ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ

nn í u í a æ i ne

อัมพิกา จันทร์ทองอิน

TC

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ปีการศึกษา 2559 Effect of Particle Size on Biocoke Properties from Leucaena Wood Chips

กุก โนโลฮั) กุร

Aumpika Juntong-in

10

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

> Graduate School Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2016

ห้วข้อวิทยานิพนธ์
โดย
สาขาวิชา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ

ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก ไม้กระถินยักษ์สับ อัมพิกา จันทร์ทองอิน เทคโนโลยีวิศวกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น ส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

C

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์) วันที่........เดือน.....พ.ศ....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจ<mark>า</mark>รย์ ดร. วราคม เนิดน้อย)

.....กร<mark>รมกา</mark>ร

(ดร. ดอน แก้วดก)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

อัมพิกา จันทร์ทองอิน : ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับ. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, 70 หน้า.

้จากแผนพลังงานของประเทศไทยที่ผลักดันให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ประกอบกับ ไม้กระถินยักษ์เป็นหนึ่งในพืชพลังงานโตเร็วที่มีศักยภาพในการปลูกและเก็บเกี่ยวสูง เหมาะสำหรับ นำมาใช้เป็นชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานทดแทน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ไม้กระถินยักษ์สับมาผลิตเป็นถ่าน ชีวภาพ และศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ สับ โดยทำการปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับและร่อนแยกขนาดพร้อมวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัว ของอนุภาคแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีความหนาแน่นสูงที่สุดคือ 1.35 g/cm³ และความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อขนาดของไม้ กระถินยักษ์สับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min มีความหนาแน่นสูงสุดคือ 1.35 g/cm³ และพบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อไม้กระถิน ้ยักษ์สับใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5, 1 และ 2 min และความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อไม้ กระถินยักษ์สับใช้เวลาในการปั่นย่อย 3, 5 และ 10 min เนื่องจากมีการจับตัวกันเป็นก้อนกลมขนาด ้เล็กของอนุภาคไม้เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาปั่นย่อยเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ ้สับขนาด 250-425 µm มีความต้านทานแรงอัดมากที่สุดคือ 147.48 MPa สอดคล้องกับถ่านชีวภาพ ที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min ที่มีความต้านทานแรงอัดมากที่สุดคือ 166.12 MPa เนื่องจากที่การปั่นย่อยที่ 2 min ทำให้เกิดไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มาก ที่สุด และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจะแปรผันตรงกับขนาดไม้กระถินยักษ์สับเมื่อขนาดน้อยกว่า 425 µm แต่ทว่าค่าความร้อนจะลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อไม้กระถินยักษ์สับมีขนาด ้มากกว่า 425 µm <mark>แ</mark>ละพ<mark>บว่าถ่านที่ผ</mark>ลิตจ<mark>ากไม้ก</mark>ระถินยั<mark>ก</mark>ษ์สับข<mark>นาด</mark> <250 µm มีค่าความร้อนต่ำ ์ ที่สุด เนื่องจากอนุภาคขน<mark>าดเล็</mark>กทำให้องค์<mark>ป</mark>ระ<mark>กอบท</mark>างเค<mark>มีมีการ<mark>เปลี่ย</mark>นแปลงขณะถูกอัดขึ้นรูปด้วย</mark> ้ความร้อนได้ง่าย ส่วนถ่าน<mark>ชีวภ</mark>าพที่ผลิตจา<mark>ก</mark>ไม้กร<mark>ะถินยักษ์</mark>สับที่ใ<mark>ช้เวล</mark>าในการปั่นย่อย 0.5, 1 และ 2 min มีค่าความร้อนใกล้เคี<mark>ยงกัน</mark> และค่าคว<mark>า</mark>มร้อนมีแน<mark>วโน้ม</mark>สูงขึ้นเ<mark>มื่อใช้</mark>เวลาในการปั่นย่อย 3, 5 และ ี่ 10 min เนื่องจากการส<mark>ลายตัวขอ</mark>งความช<mark>ึ้นแล</mark>ะสารโมเลกุลต่ำในเนื้อไม้ขณะปั่นย่อย โดยถ่านที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 10 min มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 4,560 kcal/kg

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม ปีการศึกษา 2559

(0)

ลายมือชื่อนักศึกษา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา AUMPIKA JUNTONG-IN : EFFECT OF PARTICLE SIZE ON BIOCOKE PROPERTIES FROM LEUCAENA WOOD CHIPS. ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. JINTAWAT CHAICHANAWONG, 70 PP.

Leucaena is one of a promising fast growing tree which is expected to utilize as an alternative biomass energy resources. In this work, Leucaena wood chips were ground and classified by sieving method and analyzed the particle size distribution. Then, it was produced into biocoke with different particle size. From the experimental results, the biocoke produced from the particle size smaller than 250 µm has the highest bulk density at 1.35 g/cm³ and the bulk density decreases at larger particle size. Besides, the biocoke produced from the 2 min ground particles has the highest bulk density at 1.35 g/cm³ and the density increases when the biocoke produced from the 0.5, 1, and 2 min ground particles. Conversely, the density decreases for 3, 5 and 10 min ground particles because the clusters of small particles were occurred increasingly at the longer grinding time. For ultimate compressive strength, the maximum was obtained at 147.48 MPa when the particle size is in range of 250-425 µm. Similarly, the biocoke produced from the 2 min ground particles which consists of 250-425 µm particles in the most, has the highest ultimate compressive strength at 166.12 MPa. Furthermore, the biocoke produced from the 250-425 µm particles has the highest calorific value at 4,434.74 kcal/kg and the calorific value decreases with larger particle size. The biocoke with particle size less than 250 µm, however, gives less calorific value since its better heat transfer property causes changes in chemical composition of the biocoke during the production process. In addition, the calorific value of the biocoke produced from the 0.5, 1 and 2 min ground particles are approximately at 4,350 kcal/kg, then it is upward trend for the 3, 5 and 10 min ground particles because of moisture and low molecular weight molecules disintegration, and the biocoke produced from the 10 min has the highest calorific value at 4,560 kcal/kg

Graduate School Field of Engineering of Technology Academic Year 2016 Student's Signature..... Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำปรึกษา ความ อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณบุคคล กลุ่มบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้อำนวยการ หลักสูตรและอาจารย์ประจำหลักสูตรสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่กรุณา ให้โอกาสสำหรับการทำงานวิจัยนี้ อีกทั้งคอยแนะนำ ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาแก่ ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ คำแนะนำ คำปรึกษา รวมถึงเอื้อเฟื้อช่องทางการติดต่อขอใช้เครื่องมือวิเคราะห์ของสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนิดน้อย อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมยานยนต์ และ ดร. ดอน แก้วดก ประธานหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางที่เหมาะสมด้วยดีเสมอมา ตลอดจนให้ คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

10

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ทุนอุดหนุนและอุปกรณ์จากห้อง วิจัยกระบวนการวัสดุขั้นสูง ห้องปฏิบัติการเคมี และคณาจารย์ผู้ดูแลห้องทดลอง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น รวมไปถึงบุคลากรเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรเทคโนโลยี วิศวกรรม สำหรับการดูแลประสานงาน และคอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะ ทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค และรองศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์ อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง TGA/DSC ที่ได้เอื้อเฟื้อสถ<mark>านที่</mark> เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความ ช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆในการทำวิจัยนี้

รวมไปถึงขอขอบคุณบริษัท อินเตอร์ คลินส์ อินดัสตรีส์ จำกัด สำหรับความช่วยเหลือในการ ซ่อมเตาไฟฟ้าแบบท่อที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ

อัมพิกา จันทร์ทองอิน

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	 	۹
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ຈ
กิตติกรรมประกาศ		ຊ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ฌ
สารบัญรูป		សូ

บทที่

1	บทนำ	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
	1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
2	งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
	2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
3	ขั้นตอนการวิจัย	18
	3.1 <mark>วัสดุแล<mark>ะอุป</mark>กรณ์ที่ใช้</mark>	18
	3.2 การออ <mark>กแบ</mark> บการทดลอ <mark>ง</mark> แล <mark>ะขั้นตอนกา</mark> รทดล <mark>อง</mark>	18
4	ผลการทดลอง แล <mark>ะกา</mark> รวิเคราะห์ผ <mark>ล</mark>	30
	4.1 ลักษณะทางกายภาพของไม้กระถินยักษ์สับ	30
1	4.2 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดไม้กระถินยักษ์สับ	32
	4.3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพ	33
	4.4 ความหนาแน่น	35
	4.5 อัตราการขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	4.6 ความต้านทานแรงอัดสูงสุด	39
	4.7 โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องก	าราด43
	4.8 ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ	49
	4.9 สมบัติการสลายตัวทางความร้อน	51
	4.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	55
5 สรุ	ปผลการทดลอง	60
บรรณานุกร	ນ	63
ภาคผนวก.		67
ภา	คผนวก ก. ลำดับการผลิตถ่านชีวภาพแบบสุ่มเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05	68
ประวัติย่อผู้	ີ່ວິຈັຍ	70
		0
V.		
V		

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1	เป้าหมายการพัฒนาพลังงา <mark>นทดแทนภายใต้แผน</mark> AEDP ในปี 2579 [2]
2.1	องค์ประกอบและค่าความร้อนของวัสดุชีวมวลต่างๆ [17]
2.2	แสดงองค์ประกอบแล <mark>ะค่าความร้อนของไม้โตเร็วชนิด</mark> ต่างๆ [15]
3.1	สภาวะการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพด้วยเครื่องอัดในแนวตั้ง22
4.1	ฐานนิยมของขนาดไม้กระถินยักษ์สับที่ถูกปั่นย่อยที่เวลาต่างๆ
4.2	อุณหภูมิในเครื่องปั่นย่อยขณะปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับที่เวลาต่างๆ
4.3	หมู่ฟังก์ชั่นที่พบในไม้กระถินยักษ์สับที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR56
ก.1	ลำดับการผลิตถ่านชีวภาพแบบสุ่มเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

สารบัญรูป

รูป	หา	้เา
2.1	ถ่านชีวภาพ [16]	.5
2.2	แผนภาพแสดงองค์ประกอบของชีวมวล [17]	.6
2.3	ภาพแสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ [19]	.9
2.4	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [20]	10
2.5	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21]	11
2.6	ภาพบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ [23]	12
2.7	ตัวอย่างกราฟแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุ	
	ที่ได้จากเทคนิค TGA และ DSC [25]	13
2.8	ภาพตัวอย่าง Infrared Spectrum ของ Aniline ที่ได้จากเทคนิค FTIR [27]	14
3.1	แผนภาพลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	19
3.2	(ก) ภาพถ่ายเครื่องย่อยขนาด WONDER รุ่น D3V-10 และ	
	(ข) ภาพถ่ายเครื่องร่อนขนาดอนุภาค Retsch รุ่น AS 200	21
3.3	ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ	22
3.4	ภาพถ่ายเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง (ก่อนการติดตั้งแม่พิมพ์	
	เตาไฟฟ้าแบบท่อ และแท่งอัด)	23
3.5	(ก) ภาพจำลอง และ (ข) ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของเครื่องอัดถ่านชีวภาพ	
	โดยการอัดในแนวตั้ง [25]	23
3.6	ภาพถ่ายเครื่องทดสอบกำลังอัดของวัสดุ Universal Testing Machines (UTM)	
	SHIMADZU รุ่น UH-1000kNXR	25
3.7	ภาพถ่ายกล้องจุล <mark>ทรรศ</mark> น์อิเล็กตรอ <mark>นแบบส่อง</mark> กวา <mark>ด</mark> ZEIS <mark>S รุ่น</mark> EVO MA10 Versatile 🕑	
	Multipurp <mark>ose</mark> SEM	26
3.8	ภาพถ่าย Bomb <mark>Calo</mark> rimeter P <mark>ar</mark> r รุ่น Mod <mark>el 1</mark> 341 P <mark>lain</mark> Jacket	28
3.9	ภาพถ่ายเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module	28
4.1	ไม้กระถินยักษ์สับขนาด (ก) <250 µm (ข) 250-425 µm (ค) 425-600 µm	
	(ง) 600 µm-1 mm และ (จ) 1-2 mm	30
4.2	ไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min	
	(ຈ) 5 min ແລະ (ຉ) 10 min	31

T

สารบัญรูป (ต่อ)

	ຽປ	หน้	้ำ
	4.3	กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดไม้กระถินยักษ์สับที่ผ่านการปั่นย่อยที่เวลาต่างๆ	
		(Gt : Grinding Time)	32
	4.4	(ก) ตัวอย่างไม้กระถินยักษ์สับขนาด 600 µm-1 mm และลักษณะทางกายภาพของถ่าน	
		ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด (ข) <250 μm (ค) 250-425 μm	
		(ຈ) 425-600 µm (ຈ) 600 µm-1 mm (ລ) 1-2 mm3	3
	4.5	ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย	
		(ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (ຈ) 5 min ແລະ (ຉ) 10 min3	34
	4.6	ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ	35
	4.7	ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ3	6
	4.8	อัตราการขยายตัวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ	37
	4.9	อัตราการขยายตัวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ.3	8
	4.10	ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ3	39
	4.11	กราฟแสดงความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิต	
		จากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ4	10
	4.12	ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อย	
		ที่ระยะเวลาต่างๆ (ก่อนชิ้นงานแตกหัก)4	1
	4.13	กราฟแสดงความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิต	
		จากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ (ก่อนชิ้นงานแตกหัก)	2
	4.14	ความต้านทานแร <mark>งอัดสู</mark> งสุดข <mark>อ</mark> งถ่า <mark>นชีวภา</mark> พที่ผลิต <mark>จ</mark> ากไม้ก <mark>ระถิ</mark> นยักษ์สับที่ปั่นย่อย	
		ที่ระยะเวลา <mark>ต่างๆ</mark> ก่อนชิ้นงา <mark>น</mark> แต <mark>กหัก และห</mark> ลังชิ้นง <mark>านแ</mark> ตกหักแล้ว	3
Z	4.15	ภาพถ่ายลักษณะร <mark>อยแ</mark> ตกของถ่าน <mark>ช</mark> ีวภาพที่ <mark>ผลิตจา</mark> กไม้กร <mark>ะถิน</mark> ยักษ์สับขนาด	
		(ก) <250 µ <mark>m (ข</mark>) 250-425 µm (ค) 42 <mark>5-6</mark> 00 µm (ง <mark>)</mark> 600 µm-1 mm	
		(จ) 1-2 mm ที่กำลังขยาย 30 เท่า4	ŀ4
	4.16	ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด	
		(ก) <250 µm (ข) 250-425 µm (ค) 425-600 µm (ง) 600 µm-1 mm	
		(จ) 1-2 mm ที่กำลังขยาย 80 เท่า4	15

