



รายงานฉบับสมบูรณ์

การผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
Production of Biocoke from Agricultural Residues

ผศ.ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

Asst. Prof. Jintawat Chaichanawong, D.Eng.

TNI
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

พ.ศ. 2559

บทสรุปผู้บริหาร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยทำการผลิตถ่านชีวภาพ (Biocoke) จากกากกาแฟ ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่พบมากในประเทศไทย เพื่อศึกษาปัจจัยในการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อ คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นรวม) คุณสมบัติทางความร้อน (ค่าความร้อน) คุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงอัดสูงสุด) วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยกำหนดเงื่อนไขการผลิต ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการผลิต คือ 10 15 และ 20 นาที ความดันที่ใช้ในการผลิต คือ 10 12 14 และ 16 MPa และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต คือ 150 160 170 180 และ 190 °C เป็นตัวแปรต้น รวม 60 ตัวอย่าง

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ พบว่าปัจจัย อุณหภูมิการผลิต และ ความดันการผลิต ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นรวม) และคุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงอัดสูงสุด) ในทางบวกอย่างชัดเจน คือเมื่อถ่านชีวภาพมีความหนาแน่นรวมสูงจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดสูงตามไปด้วย โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ คือ ความดันและเวลาที่ใช้ในการผลิต หากความดันในการผลิตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพลดลง แต่ค่าความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการผลิตมากขึ้น แต่ปัจจัยทั้งสองที่กล่าวมานี้ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด คือ อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ใช้ในการผลิตตามลำดับ โดยทั้งสามปัจจัยการผลิตนี้ส่งผลในเชิงบวกต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากหากใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการผลิต ในกรณีของเวลาที่ใช้ในการผลิตจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด

สภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิการผลิต 190 °C ความดัน 16 MPa เวลา 10 นาที เนื่องจากสภาวะการผลิตดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านโคก้อย่างมาก และมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับสภาวะการผลิตอื่นๆ ดังนั้นจึงพิจารณาที่เวลาที่ใช้ในการผลิต ซึ่งหากนำไปต่อยอดการผลิตในปริมาณมาก เวลาในการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ Prof. Tamio Ida (Kinki University) และ Mr. Hirotoshi Murata (Naniwa Roki Co., Ltd.) ที่ให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์อุปกรณ์การวิจัยสำหรับใช้ในการทำงานวิจัย จนโครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัทอินเตอร์ คลินส์ อินดัสตรีส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการซ่อมบำรุงเตาเผาแบบท่อสำหรับใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาวสุพิชญา เชิดเกียรติกุล นายมรรณพ พักขาว นางสาวสิรี บุราภรณ์พงศ์ และ นางสาวปิ่นทิพย์ ปิ่นทิพย์ ศุภชติกุล (ผู้ช่วยวิจัยประจำโครงการ) นายภีรเดช สายเสริมศักดิ์ (นักศึกษาปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมการยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่ร่วมทำงานวิจัยจนโครงการนี้สำเร็จ

หากเกิดความผิดพลาดใดในงานวิจัย ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีที่จะนำข้อเสนอแนะไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ผศ.ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์
หัวหน้าโครงการวิจัย

TNI

TAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
กิตติกรรมประกาศ	ii
สารบัญ	iii
สารบัญตาราง	v
สารบัญรูป	vi
 บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	8
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 หลักการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง	18
2.3 งานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 กำหนดขอบเขตงานวิจัย	25
3.2 การจัดหาวัตถุดิบ	30
3.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการทดลอง	30
3.4 การทดลอง	30
3.5 การตรวจสอบคุณสมบัติ	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ผลการวิจัย	37
4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ	37
4.2 สมบัติทางความกลของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ	40
4.3 สมบัติทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ.....	42
4.4 โครงสร้างระดังจุลภาคของถ่านชีวภาพผลิตจากกากกาแฟ.....	44
4.5 สรุป	47
5 สรุปผลการวิจัย	49
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	49
5.2 แนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง.....	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก	56
ผลงานตีพิมพ์.....	56



TNI

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ความต้องการการใช้พลังงานหลักของประเทศในกลุ่มอาเซียนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 ถึงปัจจุบันและการคาดการณ์จนถึง ค.ศ. 2035	2
1.2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามชนิดพลังงาน.....	4
1.3 สถิติการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยระหว่าง ค.ศ. 2011 – 2013.....	5
1.4 แผนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย	6
1.5 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ค.ศ. 2013.....	6
1.6 การใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานทดแทน.....	6
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของกากกาแฟ (Used Coffee Ground).....	11
2.2 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน.....	13
2.3 ตารางค่าความร้อนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในไทย	14
2.4 สมบัติของถ่านโค้กแต่ละชนิด.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยถ่านชีวภาพ	24
3.1 ตารางการทดลองที่สภาวะการผลิตต่างๆ	27
4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชีวภาพ	48

