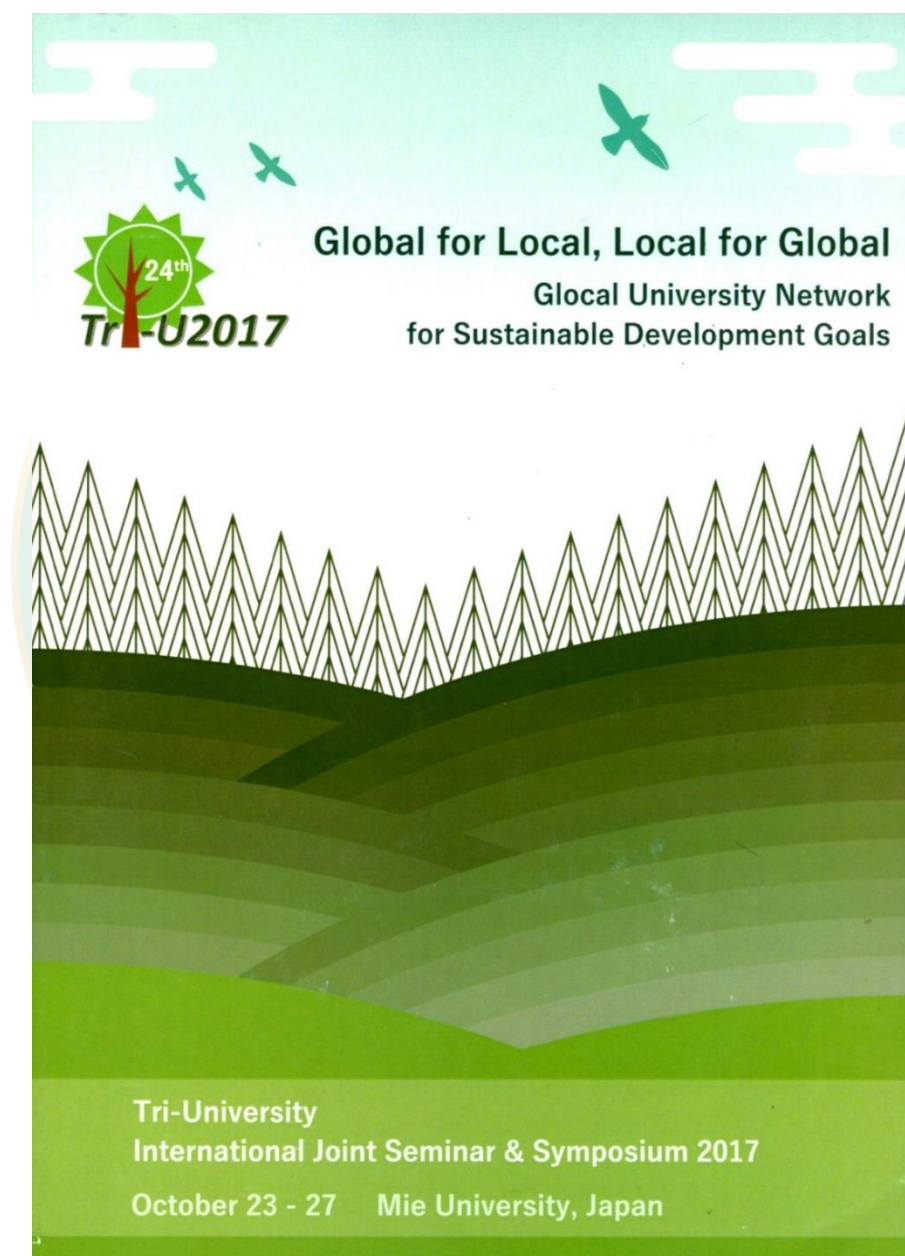


ภาคผนวก ง

การเผยแพร่งานวิจัย

การประชุมวิชาการสัมมนา

1. การประชุมวิชาการ The 24th Tri-University International Joint Seminar & Symposium.
October 23-27, 2017, Mie University, Japan



ภาพผนวกที่ 6 The 24th Tri-University International Joint Seminar & Symposium

Oral Presentation Timetable

Oct.26	EV7	Room B [Environment]			
11:00-11:20	1	Shanghai Ocean	Yating	Song	EV7-B1
11:20-11:40	2	Chiang Mai	Phatthakon	Taotiang	EV7-B2
11:40-12:00	3	Jiangsu	Ying	Song	EV7-B3
12:00-12:20	4	Jiangsu	Qinhong	Zhang	EV7-B4
12:20-12:40	5	Mie	Misa	Horii	EV7-B5
Oct.26	EG8	Room C [Energy]			
11:00-11:20	L	Maejo	Yuwalce	Unpaprom	EG8-CL
11:20-11:40	1	Maejo	Praphatsorn	Rattanaphaiboon	EG8-C1
11:40-12:00	2	Naresuan	Natjira	Inmon	EG8-C2
12:00-12:20	3	Jiangsu	Xiaoyin	Zhang	EG8-C3
12:20-12:40	4	Maejo	Jiraporn	Kaewdew	EG8-C4
Oct.26	EV8	Room D [Environment]			
11:00-11:20	1	Bogor Agriculture	Eric	Faustine	EV8-D1
11:20-11:40	2	Shanghai Ocean	Caixia	Li	EV8-D2
11:40-12:00	3	Maejo	Kodchakorn	Palaphan	EV8-D3
12:00-12:20	4	Guangxi	Jianlin	Song	EV8-D4
12:20-12:40	5	Mie	Megumi	Murakami	EV8-D5
Oct.26	EV9	Room E [Environment]			
11:00-11:20	1	Jiangsu	Xingtao	Zhong	EV9-E1
11:20-11:40	2	Bogor Agriculture	Ken	Rizkyna	EV9-E2
11:40-12:00	3	Guangxi	Xiafei	Ouyang	EV9-E3
12:00-12:20	4	Mie	Mio	Yoshida	EV9-E4
12:20-12:40					

Abstract Theme: Energy**EG8-C1****Grading Energy of Agricultural Waste
with Torrefaction Process**

Praphatsorn Rattanaphaiboon, Nigran Homdoug*, Natthawud
Dussadee, Churat Thararux and Rameshprabu Ramaraj

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290,
Thailand,

- **ABSTRACT**

Biomass is a unique fuel. It has the prospective to play a major role in the future energy in the ASEAN countries as well as worldwide. The objective of this study was to find out the properties, temperature effects on torrefaction process in Thailand agricultural wastes including rice husk and corn cob. Temperature in the reactor of 200-400°C and 60 minutes were adjusted with nitrogen. It was found that, the torrefied rice husk and corn cob show better physical and chemical properties. The overall color of both torrefied fuels that tested in high temperature was dark black that similar to coal. Then, high temperature of torrefied fuel was increased high heating value (HHV). Therefore, this study illustrated that the energy potential of rice husk and corn could be improved through torrefaction process.

KEYWORDS: torrefaction, rice husk, corn cob, HHV



UPGRADING ENERGY OF AGRICULTURAL WASTE WITH TORREFACTION PROCESS

**Prapatsorn Rattanaphaiboon, Nigran Homdoug*, Natthawud Dussadee,
Churat Thararux and Rameshprabu Ramaraj**

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand,
Corresponding author E-mail: nigranghd@gmail.com

Abstract: Biomass is a unique fuel. It has the prospective to play a major role in the future energy in the ASEAN countries as well as worldwide. The objective of this study was to find out the properties, temperature effects on torrefaction process in Thailand agricultural wastes including rice husk and corn cob. Temperature in the reactor of 200-400°C and 60 minutes were adjusted with nitrogen. It was found that, the torrefied rice husk and corn cob show better physical and chemical properties. The overall color of both torrefied fuels that tested in high temperature was dark black that similar to coal. Then, high temperature of torrefied fuel was increased high heating value (HHV). Therefore, this study illustrated that the energy potential of rice husk and corn could be improved through torrefaction process.

Keyword: torrefaction, rice husk, corn cob, HHV

1. INTRODUCTION

At present, the supply of fossil fuel is declining and the price is likely going to rise, due to the increasing consumption of electricity [1]. Thailand has been mainly imported oil, which has affected the national economic status. Fortunately, Thailand is an agricultural country and has a huge biomass sources. Hence, the development of fuels from biomass can use more efficiently. Torrefaction is a process that increased the quality of biomass for direct combustion or gasification. The principle of torrefaction process was to remove moisture and reduce volatile content which leads to the increase of energy density of biomass and reduce tar. High quality biomass can be mixed to coal to produce electricity and reduce the sulfur dioxide (SO₂) released into the atmosphere. Therefore, the objective of this research was to investigate the upgrading energy of agricultural waste using torrefaction process.

