



รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม

Development of Biocoke from Palm Residue

ผศ.ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

Asst. Prof. Jintawat Chaichanawong, D.Eng.

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

พ.ศ. 2564

บทสรุปผู้บริหาร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม โดยทำการผลิตจากกากปาล์มซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตรที่พบมากในประเทศไทย โดยใช้ชุดการทดลองการผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดขึ้นรูปร้อนแบบแนวตั้งในการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น) สมบัติทางกล (ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และความแข็ง) และสมบัติทางความร้อน (ค่าความร้อน) โดยกำหนดสภาวะในการขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 100 – 190 °C เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 10 – 25 นาที กำหนดให้ความดันในการขึ้นรูปคงที่ที่ 16 MPa โดยใช้ปริมาณกากปาล์มครั้งละ 50 กรัม และกำหนดความชื้นของกากปาล์มที่ประมาณ 10±1 wt%

จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีความหนาแน่น ความแข็ง และค่าความร้อนสูงขึ้น แต่อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพมีค่าสูงขึ้น ในช่วง 100 – 140 °C โดยค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 170 – 190 °C เนื่องจากพบว่าการแตกร้าวของชิ้นงาน เมื่อทำการขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว นอกจากนี้พบว่าเวลาในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มน้อยมาก เมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความแข็ง และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปมากกว่า 20 นาที จะไม่มีผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่ผลิตได้มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า 20 MPa ค่าความร้อน (Calorific value) ไม่น้อยกว่า 4,000 kcal/kg และความหนาแน่น (Density) ไม่น้อยกว่า 1.1 g/cm³ จึงมีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินและถ่านโค้กในอุตสาหกรรมได้ โดยสภาวะในการขึ้นรูปที่แนะนำในการผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่มีความชื้นประมาณ 10±1 wt% ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 140 – 170 °C เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 20 นาที และความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ภายใต้โครงการ การพัฒนาถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (Development of Biocoke From Palm Residue) สัญญาเลขที่ 1903/A015 และได้รับความอนุเคราะห์ชุดทดลอง ตลอดจนคำแนะนำในการศึกษาวิจัยจาก Prof. Tamio Ida (Kindai University) และ Mr. Hirotoshi Murata (Naniwa Roki Co., Ltd.)

ขอขอบคุณ นายธีรเดช สายเสริมศักดิ์ (ผู้ช่วยวิจัยประจำโครงการ) และนายณัฏกร สุขครัน นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ร่วมทำงานวิจัยจนโครงการนี้สำเร็จ

หากเกิดความผิดพลาดใดในงานวิจัย ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีที่จะนำข้อเสนอแนะไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ผศ.ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

หัวหน้าโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร.....	i
กิตติกรรมประกาศ	ii
สารบัญ.....	iii
สารบัญตาราง.....	v
สารบัญรูป	vi
 บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 งานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	16
3.3 ขอบเขตการการศึกษา	17
3.4 การทดลอง.....	17
3.5 การวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ผลการวิจัย	28
4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม.....	28
4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม....	33
4.3 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม.....	41
4.4 สรุป.....	44
5 สรุปผลการวิจัย.....	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 แนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง	46
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก	51
ผลงานตีพิมพ์.....	51

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 คาดการณ์การใช้ถ่านหินช่วงปี พ.ศ.2553 - 2557 (หน่วย พันตัน).....	4
1.2 การจัดหาถ่านหินในประเทศไทย (หน่วย พันตัน).....	4
2.1 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลที่พบในประเทศไทย	10
2.2 องค์ประกอบของชีวมวลและค่าความร้อนของชีวมวลที่พบในประเทศไทย	11
3.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากปาล์ม.....	18
3.2 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากปาล์ม.....	18
3.3 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากปาล์ม.....	18
3.4 สภาวะการทดลอง	23
4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ.....	28
4.2 การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	41

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 คาคการณ์ความต้องการใช้ถ่านหินในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040 แต่ละประเทศ	2
1.2 คาคการณ์ความต้องการใช้ถ่านหินของอินเดียในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040	2
1.3 คาคการณ์การผลิตถ่านหินในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040 แต่ละประเทศ	3
1.4 คาคการณ์การนำเข้าและส่งออกถ่านหินในช่วงปีค.ศ. 2015-2040 แต่ละประเทศ.....	3
2.1 องค์ประกอบชีวมวล.....	8
2.2 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในเซลล์พืช.....	9
2.3 ตัวอย่างถ่านชีวภาพ	13
2.4 ชุดทดลองการผลิตถ่านชีวภาพในแนวดิ่ง	13
3.1 แผนผังการดำเนินงาน	16
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 เครื่องร่อนแยกขนาดที่ใช้ในการทดลอง	20
3.4 กากปาล์มที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้ว	20
3.5 กระบวนการการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ	21
3.6 ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์และการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ.....	22
3.7 เครื่องทดสอบการอัด Shimadzu UH-100A.....	25
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	25
3.9 เครื่อง Bomb Calorimeter (IKA Model C1)	26
3.10 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness Tester Shore D	27
3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM, Zeiss EVO MA10)	27
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa	23
4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านบน) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa	34
4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านข้าง) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa	35
4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่เวลาในการขึ้นรูป 15 นาที (กำลังขยาย 500 เท่า).....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.5	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่เวลาในการขึ้นรูป 15 นาที (กำลังขยาย 1,000 เท่า) 37
4.6	ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 38
4.7	ภาพถ่ายถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 และ 180°C โดยใช้เวลาขึ้นรูป 15 นาที 39
4.8	ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 40
4.9	ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 42
4.10	ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านบน) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 42
4.11	ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านข้าง) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 43
4.12	ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 40
4.13	ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa 44

บทที่ 1

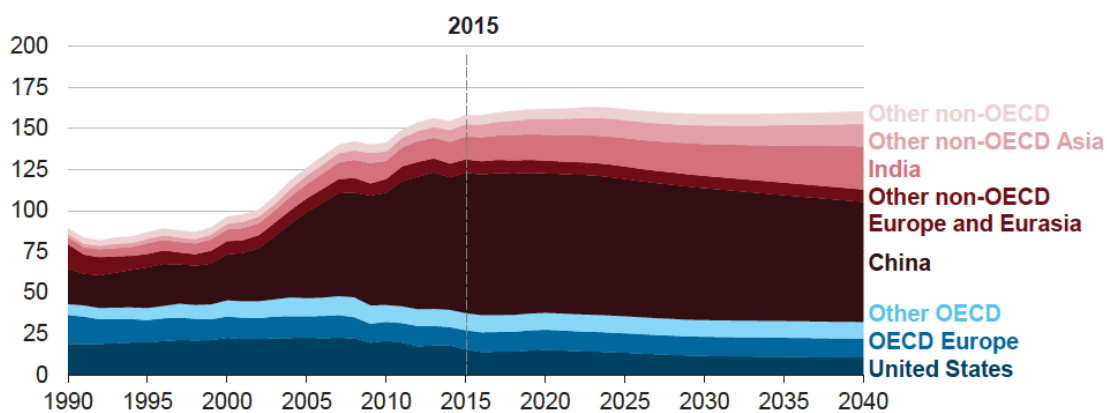
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของโลก ส่งผลให้มีการต้องการพลังงานมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการขนส่งและอุตสาหกรรม โดยพบว่าถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ทดแทนแทนน้ำมัน ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม ถ่านหินจึงนับเป็นชนิดของแหล่งพลังงานที่สำคัญรองลงมาจากน้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งการคาดการณ์ความต้องการใช้ถ่านหินในช่วงปีค.ศ. 1990-2040 แต่ละประเทศ [1] แสดงดังรูปที่ 1.1 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่ผ่านมามีปริมาณการใช้ถ่านหินของโลกเพิ่มขึ้นทุกปี และยังมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต โดยประเทศจีนเป็นผู้นำเข้าและอุปโภคถ่านหินมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก แม้ว่าจีนจะมีแนวโน้มการใช้ถ่านหินน้อยลง แต่ประเทศกำลังพัฒนาอื่นๆ เช่น อินเดีย และประเทศอื่นๆ ในเอเชียยังมีการคาดการณ์ว่าปริมาณการใช้ถ่านหินจะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในการผลิตไฟฟ้าและในอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 1.2 โดยอัตราการเพิ่มขึ้นนั้นอาจจะชะลอตัวลงด้วยปัจจัยบางประการ เช่น ความต้องการพลังงานสะอาด (Clean Energy) เพิ่มขึ้นและการชะลอตัวทางเศรษฐกิจและนโยบายลดการนำเข้าถ่านหินของประเทศจีนซึ่งเป็นผู้อุปโภคถ่านหินรายใหญ่ [1] ดังนั้นธุรกิจถ่านหินจึงขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งประเทศที่มีแหล่งถ่านหินมากและใช้เองในประเทศ จึงนับว่าเป็นประเทศที่มีความมั่นคงในด้านพลังงานสูงมาก ส่วนผู้ผลิตรายอื่นๆ ที่มีการส่งออกสูง เช่น อินโดนีเซีย และออสเตรเลีย เป็นต้น ดังรูปที่ 1.3 และรูปที่ 1.4

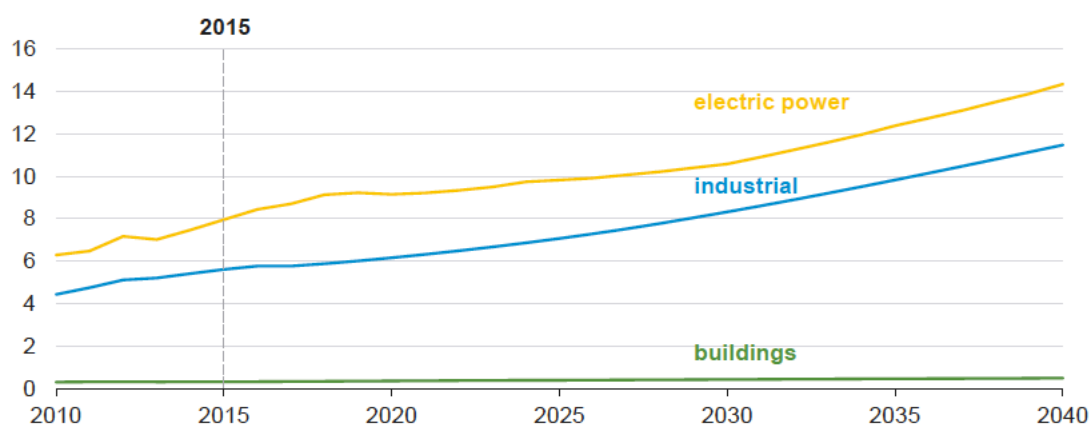
สำหรับความต้องการถ่านหินในประเทศไทยนั้น ในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา ปริมาณการใช้ถ่านหินเพิ่มขึ้นในปี 2553 และ 2555 แต่ลดลงเล็กน้อยในปี 2554 และ 2556 ในปี 2557 โดยปริมาณการใช้ถ่านหินและลิกไนต์เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.95 จากปี 2556 แบ่งเป็นภาคการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ 53.1% และอีก 46.9% นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [2] ซึ่งประเทศไทยมีการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศโดยแสดงการนำเข้าถ่านหินดังตารางที่ 1.2

World coal consumption
quadrillion Btu



รูปที่ 1.1 คาคการณ์ความต้องการใช้ถ่านหินในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040 แต่ละประเทศ [1]

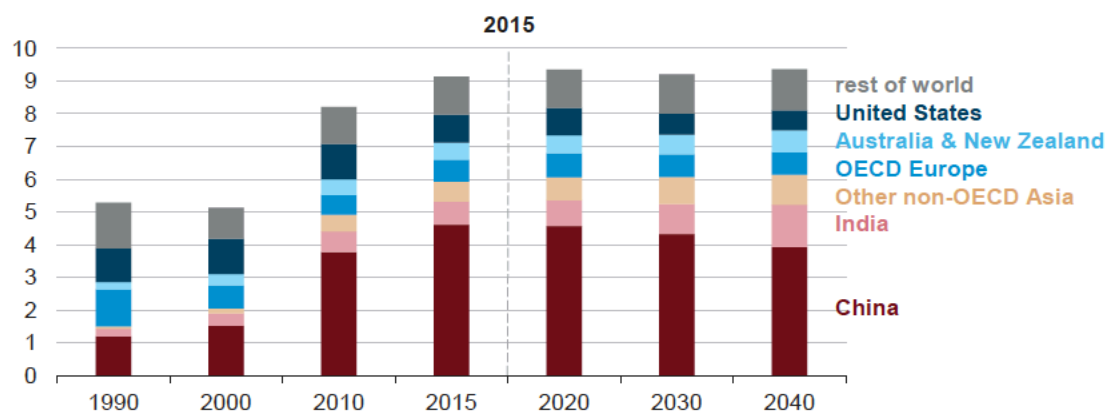
India's coal consumption by sector
quadrillion Btu



รูปที่ 1.2 คาคการณ์ความต้องการใช้ถ่านหินของอินเดียในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040 [1]