สารบัญรูป (ต่อ)

	ູລູປ		หน้า	
	4.17	ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ที่ใช้เวลา		
		ในการปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (จ) 5 min		
		(ฉ) 10 min ที่กำลังขยาย 30 เท่า	47	
	4.18	ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ที่ใช้เวลา		
		ในการปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (ง) 5 min		
		(ฉ) 10 min ที่กำลังขยาย 80 เท่า	48	
	4.19	ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ	49	
	4.20	ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ.	50	
	4.21	(ก) การสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ (ข) การสลายตัว		
		ทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ	52	
	4.22	(ก) การสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ		
		(ข) การสลายตัวทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ		
		ที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ	54	
	4.23	สเปกตรัมอินฟราเรดของไม้กระถินยักษ์สับที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	55	
	4.24	สเปกตรัมอินฟราเรดของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากวิเคราะห์		
		ด้วยเทคนิค FTIR [34]	56	
	4.25	สเปกตรัมอินฟราเรดของไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ และถ่านชีวภาพที่ผลิต		
		จากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	58	
	4.26	สเปกตรัมอ <mark>ินฟราเรดข</mark> องไม้กระถิน <mark>ยักษ์สับ</mark> ที่ปั่นย่ <mark>อ</mark> ยที่ระย <mark>ะเวล</mark> าต่างๆ		
		และถ่านชีว <mark>ภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ</mark> ที่ปั่นย่ <mark>อยที่ร</mark> ะยะเวลาต่างๆ	0	
Z		ที่ได้จากวิเค <mark>ราะห์</mark> ด้วยเทคนิ <mark>ค</mark> FTIR	59	
	5.1	กราฟแสดงความ <mark>หนาแ</mark> น่น ความต <mark>้า</mark> นทานแรง <mark>อัดสู</mark> งสุด แ <mark>ละค่า</mark> ความร้อน		
		ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ	60	
	5.2	กราฟแสดงความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และค่าความร้อน		
		ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ	60	

ม

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีนโยบายผลักดันให้พลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ โดยกำหนดเป็น แผนพัฒนาพลังงานทดแทน เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ.2558 ถึง 2579 มีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนการทดแทน การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยเชื้อเพลิงทางเลือก อันได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์/ลม/ชีวมวล/ก๊าซชีวภาพ และขยะ ให้ได้เป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศในปี 2579 ดังตารางที่ 1.1 และคาดการณ์ว่าจะช่วยลดการนำเข้าพลังงานได้มากกว่า 460,000 ล้านบาท/ปี ภายในปีพ.ศ.2565 ดังนั้นชีวมวลและไม้โตเร็วจึงถูกนำมาศึกษาและใช้ผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งไม้โตเร็วจัดเป็นวัสดุชีวมวลชนิดใหม่ที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการปลูกและช่วยผลักดันเข้าสู่ โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชนเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่เริ่มประกาศให้ พลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ มีเป้าหมายเพื่อช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตพลังงานความร้อนจาก วัสดุชีวมวล สามารถปลูกได้ในพื้นที่เสื่อมโทรมซึ่งไม่เหมาะสมในการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักได้ ซึ่ง คาดการณ์ว่าจะทำให้สามารถผลิตชีวมวลเพิ่มได้ถึง 18 ล้านตัน/ปี จาก 79.49 ล้านตัน/ปี คิดเป็น ร้อยละ 22 ของปริมาณศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลคงเหลือต่อปีที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนได้ [1, 2, 3]

	สัดส่วนพลัง	การใช้พลังงาน	
M 2 101	(ร้อย	ขั้นสุดท้าย	
MEINNIL	สถานภ <mark>า</mark> พ	<mark>ส</mark> ถานภาพ	ณ ปี 2579
	<mark>ณ ปี</mark> 2557	<mark>ณ</mark> ปี 2579	(ktoe)
ไฟฟ้า : ไฟฟ้า	9	15 - 20	27,789
ความร้อน : ความร้อน	17	<mark>3</mark> 0 – 35	68,413
เชื้อเพลิงชีวภาพ : เชื้อเพลิง	7	20 – 25	34,798
พลังงานทดแทน : การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย	12	30	131,000

ตารางที่ 1.1 เป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทนภายใต้แผน AEDP ในปี 2579 [2]

หมายเหตุ : ktoe คือ พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ

ชีวมวลและพืชพลังงานถูกนำมาใช้ทั้งในรูปแบบของการหมัก (Fermentation) เพื่อให้เกิด ้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) จากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้้อากาศ แล้วน้ำก๊าซที่ได้ไปใช้เป็น เชื้อเพลิง การผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquidification Technology) ที่ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ให้เป็นเอทานอล เช่น ไบโอ-ดีเซล [4] การนำชีวมวลมาผลิตเป็นก๊าซด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) ที่นำเศษชีวมวลขนาดเล็กที่ผ่าน การย่อยมาแล้ว มาเผาภายใต้อากาศที่จำกัด เพื่อให้เกิดเป็นก๊าซชีวมวลที่สามารถนำไปใช้กับกังหัน แก๊ส (Gas Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดคือ ชีวมวลที่นำมาใช้ต้องมีขนาดที่ เหมาะสม สม่ำเสมอ และความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 20 [5] และวิธีที่นิยมกันมากอีกวิธี คือ การเผา ใหม้โดยตรง (Direct Combustion) พลังงานที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในชีวมวล จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ความร้อน ซึ่งค่าความร้อนที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล โดยก่อนนำไปเผาไหม้จะนำชีวมวลมาอัดให้มี ้ลักษณะเป็นแท่ง หรือ เม็ด (Pallets) เรียกว่าชีวมวลอัดแท่ง เพื่อลดปริมาณความชื้น แล้วจึงนำไปเผา ใหม้เพื่อให้พลังงานความร้อน โดยข้อดีของการใช้ชีวมวลในรูปของชีวมวลอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง พลังงาน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการนำชีวมวลมาผลิตพลังงานวิธีอื่น คือสามารถนำไปใช้ในกับเตาเผา ้อุตสาหกรรมได้ [6] นอกจากนี้ในปัจจุบันมีการพัฒนาชีวมวลอัดแท่งรูปแบบใหม่ เรียกว่าถ่านชีวภาพ (Biocoke) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านโค้ก และค่าความชื้นต่ำ (น้อยกว่า 15%) มีความหนาแน่นและมีความแข็งแรงสูง จึงสะดวกในการขนส่งและจัดเก็บ รวมถึงสามารถใช้ทดแทน ถ่านหินในอุตสาหกรรมได้โดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษ

สมบัติของถ่านชีวภาพที่ดี ได้แก่ มีค่าความร้อน (Calorific Value) โดยประมาณ 4,000-4,500 kcal/kg ค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 3 ปริมาณเถ้าน้อยกว่าร้อยละ 3 และมีความต้านทาน แรงอัดสูงสุดเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและสมบัติของถ่าน ชีวภาพมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของวัสดุชีวมวล ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ใน ชีวมวล ลักษณะและขนาตอนุภาคของชีวมวล ความชื้นเริ่มต้นของชีวมวล ความดันในการผลิต อุณหภูมิการผลิต และเวลาในการอัดขึ้นรูป เป็นต้น [7, 8, 9] ดังนั้นการนำชีวมวลมาผลิตถ่านชีวภาพ อัดแท่งจึงถูกวิจัยค้นคว้าหาวิธีการและสภาวะในการอัดขึ้นรูปต่างๆที่เหมาะสม Mizono และคณะ [10] รายงานว่าอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป และปริมาณความชื้นของชีวมวล มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพโดยตรง สุพิชญา เชิดเกียรติกูล และคณะ [11] ได้ ศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟขนาดอนุภาคเล็กกว่า 400 µm ให้ค่าความร้อนสูงสุด ประมาณ 5,175 kcal/kg และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟจะสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาค ของกากกาแฟเล็กลง นอกจากนี้ Hamidun และคณะ [12] ได้ศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเส้น ใยปาล์มจะมีแนวโน้มความต้านทานแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของเส้นใยปาล์มเล็กลง โดย ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเส้นใยปาล์มขนาด 1.0-1.4 mm, 1.4-2.4 mm และขนาดเล็กกว่า 1.0 mm มี

10

ความต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 117, 108 และ 76 MPa ตามลำดับ ประกอบกับ มะลิวัลย์ หฤทัยธนา สันติ์ และคณะ [13] ได้ทดลองเปรียบเทียบศักยภาพในการใช้เป็นไม้พลังงานของไม้โตเร็ว 4 ชนิด ซึ่ง ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส กระถินเทพา กระถินยักษ์ และกระถินเทพณรงค์ พบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีมวลชีวภาพ ของลำต้นเมื่อตัดที่อายุ 24 เดือนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ กระถินเทพณรงค์ กระถินเทพา และกระถิน ยักษ์ แต่หากปลูกในดินที่มีค่า pH สูง กระถินยักษ์จะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีกว่ายูคาลิปตัส อีก ทั้งกระถินยักษ์มีความสามารถในการแตกหน่อหลังจากการตัดได้ดีกว่า ทำให้ความคุ้มค่าทาง เศรษฐศาสตร์สูงว่าไม้ชนิดอื่นหากเป็นการปลูกเพื่อตัดในรอบสั้นๆ และจากงานวิจัยของมะลิวัลย์และ คณะรายงานว่า ค่าความร้อนของไม้โตเร็วทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง 4,602 ถึง 4,798 kcal/kg ใกล้เคียง กับค่าความร้อนที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพทั่วไปอีกด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากความสามารถในการ ปลูกไม้โตเร็วที่สามารถเพาะปลูกได้ในพื้นที่เสื่อมโทรม และทางคณะวิจัยได้แนะนำว่าจากข้อมูลข้าง ต้นไม้กระถินยักษ์น่าจะเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นพืชพลังงานมากที่สุดในกลุ่มพืชทั้ง 4 ชนิด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัตถุดิบเป็นไม้กระถินยักษ์สับมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ และศึกษา ผลกระทบของขนาดอนุภาคของชีวมวลที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ แล้ว ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล โครงสร้างทางจุลภาค ค่าความร้อน สมบัติทาง ความร้อน รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ได้จากงานวิจัย

16

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับต่อสมบัติของถ่านชีวภาพ ซึ่งได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล โครงสร้างทางจุลภาค ค่าความร้อน สมบัติทางความร้อน รวมถึง องค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- ผลิตถ่านชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์สับโดยการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดย การอัดในแนวตั้งที่ความดัน 14.5 MPa และใช้เวลาในการอัด 10 นาที
- แบ่งการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดไม้กระถินยักษ์สับเป็น 2 แบบ ดังนี้
 - O แบ่งไม้กระถินยักษ์สับตามขนาดอนุภาคเป็น 5 ช่วง ได้แก่
 - 1. ขนาด <250 μm
 - **2. ขนาด 250-425** μm
 - **3. ขน**าด 425-600 μm
 - 4. ขนาด 600 µm-1 mm
 - 5. ขนาด 1-2 mm

แบ่งไม้กระถินยักษ์สับตามลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle
 Size Distribution) โดยแบ่งตามเวลาที่ใช้ในการปั่นย่อย 6 แบบ ได้แก่

- 1. ใช้เวลาปั่นย่อย 0.5 min
- 2. ใช้เวลาปั่นย่อย 1 min
- 3. ใช้เวลาปั่นย่อย 2 min
- 4. ใช้เวลาปั่นย่อย 3 min
- 5. ใช้เวลาปั่นย่<mark>อย 5 m</mark>in
- <mark>6. ใ</mark>ช้เวลาปั่นย่<mark>อ</mark>ย 10 min
- ความชื้นขอ<mark>งชิ้นไ</mark>ม้กระถินยัก<mark>ษ์สับเท่ากับ 10</mark>±1%wt
- กำหนดอุณ<mark>หภูมิ</mark>การอัดขึ้นรู<mark>ป</mark>ที่ 160°C
- ทดสอบสมบัติของถ่านชีวภาพ ได้แก่ ความห^{ู่}นาแน่นรวม อัตราการขยายตัวหลังการอัด ขึ้นรูป ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ค่าความร้อน รวมไปถึงวิเคราะห์โครงสร้างทาง จุลภาค และองค์ประกอบทางเคมี
- ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดไม้กระถินยักษ์สับที่มีผลต่อความหนาแน่นรวม อัตราการขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ค่าความร้อน โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพ



2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

16

2.1.1 ถ่านชีวภาพ และวัสดุชีวมวล [14, 15]



รูปที่ 2.1 ถ่านชีวภาพ [16]

ถ่านชีวภาพ (Biocoke) คือถ่านที่มีวัตถุประสงค์ใช้เป็นเชื้อเพลิง ผลิตจากวัสดุชีวมวล (Biomass) การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อนเพื่อผลิต ไอน้ำหรือน้ำมันร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานต่างๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิต ไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ และเนื่องจากต้นทุน พลังงานจากชีวมวล ซึ่งก็คือราคาของชีวมวลเทียบกับพลังงานที่ได้จากชีวมวล ยังมีราคาถูกเมื่อ เปรียบเทียบกับต้นทุนพลังงานจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันเตา จึงได้มีการนำชีวมวลต่างๆ มาใช้ทดแทนน้ำมันเตาเพื่อผลิตพลังงานความร้อนอย่างแพร่หลาย และยังเป็นการสนับสนุนการใช้ เศษวัสดุการเกษตรในประเทศเพื่อลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล ต่างๆ

วัสดุชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ ซึ่งวัสดุชีวมวลที่ทางกระทรวงพลังงานนำมาประเมินศักยภาพในการ ผลิตเป็นพลังงานทดแทน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