2. PRINCIPLES OF PYROLYSIS

Torrefaction is a thermo-chemical process that reduces the moisture content of solid biomass and transforms into a brittle, char-type material. Generally, the lignocellulosic biomass was consisted of approximately 80% volatile matter and 20% fixed carbon by dry mass basis. In the torrefaction process, the solid biomass were heated from external heat sources on absence of oxygen in a range of 250-350°C. This leads to a loss of moisture and partial loss of the volatile matter in the biomass. The characteristic of the original biomass was considerably changed as the tenacious fiber structure of the original biomass material is largely destroyed through the breakdown of hemicellulose and lesser degree of cellulose molecules, making the material brittle and easy to grind [2]. These materials can change from being hydrophilic to hydrophobic. With the removal of the light volatile fraction that contains most of the oxygen in the biomass, the heating value of the remaining material gradually increases from 19 MJ/kg to 21 or 23 MJ/kg for torrefied wood which similar charcoal heating value of approx.30 MJ/kg.

The torrefaction process can reduce the mass of wood by 20-30%, resulting in a denser, higher-valued product that can be transported more economically than traditional wood chips. In addition, this process can be used as a coal replacement or co-fired/co-milled with coal in electricity generating power plants.

3. MATERIALS AND METHOD

The experimental materials were rice husk and corn cob from agricultural waste of Northern Thailand farmer illustrated in Fig.1, was used in this study. The rice husk was derived from

Jusmin rice, 40 % and 60% of rice husk and rice respectively [3]. The average remaining rice husk in farm was about 240 kg/Acre in Northern Thailand and average net heating value was 14.76 MJ/kg. The moisture content with less than 8.58% was used this experiment. The corn cob was obtained from field corn, 24% of corn cob and 62% of the remaining was seed, corn straw and other parts. The average net heating value and moisture of 16.49 MJ/kg and less than 10.41% were tested. The torrefaction process experiment was used 20g/time and the sample was crushed into a fine powder with average 1 mm (16 mesh) of size.



Fig. 1 rice husk and corn cob

The torrefaction process equipment of both biomass shows in Fig.2 and Fig.3. The top and bottom of torrefaction reactor was installed screw nut for input and drain the nitrogen on torrefaction process. The heat source of input torrefaction process was used the electrical heater of 5,000 W and maximum temperature of 1500 °C was established. The temperature in the reactor was controlled by an electronic system and use 220V, single phase and 50 Hz of electricity. The temperature measurement was use type K of thermocouple with worked on the control system.

In the experiment, the test was studied the property of both biomasses on proximate and ultimate analysis while the predictions of high heating values (HHV) can be calculated from the following equation [4].

$$\text{HHV} (\%) = 0.3536\text{FC} + 0.1559\text{VM} - .0078\text{Ash} \quad (1)$$

Where FC is the fixed carbon, VM is the volatile matter and ash is noncombustible fuel.

In the experiment, the torrefaction temperature was adjusted in a range of 200-400 °C at 60 minutes of torrefaction time. The experimental was start from increase temperature with combine feed the nitrogen in to the combustion room. The biomass will be pinned above the combustion chamber. Around the top of the combustion chamber is cooled down with coolant, the average temperature was about less than 40 °C. When the temperature of the combustion chamber enters the torrefaction temperature, the

biomass is released from above into the combustion chamber, then it will start the timer and when finish time, the biomass was back to above the combustion chamber and cooler again. The upgrading energy agricultural waste system was described in fig.2.



Fig.2 The photo of upgrading energy agricultural waste

4. RESULT AND DISCUSSION

4.1 The chemical property analysis of biomass

The proximate and ultimate analysis of rice husk and corn cob are presented in Table 1 and Table 2. The proximate analysis shows in terms of moisture, volatile matter, fixed carbon and ash contents while the ultimate analysis shows in carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur. For rice husk, the percentage of moisture, volatile matter, fixed carbon and ash were 8.58%, 73.68%, 18.25% and 0.68% respectively while the high heating value was 14.61 MJ/kg. The rice husk was high ash contents and low fixed carbon with compare the corn cob. The high ash contents of biomass will be featured on the ash removal system [5]. The volatile matter and moisture of corn cob was high than rice husk. The higher of volatile matter was caused of unused in gasification power plant due to the tar will result in engine damage [6] and the high of moisture was caused low calorific value of the biomass [7]. The heating value of corn cob was 16.16 MJ/kg while the moisture, volatile matter, fixed carbon and ash were 10.41%, 87.69%, 2.81% and 3.07% respectively

The result of ultimate analysis of rice husk was low than corn cob. The reducing of carbon and hydrogen was caused of low heating value of biomass [8]. The percentage of carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur of rice husk were 39.51%, 5.31%, 34.81%, 0.40% and 0.00% respectively, while corn cob was analyzed of 46.39%, 6.05%, 40.67%, 0.50% and 0.01% respectively.

Table 1 Proximate analysis of biomass

Biomass	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)
Rice husk	8.58	73.68	18.25	0.68	14.61
Corn cob	10.41	87.69	2.81	3.07	16.16

Table 2 Ultimate analysis of biomass

Biomass	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Rice husk	39.51	5.31	34.81	0.40	0.00
Corn cob	46.39	6.05	40.67	0.50	0.01

4.2 Effect of torrefaction temperature on torrefied fuel

Fig. 3 shows the moisture content of rice husk and corn cob on varying torrefaction temperature. The moisture content of torrefied fuel was decreased with increase torrefaction temperature. Generally, the moisture content in biomass was evaporated more than 100 °C. However, some moisture unable to evaporate from biomass although higher biomass temperatures [9]. The torrefaction process of corn cob was

provided high moisture content than the rice husk. Due to the moisture content of corn is higher than the rice husk. The use of torrefaction process was decreased moisture content of rice husk and corn cob in a range of 96-99% and 73-97% respectively. The lowest moisture content of rice husk and corn cob was of 0.09% and 0.32%, respectively.

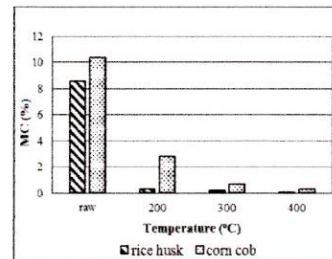


Fig. 3 The moisture content of biomass on torrefaction process

Fig. 4 shows the effect of torrefaction temperature on volatile matter. The increasing of torrefaction temperature with decrease volatile matter. The reducing of volatile matter was caused decomposition of biomass components such as extractive, hemicellulose, lignin and cellulose [7]. Decreasing of volatile in torrefaction process was led to reduce mass and some energy [10]. Importantly, when applied to the gasification process that will reduce the tar and reduce engine wear [11]. However, biomass comparisons, the decomposition ratio of both biomass was similar and that reduce average of 8%, 30% and 59% in temperature of 200, 300 and 400 °C respectively. The minimum volatile matter of rice husk and corn cob was of 30% and 36% respectively at 400 °C.

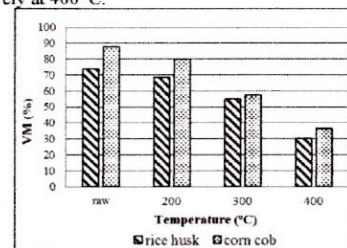


Fig. 4 Volatile matter of biomass and torrefied fuel

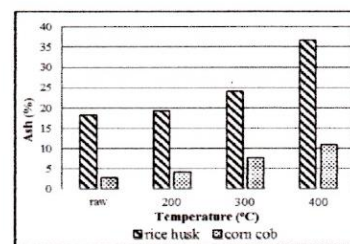


Fig. 5 Ash of biomass and torrefied fuel

Fig. 5 shows the effect of torrefaction temperature on ash content. The increasing of torrefaction temperature with increase ash content due to moisture and some volatile matter was released out from the raw materials [12]. Comparing with both torrefied fuel, the use of rice husk was high ash than corn cob. The increasing of ash was caused chemical properties of the rice

husk. For operating of gasification power plant, the high of ash was problem on removed out to the system [13]. The ash content of rice husk torrefied was maximum 36.73% at 400 °C while corn cob torrefied were 10.90% at 400 °C, respectively.