World coal production

billion short tons

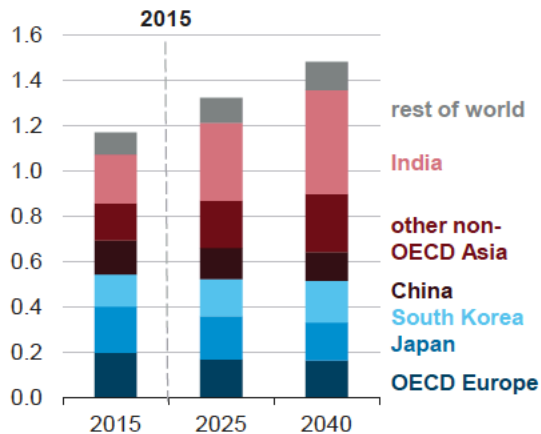


รูปที่ 1.3 คาดการณ์การผลิตถ่านหินในช่วงปี ค.ศ. 1990-2040 แต่ละประเทศ [1]

Asia remains the world's largest importer of coal in 2040—

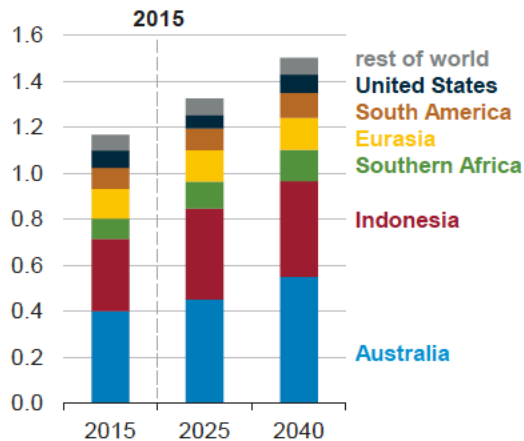
Coal imports

billion short tons



Coal exports

billion short tons



รูปที่ 1.4 คาดการณ์การนำเข้าและส่งออกถ่านหินในช่วงปีค.ศ. 2015-2040 แต่ละประเทศ [1]

ตารางที่ 1.1 คาคการณ์การใช้ถ่านหินช่วงปี พ.ศ.2553 - 2557 (หน่วย พันตัน) [2]

การใช้งาน	2553	2554	2555	2556	2557
ผลิตไฟฟ้า	7,469.1	8,080.2	9,005.8	9,048.2	9,506.6
อุตสาหกรรม	8,009.0	7,727.2	7,400.8	6,797.5	8,390.4
รวม	15,478.1	15,807.3	16,406.6	15,845.7	17,897.0

ตารางที่ 1.2 การจัดหาถ่านหินในประเทศไทย (หน่วย พันตัน) [2]

แหล่งถ่านหิน	2553	2554	2555	2556	2557
ภายในประเทศ	18,258	21,327	18,066	18,111	17,980
นำเข้าจากต่างประเทศ	16,904	16,331	18,404	17,328	20,881
รวม	35,162	37,658	36,470	35,439	38,861

อย่างไรก็ตามการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยเฉพาะถ่านหินส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซมลพิษสะสมในบรรยากาศโลก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อนขึ้น นอกจากนี้การเผาไหม้ถ่านหินยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นขนาดเล็ก $\text{PM}_{2.5}$ ซึ่งกำลังเป็นปัญหาต่อสภาพอากาศในประเทศไทย การพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิลโดยเฉพาะถ่านหินซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศนั้น จะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศในอนาคต การพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและสามารถผลิตได้เองในประเทศอย่างยั่งยืนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งประเทศไทยมีพลังงานทางเลือกหลายชนิดที่มีศักยภาพในการพัฒนาให้เป็นพลังงานหลักได้หากมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนที่ต่ำลง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ก๊าซชีวภาพ ขยะและชีวมวล เป็นต้น โดยพลังงานจากชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกอย่างหนึ่งซึ่งจากการสำรวจพบว่าในประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเหลือใช้ในประเทศสูง [3] โดยการนำชีวมวลมาพัฒนาเป็นพลังงานเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมนั้นต้องมีการพิจารณาหลายปัจจัย เช่น มีปริมาณมีมากพอ สะดวกในการจัดเก็บและการขนส่ง รวมถึงค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิด โดย Kindai University ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้ร่วมพัฒนาเทคโนโลยีเชื้อเพลิงแข็งหรือถ่านชีวภาพ (Biocoke) จากชีวมวลโดยใช้ความดันสูงและความร้อนร่วมด้วย [4, 5] ซึ่งมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และทดลองใช้วัตถุดิบ

ที่เป็นชีวมวลได้หลากหลาย เช่น ใบชา กากกาแฟ ชี้อเลื่อย และเศษวัสดุทางการเกษตร [6-11] โดยมีวัตถุดิบหลัก เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินเพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหิน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเตาหลอมเหล็กแบบ Cupola เพื่อให้การศึกษามีความต่อเนื่อง และสามารถพัฒนาให้สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการคัดเลือกวัตถุดิบภายในประเทศที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นถ่านชีวภาพ

ในปี 2560 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของปาล์มน้ำมันเป็นอันดับ 3 ของโลก โดยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 5.3 ล้านไร่ เป็นพื้นที่ให้ผลผลิตแล้ว 4.7 ล้านไร่ โดยผลผลิตปาล์มน้ำมันของไทยอยู่ที่ประมาณ 13.5 ล้านตัน/ปี สกัดเป็นน้ำมันปาล์มได้ 2.5 ล้านตัน ซึ่งพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันและโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มดิบของไทยส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ภาคใต้ประมาณ 85% (โดยเฉพาะที่สุราษฎร์ธานี กระบี่ และชุมพร) และอีก 15 % มีการการปลูกกระจายในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [12] โดยในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์มจำนวนมาก ซึ่งส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เป็นอาหารสัตว์ หรือทิ้งโดยไม่มีการใช้ประโยชน์ ซึ่งการจัดเก็บและกำจัดไม่ถูกวิธี รวมถึงการนำกากปาล์มไปเผาไหม้โดยตรงก็นำมาสู่ปัญหาการแพร่กระจายของควันและฝุ่นขนาดเล็ก เช่น PM10 และ PM2.5 และเกิดกลิ่นเหม็นเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยหากพิจารณาองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากปาล์ม ซึ่งประกอบด้วย ลิกนิน 11.27 wt % เซลลูโลส 27.19 wt% และเฮมิเซลลูโลส 24.98 wt% ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากปาล์มมีองค์ประกอบของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นถ่านชีวภาพได้ [13] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณากากปาล์มที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมาเป็นวัตถุดิบในการพัฒนาเป็นถ่านชีวภาพ โดยจะทำการศึกษาสถานะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ โดยสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านโค้กในอุตสาหกรรม ควรมีสมบัติที่สำคัญได้แก่ ความแข็งแรง (Compressive strength) ไม่น้อยกว่า 20 MPa ค่าความร้อน (Calorific value) ไม่น้อยกว่า 4,000 kcal/kg และความหนาแน่น (Density) ไม่น้อยกว่า 1.1 g/cm³ [14]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปและส่วนผสมในการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้กากกากปาล์มเป็นวัตถุดิบหลัก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำผลิตถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบหลัก ได้แก่ กากปาล์ม
- 1.3.2 ศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิในการขึ้นรูป เวลาในการขึ้นรูปความดันหรือความดันในการขึ้นรูป สัดส่วนของวัตถุดิบหลักและวัสดุผสม (หากมีความจำเป็นต้องผสมเพื่อเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรม หรืออาจมีการผสมหินปูนเพื่อปรับปรุงสมบัติของถ่านชีวภาพ เช่น ป้องกันการเกิดตะกรันในเตาเผา เป็นต้น) ต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้แก่ ความแข็งแรง ค่าความร้อน ความหนาแน่น เป็นต้น
- 1.3.3 ระยะเวลาที่ทำการศึกษา 1 ปี 9 เดือน (มีนาคม 2562 – ธันวาคม 2564)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปในการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้กากปาล์มเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหิน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ชีวมวลและองค์ประกอบ

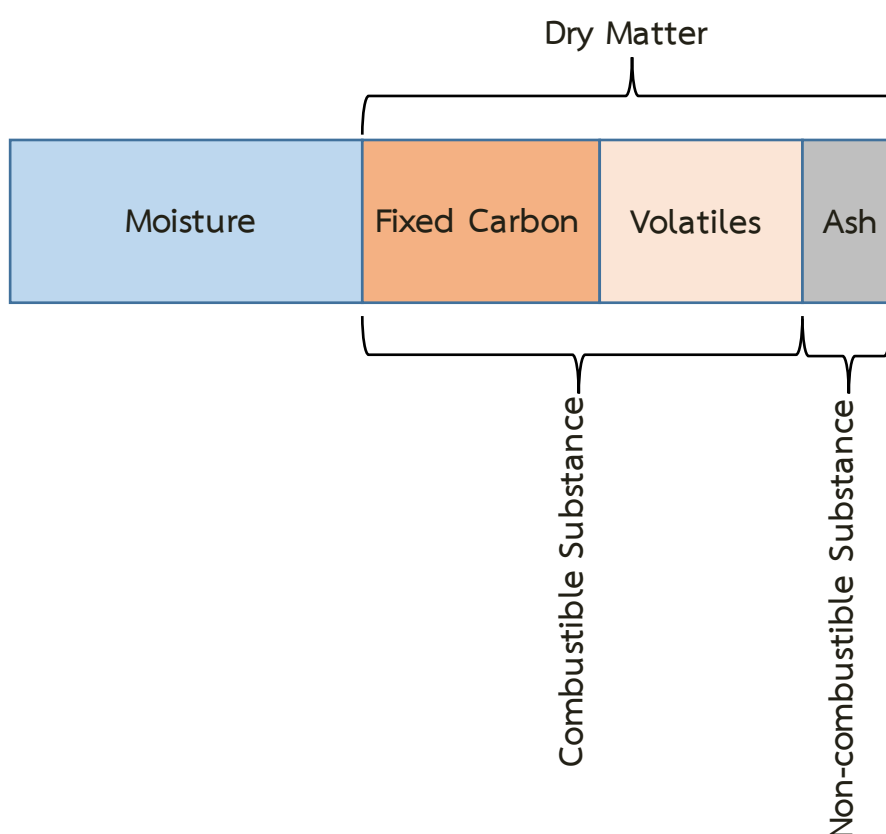
สารชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิตในธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้ ในปัจจุบันจึงนิยมนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างสารชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก ได้แก่ เศษไม้ ใบไม้ เศษหญ้า วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน เช่น แกลบ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว ฟางข้าว ชานอ้อย มูลสัตว์ ขยะชุมชน โดยการนำพลังงานมาใช้อาจนำมาเผาไหม้โดยตรง หรือมีการแปรรูปก่อนที่จะนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งนำมาพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ จึงเรียกว่า พลังงานชีวมวล (Biomass Energy) สารชีวมวลประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ในสัดส่วนที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1) **ความชื้น (Moisture)** คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล ความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของชีวมวล ส่งผลให้มีค่าความร้อนต่ำ การนำชีวมวลไปเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ จึงควรมีความชื้นไม่เกิน 50 % อย่างไรก็ตามความชื้นของชีวมวลในปริมาณที่เหมาะสมก็มีผลต่อการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน จึงควรมีการศึกษาผลกระทบของความชื้น หรือปรับความชื้นของวัตถุดิบให้เหมาะสม หากต้องการแปรรูปชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงรูปแบบต่างๆ และมีประสิทธิภาพตรงตามความต้องการ

2) **ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance)** ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สารระเหย (Volatiles Matter) ซึ่งมีผลต่อการติดไฟของชีวมวล และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อนของชีวมวล ดังนั้นการพิจารณาเลือกชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ

3) **ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible Substance)** ได้แก่ เถ้า (Ash) ซึ่งจะพบเมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้จนสมบูรณ์ และเหลือองค์ประกอบของแร่ธาตุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งจะแพร่กระจายในอากาศเมื่อเกิดการเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ และเถ้าจม (Bottom Ash) ซึ่งอาจจะเกิดการหลอมหรือกักความร้อนอุปกรณ์และเครื่องจักร หากนำชีวมวลไปใช้เป็นพลังงานทดแทน จึงต้องมีการพิจารณาปริมาณเถ้าที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวล โดยชีวมวลแต่ละประเภทจะมีปริมาณเถ้า และแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ

ต่างกัน ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเถ้าประมาณ 1 -3 % ขณะที่ชีวมวลบางประเภทมีเถ้าปริมาณสูง เช่น แกลบและฟางข้าวมีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูงถึง 10 -20 % หลายประเทศได้มีการกำหนดเกณฑ์ของปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลที่อนุญาตให้ใช้ได้ ดังนั้นการนำไปใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงต้องมีการออกแบบระบบหรือปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้ให้สามารถรองรับชีวมวลที่มีปริมาณเถ้าสูงได้

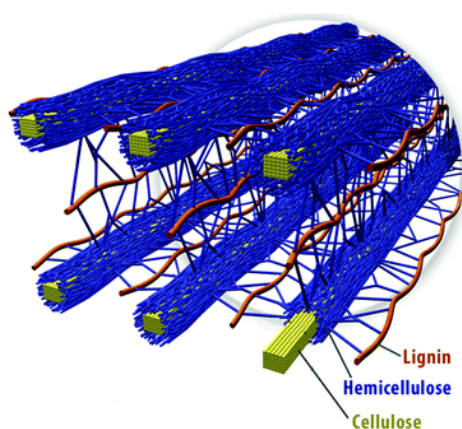


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบชีวมวล [15]

2.1.2 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ในชีวมวล

องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสเป็นวัสดุผสมที่สังเคราะห์โดยเซลล์พืช โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยลิกนิน (Lignin) เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) [16] เรียงตัวกันดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ โดยลิกนิน เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มักพบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชร่วมกับเซลลูโลสและ เฮมิ