 ชีวมวลคงเหลือ ได้แก่ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือเศษวัสดุจากกระบวนการ ผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น เหง้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว ซังข้าวโพด กิ่งไม้ เป็นต้น ไม้โตเร็วที่มีศักยภาพใช้เป็นพลังงานชีวมวล ได้แก่ ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส (Eucalytus camaldulensis Schlecht.) กระถินเทพา (Acacia mangium Willd.) กระถินยักษ์ (Leucaena leucocephala (Lamk.) de Wit) และกระถินณรงค์ (Acacia auriculiformis Cunn.) องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass Compositions) จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่

- 1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวล
- 2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ
 - สารระเหย (Volatiles Matter)
 - คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)
- 3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือเถ้า (Ash)



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของชีวมวล [17]

ดังนั้นเมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้ว จะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งคือเถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทจะมีสัดส่วนของปริมาณเถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน จากการสำรวจ สมบัติของชีวมวลประเภทต่างๆ พบองค์ประกอบและค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากชีวมวลและ พืชพลังงานโตเร็วแต่ละปร<mark>ะเภท</mark> ดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ชีวมวล	Mois- ture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Higher Calorific Value (kcal/kg)	Lower Calorific Value (kcal/kg)
แกลบ (Rice Husk)	12	12.65	56.46	18.88	3,527	3,231
ฟางข้าว (Rice Straw)	10	10.39	60.7	18.9	3,262	2,947
ซานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	2,209	1,761
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.2	6.1	67.8	16.9	4,014	3,700
ไม้ยางพารา (Parawood)	45	1.59	45.7	7.71	2,477	2,055
เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)	38.5	4.42	42.68	14.39	3,137	2,725
กะลาปาล์ม (Palm Shell)	12	3.5	68.2	16.3	4,366	4,039
ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch)	58.6	2.03	30.46	8.9	2,198	1,730
ต้นปาล์ม (Palm Trunk)	48.4	1.2	38.7	11.7	2,239	1,806
ทางปาล์ม (Palm Leaf)	78.4	0.7	16.3	4.6	934	421
ซังข้าวโพด (Corn <mark>c</mark> ob)	40	0.9	45.4 <mark>2</mark>	<mark>13.6</mark> 8	2,700	2,298
ลำต้นข้าวโพด (Corn Stalk)	41.7	3.7	46.46	8.14	2,797	2,349
เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)	59.4	1.5	31	8.1	1,781	1,313
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark)	60	2.44	28	9.56	1,628	1,175

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและค่าความร้อนของวัสดุชีวมวลต่างๆ [17]

ชนิดของไม้โตเร็ว	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Calorific Value (kcal/kg)
ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส (Eucalyptus camaldulensis Schlecht.)	3.89	1.58	28.16	66.37	4,600
กระถินเทพา (Acacia mangium Willd.)	2.57	2.57	25.10	69.76	4,737
กระถินยักษ์ (Leucaena leucocephala (Lamk.) de Wit)	2.55	G 2.70	18.90	75.85	4,436
กระถินณรงค์ (Acacia auriculiformis Cunn.)	3.64	3.81	28.73	63.82	4,770

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบและค่าความร้อนของไม้โตเร็วชนิดต่างๆ [15]

2.1.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป

TC

กระบวนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ คือการขึ้นรูปชิ้นงานโดยมีวัสดุตั้งต้นเป็นผง หรือเป็นชิ้น เล็กๆ นำมาอัดให้ได้รูปทรงที่ต้องการด้วยแรงดันที่เหมาะสม แล้วนำไปให้ความร้อนโดยไม่มีการเผา ไหม้หรือหลอมเหลว [18] เพื่อให้ส่วนผสมประสานติดกันเป็นชิ้นงานของแข็งที่มีความแข็งแรงมาก พอที่จะนำไปใช้งานต่อไป โดยมีขั้นตอนหลักๆดังแสดงในรูปที่ 2.3

STITUTE O

Processes chart of Biocoke Formation 1.Filling Pro. 3.Heating Pro. 4.Cooling Pro.

รูปที่ 2.3 ภาพแสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ [19]

2.1.3 การทดสอบสมบัติถ่านชีวภาพ

2.1.3.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพ ใช้หลักการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของมวลรวมต่อปริมาตรรวมของเนื้อวัสดุและช่องว่างในชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\rho = \frac{m}{v}$$

(2.1)

โดย

(0

ho คือ ความหนาแน่นรวมของวัตถุ (kg/m³)

m คือ มวลรวมขอ<mark>ง</mark>วัตถุ (kg)

ห คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (m³)

2.1.3.2 การวัดอัตราการขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป

อัตราการขยายตัวของชิ้นงาน เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างขนาดของชิ้นงาน ถ่านชีวภาพที่เย็นตัวหลังจากการอัดขึ้นรูปกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ สามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 2.2

2.1.3.3 การทดสอบความต้านทานแรงอัดสูงสุด

การทดสอบโดยการอัด นิยมใช้ทดสอบวัสดุที่มีสมบัติเปราะ เช่น เหล็กหล่อ หรือ คอนกรีตเพราะจะให้ผลการทดสอบถูกต้องแน่นอนกว่าการทดสอบกับโลหะเหนียว การทดสอบเริ่ม จากเพิ่มแรงอัดอย่างข้าๆและสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูปและแตก โดยรูปร่างของชิ้นงาน ทดสอบจะเป็นทรงกระบอกหรือลูกบาศก์ เครื่องทดสอบจะบันทึกค่าความเค้นกด (Compressive Stress) ที่ความเครียด (Strain) ต่างๆ แล้วแสดงผลออกมาเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 โดยความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Ultimate Strength) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัตถุสามารถรับได้ก่อนชิ้นงานเสียหาย



รูปที่ 2.<mark>4 ตัวอ<mark>ย่างก</mark>ราฟความสัมพันธ์ระหว่างค</mark>วามเค้<mark>นและ</mark>ความเครียด [20]

2.1.3.4 กา<mark>รวิเ</mark>คราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่<mark>านช</mark>ีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นเครื่องมือใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ มีกำลังขยายสูงสุด 200,000 เท่า หลักการ ทำงานคือใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปยังผิวขึ้นงานตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนเหล่านั้นจะถูก สะท้อนกลับและถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับอิเล็กตรอน (Electron Detector) และถูกแปลง เป็นสัญญาณภาพ จากนั้นแสดงผลออกมาเป็นภาพ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นิยมนำมาใช้ใน

10

การศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างต่างๆ เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเซลล์ และเนื้อเยื่อ พื้นผิวหน้าตัดของโลหะและวัสดุ ลักษณะรอยแตกของวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [21]

2.1.<mark>3</mark>.5 กา<mark>รทด</mark>สอบค่<mark>า</mark>ควา<mark>มร้อนข</mark>องเชื้อเพลิง

10

ค่าความร้อน (Calorific Value) คือ ปริมาณความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่เชื้อเพลิง ถ่ายเทออกเมื่อเกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ โดยเครื่องมือที่ใช้หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เรียกว่า บอมบ์แคลลอรี่มิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ซึ่งใช้การวัดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับ ออกซิเจน (หรืออากาศ) ภายในแคลลอรี่มิเตอร์ (Calorimeter) ระบบปิดที่จุ่มอยู่ในน้ำ แล้วทำการวัด อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของ ระบบ [22]



รูปที่ 2.6 ภาพบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ [23]

2.1.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

G

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ ของวัสดุเมื่ออุณหภูมิและเวลาเปลี่ยนแปลงไป ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางความ ร้อน เสถียรภาพต่อความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลักษณะการผ่าน กระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็น เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ภายใต้บรรยากาศที่กำหนด และเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ใช้วัดอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้ โปรแกรมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ และยังสามารถศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนเฟสของ วัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปล<mark>งอุณ</mark>หภูมิหรือเวลาได้อีกด้วย [24]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่ได้จากเทคนิค TGA และ DSC [25]

2.1.3.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

TC

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) ของชีวมวล สามารถใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ซึ่งเป็นเครื่องมือ สำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร โดยการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared Light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชั่นในสารตัวอย่าง นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น สารที่วิเคราะห์อาจจะมี หมู่ Hydroxyl (-OH), Methyl (-CH3) หรือ Carbonyl (-CO) เป็นต้น [26]

STITUTE OV



รูปที่ 2.8 ภาพตัวอย่าง Infrared Spectrum ของ Aniline ที่ได้จากเทคนิค FTIR [27]

TC

VSTITUTE OF

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันติ์ และคณะ [13] ได้ทดลองเปรียบเทียบศักยภาพในการใช้เป็นไม้ พลังงานของไม้โตเร็ว 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส กระถินเทพา กระถินยักษ์ และกระถินเทพณรงค์ โดยใช้ระยะปลูก 1x1 เมตร และตัดฟันเมื่ออายุครบ 24 เดือน พบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีมวลของลำต้น และน้ำหนักสดสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ กระถินเทพณรงค์ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ แต่หากปลูก ในดินที่มีค่า pH สูง กระถินยักษ์จะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีกว่ายูคาลิปตัส อีกทั้งกระถินยักษ์มี ความสามารถในการแตกหน่อหลังจากการตัดได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับไม้โตเร็วอีก 3 ชนิด จึงมีแนวโน้ม ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงว่าไม้ชนิดอื่นหากเป็นการปลูกเพื่อตัดในรอบสั้นๆ และจากงานวิจัยยัง รายงานอีกว่า ค่าความร้อนของไม้โตเร็วทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง 4,602 ถึง 4,798 kcal/kg และไม้ กระถินยักษ์เป็นไม้ที่มีค่าความชื้นหลังตัดต่ำที่สุด (38%) อีกด้วย

Mizuno และคณะ [10] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความชื้นและอุณหภูมิ สำหรับ การอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพความหนาแน่นสูงซึ่งผลิตจากชีวมวล ได้แก่ บรอคโคลี่ ใบเชอร์รี่แห้ง และ เมล็ดมะม่วง พบว่าอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปและปริมาณความชื้นของชีวมวลส่งผลกระทบโดยตรงต่อ ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ อีกทั้งช่วงอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปและปริมาณความชื้น เริ่มต้นของชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดยังแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุชีวมวล นอกจากนี้ Mizuno และ คณะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน (Carbon Content) และความต้านทานแรงอัด สูงสุดของถ่านชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนของชีวมวลก่อนนำมาผลิต พบว่าปริมาณคาร์บอนมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันเชิงเส้นกับความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่าน ชีวภาพ

Mizuno และคณะ [28] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปและความชื้นตั้งต้นของ ชีวมวลที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพความแข็งแกร่งสูงที่ผลิตจากลำต้นอ้อ โดยใช้ชีวมวลที่มีความชื้น ตั้งแต่ 0.05-0.1 kg/kg-wet และอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 160-210°C พบว่าที่ทุกๆความชื้น เมื่อใช้อุณหภูมิอัดขึ้นรูปสูงขึ้น ความหนาแน่นรวมจะสูงขึ้น และมีความหนาแน่นรวมสูงสุดที่อุณหภูมิ 200°C แล้วหลังจากนั้นความหนาแน่นรวมจะลูงขึ้น และมีความหนาแน่นรวมสูงสุดที่อุณหภูมิ 200°C แล้วหลังจากนั้นความหนาแน่นรวมจะลดลง นอกจากนี้ทางคณะวิจัยได้ทำการสังเกตการ เปลี่ยนสีเป็นสีดำของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากลำต้นอ้อ พบว่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่าน ชีวภาพมีแนวโน้มลดลงเมื่อถ่านชีวภาพเปลี่ยนสีเป็นสีดำมากขึ้น สามารถสันนิษฐานได้ว่าความ แข็งแกร่งของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากลำต้นอ้อมาจากสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงภายในเซลลูโลสและ ลิกนินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างแกนหลักของถ่านชีวภาพ และสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำภายในเฮมิ เซลลูโลสและลิกนินจะมีความสามารถในการยึดเกาะน้อยลงเมื่อถ่านชีวภาพเปลี่ยนสีเป็นสีดำมากขึ้น อีกทั้งพันธะระหว่างสารที่มีจุดหลอมเหล<mark>วสูงภายในลิ</mark>กนินยังอ่อนแอลง ทำให้ค่าความต้านทานแรงอัด สูงสุดที่ได้ต่ำลง

Sawai และคณะ [29] ได้ศึกษาอิทธิพลจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พันธุ์ไม้ และอุณหภูมิ ในการอัดขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพอัดแข็ง งานวิจัยรายงานว่าใน กรณีของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นบัวยจะมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการอัดที่ 140-160°C โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกิ่งบัวยไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของถ่านชีวภาพ แต่ ในกรณีของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นพลับ จะมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการอัดที่ ประมาณ 180°C ซึ่งได้รับอิทธิพลจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกิ่งพลับด้วย โดยถ่านชีวภาพที่ผลิต จากกิ่งพลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 mm จะมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดต่ำกว่าถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากกิ่งพลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 mm ถึงร้อยละ 30 ส่วนอิทธิพล ด้านความแตกต่างของพันธุ์ไม้นั้น พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกิ่งไม้พลับจะมีความต้านทานแรงอัด สูงสุดต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นบัวยเนื่องจากความแตกต่างของรูปร่างเศษไม้

ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ และคณะ [30] ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของชีวมวลที่มีผล ต่อประสิทธิภาพการให้ความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวล 4 ชนิด คือ ชานอ้อย ฟางข้าว แกลบ และผักตบชวา พบว่าขนาดอนุภาคของชีวมวลมีผลต่ออุณหภูมิที่ปล่องไอเสีย และปริมาณก๊าซ คาร์บอนมอนนอกไซด์ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านชีวภาพ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ปล่อง ไอเสียของถ่านชีวภาพทั้ง 4 ชนิดกับถ่านไม้มะขาม พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวและชานอ้อย เท่านั้นที่ให้อุณหภูมิที่ปล่องไอเสียสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้มะขาม อีกทั้งอัตราส่วนชีวมวลต่อ ตัวประสานต่อน้ำที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพทั้ง 4 ชนิด มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของ ชีวมวล