Fig. 6 shows the effect of torrefaction temperature on fixed carbon. The increasing of torrefaction temperature with increase fixed carbon. The fixed carbon content has an inverse relationship with the volatile content. Due to the high volatile extractives content in chemical composition of wood, increasing the heat treatment temperature increases the fixed carbon content [14]. Increasing of fixed carbon in torrefaction process was decreased moisture and volatile. The use of torrefaction process was increased fixed carbon of rice husk and corn cob in a range of 12-34% and 13-52% respectively. The higher fixed carbon of rice husk and corn cob was of 33.86% and 51.88% respectively.

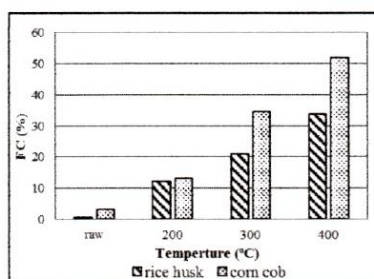


Fig. 6 Fixed carbon of biomass and torrefied fuel

4.3 Physical appearance of torrefied samples

Fig. 7 exhibited the color of rice husk and corn cob with before and after the torrefaction process at different temperatures and residence times. It was found that, the color of both biomass was changed with increase torrefaction temperature. The raw material of rice husk and corn cob were to brown between of 300 °C and that gradually become to a darker black with increase temperatures in a range of 400 °C. Comparatively, the color of both biomass was similar and same as the torrefaction process of another solid biomass such as beech wood, *miscanthus* [enery] and macroalga *Laminaria japonica* [15]. Changing color of solid biomass was caused by the exothermic nature of the reaction above 280 °C. For torrefaction temperature more than 280 °C, an exothermal reaction takes place results in hemicellulose decomposition of the biomass [16]. The use of highest temperature more than 300 °C and long residence time in torrefaction process was leading to increase the high heating value [17].

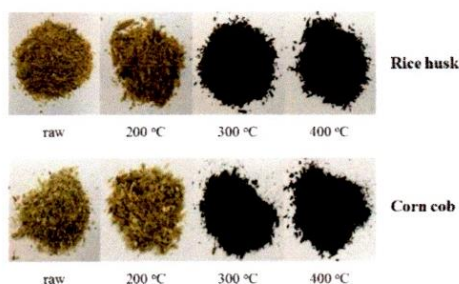


Fig. 7 Color of rice husk and corn cob at different torrefaction temperatures.

4.4 High heating value of the torrefied fuels

Fig. 8 show the high heating value of both torrefied fuels from the equation. It was found that, the increasing torrefaction temperatures was led to increased high heating value due to reducing of moisture content and some liquids that unable burn. The use of corn cob was higher heating values than rice husk, the higher of fixed carbon and volatile matter was affected the increasing in heating value [15]. At the torrefaction temperatures in a range of 200-400 °C, the high heating value of corn cob between of 17.06 - 23.95 MJ/kg while the rice husk was arrange of 15 - 17 MJ/kg which very low heating value. The more ash content in rice husk is important to heating value down [16].

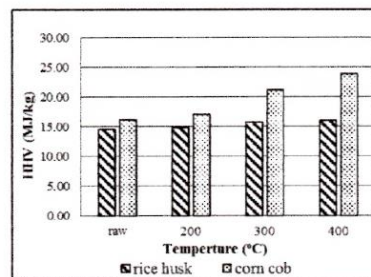


Fig. 8 HHV of biomass and torrefied fuel

The results show that the fixed carbon and ash content of rice husk and corn cob increased after torrefaction due to the decrease in moisture content and volatile matter. The fixed carbon content of rice husk at temperature 400 °C (33.86%) and corn cob (51.88%) at temperature 400 °C. The moisture contents of the two raw biomass varied from 0.09 to 2.86% are well below than the range feasible for torrefaction less than 10% [8]. The ash content of the two biomasses was increased due probably to the mineral matter turning into ash during the thermal treatment [9] The ash content of torrefied fuel increased after the high temperature show that Table 2.

Table 2 Proximate analysis of terrified fuel

Proximate	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)
Rice husk				
200 °C	0.30	68.38	19.16	12.15
300 °C	0.17	54.86	24.02	20.95
400 °C	0.09	30.13	36.73	33.86
Corn cob				
200 °C	2.86	79.92	4.12	13.10
300 °C	0.32	57.49	7.53	34.66
400 °C	0.72	36.50	10.90	51.88

5. Conclusions

The torrefaction temperature was affected on quality of torrefied fuels. The increasing temperature was reduced moisture content, volatile matter while the fixed carbon and ash content is increase and the colors of both biomass was changed to brown and black color. The high heating value of corn cob and rice husk is increase while the corn cob was higher heating values than rice husk. The high heating value of corn cob and rice husk between of 17.06 - 23.95 MJ/kg and 15 - 17 MJ/kg. Finally, the overview of upgrading both agricultural waste is satisfactory.

Acknowledgment

Authors would like to thanks for provided the research grand from School of Renewable Energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates

ASEAN” and National Research Council of Thailand (NRCT) under the Thailand-China Cooperation Program, Fiscal 2016.

References

- [1] World Energy Council, (2013), World Energy Resources, World Energy Council Registered in England and Wales.
- [2] Jaap Koppejan, Shahab Sokhansanj, Staffan Melin, Sebnem Madrali, (2012), Status overview of torrefaction technologies, http://www.icabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf.
- [3] Nigran Homdoug, Kittikorn Sasujit, Natthawud Dussadee, Tanet Chaichana, (2009), Potential Agriculture Biomass and Unused Available Biomass in Northern Thailand, 5th Conference on Energy Technology Network of Thailand; ENETT, Naresuan University, Phitsanulok.
- [4] Dinh Quoc Viet, Nguyen Van Vinh, Pham Hoang Luong, Van Dinh Son Tho. (2015). Thermogravimetric Study on Rice, Corn and Sugar Cane Crop Residue, Journal of Sustainable Energy & Environment, Vol 6, pp 87-91.
- [5] Mohammad Asadullah. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 29, pp 201-215.
- [6] I var S. Ertesvag. (2009). Energy and exergy in moist fuels, Engineering, NTNU, pp 1-4
- [7] Jaya Shankar Tumuluru, Shahab Sokhansanj, J. Richard Hess, Christopher T. Wright and Richard D. Boardman. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, Industrial Biotechnology, Vol 7, 384-402.
- [8] Xin Jiat Lee, Lai Yee Lee, Suyin Gan, Suchithra Thangalazhy-Gopakumar, Hoon Kiat Ng. (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies, Bioresource Technology, Vol 236, pp 155-163.
- [9] Dengyu Chen, Yanjun Li, Minsi Deng, Jiayang Wang, Miao Chen, Bei Yan, Qiqiang Yuan. (2016). Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood, Bioresource Technology, Vol 214, pp 615-622.
- [10] Małgorzata Wilk, Aneta Magdziarz. (2017). Hydrothermal carbonization, torrefaction and slow pyrolysis of miscanthus giganteus, Energy, Vol 120, pp 1-22.
- [11] Samy Sadaka, Mahmoud A. Sharara, Amanda Ashworth, Patrick Keyser, Fred Allen, Andrew Wright. (2014). Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization, energies, Vol 7, pp 548-567.
- [12] Ane C. P. Borges, Carine T. Alvesa, Ednildo A. Torres. (2016). Torrefied Eucalyptus Grandis Characterization as a Biomass to Using in Industrial Scale, CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, Vol 49, pp 283-288.
- [13] Wei-Cheng Chen, Heng-Wen Hsu, Cheng-Hsien Shen. (2009). The Operational Experience and Market Potential Investigation of Coal Gasification in Taiwan.
- [14] Jigisha Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal. (2005) A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, Fuel, Vol 84, pp 487-494.
- [15] Yoshimitsu Uemura, Ryunosuke Matsumoto, Shazleen Saadon, and Yukihiko Matsumura. (2015). A study on

torrefaction of *Laminaria japonica*, Fuel Processing Technology, vol. 138, pp. 133-138.

- [16] Dengyu Chen, Jianbin Zhou, Qisheng Zhang, Xifeng Zhu, Qiang Lu. (2014). Upgrading of rice husk by Torrefaction and its influence on the fuel properties, Biosources, Vol 9, pp 5893-5905.
- [17] Jau-Jang Lu, Wei-Hsin Chen. (2014). Product Yields and Characteristics of Corn Cob Waste under Various Torrefaction Atmospheres, energies, Vol 7, pp 13-27.



Ms. Praphatsorn Rattanaphaiboon

Ms. Praphatsorn Rattanaphaiboon
Date of birth : 04/03/1993
- Candidate in Master of Engineering (Renewable Energy Engineering)
- faculty of science, major applied physics
- Biomass technology



Dr. Nigran Homdoug

Dr. Nigran Homdoug
Date of birth : 09/04/1974
Doctor of Engineering (Mechanical Engineering)
Professional in Gasification and Pyrolysis Process, Biomass Conversion Technology (Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove), Internal Combustion Engine and Biomass Power Plant Engineering.