เซลลูโลส ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ไม่ละลายน้ำ ไม่มีความยืดหยุ่น ย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้ชีวมวลที่มีลิกนินปริมาณมากมีความแข็งแรงมากและให้ค่าความร้อนสูง แต่จะส่งผลทำให้แปรรูปได้ยากด้วย โดยลิกนินจะพบมากในส่วนเปลือก ชัง หรือส่วนที่เป็นเยื่อของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้นไปสู่ยอดของพืช เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มักพบในโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช เช่น ผัก ผลไม้ และเมล็ดธัญพืช โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะอ่อนตัวได้ง่ายกว่าลิกนินเมื่อโดนความร้อน



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของลิกนินเซลลูโลสในเซลล์พืช [16]

2.1.3 ค่าความร้อนของชีวมวล

เมื่อทำการเผาไหม้ชีวมวล ชีวมวลจะให้พลังงานในรูปของค่าความร้อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปริมาณความชื้นที่อยู่ในชีวมวลแต่ละชนิด โดยค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล สามารถแสดงได้ 2 ค่า คือ

1) **ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV)** เป็นพลังงานทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล โดยไม่ได้มีการหักลบพลังงานส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในชีวมวลออกไปในการเผาไหม้

2) **ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV)** เป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้จริงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้จากการหักลบพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในชีวมวลออกไปในการเผาไหม้ ค่าที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่าค่าค่าความร้อนสูง (HHV) ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าความ

ร้อนต่ำ (LHV) ในการประเมินศักยภาพที่แท้จริงของพลังงานหรือค่าความร้อนที่จะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้จริงของชีวมวล

2.1.4 กากปาล์ม

ปาล์มเป็นพืชน้ำมันที่มีปลูกกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากมีพื้นที่และภูมิอากาศเหมาะสม ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของปาล์มน้ำมันเป็นอันดับ 3 ของโลก โดยผลผลิตปาล์มน้ำมันของไทยอยู่ที่ประมาณ 11-13 ล้านตัน/ปี สกัดเป็นน้ำมันปาล์มได้เฉลี่ย 2 ล้านตัน/ปี หรือคิดเป็น 1.2% ของโลก ซึ่งพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันและโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มดิบของไทยส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ภาคใต้และมีการกระจายไปในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากขึ้น [17] โดยงานวิจัยนี้ได้นำกากปาล์มที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมาเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเล็งเห็นมีจำนวนมากสามารถหาได้ง่ายเหมาะที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบ สำหรับส่วนของปาล์มที่นำมาผลิตน้ำมันนั้นได้มาจากส่วนของผลปาล์ม ซึ่งมีส่วนที่ให้น้ำมันอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนเนื้อของผลปาล์มเป็นส่วนเปลือกที่ห่อหุ้มกะลา

จากรายงานข้อมูลการประเมินองค์ประกอบของชีวมวลและค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ที่พบโดยทั่วไปในประเทศไทย ดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 พบว่าค่าความร้อนของเฉลี่ยส่วนประกอบของปาล์มที่พบในประเทศไทยอยู่ในระดับที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งหรือถ่านชีวภาพได้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลที่พบในประเทศไทย [18]

ชนิดของวัตถุดิบ	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	37.70	22.06	21.00	19.23
ชานอ้อย	41.26	19.78	22.91	16.05
ต้นกก	37.28	7.87	20.43	34.42
ผักตบชวา	24.37	19.83	25.34	30.46
ก้านกล้วย	33.86	9.38	16.84	39.92
กาบมะพร้าว	35.56	25.81	15.02	23.62
ใบคาน้ำ	26.78	20.07	19.37	33.77
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา	51.2	16.4	16.5	15.9

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของชีวมวลและค่าความร้อนของชีวมวลที่พบในประเทศไทย [19]

สมบัติชีวมวล	%Moisture	%Ash	%Volatiles	% Fixed Carbon	HHV (kcal/kg)	LHV (kcal/kg)
กะลาปาล์ม	12.00	3.50	68.20	16.30	4366	4039
ทะลายปาล์ม	58.60	2.03	30.46	8.90	2198	1730
ต้นปาล์ม	48.40	1.20	38.70	11.70	2239	1806
ซังข้าวโพด	40.00	0.90	45.42	13.68	2700	2298
เหงามันสำปะหลัง	59.40	1.50	31.00	8.10	1781	1313
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	60.00	2.44	28.00	9.56	1628	1175
แกลบ	12.00	12.65	56.46	18.88	3527	3231
ฟางข้าว	10.00	10.39	60.70	18.90	3262	2940
ชานอ้อย	50.73	1.43	41.98	5.86	2209	1761
ไม้ยางพารา	45.00	1.59	45.70	7.71	2477	3500

2.1.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของชีวมวล รวมถึงวัตถุประสงค์และประสิทธิภาพในการการใช้ประโยชน์ [20] เช่น

1) การเผาไหม้ (Combustion) คือ การนำชีวมวลมาเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน ซึ่งอาจเป็นการนำชีวมวล เช่น เศษวัสดุต่างๆ ไปให้ความร้อนโดยตรง โดยอาจจะมีการลดขนาดก่อนนำไปเผาไหม้เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของระบบเผาไหม้ ซึ่งความร้อนที่ได้จึงขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิด และมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการจัดเก็บและความหลากหลายของแหล่งที่มาของชีวมวล ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด จึงมีการพัฒนาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพให้การเผาไหม้ เช่น การเพิ่มความดันในการเผาไหม้ และการควบคุมออกซิเจนในเตาเผา เป็นต้น หรืออาจทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพแข็ง (Bio-solid Fuel) ซึ่งเป็นการพัฒนาเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้รูปแบบหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มค่าความร้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลได้ และสามารถควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถจัดเก็บและขนส่งชีวมวลได้สะดวกขึ้น มีความเหมาะสมในการใช้ในระดับอุตสาหกรรม และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลได้

ด้วย ตัวอย่าง เช่น การแปรรูปชีวมวลเป็นชีวมวลอัดแท่ง (Wood Pellet) เชื้อเพลิงแท่งที่ผ่านกระบวนการ Torrifaction รวมถึงถ่านชีวภาพ (Biocoke) ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น

2) การผลิตก๊าซ (Gasification) เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยการให้ความร้อนกับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกังหันก๊าซของเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

3) การหมัก (Fermentation) เป็นกระบวนการหมักชีวมวลด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ เพื่อให้เกิดการย่อยสลายเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เช่น การหมักการหมักขยะอินทรีย์ในชุมชน มูลสัตว์ ชีวมวลเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตร ด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ เพื่อย่อยสลายชีวมวลให้ได้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ใช้กับหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรม และใช้เป็นก๊าซหุงต้มในครัวเรือน เป็นต้น

4) การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวล สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายแป้ง น้ำตาลและเซลลูโลสจากชีวมวลทางการเกษตร ให้เป็นไบโอเอทานอลสำหรับเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เบนซิน กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี เช่น การสกัดน้ำมันจากพืช เช่น มะพร้าว ถั่วเหลือง ปาล์ม เพื่อน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) สำหรับการผลิตเป็นไบโอดีเซล และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นการสลายชีวมวลโดย เฉพาะพืชที่พืชที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสสูง หรือไม้ยืนต้น โดยใช้อุณหภูมิสูงระหว่าง 400-800 เคลวิน ในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในเหลวและก๊าซผสมกัน

2.1.6 ถ่านชีวภาพ (Biocoke)

ถ่านชีวภาพเป็นชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษอาหาร ขยะชุมชน และเศษวัสดุจากอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพอัดแท่ง (Bio-solid Fuel) ถ่านชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนสูง และมีค่าความหนาแน่นรวมสูง สามารถใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับถ่านโค้กและถ่านหินในอุตสาหกรรมได้ โดยสามารถลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ จากศึกษาเพื่อพัฒนาถ่านชีวภาพจากวัสดุชนิดต่างๆ พบว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนประมาณ 3000-6000 kcal/kg และค่าความหนาแน่นประมาณ 1.1-1.3 g/cm³ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสภาวะในการ

ชั้นรูป [21-28] ตัวอย่างถ่านชีวภาพแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดทดลองการผลิตถ่านชีวภาพในแนวตั้ง เพื่อทดลองผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างถ่านชีวภาพ



รูปที่ 2.4 ชุดทดลองการผลิตถ่านชีวภาพในแนวตั้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถ่านชีวภาพได้ริเริ่มโดย Prof. Tamio Ida และคณะนักวิจัยของ Kindai University [21] โดย Mizuno และคณะ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุดและปริมาณคาร์บอนในวัตถุดิบ ซึ่งพบว่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะลดลงเมื่อปริมาณคาร์บอนในวัตถุดิบสูงขึ้น [22] นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิในการขึ้นรูป ซึ่งพบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจากสมุนไพรญี่ปุ่น โดยความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่ 1.38 g/cm^3 และมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 127 MPa [23]

คณะนักวิจัยของ Kindai University ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาถ่านชีวภาพอย่างต่อเนื่อง เช่น Sawai และคณะ ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษไม้ของต้นบ๊วยและต้นพลับ พบว่าถ่านชีวภาพจากเศษไม้ของต้นพลับนั้นจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 180 °C แต่จะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดลดลงตามขนาดของของวัตถุดิบที่ลดลง ส่วนถ่านชีวภาพจากเศษไม้ของต้นบ๊วยมีความต้านทานแรงอัดสูงสุด เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 140-160 °C โดยขนาดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ [24] Murata และคณะ [25] ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพจากผงไม้โดยใช้รำข้าวเป็นส่วนผสม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรำข้าว จะส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีความหนาแน่น ค่าความร้อนและความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีผู้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพอัดแท่งในลักษณะต่างๆ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพที่ทางคณะนักวิจัยของ Kindai University ทำการศึกษาอยู่ ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลเมื่อได้รับความร้อนและความดัน เช่น

Hill และ Pulkinen ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดของของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากต้นอัลฟัลฟา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูปในช่วง 60°C – 104 °C จะสามารถเพิ่มความต้านทานแรงอัดให้กับเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ประมาณ 30%-50% [26]

สำรวม โกศลนันท์ ได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงจากกากไขมันและกากของกากไขมันกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ชี้เลื่อย ชังข้าวโพด และเห้้ำมันสำปะหลัง เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่มีผลกระทบต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยพบว่าเชื้อเพลิงผสมที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือ กากไขมันผสมกับชังข้าวโพดที่ประกอบไปด้วยกากไขมัน 75% ซึ่งมีค่าความร้อน เท่ากับ 1,638 kJ/kg [27]

Goring ได้ทำการศึกษาโดยการให้อุณหภูมิกับลิกนินเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยใช้แรงอัดจากแรงโน้มถ่วง พบว่าลิกนินจะอ่อนตัวที่ 127-193 °C โดย Xylan และ Glucomannan อ่อนตัวที่ 167°C และ 181°C เมื่อเติมน้ำให้กับวัตถุดิบจะทำให้จุดที่ทำให้อ่อนตัวลดลงถึง 54°C และพบว่าเซลลูโลสจะอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 230°C [28]

ส่วนการศึกษาก่านชีวภาพในประเทศไทย ห้องวิจัยกระบวนการวัสดุขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นได้ร่วมกับ Kindai University ในการพัฒนาก่านชีวภาพ ตัวอย่างเช่น โดยสุพิชญา เชิดเกียรติกุล และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อสมบัติของก่านชีวภาพจากกากกาแฟ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความหนาแน่นรวมและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าความร้อน คือ ความดันและเวลา [6, 7, 29] นอกจากนี้ณัฐภรณ์ สุวรรณนาคี และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปของก่านชีวภาพจากกากมะพร้าว พบว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลต่อความหนาแน่นรวมของก่านชีวภาพ เมื่อให้อุณหภูมิสูงสุดในการทดลอง 170°C และเวลาในการขึ้นรูปสูงสุด 20 นาที จะให้ความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ 1.18 g/cm³ [30] นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาก่านชีวภาพจากเศษวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ อีกหลากหลายชนิด เช่น กากถั่วเหลือง [8] ไม้กระถินยักษ์สับ [5] ไม้ยางพาราสับ [13] และขี้เลื่อยไม้ยางพารา [9-11] เป็นต้น ซึ่งพบว่ามีความร้อนประมาณ 3000-6000 kcal/kg และค่าความหนาแน่นประมาณ 1.1-1.3 g/cm³ โดยก่านชีวภาพจากกากกาแฟจะให้ค่าความร้อนสูงที่สุด มีความหนาแน่นและความแข็งแรงเหมาะสมร่วมกับก่านไค้และก่านหินที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