สุพิชญา เชิดเกียรติกูล และคณะ [11] ทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะการผลิตและ ขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ พบว่าความดันและเวลาที่ใช้ในการ ผลิตส่งผลเชิงลบเพียงเล็กน้อยต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ สภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ จากงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิการผลิต 190°C ความดัน 14.5 MPa เวลา 10 นาที ถ่านชีวภาพมีค่า ความหนาแน่นและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับถ่านโค้กอย่างมาก อีกทั้งพบว่าถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟขนาดอนุภาคเล็กกว่า 400 µm ให้ค่าความร้อนสูงสุดประมาณ 5,175 kcal/kg และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟจะสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของกาก กาแฟเล็กลง Hamidun และคณะ [12] ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อความต้านทานแรงอัด สูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเส้นใยปาล์ม พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเส้นใยปาล์มจะมีแนวโน้ม ของความต้านทานแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของเส้นใยปาล์มเล็กลง โดยถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากเส้นใยปาล์มขนาด 1.0-1.4 mm, 1.4-2.4 mm และขนาดเล็กกว่า 1.0 mm มีความต้านทาน แรงอัดสูงสุด คือ 117, 108 และ 76 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเส้นใยปาล์ม ทั้ง 3 ขนาด มีความเครียดสูงสุดที่สามารถรับได้เท่าๆกัน คือ 18.0%

เจือจันทน์ เกตษา [31] ศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และ ถ่านกัมมันต์ พบว่าอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่านชาร์ สำหรับ ถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูงให้ค่าปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง และจาก การวิเคราะห์การสลายตัวของสารระเหยในถ่านชาร์ยังพบอีกว่า ปริมาณการสลายตัวของลิกโน เซลลูโลสในขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการลดลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์เนื่องจากการลดลงของตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาจากการสลายตัวของลิกโน เซลลูโลสที่คงเหลือเมื่อได้รับความร้อนในขั้นตอนการกระตุ้น

นอกจากนี้ พงษ์ศักดิ์ เฮงนิรันดร์ และไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ [32] ได้อธิบายถึงไม้ทอร์รีไฟด์ (Torrefied Wood) ว่าคือไม้ที่ผ่านกระบวนการทอร์ริแฟคชั่น (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการ ไพโรไลซิสที่ไม่รุนแรง (Mild Pyrolysis) เพื่อที่จะกำจัดน้ำและสารอินทรีย์ระเหยอื่นๆ (VOCs) ออกไป จากเนื้อไม้ สารระเหยและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนจะเริ่มสลายตัวที่ความร้อนต่ำ (ประมาณ 200-300°C) แต่เซลลูโลสและลิกนินที่เหลืออยู่จะใช้ความร้อนสูงกว่า ผลผลิตที่ได้จะมีคุณลักษณะก้ำกึ่งอยู่ ระหว่างไม้และถ่าน มีค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนัก (Energy Density) มากกว่าถ่านชีวมวลอัดแท่ง ทั่วไป และค่าความร้อนมีศักยภาพใกล้เคียงกับถ่านหิน และปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลถึงสมบัติทางความร้อน ของไม้ทอร์ริไฟด์คือ องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อไม้ โดยไม้ที่มีเฮมิเซลลูโลสที่มีค่า Degree of Polymerization (DP) สูงกว่า เมื่อเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายไปจะทำให้มีค่าความเข้มข้นของพลังงาน มากกว่าไม้ที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยสลายน้อยกว่า

6

STITUTE OF

บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- ไม้กระถินยักษ์สับ
- เครื่องย่อยขนาดชีวมวล WONDER รุ่น D3V-10
- เครื่องร่อนขนาดอนุภาค Retsch รุ่น AS 200
- พร้อมตะแกรงคัดแยกขนาด 250 µm, 425 µm, 600 µm, 1 mm และ 2 mm
- ชุดเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้งขนาดเล็กและเตาไฟฟ้าแบบท่อ ของห้องวิจัยกระบวนการวัสดุขั้นสูง ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
- เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) ความละเอียด 0.02 mm Mitutoyo
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 g METTLER TOLEDO รุ่น ML204
- เครื่องวัดความชื้น Kett รุ่น Infrared Moisture Determination Balance FD-610
- เครื่องทดสอบกำลังอัดของวัสดุ (Universal Testing Machines) SHIMADZU รุ่น UH-1000kNXR
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 - ZEISS รุ่น EVO MA10 Versatile Multipurpose SEM
- เครื่องวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Bomb Calorimeter)
 Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket
- เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงพลังงานและน้ำหนัก (Thermogravimetric/Differential Scanning Calorimeter, TGA/DSC) METTLER TOLEDO รุ่น STARE SYSTEM TGA/DSC1 Module
 - 🦷 เครื่องวิเคราะ<mark>ห์อง</mark>ค์ประกอบท<mark>า</mark>งเคมี (FTIR)

3.2 การออกแบบการทดลอง และขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเริ่มจากออกแบบ การทดลอง (Experiment Design) ให้ครอบคลุมปัจจัยที่ต้องการศึกษาโดยใช้หลักการออกแบบการ ทดลองทางสถิติร่วมด้วย จากนั้นเมื่อได้จำนวนชิ้นงานทดลองที่จำเป็นต้องศึกษาและลำดับการทำการ ทดลองแล้ว จึงทำการเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation) โดยการปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์ สับให้มีขนาดต่างๆและควบคุมความชื้นตามที่กำหนดให้มีปริมาณเพียงต่อการผลิตชิ้นงานถ่านชีวภาพ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution Analysis)



จากนั้นนำวัตถุดิบทีเตรียมไว้เข้าสู่เครืองอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง เพื่อผลิตถ่าน ชีวภาพให้มีลักษณะเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Biocoke Production) เมื่อได้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาดต่างๆแล้ว จึงนำไปทดสอบ (Testing) และวิเคราะห์สมบัติของถ่าน ได้แก่ วิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพ (Biocoke Appearance) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) อัตราการ ขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป (% Expansion) ทดสอบความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของถ่านชีวภาพด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Calorific Value) ทดสมบัติ การสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis Characterization) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) แล้วนำข้อมูลทดสอบที่ได้มาอภิปรายและสรุปผลการทดลอง

3.2.1 การออกแบบการทดลอง

ใช้หลักการของการออกแบบลำดับการทดลองแบบสุ่มเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 เพื่อกำหนดลำดับการผลิตถ่านชีวภาพสำหรับการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของไม้กระถิน ยักษ์สับที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพ โดยแสดงลำดับการผลิตถ่านชีวภาพดังภาคผนวก ก.

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เตรียมวัสดุชีวมวลก่อนการอัดโดยทำการปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับที่มีขนาดเริ่มต้น ประมาณ 0.5-1 cm ด้วยเครื่องย่อยขนาด WONDER รุ่น D3V-10 ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก) โดยแบ่ง ลักษณะการปั่นย่อยเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

- (1) ทำการปั่นย่อยขนาดไม้กระถินยักษ์ครั้งละ 100 กรัม และปั่นครั้งละประมาณ
 2 นาที จากนั้นแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนขนาดอนุภาค Retsch รุ่น AS 200
 ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข) โดยแบ่งเป็น 5 ช่วง ดังนี้
 - 1. ขนาด <250 μm
 - 2. ขนาด 250-425 µm
 - 3. ขนาด 425-600 μm
 - 4. ขนาด 600 μm-1 mm
 - 5. ขนาด 1-2 mm
- (2) ทำการปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับครั้งละ 60 กรัม ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน 6 ช่วงเวลา ดังนี้
 - 1. ใช้เวลาปั่นย่อย 0.5 min
 - 2. ใช้เวลาปั่นย่อย 1 min
 - 3. ใช้เวลาปั่นย่อย 2 min
 - 4. ใช้เวลาปั่นย่อย 3 min
 - 5. ใช้เวลาปั่นย่อย 5 min
 - 6. ใช้เวลาปั่นย่อย 10 min

แล้วจึงนำไม้กระถินยักษ์สับที่ได้จากการปั่นย่อยขนาดที่เวลาต่างๆแต่ละครั้ง มาร่อนแยกขนาดเป็น 5 ช่วง ได้แก่ <250 µm, 250-425 µm, 425-600 µm, 600 µm-1 mm และ 1-2 mm เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด อนุภาคที่ได้จากการปั่นที่เวลาต่างๆ

จากนั้นจึงทำการตรวจวัดความชื้นและอบควบคุมความชื้นของวัตถุดิบให้มีความชื้นอยู่

ในช่วง 10±1%wt

10



รูปที่ 3.2 (ก) ภาพถ่ายเครื่องย่อยขนาด WONDER รุ่น D3V-10 และ (ข) ภาพถ่ายเครื่องร่อนขนาด อนุภาค Retsch รุ่น AS 200

3.2.2.2 กา<mark>รอัดขึ</mark>้นรูปถ่านช<mark>ีว</mark>ภาพ

ขั้นตอนการ<mark>อัดขึ้</mark>นรูปถ่านช<mark>ีว</mark>ภาพดังแสดงในรูปที่ 3.3 เริ่มจากนำไม้กระถินยักษ์สับที่ ผ่านการย่อยขนาดและคว<mark>บคุม</mark>ความชื้นแล้วปริมาณครั้งละ 50 กรัม มาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดถ่าน ชีวภาพในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 โดยเครื่องจะทำการอัดผงไม้ที่อยู่ในแม่พิมพ์ด้วย ลูกสูบไฮโดรลิก และให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าแบบท่อภายใต้สภาวะการอัดขึ้นรูปดังตารางที่ 3.1 โดยลำดับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานถ่านชีวภาพจะเรียงตามลำดับการทดลองแบบสุ่มที่ได้จากข้อที่ 3.2.1 จากนั้นนำถ่านชีวภาพออกจากแม่พิมพ์และพักไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 3.1 สภาวะการอัดขึ้นรูปถ่านชีวภาพด้วยเครื่องอัดในแนวตั้ง

10

วัตถุดิบ	ไม้กระถินยักษ์สับ	>
น้ำหนักต่อชิ้น	50 g	5
เส้นผ่านศูนย์กลาง	48.04 mm	C)
อุณหภูมิอัดขึ้นรูป	160°C	
ความดัน	14.5 MPa	٢
เวลาที่ใช้ในการอัด	10 min	
	<250 μm, 250-425 μm, 425-600 μm, 600 μm-1 m	m, 1-2 mm
ขนาดอนุภาค	และไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย	
	0.5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 5 min, 10 m	nin

22



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง (ก่อนการติดตั้งแม่พิมพ์ เตาไฟฟ้า แบบท่อ และแท่งอัด)



รูปที่ 3.5 (ก) ภาพจำลอง และ (ข) ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการ อัดในแนวตั้ง [25]

3.2.2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม

การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม ทำได้โดยนำถ่านชีวภาพที่เย็นตัวสนิทแล้วมาชั่ง น้ำหนัก จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านชีวภาพด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ และวัดความสูง ของถ่านชีวภาพด้วยไมโครมิเตอร์ เพื่อคำนวณปริมาตรของถ่าน และนำไปคำนวณหาความหนาแน่น รวม ดังสมการที่ 2.1

24

(3.1)

3.2.2.4 การวัดอัตราการขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป

ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านชีวภาพเมื่อชิ้นงานเย็นตัวหลังนำออกจาก แม่พิมพ์ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ และนำไปคำนวณหาอัตราการขยายตัวเทียบกับขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของแม่พิมพ์ ดังสมการที่ 2.2

3.2.2.5 การทดสอบความต้านทานแรงอัดสูงสุด

นำถ่านชีวภาพมาทดสอบแรงกดแบบแกนเดียวด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดของวัสดุ Universal Testing Machines (UTM) SHIMADZU รุ่น UH-1000kNXR ดังแสดงในรูปที่ 3.6 การ ทดสอบจะเริ่มจากเพิ่มแรงอัดอย่างช้าๆและสม่ำเสมอ โดยกำหนดความเร็วหัวกดเป็น 0.025 mm/s จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูปและแตก เครื่องทดสอบจะแสดงแรงอัดที่ระยะกดต่างๆ จากนั้นนำค่าแรงอัด สูงสุดที่ชิ้นงานถ่านชีวภาพสามารถรับได้ก่อนชิ้นงานแตกหักมาคำนวณเป็นความเค้นดังสมการที่ 3.1 และบันทึกค่าความเค้นดังกล่าวเป็นค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength)

โดย

10

- F คือ แรงอัด (N)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานถ่านชีวภาพ (m²)


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องทดสอบกำลังอัดของวัสดุ Universal Testing Machines (UTM) SHIMADZU รุ่น UH-1000kNXR

10

3.2.2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ZEISS รุ่น EVO MA10 Versatile Multipurpose SEM ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพโดยใช้กำลังขยาย 30 และ 80 เท่า

STITUTE O



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ZEISS รุ่น EVO MA10 Versatile Multipurpose SEM

3.2.2.7 การทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ทำการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ชิ้นงานถ่านชีวภาพถ่ายเทออกมา เมื่อเกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ภายใต้แก๊สออกซิเจน โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

(1) ตัดชิ้นถ่านชีวภาพมวล 3-5 กรัม ใส่ลงไปในถ้วยโลหะ (Sample Cup)

(2) นำถ้วยโลหะวางในตำแหน่งขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิดที่ติดอยู่ใต้ฝาของลูกบอมบ์

(Bomb Cell)

(3) ตัดเส้น<mark>ลวด</mark> Fuse Wire ความยาว 10 cm ต่อ<mark>เข้ากับขั้วจุดระเบิด โดยจัดให้เส้น</mark> ลวดสัมผัสกับสารตัวอย่าง (แต่เส้นลวดห้าม<mark>สั</mark>มผั<mark>สกับถ้</mark>วยโลหะ)

(4) ใส่น้ำลง<mark>ในลู</mark>กบอมบ์จำน<mark>ว</mark>น 1 ml เพื่อให้เกิดก<mark>ารเผ</mark>าไหม้ในบรรยากาศอิ่มตัวด้วย

ไอน้ำ

(5) ประกอบฝาลูกบอมบ์ที่มีการประกอบถ้วยโลหะที่บรรจุชิ้นงานถ่านชีวภาพและต่อ เส้นถวดเรียบร้อยแล้วเข้ากับตัวลูกบอมบ์ให้แน่นสนิท

(6) เติมแก๊สออกซิเจนลงไปในลูกบอมบ์ให้มากเกินพอต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบสมบูรณ์ (ใช้ความดันประมาณ 25 bar)