Dr. Natthawud Dussadee

Dr. Natthawud Dussadee
Assistant Professor & Director, School of Renewable Energy, Maejo University,
Professional in Agricultural Drying Processes, Energy Conservation, Solar energy and Thermal Process and Biofuels.



Dr. Churat Thararux

Dr. Churat Thararux,
Assistant Professor, School of Renewable Energy, Maejo University
Professional in Gasification and Pyrolysis Process, Biomass Conversion Technology, Internal Combustion Engine and Bio hydraulic oil.



Dr. Rameshprabu Ramaraj

Dr. Rameshprabu Ramaraj, M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School of Renewable Energy, Maejo University,
Professional in scientific and engineering field including biology (animal, plant & microbes), sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, and biofuels.

2. การประชุมวิชาการสัมมนาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 วันที่ 29-30 พฤศจิกายน - 1 ธันวาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง



ภาพผนวกที่ 7 การประชุมวิชาการสัมมนาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10



สารบัญ

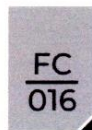
FC - 015	การศึกษหออของชิ้นงานที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียม นางสาวรัชฎาภรณ์ อินเกิด	109
FC - 016	การวิเคราะห์คุณสมบัติและต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส นางสาวประภัสสร รัตนไพบูลย์	120
FC - 017	การศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลของสัตว์ด้วยแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นางสาวศิริพร ศรีไตรรัตน์	128
FC - 018	สมรรถนะแก๊สซีพีเออร์แบบฟลูอิดซ์เบดเมื่อใช้ขังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง นายพงศธร มณทิพย์	134
FC - 019	การปรับปรุงเสถียรภาพของอิมัลชันขี้ดน้ำในน้ำมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบ นายณรงค์ อินทรหมม	143
FC - 020	สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นางสาวโสภณาภรณ์ รัตน์นะ	152
FC - 021	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทางที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง นายภาสพงษ์ศักดิ์ ปัญญรัตน์	158
FC - 023	การประเมินเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลไร้ควัน สำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ นายธนาชาติ มหาวัน	166

Session : สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

NC- 001	การใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมสู่นวัตกรรม “การดูแลคุณภาพน้ำชุมชน” เพื่อการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืน นางสาวเดือนตา ร่าหมาน	174
NC- 002	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพจากระบบยูเอเอสขนาดเล็ก นายสุรเชษฐ์ กล้าณรงค์	185
NC- 003	การศึกษากาเวการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ราบจังหวัดแพร่ นายศุภชัย เพชรธาวาดี	191
NC- 004	การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตก๊าซมีเทน มุ่งสู่การจัดการสิ่งแวดล้อมในฟาร์มสุกรอย่างยั่งยืน: กรณีศึกษาจังหวัดเชียงใหม่ นางสาวรุ่งนภา เขียววิจิตร	199
NC- 005	การพัฒนา และติดตั้งกรีนรูฟเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสู่ภายในบ้าน นายวรัช พวงพรศรี	207
NC- 007	กรรมวิธีการผลิตไฟเบอร์ซีเมนต์ด้วยผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินเพื่อเป็นวัสดุสำหรับอาคาร นายสันต์ เกื้อหนุน	214
NC- 008	การบริหารจัดการขยะในสถานศึกษาผ่านการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม นายเด่นศักดิ์ หอมหวล	221
NC- 009	การศึกษาการเจริญเติบโตของคันข้าว โดยการใช้แหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นายณัฐวุฒิ ชาวสะอาด	228

ภาพผนวกที่ 2 การประชุมวิชาการสัมมนาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 10 (ต่อ)



การวิเคราะห์คุณสมบัติและต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส
Analysis of Properties and Costs of Biochar Production with Using Pyrolysis Process

ประภัสสร รัตนไพบูลย์, นิกราน หอมดวง¹, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, ชูรัตน์ ธาธาภิรักษ์, อัครินทร์ อินทนิเวศน์

วิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติและต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้แกลบ และซังข้าวโพด เป็นชีวมวล อุณหภูมิไพโรไลซิส คือ 300 และ 400 °C ระยะเวลา 40 และ 60 min ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เตาฮีทเตอร์ในการผลิตถ่านชีวภาพ สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านจะใช้เครื่องผลิตถ่านชนิดให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาส่งผลให้คุณภาพถ่านชีวภาพไม่แตกต่างกันนักที่อุณหภูมิเดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจะทำให้ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น โดยที่ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 60 min มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือ 51.88% และค่าความร้อนสูงคือ 23.95 MJ/kg นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงปียังส่งผลให้มีอัตราการใช้พลังงานสูงคือ 37.06 kWh/kg โดยต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ 8.99 Baht/kg ที่การทดลอง 1 kg/ครั้ง ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนทดแทนก๊าซหุงต้มจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตถ่านลดลง 83-86%

คำสำคัญ: ชีวมวล ถ่านชีวภาพ ไพโรไลซิส ปริมาณคาร์บอนคงตัว อัตราการใช้พลังงาน

¹Corresponding author: Tel.: 084-1773632 E-mail nigranghd@gmail.com

FC
016

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม สามารถผลิตพืชอาหารเพื่อบริโภคทั้งภายในประเทศ และส่งออกภายนอกประเทศ ดินจึงเป็นปัจจัยความสำคัญอย่างยิ่งในการเพาะปลูก ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาดินเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากการทำเกษตรกรรมแบบต่อเนื่อง และขาดการปรับปรุงดินที่เป็นปัจจัยในการทำให้อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินมีปริมาณลดลง และทำให้สูญเสียอินทรีย์วัตถุจากองค์ประกอบของดิน [1] การใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกสลายทางความร้อนที่เรียกว่า ไพโรไลซิส เป็นกระบวนการทางความร้อนในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยปราศจากอากาศหรือมีปริมาณอากาศอย่างจำกัด [2] ถ่านชีวภาพที่ได้จะมีคาร์บอนเป็นประกอบหลัก ซึ่งคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชีวภาพนี้จะมีคุณสมบัติสามารถกักเก็บไว้ในดินได้นาน เป็นแหล่งกักเก็บอาหารและความชื้น เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยอาหารให้แก่พืชทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ [3] นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในรูปแบบพลังงาน เพราะมีความร้อนที่สูงกว่าถ่านไม้ทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการนำวัสดุทางการเกษตรที่มีปัญหาในการเผาทำลายในเขตภาคเหนือ ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพด มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ เพื่อลดปัญหาทางด้านหมอกควัน โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ปริมาณคาร์บอนคงตัว อัตราการใช้พลังงานและต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพ

วิธีการวิจัย

เครื่องมือในการผลิตถ่านชีวภาพ

ในการทดสอบผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เครื่องมือผลิตถ่านชีวภาพเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิและเวลาจะใช้เครื่องวิเคราะห์ระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านจะใช้เครื่องมือผลิตถ่านชนิดให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม โดยทั้งสองเครื่องนี้เวลาทดสอบจะใช้ตัวแปรเดียวกัน เครื่องผลิตถ่านระดับห้องปฏิบัติการเป็นเตาเผาแบบใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์ที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อน ใช้กำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดฮีตเตอร์ 5,000 W แรงดันไฟฟ้า 220 V ที่ความถี่ 50 Hz สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 1,500 °C ส่วนเตาผลิตถ่านชีวภาพสำหรับการทดสอบนำร่องครั้งละ 1 kg จะใช้ก๊าซหุงต้มเป็นแหล่งความร้อน ลักษณะของเตาเป็นทรงกระบอก สามารถจุชีวมวลในการผลิตครั้งละ 1 kg ส่วนประกอบทั่วไปของเตาประกอบไปด้วย ห้องเผาไหม้ หัวเตาแก๊สและชุดมอเตอร์และเกียร์ทดที่มีขนาด 1 HP (0.75 kW) มีอัตราการหมุนของห้องเผาไหม้คือ 0.15 rpm