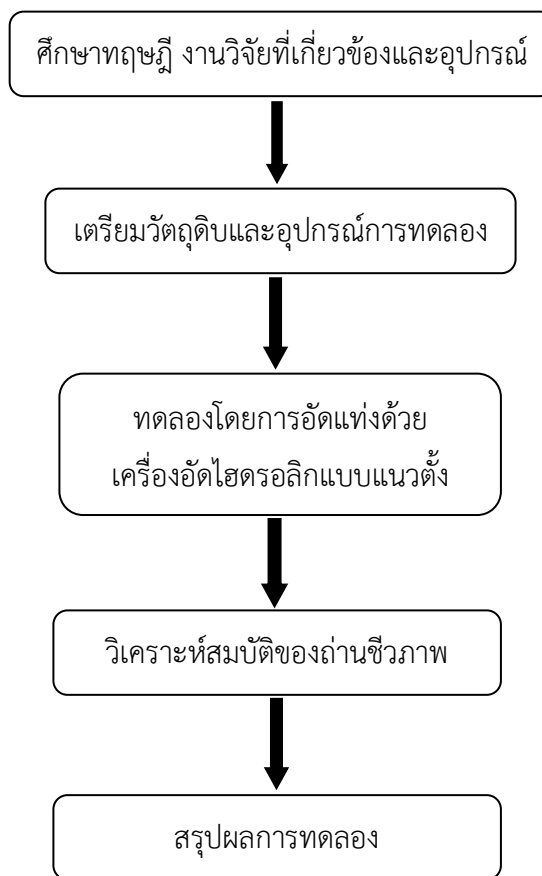
อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก่านชีวภาพจากกากปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันพบมากในประเทศไทย และมีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแผนผังงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง
- 2) เครื่องร่อนแยกขนาดอนุภาค
- 3) เครื่องชั่งความละเอียดสูง

- 4) เครื่องวัดความชื้นวัตถุดิบ
- 5) ตู้อบควบคุมความชื้น

3.3 ขอบเขตการการศึกษา

3.3.1 วัตถุดิบที่ใช้

- 1) กากปาล์ม

3.3.2 ตัวแปรต้น

- 1) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 100 °C - 190 °C
- 2) เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 10 - 20 นาที

3.3.3 ตัวแปรตาม

- 1) ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (kcal/kg)
- 2) ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa)
- 3) ความหนาแน่น (g/cm^3)
- 4) ความแข็ง (Shore D Scale)

3.3.4 ตัวแปรควบคุม

- 1) ชุดทดลองการขึ้นรูปถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง
- 2) ความดันในการขึ้นรูปคงที่ เท่ากับ 16 MPa
- 3) ความชื้นของวัตถุดิบคงที่ ประมาณ $10 \pm 1 \text{ wt}\%$
- 4) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่ใช้ มีขนาดเล็กกว่า 600 micron
- 5) น้ำหนักรวมของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง 50 g

3.4 การทดลอง

3.4.1 วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ วัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นกากปาล์ม จากบริษัท JFK Feed ซึ่งเป็นกากปาล์มเนื้อใน ผ่านการกะเทาะเปลือกหรือกะลาออกก่อนแล้ว และได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อพิจารณาองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ได้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1 – 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากปาล์ม

องค์ประกอบประกอบ	ลิกนิน	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	อื่นๆ
ปริมาณ (wt%)	11.27	27.19	24.98	35.56

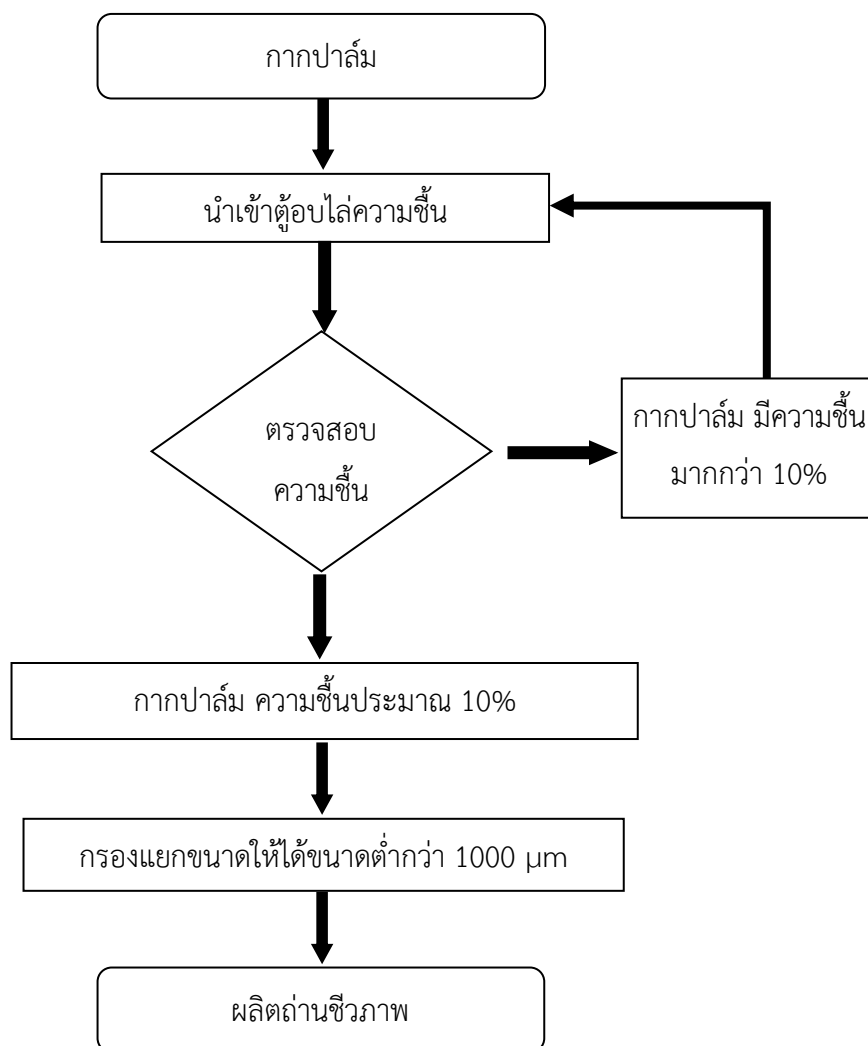
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของกากปาล์ม

Test Item	Result (wt%)	Test Method
Moisture	7.99	ASTM D5865
Volatile Matter	71.95	ASTM D5865
Fixed Carbon	16.83	ASTM D7582
Ash	3.23	ASTM D7582

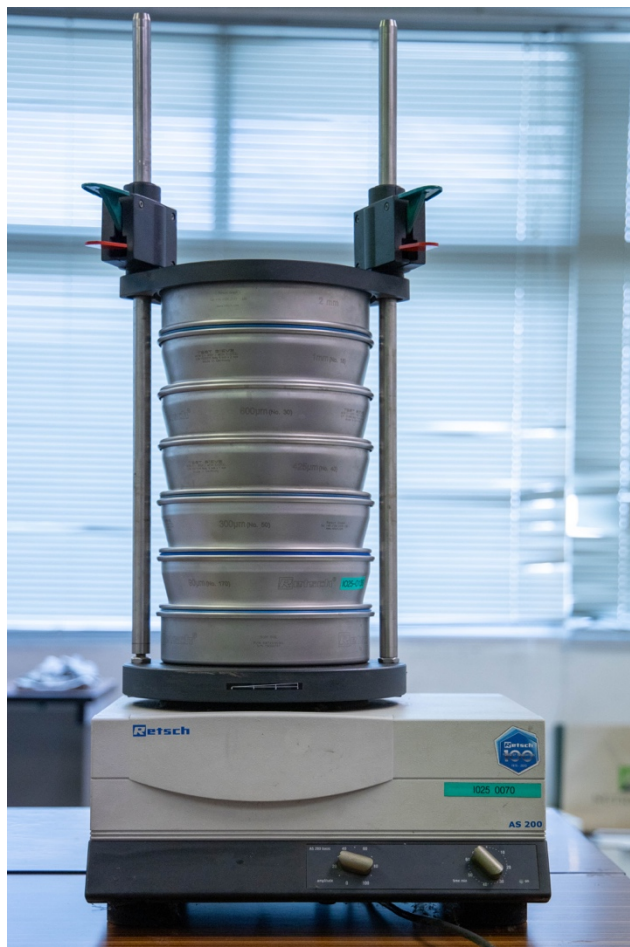
ตารางที่ 3.3 Ultimate Analysis

Test Item	Result (wt%)	Test Method
Carbon (C)	44.65	ASTM D5373
Hydrogen (H)	6.93	ASTM D5373
Nitrogen (N)	2.34	ASTM D5373
Oxygen (O)	42.63	ASTM D5373
Sulfur (S)	0.22	ASTM D4239

โดยจะทำการเตรียมวัตถุดิบก่อนนำมาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 จะต้องทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C เพื่อให้มีความชื้นประมาณ 10±1 wt% และทำการร่อนเพื่อคัดขนาดให้อยู่ในช่วงที่กำหนด คือ มีขนาดเล็กกว่า 1000 micron โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve Shaker, Retsch รุ่น AS200) ดังรูปที่ 3.3 หลังจากคัดแยกได้ขนาดตามที่กำหนดแล้วจะได้วัตถุดิบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 เครื่องร่อนแยกขนาดที่ใช้ในการทดลอง

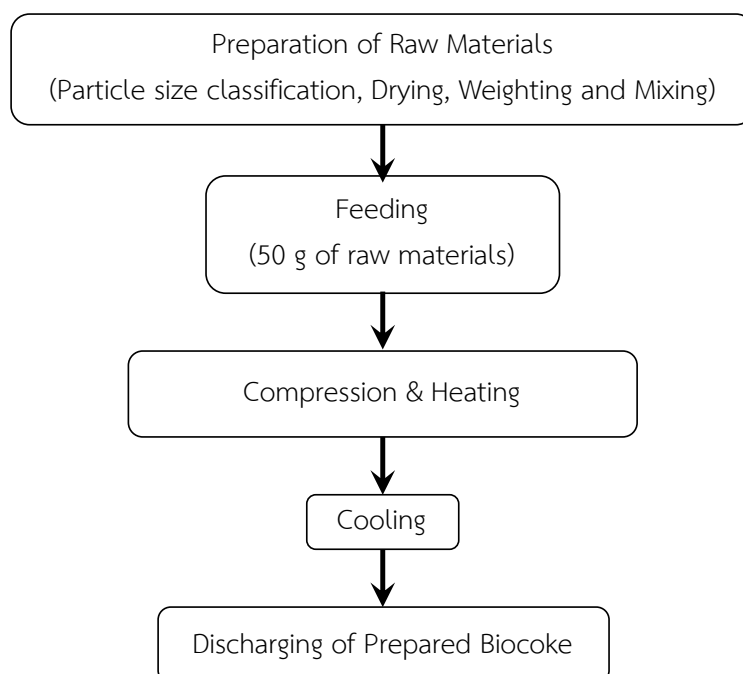


รูปที่ 3.4 กากปาล์มที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้ว

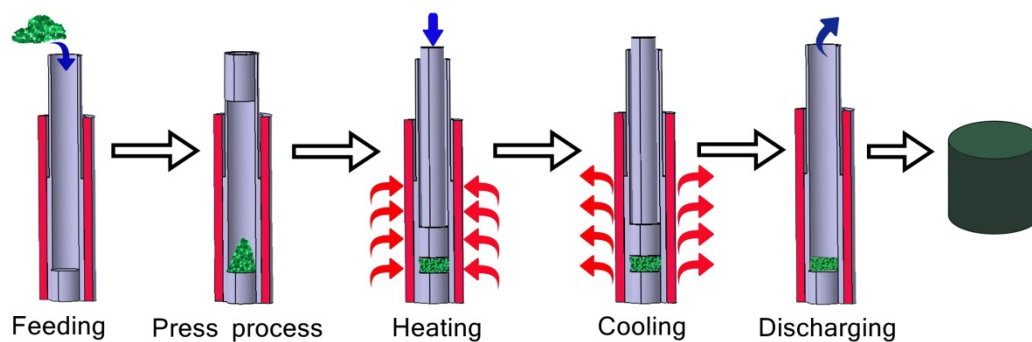
3.4.2 การขึ้นรูปถ่านชีวภาพ

ในการศึกษานี้ทำการผลิตถ่านชีวภาพด้วยชุดทดลองผลิตถ่านชีวภาพแบบอัดร้อนในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.4 มีขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์และการขึ้นรูปถ่านชีวภาพแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6

- 1) ประกอบชุดแม่พิมพ์
- 2) ชั่งกากปาล์มตามน้ำหนักที่กำหนด คือ 50 กรัม จากนั้นนำกากปาล์มใส่ในแม่พิมพ์ทรงกระบอก
- 3) เลื่อนหัวอัดซึ่งบังคับด้วยลูกสูบไฮดรอลิกลงมาประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ด้านบนจากนั้นทำการกดด้วยไฮดรอลิกจนถึงความดันที่กำหนด คือ 16 MPa
- 4) ครอบกระบอกแม่พิมพ์ด้วยสตูบ Electric heating furnace เพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นคงที่อุณหภูมิและเวลาตามที่ได้กำหนดไว้
- 5) เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว นำ Electric heating furnace ออกจากกระบอกสตูบ จากนั้นรอจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 6) นำถ่านชีวภาพออกจากกระบอกสตูบ



รูปที่ 3.5 กระบวนการการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ [15]



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการประกอบแม่พิมพ์และการขึ้นรูปถ่านชีวภาพ [15]

3.4.3 สถานะที่ทำการศึกษา

ในการศึกษานี้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 ชุดการทดลองได้แก่

- 1) ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม
- 2) ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม

ในการทดลองจึงทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ตามที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งสามารถสรุปกรณีที่ทำการศึกษาได้ 20 กรณี ดังตารางที่ 3.4 โดยที่ในแต่ละกรณีจะทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งจะได้ถ่านชีวภาพรวมทั้งหมดอย่างน้อย 60 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทดลอง

No.	สภาวะการทดลอง			
	ความชื้นของวัสดุดิบ (wt%)	ความดันในการขึ้นรูป (MPa)	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)
1	10±1	16	100	10
2	10±1	16	140	10
3	10±1	16	170	10
4	10±1	16	180	10
5	10±1	16	190	10
6	10±1	16	100	15
7	10±1	16	140	15
8	10±1	16	170	15
9	10±1	16	180	15
10	10±1	16	190	15
11	10±1	16	100	20
12	10±1	16	140	20
13	10±1	16	170	20
14	10±1	16	180	20
15	10±1	16	190	20
16	10±1	16	100	25
17	10±1	16	140	25
18	10±1	16	170	25
19	10±1	16	180	25
20	10±1	16	190	25

3.5 การวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพ

งานศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม มีการวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพที่ได้จากสภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกันโดยการตรวจสอบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวของถ่านชีวภาพเพื่อหาความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา โดยสมบัติที่มีการตรวจสอบ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Density) ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) ค่าความร้อน (Colorific Value) และความแข็ง (Hardness) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 ค่าความหนาแน่น (Density)

การหาค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพ ทำได้โดยนำถ่านชีวภาพแต่ละชิ้นมาชั่งน้ำหนักและวัดความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่น ตามสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพ} = \frac{\text{มวลของถ่านชีวภาพ}}{\text{ปริมาตรของถ่านชีวภาพ}} \quad (3.1)$$

3.5.2 ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength)

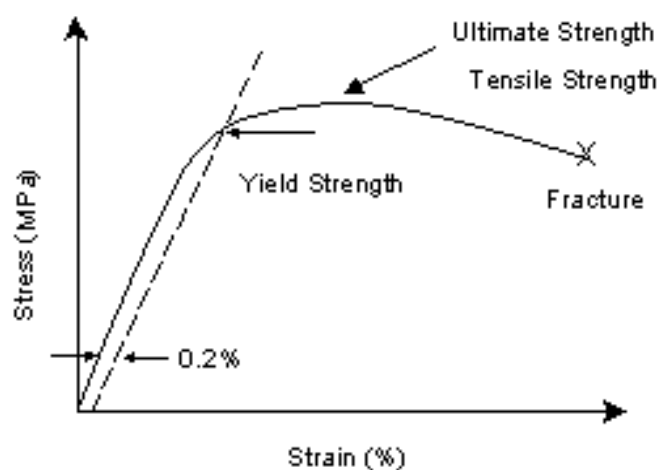
การทดสอบความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพ (Compressive Strength) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงาน เนื่องจากถ่านชีวภาพต้องมีการขนส่ง การจัดเก็บและการเผาไหม้ร่วมกับวัสดุอื่นๆ จึงต้องมีสมบัติที่แข็งแรงไม่แตกร่วนง่าย จึงจะสามารถให้ความร้อนได้ดีและไม่เสียหายระหว่างการขนส่งและการจัดเก็บ ซึ่งในการศึกษานี้ทดสอบความแรงอัดด้วยเครื่อง Shimadzu UH-100A ดังรูปที่ 3.7 โดยพิจารณาการรับแรงอัดสูงสุดของชิ้นงาน จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 3.8 และคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\sigma_{max} = F_{max}/A \quad (3.2)$$

เมื่อ σ_{max} ค่าความต้านทานแรงอัด (MPa) F_{max} แรงอัดสูงสุด (N) และ A พื้นที่หน้าตัดของถ่านชีวภาพ (m^2).



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการอัด Shimadzu UH-100A



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [4]

3.5.3 สมบัติทางความร้อน (Calorific Value) [18]

ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket แสดงใน รูปที่ 3.9 โดยจะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าความร้อนของสารตัวอย่างจาก สมการที่ 3.3

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (3.3)$$

โดย H_g คือ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (kcal/kg)

t คือ อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

W คือ ค่าน้ำสมมูลของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

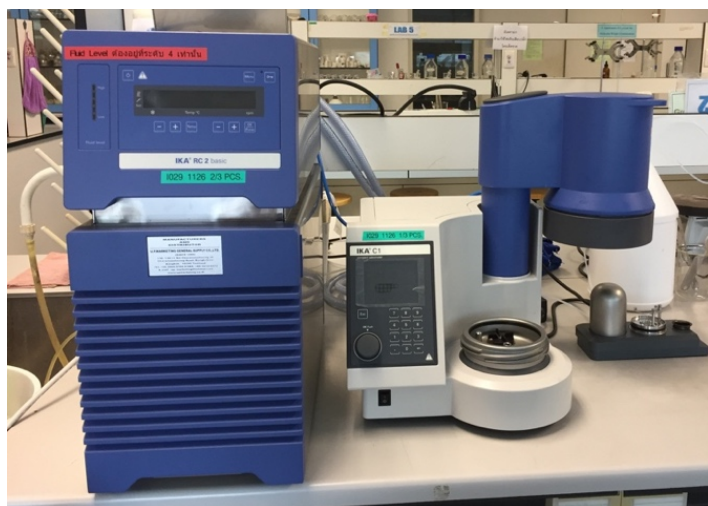
m คือ มวลของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบ (g)

e_1 คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริกในกระบวนการเผาไหม้ เท่ากับ 23.9

e_2 คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟิวริกที่เกิดในกระบวนการเผาไหม้ มีค่า

เท่ากับ $13.7 \times 1.02 \times$ มวลของตัวอย่างถ่านชีวภาพ

e_3 คือ ค่าแก้จากความร้อนที่เกิดจากการลุกไหม้ของขวดวัดน้ำหนัก เท่ากับ $2.3 \times$ ความยาวของหลอดที่ใช้จุดระเบิดในหน่วย cm



รูปที่ 3.9 เครื่อง Bomb Calorimeter (IKA Model C1)

3.5.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

แม้ว่าจากการสำรวจสมบัติของถ่านชีวภาพที่ภาคอุตสาหกรรมต้องการ จะไม่ได้มีการระบุความแข็งที่เหมาะสมในการใช้งาน แต่ความแข็งก็เป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของถ่านชีวภาพ เนื่องจากในการจัดเก็บ การขนส่งและการใช้งานจริง อาจจะมีการกระแทก การเสียดสี และการกดทับเกิดขึ้น ใน การศึกษานี้จึงได้ทำการทดสอบความแข็งของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการใช้งาน ในภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต การทดสอบความแข็งของถ่านชีวภาพในการศึกษานี้ ใช้การทดสอบความแข็งแบบชอร์โดยใช้ Hardness Tester Shore D ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งใช้การยึดหยุ่นตัวของวัสดุที่ถูกกดโดยสปริงที่แรงคงที่และมีหัวกดแล้ว วัดระยะยุบตัวของวัสดุด้วยไดอัลเกจ (Dial Gauge) ระบุเป็น ค่าความแข็งแบ่งเป็น 100 สเกล ซึ่งในการทดสอบใช้การกดที่ส่วนต่างๆ ของชิ้นงานแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness Tester Shore D

3.5.5 การวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM, Zeiss EVO MA10 และ Hitachi S-4800) โดยการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาคของชิ้นงานบริเวณที่แตกหักหลังจากการทดสอบการอัด เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของวัตถุดิบและถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ ซึ่งในการถ่ายภาพชิ้นงานที่ผลิตได้ทำได้เพียงบางกรณี เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือทดสอบ รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างภาพเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่ใช้ในการศึกษานี้



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM, Zeiss EVO MA10)

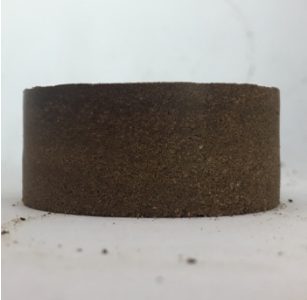
บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการวิจัย

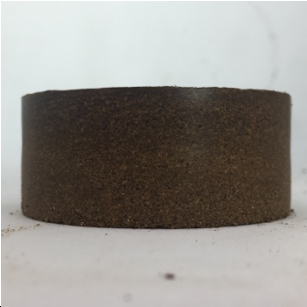
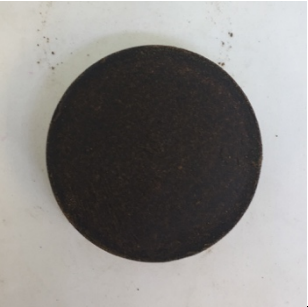
4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์ม ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 cm ความสูงประมาณ 2 cm ขึ้นอยู่กับสภาวะในการขึ้นรูป พบว่าสีของถ่านชีวภาพจะมีสีเข้มกว่าวัตถุดิบ และมีสีเข้มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 °C จะพบรอยร้าวขนาดเล็กที่ด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน

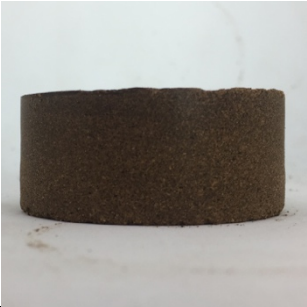
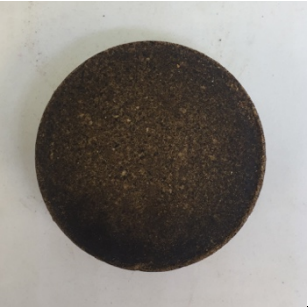
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ

No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
1	100	10		
2	140	10		

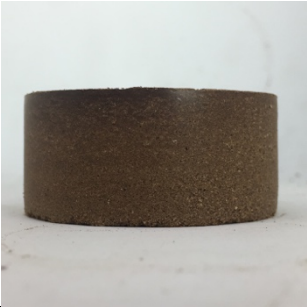
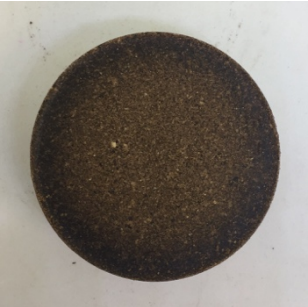
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายผ่านซีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
3	170	10		
4	180	10		
5	190	10		
6	100	15		

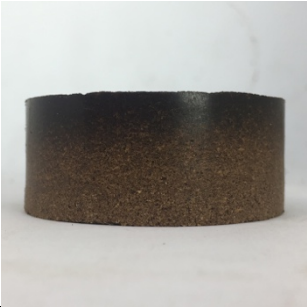
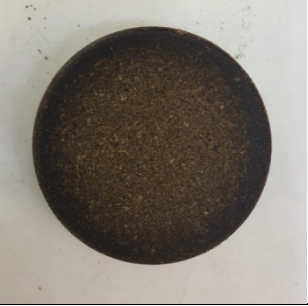
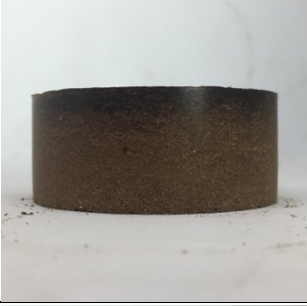
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
7	140	15		
8	170	15		
9	180	15		
10	190	15		

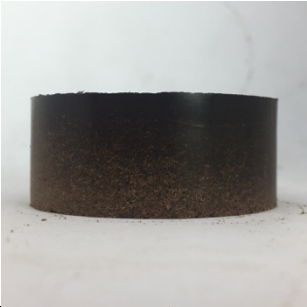
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายผ่านซีวีภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
11	100	20		
12	140	20		
13	170	20		
14	180	20		

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

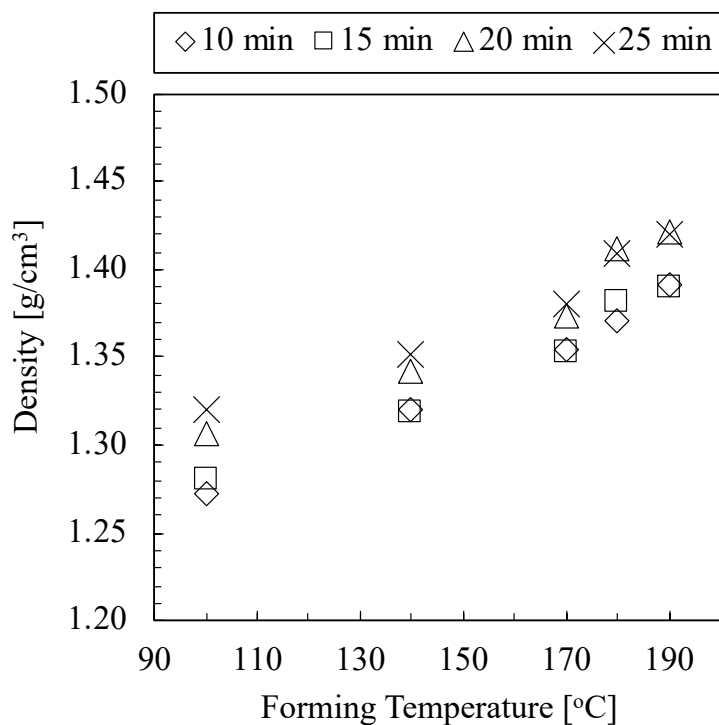
No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
15	190	20		
16	100	25		
17	140	25		
18	170	25		