(7) เติมน้ำกลั่นจำนวน 2 ลิตร ลงใน Calorimeter Bucket ที่เป็นฉนวนความร้อน แล้วจึงนำลูกบอมบ์ที่บรรจุถ่านชีวภาพเรียบร้อยแล้วแช่ลงใน Calorimeter Bucket (8) ต่อสายไฟเข้ากับขั้วจุดระเบิดของลูกบอมบ์

(9) ปิดฝา Calorimeter Bucket เพื่อให้อยู่ในระบบปิด

(10) เสียบ Thermocouple เข้าไปใน Calorimeter Bucket เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำ

(11) เปิดเครื่องเพื่อให้ใบพัดกวนทำงานประมาณ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำคงที่

(12) บันทึกอุณหภูมิของน้ำก่อนการจุดระเบิด

(13) กดปุ่มจุดระเบิดเพื่อให้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่สัมผัสอยู่กับถ่าน ชีวภาพ ทำให้ขดลวดร้อนและจุดถ่านชีวภาพให้ติดไฟ

(14) บันทึกอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นสูงสุด แล้วนำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมา คำนวณปริมาณความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของระบบ ดังสมการที่ 3.2

$$H_g = \frac{\Delta t W - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

(3.2)

โดย

H ู คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (cal/g)

 Δt คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำกลั่นใน Calorimeter Bucket (°C)

- W คือ ค่าน้ำสมมูลของ Bomb Calorimeter Parr (สำหรับยี่ห้อ Parr รุ่น
 - Model 1341 Plain Jacket มีค่าเท่ากับ 2,506 cal/°C)
- e1 คือ ค่าแก้เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้กรดไนตริก
 - $= c_1$

e2 คือ ค่าแก้ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้กรดซัลฟูริก (cal)

 $=13.7(c_2)(m)$

- e₃ <mark>คือ </mark>ค่าแก้ เนื่อง<mark>จ</mark>าก<mark>ความ</mark>ร้อนที่เกิดจากการ</mark>เผาไหม้ของ Fuse Wire (cal)
 - = $2.3(c_3)$ (กรณีเลือกใช้ Fuse Wire รุ่น Parr 45C10 Nickel Chromium)
- c₁ คือ มิลลิเมตรของค่า Standard Alkali Solution ที่ใช้ในการทำ Acid
 Titration = 23.9 (ค่าคงที่)

 c_2 คือ เปอร์เซนต์ซัลเฟอร์ในสารตัวอย่าง = 1.02 (ค่าคงที่)

 $c_{\scriptscriptstyle 3}$ คือ ความยาวของ Fuse Wire ที่ใช้ในการจุดระเบิด (cm)

m คือ มวลของสารตัวอย่าง (g)



รูปที่ 3.8 ภาพถ่าย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket

3.2.2.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

(6

ทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆซึ่งผ่านการ ปั่นย่อยแล้ว รวมไปถึงทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาดต่างๆ ด้วยเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module ดัง แสดงในรูปที่ 3.9 โดยให้ความร้อนที่อัตรา 10°C/min ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการ ไหล 100 ml/min เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลของวัสดุภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลง ไป



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module

3.2.2.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารโดยการกระตุ้นสารด้วยพลังงาน แสงช่วงแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่นตั้งแต่ 600-4000 cm⁻¹ โดยใช้เครื่องทดสอบของศูนย์เครื่องมือเพื่อ การวิจัยทางวิศวกรรม (Center of Advanced Instrument for Research in Engineering) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

T

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของไม้กระถินยักษ์สับ

4.1.1 ไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค





รูปที่ 4.1 ไม้กระถิน<mark>ยักษ์สับขนา</mark>ด (ก) <250 µm (ข) 250-425 µm (ค) 425-600 µm (ง) 600 µm-1 mm แ<mark>ละ (</mark>ง) 1-2 mm

จากรูปที่ 4.1 พ<mark>บว่าอ</mark>นุภาคไม้ก<mark>ร</mark>ะถินยักษ์สับขนาด 1-<mark>2 m</mark>m จะมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว และอนุภาคจะมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นลงเมื่ออ_{นุ}ภาคมีขนาดเล็กลง และที่อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ ขนาด <250 µm พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นผงละเอียดผสมกับเส้นใยสั้นขนาดเล็ก 4.1.2 ไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด



รูปที่ 4.2 ไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (จ) 5 min และ (ฉ) 10 min

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อใช้เวลาปั่นย่อย 0.5 min ไม้กระถินยักษ์สับจะมีอนุภาคขนาดใหญ่ ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ผสมอยู่กับอนุภาคที่เป็นเส้นใยขนาดเล็กและอนุภาคที่มีลักษณะเป็นผง ละเอียดอยู่บ้าง และที่เวลาปั่นย่อย 1 min พบสัดส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวลดลง และพบเส้นใยสั้นเพิ่มมากขึ้น และเมื่อใช้เวลาปั่นย่อย 2 min พบว่าเส้นใยขนาดใหญ่มี ปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจะพบว่ามีเส้นใยสั้นเป็นส่วนมาก และเมื่อใช้เวลาปั่นย่อย 3 min พบว่าเส้นใยขนาดสั้นมีปริมาณลดลง เปลี่ยนไปเป็นเส้นใยขนาดเล็กและอนุภาคที่มีลักษณะเป็นผง ละเอียดเพิ่มมากขึ้น และเริ่มพบการเกี่ยวพันกันเองของเส้นใยไม้ในกลุ่มของเส้นใยขนาดเล็กและ อนุภาคที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด และเมื่อใช้เวลาปั่นย่อย 5 และ 10 min พบว่ามีเส้นใยสั้นเล็กน้อย ผสมกับอนุภาคมีลักษณะเป็นผงละเอียด และเมื่อใช้เวลาปั่นย่อย 5 และ 10 min พบว่ามีเส้นใยสั้นเล็กน้อย เกี่ยวพันกันเองของเส้นใยไม้ในขณะที่ทำการปั่นย่อยอย่างชัดเจน และจะพบการเกี่ยวพันกันเป็นก้อน กลมของอนุภาคไม้มากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการปั่นย่อยเพิ่มขึ้น



4.2 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดไม้กระถินยักษ์สับ

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดไม้กระถินยักษ์สับที่ผ่านการปั่นย่อยที่เวลาต่างๆ (Gt : Grinding Time (min))

ตารางที่ 4.1 ฐานนิยมของ<mark>ขนาด</mark>ไม้กระถินยั<mark>ก</mark>ษ์สับ<mark>ที่ถูกปั่นย่</mark>อยที่เว<mark>ลาต่า</mark>งๆ

(6

	Ŭ	
เวลาที่ใช้ในการปั่นย่ <mark>อย</mark>	ฐา <mark>น</mark> นิยมตำแ <mark>หน่งที่</mark> 1	ฐานนิยมตำแหน่งที่ 2
0.5 min	1-2 mm	7
1 min	1-2 mm	600 µm-1 mm
2 min	600 µm-1 mm	<250 μm
3 min	600 µm-1 mm	<250 µm
5 min	<250 µm	
10 min	<250 µm	

ลักษณะการกระจายตัวของขนาดไม้กระถินยักษ์สับโดยรวมมีการกระจายตัวแบบทวิฐาน นิยม (Bimodal Distribution) หรือมีลักษณะการกระจายตัวแบบมีฐานนิยมสองตำแหน่ง ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 โดยที่แต่ละเวลาปั่นย่อยมีตำแหน่งฐานนิยมดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพ

10

4.3.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค



รูปที่ 4.4 (ก) ตัวอย่างไม้กร<mark>ะถิน</mark>ยักษ์สับขนาด 600 µm-1 mm แ<mark>ละลัก</mark>ษณะทางกายภาพของถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด (ข) <250 µm (ค) 250-425 µm (ง) 425-600 µm (จ) 600 µm-1 mm (ฉ) 1-2 mm

สีและลักษณะของผิวถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 μm, 425-600 μm, 600 μm-1 mm มีลักษณะผิวด้านข้างของถ่านเรียบกึ่งเงา สีของถ่านชีวภาพที่ได้เข้มขึ้นกว่าสีของวัตถุดิบเริ่มต้น และมีการกระจายของสีที่เข้มขึ้นทั่วชิ้นงาน และสีของไม้กระถินยักษ์สับจะเข้มขึ้นมากที่บริเวณที่อยู่ ใกล้กับเตาไฟฟ้า (บริเวณด้านบนของชิ้นงานถ่านชีวภาพ) ส่วนถ่านที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1-2 mm มีลักษณะผิวด้านข้างของถ่านชีวภาพไม่เรียบ มีความขรุขระและมีร่องระหว่างชิ้นไม้ทั่ว บริเวณผิวด้านนอก อีกทั้งสีของไม้กระถินยักษ์สับมีการเปลี่ยนสีน้อยที่สุด แต่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีลักษณะผิวด้านข้างของถ่านเรียบเงาเป็นเนื้อเดียวกัน สีของถ่าน ชีวภาพที่ได้เปลี่ยนเป็นสีดำแบบสม่ำเสมอเกือบทั้งชิ้น โดยบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนเป็นสีดำเป็นบริเวณ ที่ได้รับความร้อนในขณะอัดในแม่พิมพ์น้อยกว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาดเล็กสามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคได้ดีกว่าไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ ทำให้ ไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กมีแนวโน้มได้รับอิทธิพลจากความร้อนขณะอัดขึ้นรูปมากกว่า จึงเกิดการ เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพมากกว่าไม้กระถินยักษ์สับที่มีขนาดใหญ่



4.3.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (จ) 5 min และ (ฉ) 10 min

จากรูปที่ 4.5 พบว่าสีของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 0.5 min และ 1 min มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยในส่วนที่พบว่ามีการเปลี่ยนสีเป็นสีดำเป็นบริเวณ ของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กกระจายอยู่บางบริเวณของชิ้นงานถ่านชีวภาพ และพบลักษณะ ดังกล่าวเช่นเดียวกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 2 min และ 3 min แต่ พื้นที่ที่อนุภาคเปลี่ยนเป็นสีดำของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 2 min และ 3 min มีลักษณะการกระจายตัวแบบละเอียดอยู่ทั่วบริเวณของชิ้นงานมากกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 0.5 min และ 1 min ส่วนถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 5 min และ 10 min มีการเปลี่ยนแปลงสีของไม้กระถินยักษ์สับน้อยที่สุด และลักษณะการกระจายตัวของบริเวณที่มีการเปลี่ยนเป็นสีดำมีความละเอียดมากที่สุด นอกจากนี้ผิว ด้านข้างของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อยทั้ง 6 แบบ มีลักษณะ เรียบเงาเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กสามารถเติมเต็มช่องว่าง ระหว่างไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้เกิดการเชื่อมประสานและยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้มี ประสิทธิภาพดี

4.4 ความหนาแน่น

(



4.4.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ

ผลกระทบของขนาดอนุภาคของไม้กระถินยักษ์สับต่อความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดไม้กระถินยักษ์สับที่นำมาอัด ขึ้นรูปมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กเมื่อนำไปอัดเป็นถ่านชีวภาพจะถูก อัดให้ชิดกันได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กจึงมีช่อง ระหว่างอนุภาคน้อยกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ อีกทั้งอนุภาคไม้กระถิน ยักษ์สับขนาดเล็กมีสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าและมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงทำให้การอ่อนตัวของ ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และสารโมเลกุลต่ำอื่นๆสามารถเกิดได้ง่ายกว่า ดังนั้นไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กจึงการเกิดการประสานและยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้ดีกว่า โดย พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 1.35 g/cm³ และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1-2 mm มีความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำ ที่สุดคือ 1.24 g/cm³ โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1.2 mm มีความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำ หรือทดแทนถ่านโค้กและถ่านหินได้ดี

1.40 1,35 1.34 1,34 1.35 1.33 1_80 Density (g/cm³) 1.30 1.25 1.23 1.20 1.15 1.10 10 min 0.5 min 2 min 3 min 5 min 1 min **Grinding** Time

10

4.4.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.7 ความหนาแน่<mark>นของ</mark>ถ่านชีวภา<mark>พที่ผ</mark>ลิตจากไม้กระถินยั<mark>กษ์สับ</mark>ที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ

ความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่น ย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min เนื่องจากการใช้เวลาปั่นย่อยเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของอนุภาคไม้ กระถินยักษ์สับขนาดเล็กต่ออนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ ขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่ทว่าความหนาแน่นรวมของถ่าน ชีวภาพจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อถ่านชีวภาพผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min โดยแนวโน้มที่ลดลงมีผลมาจากลักษณะของไม้กระถินยักษ์สับที่ผ่านการปั่นย่อย มา 3 min, 5 min และ 10 min มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนกลมเล็กๆเนื่องจากเกิดการเกี่ยวพัน กันเองของเส้นใยไม้ในขณะที่ทำการปั่นย่อย ดังนั้นเมื่อนำไม้กระถินยักษ์สับสังจากเกิดการเกี่ยวพัน กันเองของเส้นใยไม้ในขณะที่ทำการปั่นย่อย ดังนั้นเมื่อนำไม้กระถินยักษ์สับลักษณะนี้ไปอัดเป็นถ่าน ชีวภาพ นอกจากจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับเองแล้ว ยังมีช่องว่างระหว่างไม้กระถิน ยักษ์สับที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมเล็กๆดังกล่าวเกิดขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างไม้กระถิน ปริมาตรของถ่านชีวภาพมีแนวโน้มลดลง โดยพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลา ในการปั่นย่อย 2 min มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ยสูงสุดคือ 1.35 g/cm³ และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 10 min มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ยต่ำสุดคือ 1.23 g/cm³ ซึ่ง ถ่านชีวภาพที่ได้ทั้งหมดมีความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมหรือทดแทน ถ่านโค้กและถ่านหินได้ดีเช่นเดียวกับถ่านชีวภาพในข้อ 4.4.1