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้ แกลบและซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ ชีวมวล 2 ชนิดนี้เป็นชีวมวลที่พบมากในเขตภาคเหนือการทดสอบเริ่มต้นจากการนำเอาชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ทำการบดย่อยให้ได้ขนาด 1 mm (16 mesh) นำไปทดสอบกับเครื่องมือผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิไพโรไลซิส คือ 300 และ 400 °C เป็นระยะเวลา 40 และ 60 min โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนไหลเวียนในกระบวนการ จากนั้นนำชีวมวลไปทดสอบและวิเคราะห์ผลทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์โดยประมาณ ส่วนการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ต้นทุน กระบวนการเตรียมและการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบในระดับปฏิบัติการแตกต่างกันเพียงปริมาณชีวมวลที่ทดลองและเชื้อเพลิงที่ป้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเท่านั้น



การวิเคราะห์คุณสมบัติ

การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านชีวภาพ ทำการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ด้วยการหาค่าความชื้น โดยนำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 105 °C ระยะเวลา 3 h ตามมาตรฐาน ASTM D2867-04 ปริมาณสารระเหย ทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 750 °C ระยะเวลา 7 min ตามมาตรฐาน ASTM D 5832-96 ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D 2866-94 เเผาที่อุณหภูมิ 650 °C ระยะเวลา 3 h [4] คำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัวจากสมการที่ (1) [5] และวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงจากสมการที่ (2) [6] วิเคราะห์อัตราการใช้พลังงาน และต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของชีวมวล ที่ห้องปฏิบัติการธรณี โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

$$FC (\%) = 100 - (MC + VM + Ash) \quad (1)$$

$$HHV (MJ/kg) = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \quad (2)$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%), MC คือ ความชื้น (%), VM คือ ปริมาณสารระเหย (%) Ash คือ ปริมาณเถ้า (%) และ HHV คือ ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแกลบและซังข้าวโพด

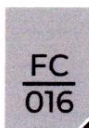
การวิเคราะห์คุณสมบัติของแกลบและซังข้าวโพด ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ พบว่าซังข้าวโพดมีค่ามากกว่าแกลบ ดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากซังข้าวโพดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ที่มากกว่าแกลบ คือ 46.39%, 6.05%, 40.67%, 0.04% และ 0.00% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ทำให้ซังข้าวโพดมีความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าแกลบ คือ 11.44±0.18%, 83.23±2.03%, 2.40±0.66% และ 2.93% ตามลำดับ การที่ซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงส่งผลให้ค่าความร้อนสูงตามไปด้วย คือ 13.99 MJ/kg ในขณะที่แกลบมีค่าความร้อน 12.87 MJ/kg อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนกับงานวิจัยอื่น พบว่ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่แตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ในขณะที่ค่าความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยปริมาณคาร์บอนคงตัวของแกลบอยู่ในช่วง 13-15% และซังข้าวโพดอยู่ในช่วง 11-16% ในขณะที่ค่าความร้อนของแกลบอยู่ในช่วง 15-17 MJ/kg และ ซังข้าวโพดอยู่ในช่วง 15-18 MJ/kg [7-10]

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์โดยประมาณของชีวมวล

Biomass	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)
Rice husk	6.38±0.05	69.58±2.24	17.92±0.36	6.12	12.87
Corn cob	11.44±0.18	83.23±2.03	2.40±0.66	2.93	13.99

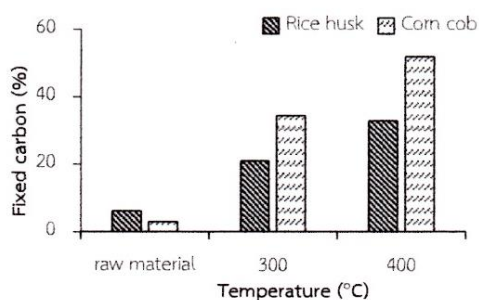
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวล

Biomass	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Rice husk	39.51	5.31	34.81	0.4	0.00
Corn cob	46.39	6.05	40.67	0.5	0.01



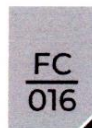
ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

จากภาพที่ 1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนคงตัว 6.12% และ 2.93% เมื่อนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสนี้ส่งผลให้มีการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น [11] โดยถ่านชีวภาพแกลบ ที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C ที่ระยะเวลา 60 min มีปริมาณคาร์บอนคงตัวคือ 20.95% และ 32.86% ตามลำดับ สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพด คือ 34.66% และ 51.88% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัวนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดที่ 400 °C มีค่าความร้อนสูงสุด คือ 16.10 และ 23.95 MJ/kg ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

ผลกระทบของเวลาที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลากระบวนการไพโรไลซิสจะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยถ่านชีวภาพแกลบที่ระยะเวลา 40 และ 60 min ที่อุณหภูมิ 400 °C มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ 31.23% และ 32.86% ตามลำดับ สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 50.97% และ 51.88% ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยากจะคงเหลืออยู่ในถ่านชีวภาพหลังจากที่เฝ้าสารระเหยออกไป และจะใช้ระยะเวลานานในการเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว [12] การเพิ่มเวลาเพียงเล็กน้อยจึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพทั้ง 2 ระยะเวลาไม่แตกต่างกัน โดยถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนคือ 15.85 และ 16.03 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับถ่านชีวภาพแกลบที่ระยะเวลา 40 และ 60 min และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด คือ 23.78 และ 23.95 MJ/kg ตามลำดับ ดังภาพที่ 2



จากตารางที่ 3 จะสังเกตได้ว่าชีวมวลที่ได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิและระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อคาร์บอนคงตัว โดยที่อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ในขณะที่เวลาที่มีผลเพียงเล็กน้อยที่ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการลดลงของค่าความชื้น และสารระเหย อีกทั้งปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [13]

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชีวภาพ

Biomass	Temperature (°C)	Time (min)	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)
Rice	300	40	0.29±0.11	57.48±0.52	22.84±0.14	19.39	15.64
		60	0.17±0.10	54.86±0.58	24.02±0.36	20.95	15.77
husk	400	40	0.25±0.26	32.21±1.47	36.31±0.24	31.23	15.78
		60	0.09±0.23	30.13±2.56	36.92±0.37	32.86	16.03
Corn	300	40	0.73±0.03	61.26±0.60	7.71±2.69	30.30	20.20
		60	0.32±0.13	57.4±1.23	7.53±1.06	34.66	21.16

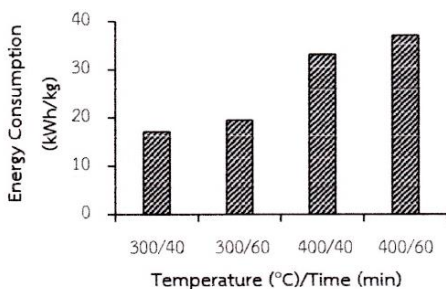
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชีวภาพ (ต่อ)

Biomass	Temperature (°C)	Time (min)	MC (%)	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)
Corn	400	40	0.88±0.13	37.44±1.92	10.71±0.60	50.97	23.78
cob		60	0.72±0.17	36.50±1.65	10.90±0.43	51.88	23.95

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานในการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานในระดับห้องปฏิบัติการเมื่อใช้ก๊าซหุงต้มเป็นแหล่งความร้อนในการผลิตถ่านชีวภาพ พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสทำให้อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 60 min (400/60), มีอัตราการใช้พลังงานมากที่สุดคือ 37.06 kWh/kg รองลงมาได้แก่ อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 40 min (400/40), อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 60 min (300/60) และ อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 40 min (300/40) คือ 33.20, 19.48 และ 17.16 kWh/kg เนื่องจากการทำอุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงนั้นจะต้องใช้เชื้อเพลิงในการเป็นแหล่งความร้อนที่มากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อน ในขณะที่เดียวกันหากเพิ่มระยะเวลาที่อุณหภูมิเท่ากันมีการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้มีความสิ้นเปลืองทางด้านพลังงานไม่ต่างกันนัก ดังภาพที่

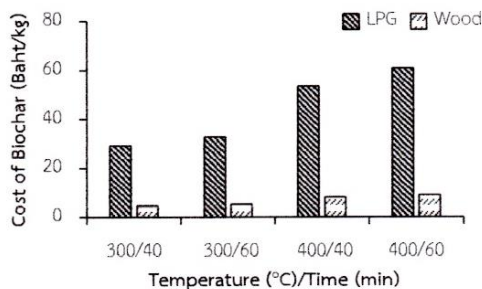
3

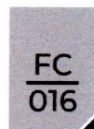


ภาพที่ 3 การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานในระดับห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อใช้ชีวมวลและก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

การผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้ก๊าซหุงต้มเป็นแหล่งความร้อนนั้นมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงได้มีการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเป็นแหล่งความร้อน พบว่าต้นทุนในการผลิตลดลง 83-86% ต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาที่อุณหภูมิเดียวกันมีต้นทุนในการผลิตไม่แตกต่างกันนัก โดยที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 40 min (300/40), อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลา 60 min (300/60), อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 40 min และอุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 60 min (400/60) มีต้นทุนการผลิตคือ 29.05, 32.76, 53.49 และ 60.75 Baht/kg ตามลำดับ สำหรับก๊าซหุงต้ม ในขณะที่ใช้ชีวมวลมีต้นทุนคือ 4.66, 5.16, 8.24 และ 8.99 baht/kg ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากมีระบบการผลิตถ่านชีวภาพที่มีอัตราการผลิตที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง ซึ่งอยู่ในช่วง 8-9 Baht/kg [14]





สรุปผลการวิจัย

อุณหภูมิและระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของถ่านชีวภาพ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจะทำให้ได้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันนัก โดยที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 60 min แกลบและขังข้าวโพดที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือ 32.86% และ 51.88% ตามลำดับ อัตราการใช้พลังงานสูงสุดคือ 37.06 kWh/kg เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น ทำให้มีต้นทุนในการผลิตคือ 8.99 Baht/kg การใช้ชีวมวลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเป็นเชื้อเพลิงที่จะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเป็นแหล่งความร้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาถ่านชีวภาพบัณฑิตทางพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา และสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการไทย-จีน ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทรัตน์ ศุภกานีต. 2558. การจัดการดินและปุ๋ยสำหรับพืชสวน. สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร
- [2] เบญจพร เครือทะนันทไชย. 2557. การวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า. วิศวกรรมมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] ทิวา ดันสถิตย์, สุธรรม วิจารณ์เมฆา และธณกร เทพวงษ์. 2559. การผลิตไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าวเพื่อการอุ้มน้ำในดิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1, 2559(401-410).
- [4] ASTM INTERNATIONAL. (2009). ANNUALBOOK OF ASTM STANDARTS 2009. Printed in Baltimore, MD, USA
- [5] นคร ทิพย์วงศ์. 2553. เทคโนโลยีการเปลี่ยนสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [6] Jigisha Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal. (2005) A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *Fuel*, 84, pp 487-494.
- [7] Adilah Shariff, Nurhidayah Mohamed, Alexxander Lau and Muhammad Azwan Mohd Ali.2016. A Comparative Study on Biochar from Slow Pyrolysis of Corn Cob and Cassava Waste. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 10, pp763-767.



- [8] Jau-Jang Lu and Wei-Hsin Chen. 2014. Product Yield and Characteristics of Corncob Waste under Various Torrefaction Atmospheres. **Energies**, 7, pp 13-27.
- [9] Noorhaza Alisa, Norazana Ibrahim, Mohd. Kamaruddin Abd. Hamid, Hasrinah Hasbullah, Roshafima Rasit Ali, Aziatul Niza Sadikin and Umi Aisah Asli. (2014). THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF RICE HUSK AND COCONUT PULP FOR POTENTIAL BIOFUEL PRODUCTION BY FLASH PYROLYSIS. **The Malaysian Journal of Analytical Sciences**, 18, pp 705-710.
- [10] Savitri Garivait1, Ubonwan Chaiyo, Suthum Patumsawad and Jittawadee Deakhuntod. (2006). Physical and Chemical Properties of Thai Biomass Fuels from Agricultural Residues. **The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)"**,
- [11] Xin Jiat Lee, Lai Yee Lee, Suyin Gan, Suchithra Thangalazhy-Gopakumar and Hoon Kiat-Ng. 2017. Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: **Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. Bioresource Technology**, 2017(236), 155-163.
- [12] นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล. (2557). การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและครัวเรือน. **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**, 6(11), หน้า 66-77.
- [13] Praphatsom Rattanaphalboon, Nigran Homdoun*, Natthawud Dussadee, Churat Thararux and Rameshprabu Ramaraj. (2017). UPGRADING ENERGY OF AGRICULTURAL WASTE WITH TORREFACTION PROCESS. **Proceedings of the 24th Tri-University International Joint Seminar and Symposium 2017**,
- [14] สถาบันพลังงาน มช. (2560). **โครงการพัฒนาแนวทางการผลิตและประยุกต์ด้านชีวภาพจากวัสดุการเกษตรเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านกัม.**

3. The 25th Tri-University International Joint Seminar & Symposium. November 4-8, 2018 : Faculty of Engineering Chaing Mai University, Thailand



ภาพผนวกที่ 8 The 25th Tri-University International Joint Seminar & Symposium.



JSU_24 16:45 - 17:00	THE RATIONAL THINKING OF EDUCATION DISCIPLINE PROBLEMS IN CHILDREN'S EDUCATION Speaker : Shumin Wu Jiangsu University	300
BAU_14 17:00 - 17:15	“JANGAN JAJAN” : ONLINE FOOD COMIC AS A BREAKTHROUGH SOLUTION TO INCREASE FOOD SAFETY KNOWLEDGE AMONG YOUTH IN INDONESIA Speaker : Ditta Hakha Soleha Bogor Agricultural University	304
SESSION 3.4 FOOD (Room : PHUANG SAET)		
MJU_07 15:15 - 15:30	PRETREATMENT OF WAITE WAXY CORN (<i>Zea mays var. ceratina</i>) FOR EFFICIENT BIOETHANOL PRODUCTION Speaker : Alissandra Pauline B. Mariano Maejo University	310
GXU_01 15:45 - 16:00	RESEARCH ON CHINA'S FOOD PRODUCTION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT Speaker : Chen Yuying Guangxi University	314
MJU_04 16:00 - 16:15	AN ANALYSIS ENERGY OF WASTER CORE PRODUCTION WITH USING TORREFACTION PROCESS Speaker : Praphatsorn Rattanaphaiboon Maejo University	318
MJU_06 16:15 - 16:30	POTENTIAL BIOETHANOL PRODUCTION FROM LOW QUALITY MIXED WAXY CORN SEEDS Speaker : Jennifer Casabar Maejo University	322



AN ANALYSIS ENERGY OF WASTE CORN PRODUCTION WITH USING TORREFACTION PROCESS

Praphatsorn Rattanaphaiboon
pui_p4336@hotmail.com

Nigran Homdoung*
nigranghd@gmail.com

Jenjira Uttareun
Natthawud Dussadee
Churat Thararux
Rameshprabu Ramaraj

School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290,
Thailand

ABSTRACT: Currently, abundant agricultural wastes are available in Thailand. Therefore, the use of that to produce energy is likely and highly feasible. The objective of this research found out the effect of torrefaction temperature on proximate properties, heating value, mass and energy yield with using corn cob and corn stalk. The torrefaction process was adjusted temperature between of 200-400°C at 40 minutes of constant torrefaction time and nitrogen gas atmosphere. It was found that, the moisture and volatile was decreased with increase in torrefaction temperature while the fixed carbon and ash content with an increase. The heating value of torrefied fuel was increased in a range of 30-40% at high torrefaction temperature. The optimum mass and energy yields of both biomasses occurred in lower torrefaction temperature and that was obtained of 81.42% and 98.38%, respectively.

Keyword: torrefaction, energy, corn cobs, corn stalks

1. INTRODUCTION

The northern of Thailand, the most agriculture was corn planting. It founded that, had many agricultural waste of corns such as corn stalks and corn cobs [1, 2]. Normally, agriculturist often eradicate by burn method, which it led to air pollution problem and farmer's health. If corn stalks and corn cobs lead to apply in part of energy. It could increase quality of agricultural product and decrease air pollution problem. However, utilization of agricultural waste had many limitations such as low heating value, high moisture and low density. For this reason, they could not lead to use be fuel. Therefore, it must improve quality of agricultural waste by torrefaction.

Torrefaction was per-pyrolysis process at temperature in a range of 200-400°C under vacuum condition. This process can decrease moisture and disintegrate polymer structure of plant such as cellulose, lignin and some hemicellulose [3]. Properties of torrefied fuel like char, high heating value and low moisture [4]. After torrefaction, remaining moisture was 3%, mass lost 30% and remaining energy was 90% which was compared raw material's energy [3].

The main objectives of this work were thereby (1) to test the energy quality increasing of agricultural waste including corn cobs and corn stalks by torrefaction, and (2) to decrease the air pollution problem and increase energy potential of Thailand.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Material

Biomass sample used in the study was collected from the Northern Thailand which including corn cobs and corn stalks. It was derived from field corn were of 24% and 62%, respectively [5]. The average heating value and moisture content of the corn cobs and corn

stalks were 13.78 MJ/kg, and less than 12% were carried out testing. The raw sample was choose and removed coarse contaminants. After choosing, the sample was crushed into the powder with 1 mm (16 mesh) of size Fig. 1.