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

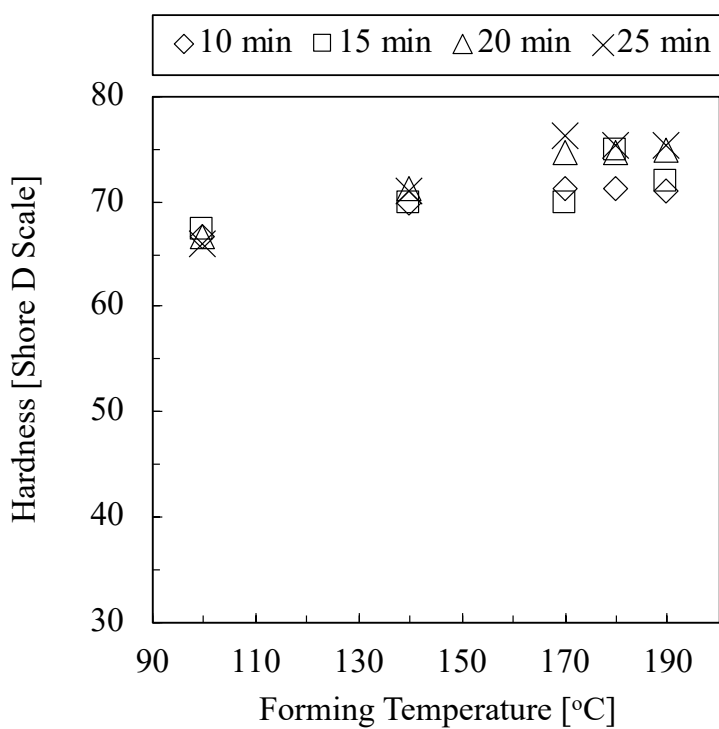
No.	สภาวะการทดลองและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพ			
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (°C)	เวลาในการขึ้นรูป (นาท)	ภาพถ่ายด้านข้าง	ภาพถ่ายด้านบน
19	180	25		
20	190	25		

4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม

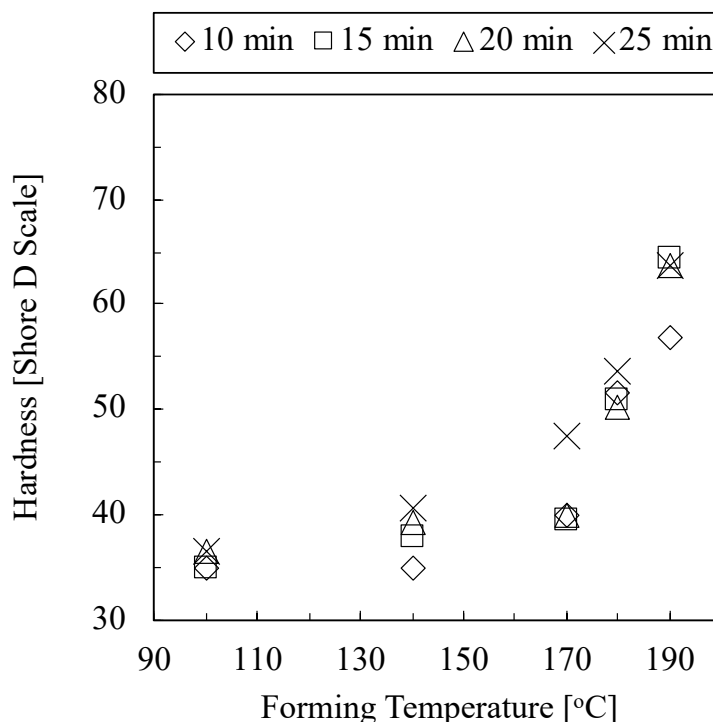
รูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่อุณหภูมิ 100 °C 140 °C 170 °C 180 °C และ 190 °C ที่เวลาในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตที่อุณหภูมิ 100 – 190 °C ที่เวลา 10 – 25 นาทีมีค่ามากกว่า 1.1 g/cm³ ซึ่งเป็นค่าเป้าหมายที่ต้องการ ความหนาแน่นสูงสุดของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 1.42 g/cm³ เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 190°C ที่เวลา 20 และ 25 นาที โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอ่อนตัวของ ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่เป็นองค์ประกอบของกากปาล์มอ่อนตัว ทำหน้าที่คล้ายตัวประสานช่วยให้อนุภาคของกากปาล์มที่เป็นวัตถุดิบเกิดการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongsuwan และคณะ [8] และ Goring [28]



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

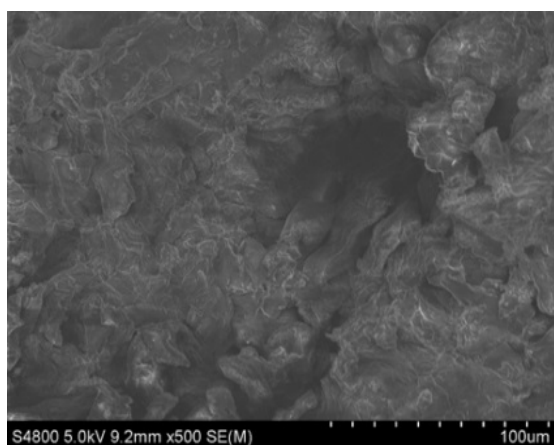


รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านบน) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

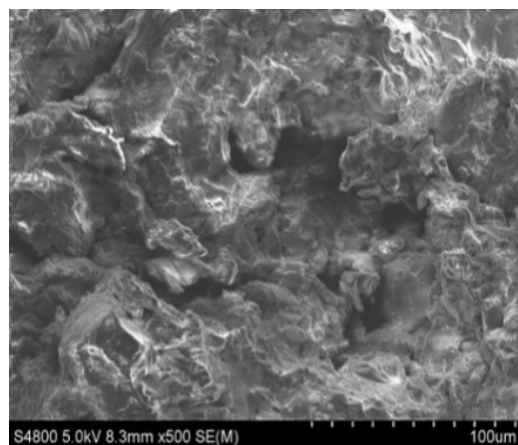


รูปที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านข้าง)
ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

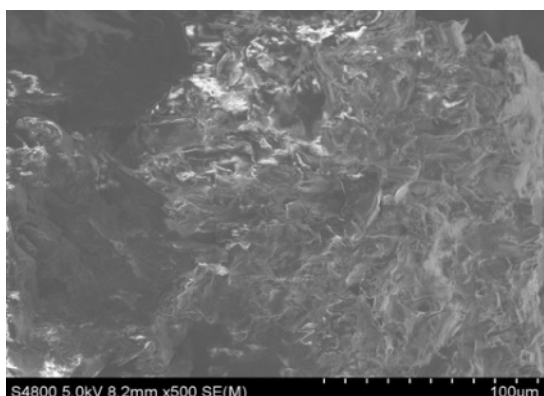
รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่อุณหภูมิ 100 140 170 180 และ 190°C ตามลำดับ ที่เวลาในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าด้านบนซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงอัดโดยตรงจะมีความแข็งมากกว่าด้านข้าง โดยความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิขึ้นรูปสูงขึ้น เช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงขึ้น ทำให้เกิดการอ่อนตัวของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของกากปาล์มอ่อนตัว ทำหน้าที่คล้ายตัวประสานช่วยให้อนุภาคของกากปาล์มที่เป็นวัตถุดิบเกิดการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น [8, 28] ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายกำลังขยายสูง (ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1,000 เท่า) ของลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 100°C 140°C 170°C 180°C และ 190°C โดยใช้เวลาในการขึ้นรูป 15 นาที ดังรูปที่ รูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของกากปาล์มยึดเกาะกันและมีช่องว่างขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



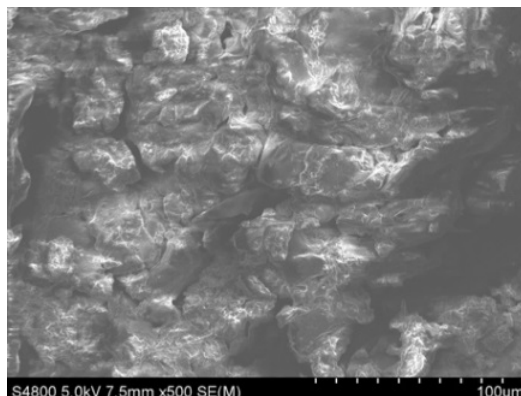
(a) 100°C



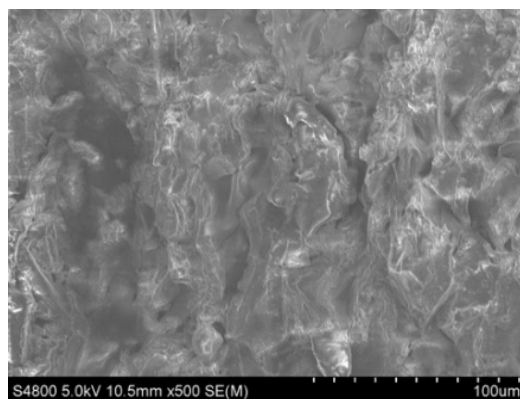
(b) 140 °C



(c) 170 °C

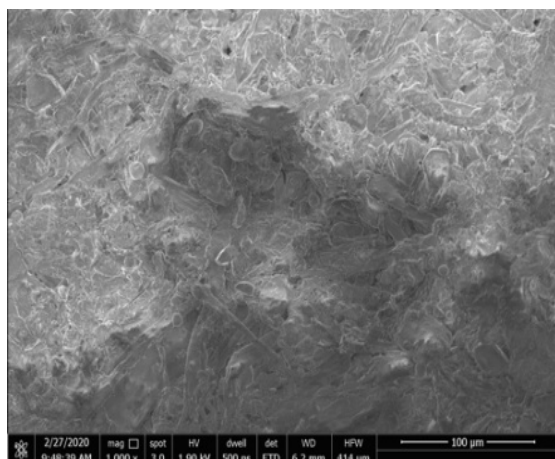


(d) 180 °C

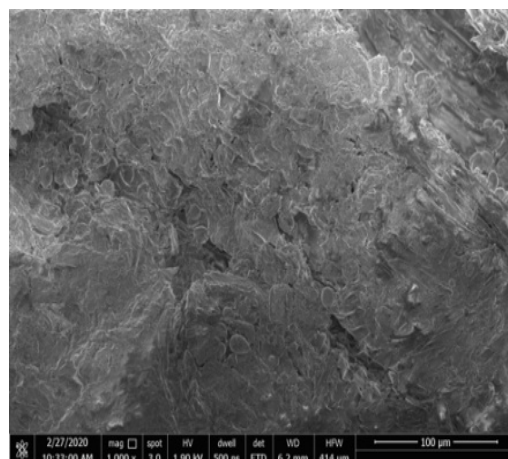


(e) 190 °C

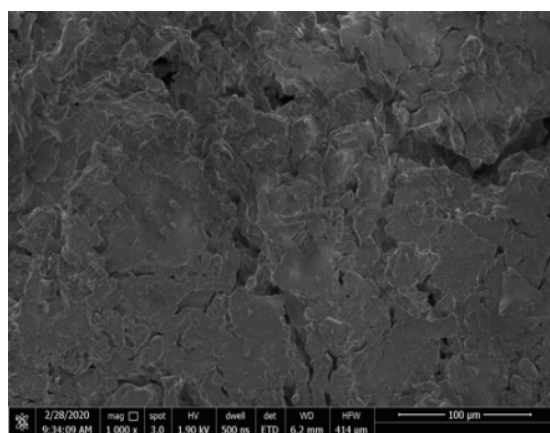
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
ที่เวลาในการขึ้นรูป 15 นาที (กำลังขยาย 500 เท่า)



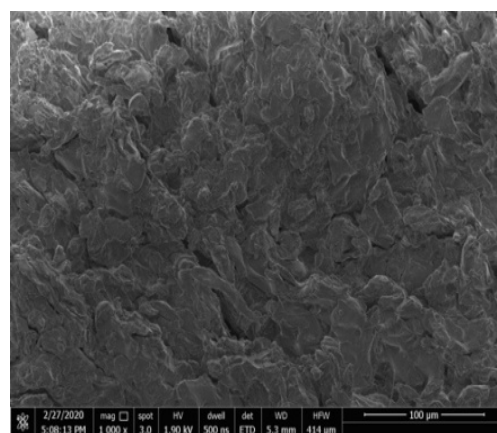
(a) 100 °C



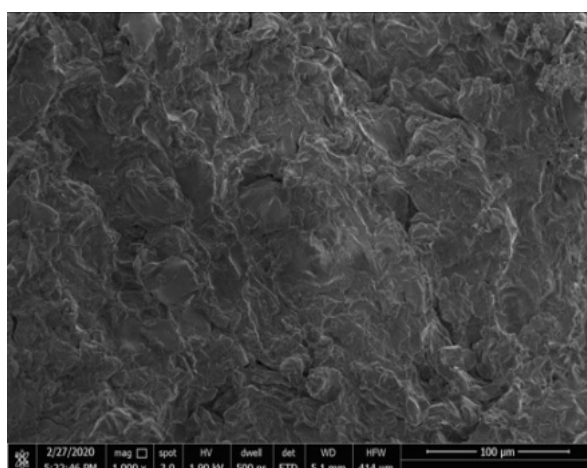
(b) 140 °C



(c) 170 °C



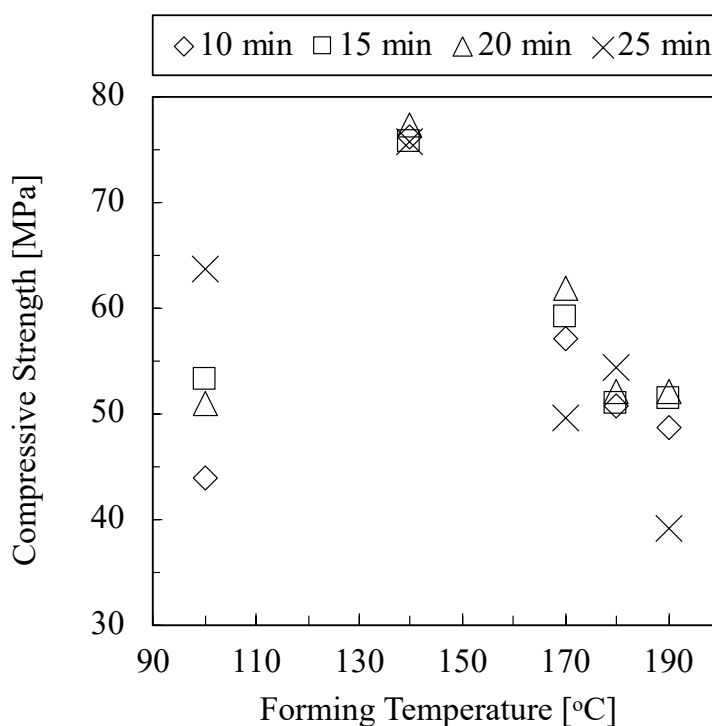
(d) 180 °C



(e) 190 °C

รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
ที่เวลาในการขึ้นรูป 15 นาที (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