4.5 อัตราการขยายตัวหลังการอัดขึ้นรูป

10



4.5.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.8 อัตราการขยายตัวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm และ 250-425 µm มีการหดตัวหลังชิ้นงานถ่านชีวภาพเย็นตัวเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของแม่พิมพ์ ส่วนถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 425-600 µm และ 600 µm-1 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับแม่พิมพ์ และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1-2 mm มีการขยายตัวหลังนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1.2 mi มีการขยายตัวหลังนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็ก สามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคได้ดีกว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ ส่งผลให้ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารโมเลกุลต่ำอื่นๆในเนื้อไม้ สามารถอ่อนตัวและเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคได้ ดีกว่า ทำให้เนื้อไม้มีการประสานตัวกันได้ดีกว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ และเมื่อชิ้นงาน ถ่านชีวภาพเย็นตัวจึงทำให้องค์ประกอบในเนื้อไม้ที่อ่อนตัวได้ระหว่างการอัดขึ้นรูปหดตัวลงไปด้วย ในทางกลับกันอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่จะได้รับอิทธิพลจากความร้อนน้อย การเชื่อม ประสานระหว่างอนุภาคจึงเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานถ่านชีวภาพที่ผลิตจากอนุภาคไม้ กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ออกจากแม่พิมพ์และทิ้งไว้ให้เย็นตัว อนุภาคไม้ที่เคยถูกอัดให้ติดกันจะเกิด การคลายตัวออก ส่งผลให้ชิ้นงานถ่านชีวภาพขยายตัวเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ แม่พิมพ์



(0

4.5.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.9 อัตราการขยายตัวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ

ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆทั้งหมดไม่พบการหดตัว หรือขยายตัวหลังนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และพักไว้ให้เย็นสนิทที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากในชิ้นงาน ถ่านชีวภาพกลุ่มนี้มีการกระจายตัวของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กผสมกับอนุภาคไม้กระถิน ยักษ์สับขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่ออนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กที่มีสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ได้รับความร้อนขณะอัดขึ้นรูป ทำให้องค์ประกอบทางเคมีภายใน เนื้อไม้ของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กอ่อนตัวและทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคได้ดี จึงทำให้ชิ้นงานถ่านชีวภาพไม่ขยายตัวหรือคลายตัวออกเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง ในขณะที่อนุภาคไม้ กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนขณะอัดขึ้นรูปน้อยกว่ายังสามารถคงโครงสร้าง เส้นใยไว้ได้ดีกว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็ก จึงทำหน้าที่เป็นเสมือนโครงสร้างแกนของถ่าน ชีวภาพค้ำไว้ไม่ให้ชิ้นงานถ่านชีวภาพหดตัวเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง

4.6 ความต้านทานแรงอัดสูงสุด

10

 4.6.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค สำหรับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 μm, 425-600 μm, 600 μm-1 mm และ 1-2 mm มีแนวโน้มของความต้านทานแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อไม้กระถิน ยักษ์สับมีขนาดใหญ่ขึ้น (เพิ่มขึ้นจากค่าต่ำสุดประมาณ 3.3%) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งขัดแย้งกับ แนวโน้มของความหนาแน่นรวมดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ

10

เนื่องจากในการปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับทำให้ลักษณะของขึ้นไม้มีลักษณะเป็นเส้นใย โดย เฉพาะที่อนุภาคมีขนาดใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใยมาก จึงทำให้เกิดความสามารถในการยึดเกาะ ระหว่างอนุภาคได้ดี และความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคจะลดลงเมื่ออนุภาคไม้กระถิน ยักษ์สับมีขนาดเล็กลง และพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีความ ต้านทานแรงอัดต่ำสุด เนื่องจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีลักษณะเป็นผงละเอียด ทำให้มี การยึดเกาะระหว่างอนุภาคน้อยกว่าไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีลักษณะเป็นผงละเอียด ทำให้มี การยึดเกาะระหว่างอนุภาคน้อยกว่าไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีลักษณะเป็นผงละเอียด ทำให้มี การยึดเกาะระหว่างอนุภาคน้อยกว่าไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีความต้าน ไข้อาการระหว่างอนุภาคน้อยกว่าไม้กระถินยักษ์สับขนาดอื่นๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mizuno [28] ที่พบว่าความแข็งแกร่งของถ่านชีวภาพจะลดลงเมื่อถ่านชีวภาพเปลี่ยนเป็นสีดำมากขึ้น ส่วนถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีความต้าน ทานแรงอัดสูงสุดมากที่สุดคือ 147.48 MPa เพราะนอกจากความสามารถในการยึกเกาะทางกายภาพระหว่างอนุภาคแล้ว ยังมีผล จากการประสานตัวของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับที่ดีด้วย เนื่องจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีขนาดเล็กพอเหมาะที่สามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคได้ดี สามารถสังเกตได้จากอัตรา การขยายตัวของถ่านชีวภาพในข้อที่ 4.5.1 ที่พบว่าอัตราการขยายตัวของถ่านชีวภาพหลังชิ้นงานเย็น ตัวเริ่มพบการหดตัวเมื่ออนุภาคไม้กระถินยักษ์สับมีขนาดเล็กกว่า 425 µm จึงส่งผลให้องค์ประกอบ ในเนื้อไม้ที่สามารถอ่อนตัวได้ภายใต้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปของไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm



4.6.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.12 ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ ระยะเวลาต่างๆ (ก่อนชิ้นงานแตกหัก)

10

จากรูปที่ 4.12 พบว่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความต้านทานแรงอัด สูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อถ่านชีวภาพผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min มี ความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากที่สุดคือ 166.12 MPa ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของความหนาแน่น รวมดังแสดงในรูปที่ 4.13 รวมถึงสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ ที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆในข้อที่ 4.6.1 ที่พบว่าถ่านชีวภาพมีความต้านทานแรงอัด สูงสุดมากที่สุดเมื่อผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm และในทำนองเดียวกันพบว่าที่การ ปั่นย่อยที่ 2 min และ 3 min ทำให้เกิดอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มากที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับเวลาในการปั่นย่อยอื่นๆ ดังแสดงในข้อที่ 4.2 อีกด้วย แต่สำหรับกรณีของถ่านชีวภาพ ที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min แม้ว่าจะพบว่ามีอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ ขนาด 250-425 µm ใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min แต่ลักษณะผงไม้ที่ได้จากการปั่นย่อย 3 min จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนกลมเล็กๆเนื่องจาก เกิดการเกี่ยวพันกันเองของเส้นใยไม้ในขณะที่ทำการปั่นย่อยดังที่อธิบายไว้ในข้อ 4.1.2 ทำให้ชิ้นงาน ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min มีช่องว่างภายในขึ้นงาน ชีวภาพมากกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min จึงทำให้ความ ต้านทานแรงอัดสูงสุดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาใน การปั่นย่อย 2 min และพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 10 min มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดน้อยที่สุดคือ 147.08 MPa เนื่องมาจากอนุภาคที่ได้จากการปั่นย่อย 10 min มีขนาดเล็กที่สุด จึงเกิดการยึดเกาะทางกายภาพระหว่างอนุภาคน้อยว่าเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งประกอบกับได้รับอิทธิพลจากการเกาะพันกันเป็นก้อนกลมของเส้นใยมากที่สุดดังที่อธิบายไว้ใน ข้างต้น



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก ไม้กระถินยักษ์ส<mark>ับที่ปั่นย่อยที่ระยะ</mark>เวล<mark>าต่างๆ</mark> (ก่อนชิ้<mark>นง</mark>านแต<mark>กหัก)</mark>

(0

นอกจากนี้ สำหรับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 5 min และ 10 min ในขณะที่ทดสอบความต้านทานแรงอัดสูงสุดพบว่า หลังจากที่ขึ้นงานถ่านชีวภาพเกิด การแตกหักแล้ว เมื่อทำการกดอัดต่อไปเรื่อยๆพบว่าความเค้นที่ใช้ในการกดจะลดลง และหลังจากนั้น ความเค้นที่ใช้ในการกดจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งมากกว่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่บันทึกขณะที่ ชิ้นงานเริ่มแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะพบพฤติกรรมทางกลลักษณะนี้ในวัสดุที่มีทั้งสมบัติ Ductility (ความเหนียว) และ Strengthening (การเพิ่มความแข็งแรง) [33] สอดคล้องกับลักษณะ การเรียงตัวของอนุภาคไม้ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 5 min และ 10 min ดังอธิบายในข้อที่ 4.1.2 คือ ณ ตำแหน่งที่เกิดความต้านทานแรงอัดสูงสุด คือ ตำแหน่ง ที่ชิ้นงานถ่านชีวภาพเริ่มแตกหักเนื่องจากเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดจากการเรียงตัวกันของ กลุ่มก้อนอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับที่จับตัวกันเป็นก้อนกลมเล็กๆ หลังจากนั้นแรงกดจะทำให้ ไม้กระถินยักษ์สับที่เกาะเกี่ยวกันเป็นก้อนกลมและอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับแต่ละอนุภาคอัดแน่นเรียง ชิดติดกันมากขึ้น ซึ่งเสมือนเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานถ่านชีวภาพ ดังนั้นการกดอัดจึงต้อง ใช้ความเค้นที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ชิ้นงานถ่านชีวภาพที่อนุภาคไม้อัดแน่นเกิดการแตกหักอีกครั้ง



รูปที่ 4.14 ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ ระยะเวลาต่างๆ ก่อนชิ้นงานแตกหัก และหลังชิ้นงานแตกหักแล้ว

4.7 โครงสร้างจุลภ<mark>า</mark>คขอ<mark>งถ่าน</mark>ชีวภา<mark>พจากกล้อง</mark>จุลทรร<mark>ศ</mark>น์อิเล็ก<mark>ตรอน</mark>แบบส่องกราด

10

4.7.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าการเรียงตัวของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับใน ภาพรวมมีเป็นการเรียงตัวตามแนวยาวของอนุภาค และพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ ขนาด <250 µm มีลักษณะรอยแตกละเอียดที่สุด และมีลักษณะรอยแตกแบบเปราะ และในทาง กลับกันถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1-2 mm มีลักษณะรอยแตกหยาบและมี ลักษณะรอยแตกแบบเหนียว พบการฉีกยืดของเส้นใยเป็นเส้นยาว และอนุภาคไม้ที่มีลักษณะเป็นเส้น ใยอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ไม้กระถินยักษ์สับขนาด 1-2 mm เกิดการยึดเกาะทางกายภาพระหว่าง อนุภาคได้มาก และเมื่อสังเกตรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm ซึ่งมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากที่สุดพบว่า มีลักษณะรอยแตกแบบเหนียว และมีความ สม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพชิ้นอื่นๆ



(ค)

TC



(ຈ)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด (ก) <250 μm (ข) 250-425 μm (ค) 425-600 μm (ง) 600 μm-1 mm (จ) 1-2 mm ที่กำลังขยาย 30 เท่า











รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด (ก) <250 µm (ข) 250-425 µm (ค) 425-600 µm (ง) 600 µm-1 mm (จ) 1-2 mm ที่กำลังขยาย 80 เท่า 4.7.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 พบว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับในภาพรวมมีการเรียงตัวตาม แนวยาวแต่ไม่เป็นระเบียบเท่าการเรียงตัวของถ่านชีวภาพในข้อที่ 4.7.1 และเมื่อพิจารณาที่ถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min และ 1 min พบว่ารอยแตกมี ลักษณะเป็นการแตกแบบเหนียว พบการฉีกยึดของเส้นใยเป็นเส้นยาว ส่วนที่เวลาปั่นย่อย 2 min ลักษณะเป็นการแตกแบบเหนียว พบการฉีกยึดของเส้นใยเป็นเส้นยาว ส่วนที่เวลาปั่นย่อย 2 min ลักษณะของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับมีความเป็นเส้นใยมากขึ้น รอยแตกมีลักษณะมีลักษณะเป็นการ แตกแบบเหนียว อีกทั้งพบการอัดแน่นของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กแทรกอยู่ตามเส้นใย ขนาดใหญ่ เนื่องจากที่การปั่นย่อย 2 min มีสัดส่วนของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กแตรกอยู่ตามเส้นใย ขนาดใหญ่ เนื่องจากที่การปั่นย่อย 2 min มีสัดส่วนของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กแตรกอยู่ตามเส้นใย ขนาดใหญ่ เนื่องจากที่การปั่นย่อย 2 min มีสัดส่วนของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กแทรกอยู่ตามเส้นใย ขนาดใหญ่ เนื่องจากที่การปั่นย่อย 2 min มีสัดส่วนของอนุภาคไม้กระเวลาปั่นย่อย 0.5 min และ 1 min ดังนั้นอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กจึงสามารถเติมเต็มต่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้มาก ขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min พบว่ารอยแตกมีลักษณะเป็นการแตกแบบเปราะ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กลง ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยลดลง นอกจากนี้ยังพบรอยแตกที่มีลักษณะเป็นหลุมอีกด้วย ซึ่ง สอดคล้องกับคำอธิบายในข้อ 4.1.2 ว่า อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับกลุ่มนี้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อน กลมเล็กๆเนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันกันเองของเส้นใยไม่ในขณะที่ทำการปั่นย่อย

10

46



T

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายลักษณ<mark>ะรอย</mark>แตกของถ่<mark>าน</mark>ชีวภาพที่ผ<mark>ลิต</mark>จากไม้<mark>กระถิ</mark>นยักษ์ที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (จ) 5 min (ฉ) 10 min ที่กำลังขยาย 30 เท่า

47



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายลักษณ<mark>ะรอย</mark>แตกของถ่<mark>าน</mark>ชีวภาพที่ผล<mark>ิต</mark>จากไม้<mark>กระถิ</mark>นยักษ์ที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย (ก) 0.5 min (ข) 1 min (ค) 2 min (ง) 3 min (จ) 5 min (ฉ) 10 min ที่กำลังขยาย 80 เท่า