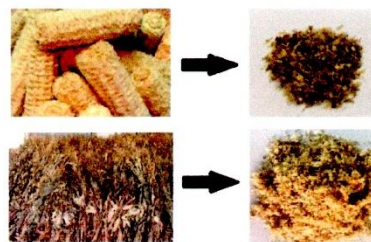


Fig. 1 Raw material and powdered sample

2.2 Torrefaction reactor

Torrefaction reactor diagram was illustrated in Fig. 2. The top and under of torrefaction reactor was installed tube for input and output for nitrogen gas and produce gas on process. The heat source of torrefaction reactor was used 5 kW of electrical heater and type K of thermocouple control system on operating. The experimental was start with increase temperature and feed N_2 into the reactor. Sample was used average of 10 g/times. The sample was input in the top reactor and that use water cooled down at less than 40°C. When the temperature torrefaction of the reactor enter, the sample is released from above into the reactor. When finish the sample will pull back to above the reactor and cooler again. The sample after torrefaction was called torrefied fuel. The temperature of torrefaction was adjusted in a range of 200-400°C at 40 minutes of constant torrefaction time.

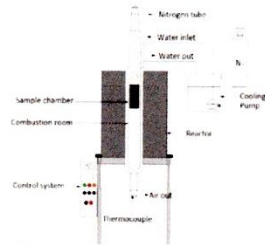


Fig. 2 Torrefaction reactor diagram

In the experiment testing was studied the property of raw sample and torrefied fuel on proximate analysis such as moisture content (MC), volatile matter (VM), ash content and fixed carbon (FC). The high heating value (HHV) [6], mass yield (Y_{mass}) and energy yield (Y_{energy}) [7] can calculated the following (1)-(3).

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \quad (1)$$

$$Y_{mass} \text{ (%) } = \frac{\text{mass after torrefaction}}{\text{mass of raw sample}} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_{energy} \text{ (%) } = Y_{mass} \frac{HHV \text{ (torrefied fuel)}}{HHV \text{ (raw sample)}} \times 100\% \quad (3)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Torrefaction temperature on torrefied fuel properties

Moisture content of corn cobs and corn stalks after torrefaction at different temperatures were presented in Fig. 3. The moisture content of torrefied fuel decreased when increase temperature torrefaction from raw sample. Normally, the moisture content in biomass was evaporated higher 100°C cause of the moisture content decrease [8].

The volatile matter of torrefaction was reduced from raw sample with increased temperature torrefaction because thermal damages decomposition of biomass including hemicellulose lignin and cellulose [9]. Then, it was reduced mass and some energy [10]. The minimum volatile matter of torrefied fuel from corn cobs and corn stalk were 37.44% and 43.16% at 400°C show that Fig. 4.

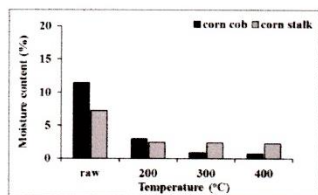


Fig. 3 Moisture content of raw sample and torrefied fuel

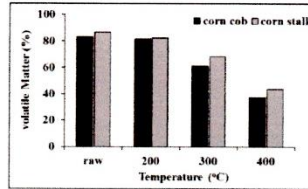


Fig. 4 Volatile matter of raw sample and torrefied fuel

Fig. 5 shows that the ash content of corn cobs and corn stalks were torrefied at difference temperature. The ash content of torrefied fuel increased because chemical structure of biomass was damaged [9]. Which the moisture and some volatile was released out from the raw sample [11]. The ash content of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks increased from 2.40-10.71% and 5.75-18.84%, respectively. The high ash content is problem for operating gasification engine due to trouble on remove out on the system [12].

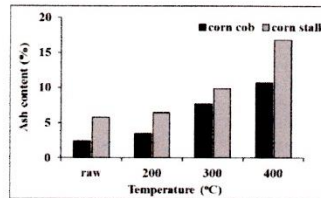


Fig. 5 Ash content of raw sample and torrefied fuel

The fixed carbon results presented in Fig. 6. Increasing of torrefaction temperature with high fixed carbon was decreased the H, O and N, which is element component of moisture and volatile [13]. The fixed carbon of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks were increased in a range of 12-51% and 13-20%, respectively. The fixed carbon of torrefied fuel was increased 37-51% from the raw sample.

The fixed carbon and ash content of torrefied fuel was increased with that on torrefaction. The maximum fixed carbon content of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks were 51.12% and 37.27% at 400°C. The moisture contents decrease was 68-94% which after torrefaction the moisture less than 10% [14]. The ash content of torrefied fuel increased after the high temperature torrefaction. The ash content of the both torrefied fuel was increased from raw sample.

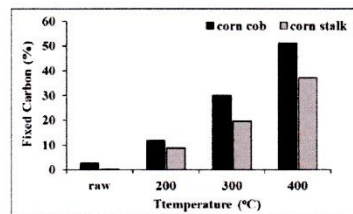


Fig. 6 Fixed carbon of raw sample and torrefied fuel

3.2 High heating value of torrefied fuel

The prediction of high heating value from equation (1) Increasing torrefaction temperature was led to increased high heating value. The moisture content and some volatile matter was removed out from biomass while the fixed carbon was increase with result to rise the high heating value [16]. The maximum high heating value of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks was obtained 23.83 MJ/kg and 19.58 MJ/kg at 400°C. Which increasing from raw sample was 30-40%.

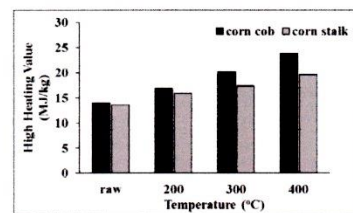


Fig. 7 High heating value of torrefied fuel

3.3 Mass and energy yield of torrefied fuel

Fig. 8 and 9 shown the mass and energy yield of torrefied fuel. The increasing torrefaction temperature with decreased mass yield. The decrease of mass was caused loss moisture and some volatile, the thermal decomposition was reactive of components biomass such as the hemicellulose, volatile and the consequent producer gas, which that occurred between 200-400°C. The mass yield of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks were of lowest 31.51% and 32.91% at 400°C.

The energy yield of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks were decreased from 98.38% to 53.56% and 78.01% to 40.91% with increase torrefaction temperature. The energy yield has relationship with mass yield. Due to decrease mass yield was caused low energy yield. The main causes in decrease of mass yield was reduced moisture and volatile out raw sample [7]. The temperature torrefaction at 200°C has high energy yield which is suitable for energy.

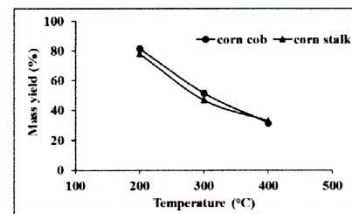


Fig. 8 The mass yield of torrefied fuel

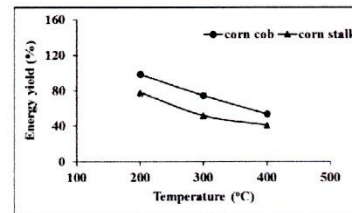


Fig. 9 The energy yield of torrefied fuel

4. CONCLUSIONS

The torrefaction temperature was effected on properties of torrefied fuel. Increasing temperature torrefaction was reduced moisture content with volatile matter and the fixed carbon and ash content was increase. The high heating value of torrefied fuel from corn cobs and corn stalks between of 15-24 MJ/kg. In addition, the torrefaction temperature at 200°C was achieved highest mass and energy yield and that was suitable for upgrading both biomass in industrial and power generation.

5. ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thanks for provided the research grand from School of Renewable Energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates ASEAN". National Research Council of Thailand (NRCT) under the Thailand-China Cooperation Program, Fiscal 2016. Scholarship of project Startup from graduate school, Maejo University and EPPO: Energy Policy and Planning office, Ministry of Energy, Thailand, Fiscal 2018.

6. REFERENCES

- [1] Ministry of energy. (2018). Energy Situation of Thailand in 2017. Department of Alternative Energy Development and Efficiency.
- [2] Office of Agricultural Economics. (2018). Product of agriculture in Thailand. (Online) URL: <http://www.oae.go.th/> Accessed August 10, 2018.
- [3] Dussadeeporn Sitikul. (2014). The Characteristic of Biomass In Torrefaction Process. Thesis, Master of Engineering, Silpakorn University
- [4] Pongsak Hangniran, Trirat Neamsuwan. (2011). Future technology of torrefied fuel pellet, Journal of Forest Management, Vol 5 (10), pp 67-75.