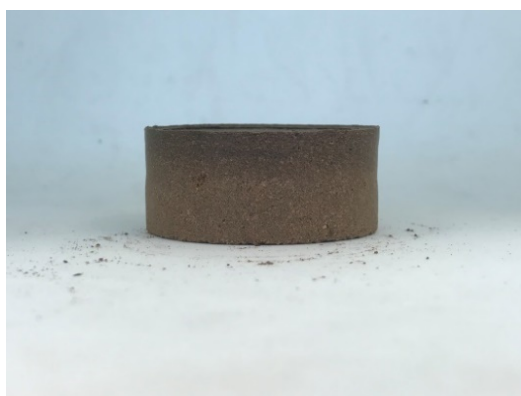
รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่อุณหภูมิ 100 140 170 180 และ 190°C ที่เวลาในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพมีค่าสูงขึ้น ในช่วง 100 – 140 °C โดยค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 170 – 190 °C เนื่องจากพบว่าการแตกตัวของชิ้นงาน ทำให้รับแรงอัดได้น้อยลงเมื่อทำการทดสอบการกด มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า 20 MPa โดยอาจจะเกิดจากความชื้นที่อยู่ในวัตถุดิบ กลายเป็นไอน้ำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดแรงดันภายในตัวถ่านชีวภาพ ทำให้ถ่านชีวภาพขยายตัวออก และเกิดรอยแตก รวมถึงเป็นผลจากการอัตราการลดอุณหภูมิของถ่านชีวภาพหลังจากที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงไม่เหมาะสม จึงเกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งเป็นที่เด่นที่นำไปศึกษาในอนาคต อย่างไรก็ตาม ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มในช่วงที่ศึกษามีความต้านทานแรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า 20 MPa ซึ่งอยู่ในเกณฑ์เป้าหมายที่ตั้งไว้เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินหรือถ่านโค้กในอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa



(a) ด้านบน 170°C



(b) ด้านข้าง 170°C



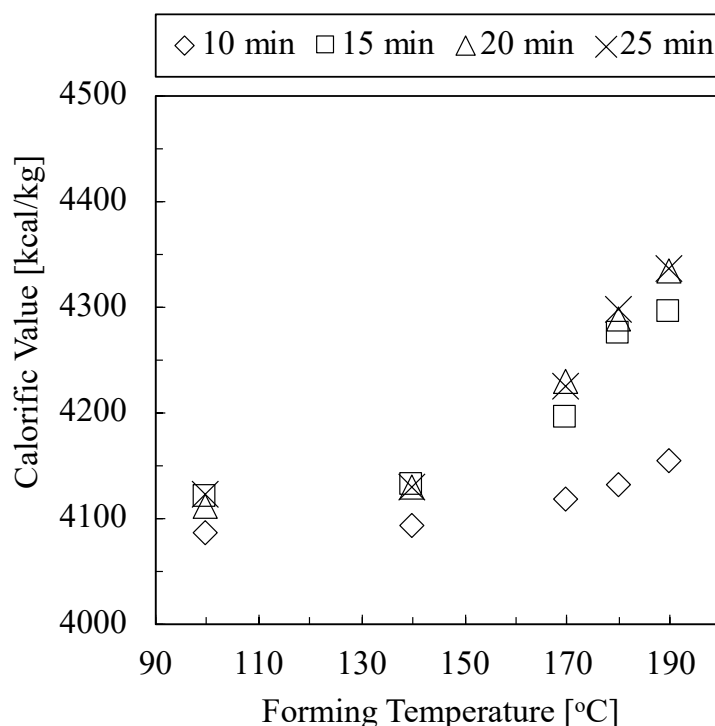
(c) ด้านบน 180°C



(d) ด้านข้าง 180°C

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์จากกากปาล์มที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 และ 180°C โดยใช้เวลาขึ้นรูป 15 นาที

รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่อุณหภูมิ 100 °C 140 °C 170 °C 180 °C และ 190 °C ตามลำดับ ที่เวลาในการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปมีผลต่อค่าความร้อนน้อยในช่วง 100 °C – 140 °C แต่ส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปมากกว่า 170 °C - 190 °C ซึ่งแสดงว่าในช่วงอุณหภูมินี้ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางเคมีและส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงขึ้น แม้ว่าค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มมีค่าความร้อนไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพจากการกากปาล์มกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดอื่นดังตารางที่ 4.2 พบว่าถ่านชีวภาพจากกากปาล์มในช่วงสภาวะที่ศึกษามีค่าความร้อนสูงกว่า 4,000 kcal/kg และความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดสูงกว่าถ่านโค้กอย่างมาก แต่เมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกันแต่ความต้านทานแรงอัดสูงสุดมีค่าน้อยกว่า ซึ่งสมบัติโดยรวมของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มอยู่ในเกณฑ์เป้าหมายที่ตั้งไว้เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินหรือถ่านโค้กในอุตสาหกรรม



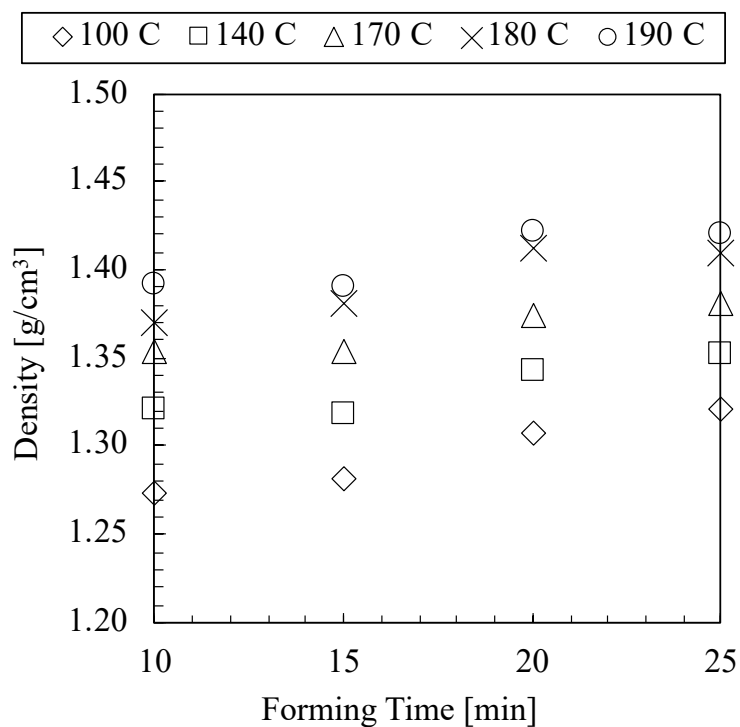
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

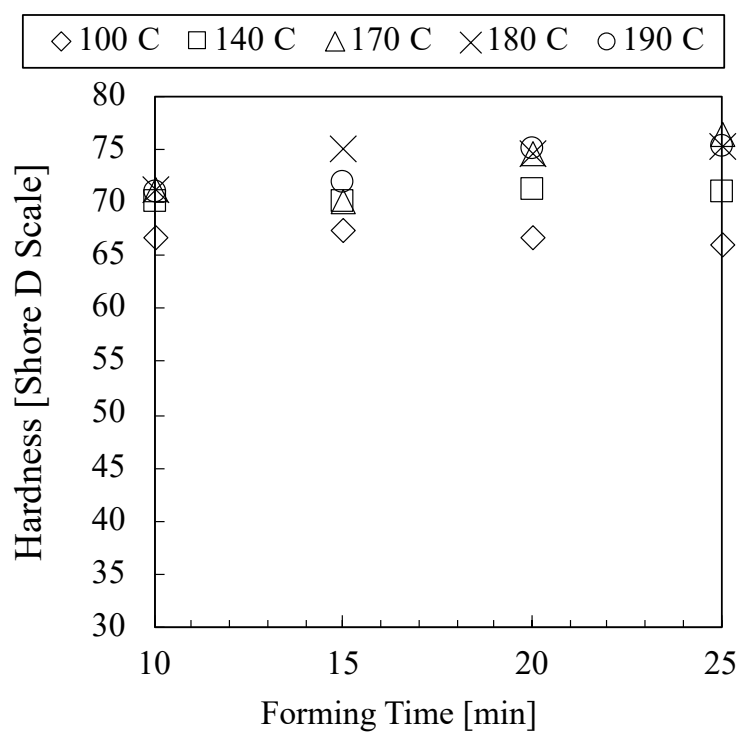
	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความต้านทาน แรงอัดสูงสุด (MPa)	ค่าความร้อน (kcal/kg)
ถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม	1.42	75	4,331
ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ [6, 7]	1.33	69	4,910
ถ่านชีวภาพจากสมุนไพรรูป [23]	1.38	127	N/A
ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่รูป [31]	1.39	110	N/A
ถ่านโค้ก [32]	1.1	20	7,000

4.3 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม

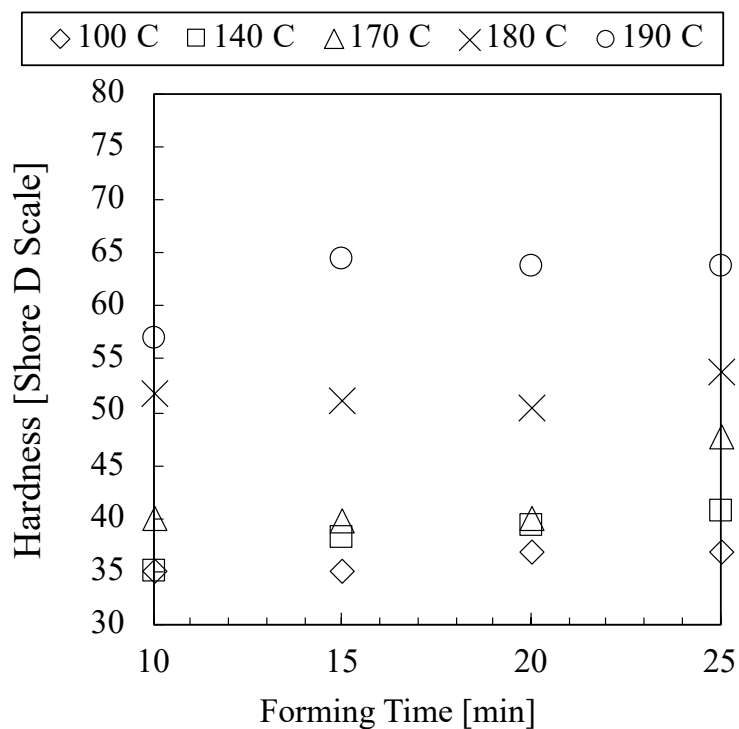
รูปที่ 4.9 - 4.13 แสดงผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความหนาแน่น ความแข็งแรง ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากปาล์มที่ได้จากการการขึ้นรูปโดยใช้เวลา 10 นาที 15 นาที 20 นาที และ 25 นาที ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความแข็งแรง และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Murata และคณะ [25] ที่กล่าวว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการขึ้นรูปขึ้นจะทำให้การยึดเกาะของอนุภาคดีขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด และค่าความร้อนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยในกรณีของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม เมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปมากกว่า 20 นาที จะไม่มีผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ แสดงว่าการใช้เวลาเพียง 20 นาทีก็เพียงพอต่อการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนสู่แกนกลางของถ่านชีวภาพ และทำให้เกิดการอ่อนตัวของลิกนินและเซลลูโลส [8, 28] ทำให้เกิดการยึดเกาะกันของอนุภาคจากปาล์ม