4.8 ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

10

4.8.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค



รูปที่ 4.19 ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ

ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ มีค่าความร้อนสูงกว่า ค่าความร้อนของไม้กระถินยักษ์ก่อนการอัดขึ้นรูป เนื่องจากความร้อนในกระบวนการอัดขึ้นรูปทำให้ ความขึ้นและแก๊สที่ให้พลังงานความร้อนต่ำในไม้กระถินยักษ์สับระเหยเป็นไอ ทำให้ความหนาแน่น ของค่าความร้อนต่อมวลของถ่านชีวภาพสูงกว่าค่าความร้อนต่อมวลของไม้กระถินยักษ์สับ [28] และ พบว่าค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆมีความแตกต่างกันอยู่ ในช่วง 100 kcal/kg โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีค่าความร้อน สูงที่สุด คือ 4,434.74 kcal/kg ส่วนถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีค่าความร้อน สูงที่สุด คือ 4,434.74 kcal/kg ส่วนถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีค่าความร้อน สูงที่สุด คือ 4,434.74 kcal/kg ส่วนถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 425-600 µm, 600 µm-1 mm และ 1-2 mm มีค่าความร้อนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 4,400 kcal/kg แต่ ทว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีค่าความร้อนต่ำที่สุด คือ 4,338.85 kcal/kg ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยความแตกต่างของค่าความร้อนเกิดจากความแตกต่างของ องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อไม้ โดยที่อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่อาจเกิดจากส่วนที่เนื้อไม้ กระถินยักษ์มีความแข็งไม่มากนัก และอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดใหญ่อาจเกิดจากส่วนที่เนื้อไม้ กระถินยักษ์มีความแข็งไม่มากจึงถูกปั่นย่อยขนาดได้ยาก เช่น บริเวณแก่นไม้ เป็นต้น



4.8.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.20 ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ ระยะเวลาต่างๆ มีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับก่อนการอัดขึ้นรูป เช่นเดียวกับข้อ 4.8.1 และพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min มีค่าความร้อนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 4,360±30 kcal/kg และค่า ความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อถ่านชีวภาพผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min

-	ີ 9 ຢີ 1								6 .
	เวลาที่ใช้ในก	ารปั่	นย่อย			อุณหภู <mark>มิสูง</mark>	สุดขณะปั่น	าถุอถ (_° C)	2
	0.5 n	nin					53)
	1 m	in					60	\sim	
V,	2 m	in					76	12	
\sim	3 m	in					88		
	5 m	in				- 1	108		
	10 m	nin	TITI	17	F (Or	133		

ตารางที่ 4.2 อุณหภู<mark>มิในเค<mark>รื่องป</mark>ั่นย่อย[ู]ขณะ<mark>ปั่นย่อยไ</mark>ม้กระ<mark>ถิ</mark>นยักษ์<mark>สับที่เ</mark>วลาต่างๆ</mark>

10

เนื่องจากที่การปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min จะเกิดความร้อนขึ้นสูง ทำให้ภายใน โถปั่นมีอุณหภูมิถึง 88-133°C ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำให้ความชื้นและ สารโมเลกุลต่ำบางชนิดสลายตัวไปได้ [10, 28] นอกจากนี้ไม้กระถินยักษ์สับที่ผ่านการปั่นย่อยที่ 3 min, 5 min และ 10 min มีอนุภาคขนาดเล็กเป็นส่วนมาก จึงสามารถถ่ายเทความร้อนระหว่าง อนุภาคได้ดี เมื่อนำไปอัดขึ้นรูปจึงได้รับอิทธิพลจากความร้อนแล้วทำให้องค์ประกอบทางเคมีบางส่วน เปลี่ยนแปลงไป เหลือเป็นอัตราส่วนของธาตุคาร์บอน (Carbon) ต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min โดยถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 10 min มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 4,560.44 kcal/kg

4.9 สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

4.9.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค

จากภาพรวมของรูปที่ 4.21(ก) และรูปที่ 4.21(ข) พบว่าช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-100℃ มวล ของไม้กระถินยักษ์สับและถ่านชีวภาพมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสลายตัวของความชื้นที่อยู่บริเวณผิว ของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ จากนั้นที่ช่วงอุณหภูมิ 100-230℃ มวลมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่จะมีการอ่อนตัวของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้เกิดขึ้น ซึ่งเฮมิเซลลูโลสที่อ่อนตัวจะทำหน้าที่เป็นตัว ประสานระหว่างผงไม้ที่นำมาอัดเป็นถ่านชีวภาพ และที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 230℃ เป็นต้นไป มวลของ ไม้กระถินยักษ์สับและถ่านชีวภาพเริ่มลดลงอย่างชัดเจนอีกครั้ง เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เริ่ม เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) [10, 28]

และจากรูปที่ 4.21(ก) สามารถสังเกตได้ว่าสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถิน ยักษ์สับแต่ละขนาดมีความว่องไวในการสลายตัวภายใต้ความร้อนแตกต่างกัน และไม่มีความสัมพันธ์ กับลำดับของขนาดอนุภาคของไม้ ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับแต่ละขนาดอาจมา จากแต่ละส่วนประกอบของเนื้อไม้ที่ความแข็งแตกต่างกัน เช่น อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็ก อาจเกิดจากส่วนประกอบของเนื้อไม้ที่สามารถถูกปั่นย่อยได้ง่ายกว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็ก อื่น เป็นต้น

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.21(ข) พบว่าสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีพฤติกรรมการสลายตัวใกล้เคียงกับไม้กระถินยักษ์สับที่ไม่ ผ่านการปั่นย่อย สอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพในข้อที่ 4.8.1 ที่พบว่าค่า ความร้อนของทั้งสองใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 425-600 µm, 600 µm-1 mm และ 1-2 mm มีพฤติกรรมการสลายตัวใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับ ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับทั้ง 3 ขนาดมีค่าความร้อนใกล้เคียงกัน และพบว่าถ่าน



ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน แตกต่างออกไป

รูปที่ 4.21 (ก) การสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ (ข) การสลายตัวทาง ความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ 4.9.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด จากภาพรวมของรูปที่ 4.22(ก) และรูปที่ 4.22(ข) พบว่าช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-100℃ มวล ของไม้กระถินยักษ์สับและถ่านชีวภาพมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสลายตัวของความชื้นที่อยู่บริเวณผิว ของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ จากนั้นที่ช่วงอุณหภูมิ 100-230℃ พบการลดลงของมวลเพียงเล็กน้อย และที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 230℃ เป็นต้นไป มวลของไม้กระถินยักษ์สับและถ่านชีวภาพเริ่มมีการลดลง อย่างชัดเจนอีกครั้ง เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น [10, 28] เช่นเดียวกับ ลักษณะการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาด อนุภาคในข้อที่ 4.9.1

และจากรูปที่ 4.22(ก) พบว่าพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์สับที่ ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

- (1) กลุ่มของไม้กระถินยักษ์สับ (Raw Material) และอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้
 เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min
- (2) กลุ่มของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ10 min

จึงสามารถสังเกตได้ว่าอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับในกลุ่มที่ (2) มีองค์ประกอบทางเคมี บางอย่างเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการการปั่นย่อย เมื่อเปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์สับและ อนุภาคไม้กระถินยักษ์สับในกลุ่มที่ (1) ซึ่งใช้เวลาในการปั่นย่อยน้อยกว่า สอดคล้องกับผลการ วิเคราะห์ในข้อที่ 4.8.2

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.22(ข) พบว่าลักษณะการสลายตัวทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆโดยรวมมีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากถ่านชีวภาพ ทุกชิ้นผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับเหมือนกัน เพียงแต่แตกต่างกันที่ขั้นตอนการเตรียมไม้กระถินยักษ์สับ นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาปั่นย่อย 3 min มี ลักษณะการสลายตัวทางความร้อนค่อนข้างแตกต่างจากถ่านชีวภาพชิ้นอื่นๆ สอดคล้องกับผลการ ทดสอบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพในข้อที่ 4.8.2 ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ ใช้เวลาปั่นย่อย 3 min เป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของค่าความร้อน

STITUTE OF





รูปที่ 4.22 (ก) การสลายตั<mark>วทาง</mark>ความร้อนข<mark>อ</mark>งไม้กร<mark>ะถินยักษ์</mark>สับที่ปั<mark>่นย่อ</mark>ยที่ระยะเวลาต่างๆ (ข) การ สลายตัวทางความร้อน<mark>ของ</mark>ถ่านชีวภาพ<mark>ที</mark>่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ

54

4.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

10

การวิเคราะห์ไม้กระถินยักษ์สับด้วยเทคนิค FTIR ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.23 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับเส้นสเปกตรัมของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ดังแสดงใน รูปที่ 4.24 พบหมู่ฟังก์ชั่นที่สามารถระบุองค์ประกอบทางเคมีได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งสามารถระบุได้ว่า ในไม้กระถินยักษ์สับพบองค์ประกอบทางเคมีหลักๆที่สำคัญ ได้แก่ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีทั่วไปที่พบในเนื้อไม้และในพืชทั่วไป



รูปที่ 4.23 สเป<mark>กตรัมอินฟร</mark>าเรด<mark>ข</mark>องไม้<mark>กระถ</mark>ินยักษ์สับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมอินฟราเรดของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR [34]

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชั่นที่พบในไม้กระถินยักษ์สับที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

T

Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชั่น	องค์ประกอบทาง เคมีที่พบ	แหล่งอ้างอิง	
897	C-H	Cellulose	[33]	
1030	C O Nat Alcohol	Cellulose และ	[33, 34]	
	C-O YEN ALCOHOL	Hemicellulose		
1103	Aromatic Skeletal	Polysaccharides	[22]	
	<mark>แ</mark> ละ C-O st <mark>re</mark> tch	และ Lignin		
1155	O-H in Primary and	<mark>Ce</mark> llulose และ	[33, 35]	
	Secondary Alcohol	H <mark>e</mark> micellulose		
1238	COH in Phenolic	Lignin	[33, 34, 36]	
1327	C-O Stretching and	Lignin	[33]	
	O-H Bending	Lighin		
1369	VSTELLE	Cellulose และ	[23 25]	
		Hemicellulose	[55, 55]	

Wavenumber (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชั่น	องค์ประกอบทาง เคมีที่พบ	แหล่งอ้างอิง
1427	Aromatic Ring และ CH	Lignin	[35, 36, 38]
1512	C=C in Aromatic Ring (Benzene Ring)	Lignin	[33, 34, 35]
1600	Aromtic Ring (Benzene Ring)	Lignin	[33, 34]
1720	C=O	Hemicellulose	[33, 36]
2854	CH ₂ , CH-, CH ₃	187	[34, 36]
2912	CH ₂ , CH-, CH ₃	5	[34]
3360	OH stretching	Wood Polymer	[33, 36]

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชั่นที่พบในไม้กระถินยักษ์สับที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR (ต่อ)

4.10.1 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามขนาดอนุภาค

10

เพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งจุดยอด (Peak) ของสเปกตรัมมากกว่าหนึ่งเส้น จึงมีการปรับ ตำแหน่งของสเปกตรัมในแกน y ดังรูปที่ 4.25 พบว่าที่ตำแหน่งจุดยอดเส้นสเปกตรัมของไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด <250 µm, 250-425 µm และ 1-2 mm เมื่อเปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์สับที่ไม่ ผ่านการปั่นย่อย (Raw Material: Rawmat) ไม่พบการเลื่อน (Shift) ของตำแหน่งจุดยอด แต่พบ ความแตกต่างของความสูงของจุดยอดของเส้นสเปกตรัมในบางตำแหน่ง ซึ่งหมายถึงในไม้กระถินยักษ์ สับและไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm, 250-425 µm และ 1-2 mm มืองค์ประกอบทางเคมีชนิด เดียวกันแต่อาจมีอัตราส่วนของส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเส้น สเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm เปรียบเทียบกับไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด <250 µm พบว่าที่ตำแหน่ง 1420 cm⁻¹ ลักษณะของจุดยอดมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่ง เป็นตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของวงแหวน Aromatic ของไซแลน (Xylan) ในลิกนินและการงอของ พันธะ C-H ในเซลลูโลส [34] และที่ตำแหน่ง 897 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C-H [33] พบว่า จุดยอดมีการขยับตำแหน่งและความสูงจุดยอดเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด <250 µm มีการเปลี่ยนแปลงพันธะในเนื้อไม้ไปเป็นเป็นพันธะ C-H ซึ่งเป็นพันธะที่มี พลังงานพันธะต่ำกว่า



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมอินฟราเรดของไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

TC

ส่วนเส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 μm และ 1-2 mm เปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 μm และ 1-2 mm ไม่พบการ เปลี่ยนแปลงลักษณะของจุดยอด สอดคล้องกับผลการทดลองในข้อที่ 4.8.1 ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 μm มีค่าความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับขนาดอื่นๆ และสอดคล้องกับผลการทดลองในข้อที่ 4.3.1 ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิต จากไม้กระถินยักษ์สับขนาดอื่นๆ และสอดคล้องกับผลการทดลองในข้อที่ 4.3.1 ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 μm มีการเปลี่ยนสีเป็นสีดำเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบทางเคมีมากที่สุด และพบการเปลี่ยนเป็นสีดำน้อยลงเมื่อถ่านชีวภาพผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด 250-425 μm, 425-600 μm, 600 μm-1 mm และ 1-2 mm



4.10.2 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่แบ่งตามระยะเวลาในการปั่นย่อยขนาด

รูปที่ 4.26 สเปกตรัมอินฟราเรดของไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ และถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

10

จากรูปที่ 4.26 (กราฟมีการปรับตำแหน่งของสเปกตรัมในแกน y) สังเกตได้ว่าที่จุดยอด ตำแหน่ง 1600 cm⁻¹ ของไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่เวลา 0.5 min, 2 min และ 10 min เปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์สับที่ไม่ผ่านการปั่นย่อย (Raw Material: Rawmat) มีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะของจุดยอด และจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อไม้กระถินยักษ์สับถูกปั่นย่อยเป็นเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยจุดยอดที่ตำแหน่ง 1600 cm⁻¹ คือตำแหน่งของ Benzene Ring ในลิกนิน ซึ่งหมายถึงพบสัดส่วน ของลิกนินเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ [34] อันเนื่องมาจากความร้อนขณะปั่นย่อย และจากการเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่เวลา 0.5 min, 2 min และ 10 min กับไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่เวลา 0.5 min, 2 min และ 10 min ไม่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของจุดยอด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในข้อที่ 4.3.2 ที่พบว่าถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่เวลาต่างๆ มีการเปลี่ยนสีเป็นสีดำปริมาณน้อยเมื่อ เปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่เวลาต่างๆ มีการเปลี่ยนสีเป็นสีดำปริมาณน้อยเมื่อ



สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาดต่างๆ

10



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ปั่นย่อยที่ระยะเวลาต่างๆ
จากการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับ โดยการแบ่งการศึกษาลักษณะของอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับเป็น 2 แบบ คือ แบ่งตามขนาด ของอนุภาค และแบ่งตามลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้มีสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนดังสรุปในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2