- [5] Praphatsorn Rattanaphaiboon, Nigran Homdoug, Natthawud Dussadee, Churat Thararux, Rameshprabu Ramaraj (2017). Upgrading Energy of Agricultural Waste With Torrefaction Process, Proceedings of the 24th Tri-University International Joint Seminar and Symposium 2017, 23-27 October 2017, Mie University, Japan.
- [6] Jigisha Parikh, S.A.Channiwala, G.K.Ghosal. (2005) A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, Fue, Vol 84, pp. 494-487
- [7] Jeeban Poudel, Tae-In Ohm, Sea Cheon Oh. (2015). A study on torrefaction of food waste. Fuel, Vol 140, pp 275-281.
- [8] G. Toscano, A. Pizzi, E. Foppa Pedretti, G. Rossini, G. Ciceri, G. Martignon, D. Duca. (2015). Torrefaction of tomato industry residues. Fuel, Vol 143, pp 89-97.
- [9] Prins M.J, Ptasinski K.J, Janssen F.J. (2006). Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. J Anal Appl Pyrol: Vol 77, pp 35-40.
- [10] Małgorzata Wilk, Aneta Magdziarz. (2017). Hydrothermal carbonization, torrefaction and slow pyrolysis of miscanthus giganteus, Energy, Vol 120, pp 1-22.
- [11] Ane C. P. Borges, Carine T. Alvesa, Ednildo A. Torres. (2016). Torrefied Eucalyptus Grandis Characterization as a Biomass to Using in Industrial Scale, Chemical Engineering Transactions, Vol 49, pp 283-288.
- [12] Wei-Cheng Chen, Heng-Wen Hsu, Cheng-Hsien Shen. (2009). The Operational Experience and Market Potential Investigation of Coal Gasification in Taiwan,
- [13] Øyvind Skreiberg, Liang Wang, Quang-Vu Bach, Morten Grønli. (2018). Carbonization pressure influence on fixed carbon yield. Chemical Engineering Transactions, Vol 65.
- [14] Xin Jiat Lee, Lai Yee Lee, Suyin Gan, Suchithra Thangalazhy-Gopakumar, Hoon Kiat Ng. (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies, Bioresource Technology, Vol 236, pp 155-163.
- [15] Dengyu Chen, Yanjun Li, Minsi Deng, Jiayang Wang, Miao Chen, Bei Yan, Qiqiang Yuan. (2016). Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood, Bioresource Technology, Vol 214, pp 615-622.



Praphatsorn
Rattanaphaiboon

Graduate student in Master of Engineering (Renewable Energy Engineering). Faculty of science, major applied physic and Biomass technology



Jenjira Utaeun

Researcher, School of Renewable Energy, Maejo university. Master of Engineering (Renewable Energy Engineering) -Biomass technology



Churat Thararux

Assistant Professor, School of Renewable Energy, Maejo University Professional in Gasification and Pyrolysis Process.



Nigran Homdoug

Assistant Professor, School of Renewable Energy, Maejo University Professional in Biomass Engineering and Automotive field.



Natthawud Dussadee

Assistant Professor & Director, School of Renewable Energy, Maejo University. Professional in Agricultural Drying Processes, Energy Conservation, Solar energy.

การบริการวิชาการ

นิทรรศการแสดงผลงาน ในงานเกษตรแม่โจ้ 85 ปี ร่วมกับบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยแม่โจ้ วันที่ 8-16 ธันวาคม พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้



**บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยแม่โจ้**

Graduate School : Maejo University
 "Innovative Entrepreneurs Driving Thailand 4.0"
 8-16 December 2018

การพัฒนาถ่านชีวภาพ
สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านเกษตรกรรม



Biomass → **Pyrolysis** → **BIOCHAR**

ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตขึ้นจากพืชหรือวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ผ่านกระบวนการทางเคมีที่ควบคุมอุณหภูมิ "กระบวนการไพโรไลซิส" ที่อุณหภูมิ 200-500 °C ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยทั่วไปอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 200-500 °C ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำลงได้จะส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอน น้ำ ความร้อน และก๊าซอื่นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตถ่านชีวภาพ จะทำให้คาร์บอนที่ปล่อยออกมาได้ลดลงและสามารถปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่ชั้นบรรยากาศ สามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

ปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

Biomass	Temperature (°C)	Fixed carbon (%)	HHV (MJ/kg)
Rice husk	Raw material	0.68	14.61
	300	20.95	15.77
400	Raw material	3.86	16.03
	300	34.66	21.18
Corn cob	300	34.66	21.18
	400	51.88	23.55

คุณสมบัติ/ประโยชน์ ถ่านชีวภาพ

ปริมาณคาร์บอนสูง

- สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
- ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนราก
- ช่วยกักเก็บน้ำทำให้ดินมีอุณหภูมิลดลง ช่วยลดการระเหยของน้ำและเพิ่มที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์
- ช่วยดูดซับธาตุอาหาร ปรับค่า pH ของดินและน้ำ
- ช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

คณะผู้จัดทำ
 ภาควิชาประมงสัตว์น้ำ ปศุสัตว์ และ วนศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 (ศึกษาศาสตร์ และ ศึกษาศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้)

รับชมวีดิทัศน์และข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่
 เฟซบุ๊ก : คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 โทร : 053-812-111 ต่อ 2101 หรือ 2102
 โทรสาร : 053-812-111 ต่อ 2103

ภาพผนวกที่ 9 โปสเตอร์นิทรรศการแสดงผลงาน งานเกษตรแม่โจ้ 85 ปี

ผลการศึกษา

ปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อน

Biomass	Temperature (°C)	Fixed carbon (%)	HFV (MJ/kg)
Rice husk	Raw material	0.68	14.61
	300	20.95	15.77
	400	33.86	16.03
Corn cob	Raw material	3.07	16.16
	300	34.66	21.16
	400	51.88	23.95

การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น 33-49% และค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 8-33% จากชีวมวลเริ่มต้น



คณะผู้จัดทำ
นางสาวประวิมล เสาร์ รัตนไพฑูริย์
ผู้ช่วยคณบดีอาวุโส ศร.นิราน หอมดวง
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงานทดแทน)

ความเป็นรูปทรงของถ่านชีวภาพ



ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีพื้นที่พื้นผิวภายในมาก โดยมีค่าประมาณ 10-400 m²/g ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิไพโรไลซิส ความเป็นรูปทรงนี้จะทำหน้าที่ในการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน และทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
Graduate School : Maejo University
"Innovative Entrepreneurs Driving Thailand 4.0"
8-16 December 2018

ถ่านชีวภาพ



Biochar



วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ 4 ส.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
โทรศัพท์ 053-873070 แฟกซ์ 053-333194



วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีความร้อนที่เรียกว่า "กระบวนการไพโรไลซิส" เพื่อแยกสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในชีวมวล โดยจะใช้อุณหภูมิในช่วง 300-800 °C ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้จะมีองค์ประกอบของคาร์บอน ค่าความร้อน และรูปทรงเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาใช้ในด้านการเกษตรสามารถกักเก็บคาร์บอนลงสู่ดิน ทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชสามารถลดปัญหาการลดก๊าซเรือนกระจก และปัญหาสิ่งแวดล้อม





คุณสมบัติ/ประโยชน์ ถ่านชีวภาพ

- ปริมาณคาร์บอนสูง
- สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
- ช่วยกักเก็บน้ำ ทำให้ดินมีรูปทรงไม่จับตัวแน่น
- เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์
- ช่วยดูดซับธาตุอาหาร
- ปรับค่า pH ของดินและน้ำ
- ช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

วิธีการผลิตถ่านชีวภาพ

1. ทำการลดความชื้นชีวมวล โดยการตากแดด
2. นำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300-800 °C ระยะเวลาเป็นชั่วโมง
3. นำถ่านที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กลง เพื่อใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงดิน

วิธีการใช้ถ่านชีวภาพ



50%
ถ่านชีวภาพ



35%
ปุ๋ยคอก



15%
ดิน

แบบที่ 1

ใช้ถ่านชีวภาพ 1 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ร่วมกับปุ๋ยคอก



ภาพผนวกที่ 10 แผ่นพับนิทรรศการแสดงผลงาน งานเกษตรแม่โจ้ 85 ปี

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวประภัสสร รัตนไพบูลย์
เกิดเมื่อ	4 มีนาคม 2536
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี