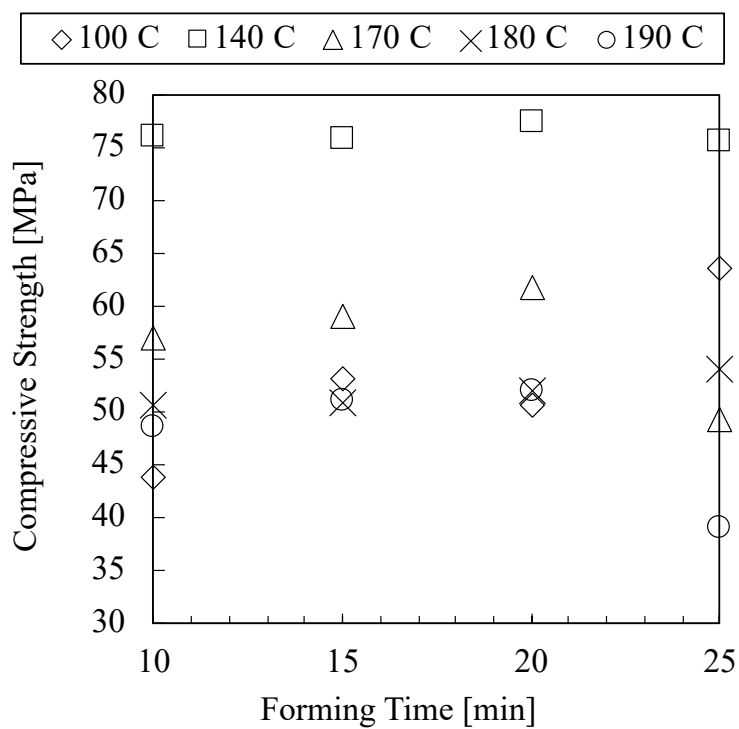
รูปที่ 4.9 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความหนาแน่นของของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa



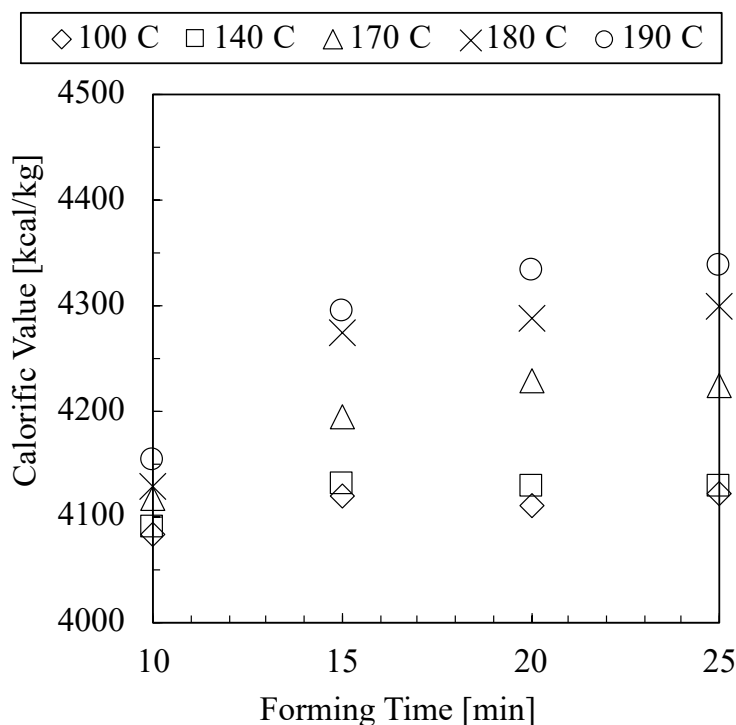
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านบน) ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความแข็งของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม (ด้านข้าง)
ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม
ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa



ที่ 4.13 ผลกระทบของเวลาในการขึ้นรูปต่อค่าความร้อนของของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม
ที่ความดันในการขึ้นรูป 16 MPa

4.4 สรุป

อุณหภูมิในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีความหนาแน่น ความแข็ง และค่าความร้อนสูงขึ้น แต่อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพมีค่าสูงขึ้น ในช่วง 100 – 140 °C โดยค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 170 – 190 °C ส่วนเวลาในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มน้อยมาก เมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความแข็ง และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบอื่นๆ และถ่านโค้กที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่ผลิตได้มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า 20 MPa ค่าความร้อน (Calorific value) ไม่น้อยกว่า 4,000 kcal/kg และความหนาแน่น (Density) ไม่น้อยกว่า 1.1 g/cm³ ซึ่งมีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินและถ่านโค้กในอุตสาหกรรมได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม โดยทำการผลิตจากกากปาล์มซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตรที่พบมากในประเทศไทย โดยใช้ชุดการทดลองการผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดขึ้นรูปร้อนแบบแนวตั้งในการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น) สมบัติทางกล (ความต้านทานแรงอัดสูงสุด และความแข็ง) และสมบัติทางความร้อน (ค่าความร้อน) โดยกำหนดสภาวะในการขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 100 – 190 °C เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 10 – 25 นาที กำหนดให้ความดันในการขึ้นรูปคงที่ที่ 16 MPa โดยใช้ปริมาณกากปาล์มครั้งละ 50 กรัม และกำหนดความชื้นของกากปาล์มที่ประมาณ 10±1 wt%

จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์ม โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีความหนาแน่น ความแข็ง และค่าความร้อนสูงขึ้น แต่อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพมีค่าสูงขึ้น ในช่วง 100 – 140 °C โดยค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 170 – 190 °C เนื่องจากพบว่ามีอาการแตกร้าวของชิ้นงาน เมื่อทำการขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว นอกจากนี้พบว่าเวลาในการขึ้นรูปส่งผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากปาล์มน้อยมาก เมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความแข็ง และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อใช้เวลาในการขึ้นรูปมากกว่า 20 นาที จะไม่มีผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่ผลิตได้มีความต้านทานแรงอัดสูงสุดไม่น้อยกว่า 20 MPa ค่าความร้อน (Calorific value) ไม่น้อยกว่า 4,000 kcal/kg และความหนาแน่น (Density) ไม่น้อยกว่า 1.1 g/cm³ จึงมีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินและถ่านโค้กในอุตสาหกรรมได้ โดยสภาวะในการขึ้นรูปที่แนะนำในการผลิตถ่านชีวภาพจากกากปาล์มที่มีความชื้นประมาณ 10±1 wt% ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 140 – 170 °C เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 20 นาที และความดันในการขึ้นรูป 16 MPa เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านโค้กและถ่านหิน

5.2 แนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง

1) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของวัตถุดิบและถ่านชีวภาพที่ได้ด้วยวิธีการทางเคมี เช่น Fourier Transform Infrared Spectrometer เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของถ่านชีวภาพเพิ่มเติม

2) ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นของวัตถุดิบ และอัตราการลดอุณหภูมิหลังจากการขึ้นรูป เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวของชิ้นงานที่อุณหภูมิการขึ้นรูปสูง และปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรม และส่งเสริมการใช้เศษวัสดุเหลือใช้ในประเทศให้เป็นประโยชน์

บรรณานุกรม

- [1] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2017,” [Online]. Available: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf). [Accessed: Mar. 10, 2019].
- [2] บริษัท ไทย แคปปิตอล คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2552. “การประกอบธุรกิจ,” [Online] Available: http://www.thaicapital.co.th/index.php/front_end/investor_relation_th3 [Accessed: Jan.7,2016].
- [3] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, “การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลของประเทศ ไทย,” *วารสารนโยบายพลังงาน*, ฉ. 55, ม.ค. – มี.ค. 2545.
- [4] I. Kazuyoshi et al., “Combustion simulation and quick-freeze observation of a cupola-furnace process using a bio-coke fuel based on tea scum,” *J. High Temp. Soc.*, vol. 35, no.2, pp. 91-96, May 2009.
- [5] P. Saisermasak, S. Cherdkeattikul, and J. Chaichanawong, “*Effect of forming temperature on properties of biocoke from leucaena wood chips*,” The 4th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2015), Matsuyama, Japan, Dec. 5-7, 2015.
- [6] S. Cherdkeattikul, K. Nantasaksiri, P. Saisermasak, and J. Chaichanawong, “*Effects of forming temperature on biocoke properties from used coffee ground*,” The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2015), Petchaburi, Thailand, December 16-18, 2015.
- [7] S. Cherdkeattikul, K. Nantasaksiri, P. Saisermasak, and J. Chaichanawong, “*Influence of forming pressure on properties of biocoke from used coffee ground*,” The 4th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2015), Matsuyama, Japan, Dec. 5-7, 2015.
- [8] W. Wongsuwan, S. Burapornpong, P. Supachutikul, S. Cherdkeattikul, K. Nantasaksiri, and J. Chaichanawong, “*Process effect of temperature on properties of biocoke from soybean residues*,” The International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM’15), Toyohashi, Japan, Oct. 4-8, 2015.
- [9] J. Chaichanawong, “*Preparation of biocoke from agricultural wastes*,” The 6th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2018), July 9-12, 2018, Kurashiki, Okayama, Japan.

- [10] J. Chaichanawong, “*Development of biocoke from rubberwood sawdust*,” The Management and Innovation Technology International Conference (MITiCON 2017), Ayutthaya, Thailand, Dec. 14-16, 2017.
- [11] J. Chaichanawong, R. Srisang, and T. Kanchana-art, “*Effect of moisture content on properties of biocoke from rubberwood sawdust*,” The 5th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (JCREN 2016), Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 7-9, 2016.
- [12] เชื้อสุตตา เชื้อสุวรรณ, “อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน”, แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63, Industry Perspectives/Krungsri Research, เม.ย. 2561.
- [13] P.J. Van Soest, J.B. Robertson, B.A. Lewis, Carbohydrate Methodology, Metabolism, and Nutritional Implications in Dairy Cattle, J. Dairy Sci., Vol. 74, pp. 3583-3597, 1991.
- [14] จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอัดแท่งจากเศษวัสดุทางการเกษตรและอุตสาหกรรมแปรรูปไม้, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), พ.ค. 2562.
- [15] จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการผลิตถ่านชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมจากชี้เลี้ยงไม้ยางพารา, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, พ.ค. 2562.
- [16] A. Brandt, J. Gräsvik, J.P. Hallett, and T. Welton, “*Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids*”, Green Chem., vol. 15, no. 3, pp. 550-583, Mar. 2013.
- [17] วาริรัตน์ เพชรลีช่วง, “อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน,” [Online]. Available: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/IO_Oil_Palm_2017_TH.aspx. [Accessed: Mar. 12, 2020].
- [18] วิทวัส จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวช ทรงธนศักดิ์, “การศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ,” [Online] Available: www.chem.eng.psu.ac.th/tiche2011/.../tes007.pdf [Accessed: Jan.7, 2016]
- [19] Thai Sumi Co. Ltd., “การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลในประเทศไทย”, [Online] Available: <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php> [Accessed: Jan. 7, 2016].
- [20] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, “พลังงานจากชีวมวล,” ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP. [Online] Available : <http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/index.php/en/knowledge/informationrepack/392-biomass-energy?showall=&start=2>. [Accessed: Dec. 25, 2020].

- [21] T. Ida, Y. Kawami, J. Satou, “Biocokes producing method and apparatus,” US 20120168296 A1, Jul. 5, 2012.
- [22] S. Mizuno et al., “Scale effect of compressive strength properties under high temperature, for green tea bio-coke,” *J. Jap. Soc. Exp. Mechanics*, vol. 13, no. 2, pp. 190-193, Dec., 2013.
- [23] S. Mizuno et al., “Formation characteristics of high density and high hardness new briquette based on herby biomass,” *J. Japan Inst. Technol.*, vol. 31, no.1, pp. 41-47, Feb. 2011.
- [24] T. Sawai et al., “Compressive strength properties of bio-solid fuel made from pruned branch,” *J. High Temp. Soc.*, vol. 36, no.1, pp. 36-40, May 2011
- [25] H. Murata et al., “An experimental study for functional improvement of woody bio-coke by addition of rice bran,” *J. Smart Proc.*, vol.3, no.5, pp. 283-288, Jul. 2014.
- [26] B. Hill and D.A. Pulkinen, “*A Study of Factors Affecting Pellet Durability and Pelleting Efficiency in the Production of Dehydrated Alfalfa Pellets*,” (A Special Report), Tisdale, SK, Canada: Saskatchewan Dehydrators Association, 1998.
- [27] สำรวม โกศลนันท์, “การศึกษาอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงจากกากไขมันและกากของกากไขมันกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2553.
- [28] D. A. I. Goring, “*Thermal Softening, Adhesive Properties and Glass Transitions in Lignin, Hemicellulose and Cellulose*,” [Online] Available: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/02/1965.1.555.pdf>. [Accessed: March 12, 2020].
- [29] J. Chaichanawong, S. Cherdkeattikul, and P. Supachutikul, “preparation of biocoke from coffee grounds,” The International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM’15), Toyohashi, Japan, Oct. 4-8, 2015.

- [30] ณัฐภรณ์ สุวรรณาคี และ จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, “ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากมะพร้าว,” การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 8 – 10 พ.ย. 2559.
- [31] Y. Torii et al., “Forming characteristics of bio-coke with a mixture of bamboo and carbonized Japanese cedar,” *J. Smart Proc.*, vol.1, no.2, pp. 63-70, Jan 2013.
- [32] Mizuho Information and Research Institute, “*Project for Promoting the Spread of Technologies to Counter Global Warming*,” Bangkok: Mizuho Information and Research Institute, Inc., 2015.

ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์

ผลงานตีพิมพ์ในวารสาร และรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- [1] P. Saisermasak, and **J. Chaichanawong**, "Effect of forming temperature on properties of biocoke from palm oil residues," *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, no. 1, pp. 012025, Jan. 2020.
- [2] **J. Chaichanawong**, and T. Ida, Current Situation of Biomass Energy and Development of Biocoke Technology in Thailand, *J. Smart Processing*, vol. 8, no. 6, pp. 235-242, Nov. 2019.
- [3] **J. Chaichanawong**, and T. Ida, "Development of biocoke for industrial utilization in Thailand", *The International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)*, Okinawa, Japan, Jun. 25–28, 2019.