โดยในกลุ่มของถ่านชีวภาพที่แบ่งตามขนาดอนุภาค พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด <250 μm มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ยสูงสุดคือ 1.35 g/cm³ และความหนาแน่นมีค่า ลดลงเมื่อขนาดไม้กระถินยักษ์สับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กเมื่อนำไปกดอัด เป็นถ่านชีวภาพจะถูกอัดให้ชิดกันได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนกลุ่มของถ่านชีวภาพที่แบ่งตาม ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อไม้กระถินยักษ์ สับใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มกับกลุ่มของถ่าน ชีวภาพที่แบ่งตามขนาดอนุภาค แต่ความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อไม้กระถินยักษ์สับใช้เวลาใน การปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min เนื่องจากเมื่อใช้เวลาปั่นย่อยมากขึ้น อนุภาคไม้กระถินยักษ์ สับจะเกิดการเกาะเกี่ยวกันเป็นก้อนกลมขนาดเล็ก ทำให้เมื่อนำไปอัดเป็นถ่านชีวภาพจึงเกิดช่องว่าง ระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min มี ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยสูงสุดคือ 1.35 g/cm³ ซึ่งถ่านทั้งสองกลุ่มมีความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ที่ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมหรือทดแทนถ่านโค้กและถ่านหินได้ดี

นอกจากนี้ถ่านชีวภาพมีการหดตัวหลังเย็นตัวเมื่อผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm และ 250-425 µm ส่วนถ่านชีวภาพจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับแม่พิมพ์เมื่อผลิตจากไม้ กระถินยักษ์สับขนาด 425-600 µm และ 600 µm-1 mm และจะขยายตัวเมื่อผลิตจากไม้กระถิน ยักษ์สับขนาด 1-2 mm แต่ทว่าไม่พบการหดตัวหรือขยายตัวของชิ้นงานถ่านชีวภาพในกลุ่มที่แบ่งตาม ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เนื่องจากการผสมกันระหว่างอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับ ขนาดใหญ่ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลัก และอนุภาคไม้กระถินยักษ์สับขนาดเล็กทำหน้าที่เชื่อม ประสานระหว่างอนุภาค ทำให้ชิ้นงานถ่านชีวภาพในกลุ่มที่แบ่งตามลักษณะการกระจายตัวของขนาด อนุภาคสามารถคงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต[้]ามขนาดของแม่พิมพ์ได้

16

รวมถึงพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีความต้านทาน แรงอัดสูงสุดมากที่สุดคือ 147.48 MPa ซึ่งสอดคล้องกับที่พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์ สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากที่สุดคือ 166.12 MPa เพราะไม้ กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 2 min ทำให้เกิดไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มาก ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการปั่นย่อยอื่นๆ เนื่องจากที่ไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm นอกจากมีความสามารถในการยึดเกาะทางกายภาพระหว่างอนุภาคแล้ว ยังมีผลจากการประสานตัว ของอนุภาคเนื่องจากความร้อนที่ดีอีกด้วย เนื่องจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีขนาด เล็กพอเหมาะที่สามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคได้ดี ส่งผลให้องค์ประกอบในเนื้อไม้ที่สามารถ อ่อนตัวได้ภายใต้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคได้อีกด้วย ซึ่ง สมบัติในการต้านทานแรงอัดสอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของถ่านชีวภาพจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด 250-425 µm มีค่าความร้อนสูง ที่สุดคือ 4,434.74 kcal/kg สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง TGA/DSC และค่าความร้อนของ ถ่านชีวภาพกลุ่มที่แบ่งตามขนาดอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อขนาดไม้กระถินยักษ์สับเพิ่มขึ้น แต่ทว่าถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับขนาด <250 µm มีค่าความร้อนต่ำที่สุดเนื่องจากสมบัติการ ถ่ายเทความร้อนในอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีมีการเปลี่ยนแปลงขณะถูกอัดขึ้นรูป ด้วยความร้อนในอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีมีการเปลี่ยนแปลงขณะถูกอัดขึ้นรูป ด้วยความร้อนมากที่สุด ส่วนถ่านชีวภาพในกลุ่มที่แบ่งตามลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 0.5 min, 1 min และ 2 min มีค่าความร้อนใกล้เคียงกัน และค่าความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อถ่านชีวภาพผลิตจากไม้กระถินยักษ์ สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 3 min, 5 min และ 10 min เนื่องจากขณะปั่นย่อยไม้กระถินยักษ์สับเกิด ความร้อนขึ้นทำให้ความขึ้นและสารโมเลกุลต่ำบางชนิดที่ให้พลังงานความร้อนต่ำสลายตัวไป โดยถ่าน ชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับที่ใช้เวลาในการปั่นย่อย 10 min มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 4,560.44 kcal/kg

10

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่
 1/2552 (ครั้งที่ 123), กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2552.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงาน ทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579, กรุงเทพฯ: กระทรวงแรงงาน, 2558.
- [3] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับ ชุมชน, กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานนโยบายและแผน พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2555.
- [4] K. Saensree, "พลังงานทดแทน," Blogspot [Online]. Available: http://53011711152.blogspot.com/2012/06/blog-post_19.html. [Accessed: September 10, 2015].
- [5] มูลนิชิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (มพส.), "พลังงานชีวมวล," [Online]. Available: http://www.efe.or.th/pdf/biomas.pdf. [Accessed: 9 กันยายน 2558].
- [6] อารีย์ คล่องขยัน, "ถ่านชีวภาพ (Biochar)," ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร ธ.ก.ส [Online]. Available: http://www.baac.or.th/km/wpcontent/uploads/2015/01/pdf13. [Accessed: 10 กันยายน 2558].
- [7] J. Chaichanawong et al., "Effect of moisture content on properties of biocoke from rubberwood sawdust," *The 5th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology, JCREN2016*, Kuala Lumpur, Malaysia, December 7-9, 2016, no page.
- [8] S. Cherdkeattikul et al., "Effects of forming temperature on biocoke properties from used coffee ground," *The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, TSMEICoME2015,* Petchaburi, Thailand, December 16-18, 2015, pp. 55.
- [9] S. Cherdkeattikul et al., "Influence of forming pressure on properties of biocoke from used coffee ground," *The 4th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology, JCREN2015,* Matsuyama, Japan, December 5-7, 2015, pp. A21.

- [10] S. Mizuno et al., "Study of physical properties of high-density solid biomass," *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, vol. 11, no. Special Issue, pp. SS19-SS24, February 2012.
- [11] สุพิชญา เชิดเกียรติกูล และคณะ, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจาก กากกาแฟ," Thai-Nichi Institute of Technology The 3rd National Interdisciplinary Academic Conference, TNIAC2015, กรุงเทพฯ, 15 พฤษภาคม 2558, pp. 66.
- [12] O. b. Hamidun et al., "Effect of particle size on the strength of palm fiber biocoke," International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, ATEM'15, Toyohashi, Japan, October 4-8, 2015, pp. 297.
- [13] มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันติ์ และคณะ, "ศักยภาพของกระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และ กระถินเทพณรงค์ ในการปลูกเป็นสวนป่าพืชพลังงาน," การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, กรุงเทพฯ, 3-6 กุมภาพันธ์ 2553, หน้า 1-8.
- [14] อรสา สุกสว่าง, "เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ: วิธีแก้ปัญหาโลกร้อน ดิน และความยากจนในภาค เกษตรกรรม," การประชุมวิชาการเรื่องสภาวะโลกร้อน: ความหลากหลายทางชีวภาพและการ ใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน, นครปฐม, 5-6 พฤศจิกายน 2552, ไม่ปรากฏเลขหน้า.
- [15] กรมป่าไม้, โครงการปลูกไม้โตเร็วเพื่อการพลังงาน, กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม, ม.ป.ป.

- [16] ENGTNI, *"ห้องวิจัยสังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์,"* สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น [Online]. Available: https://sites.google.com/a/tni.ac.th/engtni/research-lab. [Accessed: 9 กันยายน 2558].
- [17] ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, "ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย," กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน [Online]. Available: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=486. [Accessed: 12 กันยายน 2558].
- [18] วสวัชร นาคเขียว, *"การขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming),"* คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [Online]. Available:
 - http://personel.eng.cmu.ac.th/~wasawat/Sheet_Shear_st.pdf. [Accessed: 9 กันยายน 2558].

- [19] "バイオコークス技術で東日本大震災の除染廃棄物問題を解決へ," Kindai University
 [Online]. Available: http://www.kindai.ac.jp/topics/2014/03/post-552.html.
 [Accessed: July 3, 2016].
- [20] "Ultimate Strength," eFatigue LLC [Online]. Available: https://www.efatigue.com/glossary/. [Accessed: September 10, 2015].
- [21] "Scanning Electron Microscope," Purdue University [Online]. Available: https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm. [Accessed: March 10, 2017].
- [22] ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล, "วิชาอุณหพลศาสตร์," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 [Online]. Available: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/themodanamic/. [Accessed: 10 กันยายน 2558].
- [23] B. Averill and P. Eldredge, *General Chemistry: Principles, Patterns, and Applications,* Washington, DC: Saylor Foundation, 2015.
- [24] "เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Analysis Technique, TA)," ศูนย์ เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) [Online]. Available: https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14uncategorised/38-thermal-analysis-th. [Accessed: 23 ธันวาคม 2559].
- [25] S. Mizuno et al., "Effect of specimen size on ultimate compressive strength of Bio-coke produced from green tea grounds," *The Japan Society of Mechanical Engineers*, vol. 3, no. 1, pp. 15-00441, February 2016.
- [26] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ, *"Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR),"* MIC Material Innovation Center คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [Online]. Available: http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=37. [Accessed: 27 มกราคม 2560].
- [27] "FTIR-Raman Spectrometer," มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง [Online]. Available: http://web2.mfu.ac.th/center/stic/spectroscopy-chem-analysisinstrument/item/139-ftir-raman-spectrometer.html. [Accessed: 6 เมษายน 2560].
- [28] S. Mizuno et al., "Formation characteristics of high-density and high-hardness new briquette based on herby biomass," *Journal of the Japan Institute of Energy,* vol. 91, pp. 41-47, January 2012.

- [29] T. Sawai et al., "Compressive strength properties of bio-solid fuel made from pruned branch," *Journal of High Temperature Society*, vol. 36, no. 1, pp. 36, May 2011.
- [30] ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ และคณะ, "อิทธิพลของขนาดอนุภาคของถ่านชีวมวลที่มีต่อการ
 เผาไหม้," *วิศวกรรมสาร มข.,* vol. 32, no. 1, pp. 61-75, มกราคม กุมภาพันธ์ 2548.
- [31] เจือจันทน์ เกตษา, "ผลของอุณหภูมิคาร์บอในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์,"
 วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2555.
- [32] พงษ์ศักดิ์ เฮงนิรันดร์ และ ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ, "เม็ดเชื้อเพลิงไม้ทอร์ริไฟด์...เทคโนโลยีและ โอกาสทางการตลาด," *วารสารการจัดการป่าไม้*, vol. 5, no. 10, pp. 67-75, กรกฎาคม -ธันวาคม 2554.
- [33] R. W. Hertzberg et al., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, USA: John Wiley & Son, Inc., 2013.

[34] M. Fan et al., Fourier Transform - Materials Analysis, China: InTech, 2012.

- [35] J. S. Fabiyi. and B. M. Ogunleye, "Mid-infrared spectroscopy and dynamic mechanical analysis of heat-treated obeche (Triplochiton scleroxylon) wood," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 17, no. 1, pp. 5-16, October 2014.
- [36] B. Esteves et al., "Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 15, no. 2, pp. 245-258, May 2013.
- [37] R. Bodîrlău and C. A. Teacă, "Fourier transform infrared spectroscopy and thermal analysis of lignocellulose fillers treated with organic anhydrides," *Romanian Journal of Physics*, vol. 54, no. 1-2, pp. 93-104, January 2009.

[38] O. Faruk and M. S<mark>ain, Lignin in Polymer Comp</mark>osites, USA: William Andrew, 2016.



68

ภาคผนวก ก. ลำดับการผลิตถ่านชีวภาพแบบสุ่มเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

nníulaðins

ชิ้นที่	ขนาดอนุภาค	ลำดับ	ชิ้นที่	ขนาดอนุภาค	ลำดับ
1	< 250 µm	23	29	Gt 0.5 min	9
2	< 250 µm	7	30	Gt 0.5 min	55
3	< 250 µm	38	31	Gt 1 min	22
4	< 250 µm	1	32	Gt 1 min	44
5	< 250 µm	48	33	Gt 1 min	3
6	250-425 µm	45	34	Gt 1 min	30
7	250-425 µm	2	35	Gt 1 min	28
8	250-425 µm	39	36	Gt 2 min	21
9	250-425 µm	15	37	Gt 2 min	36
10	250-425 µm	29	38	Gt 2 min	47
11	425-600 µm	17	39	Gt 2 min	8
12	425-600 μm	4	40	Gt 2 min	34
13	425-600 µm	35	41	Gt 3 min	5
14	425-600 μm	43	42	Gt 3 min	16
15	425-600 μm	12	43	Gt 3 min	54
16	600 µm-1 mm	18	44	Gt 3 min	13
17	600 µm-1 mm	6	45	Gt 3 min	41
18	600 µm-1 mm	37	46	Gt 5 min	27
19	60 <mark>0 µm-1 m</mark> m	26	47	<mark>G</mark> t 5 min	50
20	600 μm- <mark>1 m</mark> m	53	48	<mark>G</mark> t 5 min	33
21	1-2 m <mark>m</mark>	24	49	<mark>G</mark> t 5 min	52
22	1-2 m <mark>m</mark>	49	50	<mark>G</mark> t 5 min	14
23	1-2 mm	40	51	Gt 10 min	51
24	1-2 mm	32	52	Gt 10 min	25
25	1-2 mm	19	53	Gt 10 min	42
26	Gt 0.5 min	11	54	Gt 10 min	10
27	Gt 0.5 min	20	55	Gt 10 min	31
28	Gt 0.5 min	46			

ตารางที่ ก.1 ลำดับการผลิตถ่านชีวภาพแบบสุ่มเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05