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 กราฟแสดงปริมาณการบริโภคพลังงานหลักทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 ถึงปัจจุบัน และการคาดการณ์จนถึงปี ค.ศ. 2035	1
1.2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและพลังงานทดแทนขั้นสุดท้าย ค.ศ. 2013	4
2.1 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดแน่นตั้งก่อนติดตั้งกระบอกลัดและฮีตเตอร์	9
2.2 ภาพจำลองเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง	10
2.3 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอน	10
2.4 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส	12
2.5 โมเลกุลของเพกทิน บริเวณผนังเซลล์ของพืช	12
2.6 ชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellet)	14
2.7 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะชุมชนในประเทศไทย	15
2.8 ถ่านโค้ก	16
2.9 เตา Cupola Furnace	17
2.10 ภาพจำลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์	18
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	20
3.1 แผนผังการดำเนินงาน	25
3.2 ภาพวัตถุติดก่อนนำเข้าตู้อบ	30
3.3 แผนผังขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ	31
3.4 ภาพถ่ายเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้งก่อนติดตั้งกระบอกลัด และฮีตเตอร์ไฟฟ้า	32
3.5 ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง	32
3.6 ภาพถ่าย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 และ RTD Band 3 Pt-100	35
3.7 ภาพถ่าย EL36-4145/01 ADR Auto 2000/250 EN Compression Machine	35
3.8 ภาพถ่าย เครื่อง EVO MA10 Versatile Multipurpose SEM	36
4.1 ลักษณะของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ ที่ เวลา 15 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180 °C	37

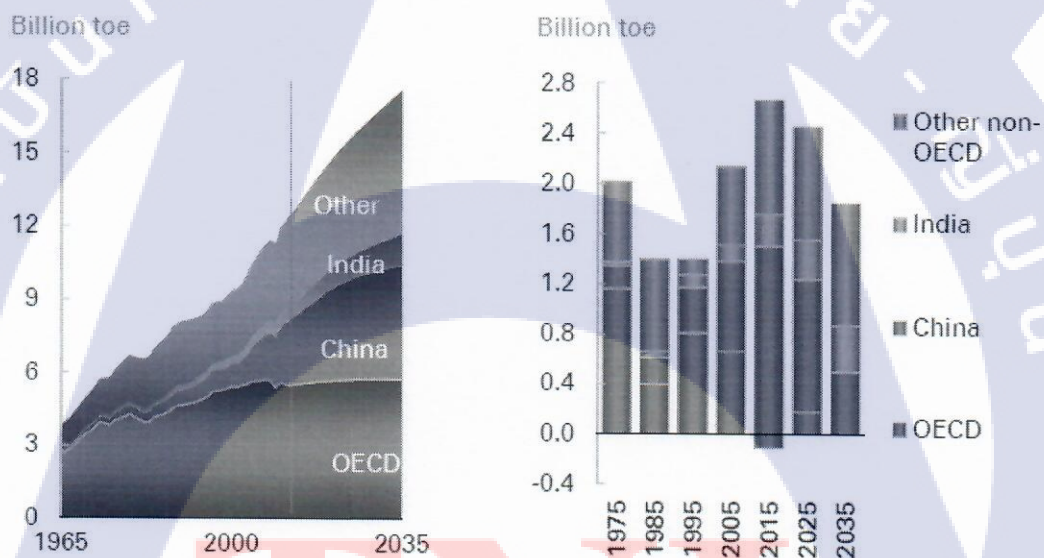
สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที 38
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที 39
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 20 นาที 39
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที 40
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที 41
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 20 นาที 41
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที 42
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที 43
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที 43
4.11	การเปรียบเทียบค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ใช้ในประเทศไทย..... 44
4.12	ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่เงื่อนไขการผลิต เวลา 20 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180 °C..... 45
4.13	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 180 °C ... 45
4.14	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เวลา 15 นาที ความดัน 16 MPa . 47

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยีทั่วโลก ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงาน โดยเฉพาะพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน ก๊าซ และถ่านหิน เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรม การขนส่งสินค้า เครื่องเรือน ฯลฯ ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงดังกล่าว เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy) พลังงานน้ำ (Hydroelectric Energy) และชีวมวล (Biomass)



รูปที่ 1.1 การบริโภคพลังงานหลักทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 ถึงปัจจุบันและการคาดการณ์จนถึง ค.ศ. 2035 [1]

BP Public Limited Company ได้รายงานแนวโน้มพลังงานโลก [1] ซึ่งความต้องการพลังงานหลักของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 41% ในช่วง ค.ศ. 2012-2035 แสดงใน รูปที่ 1.1 โดยประมาณการอัตราการขยายตัวเฉลี่ยของการใช้พลังงานในช่วง ค.ศ. 2005-2015 ประมาณ 1.5% ต่อปี ค.ศ. 2015-2025 ประมาณ 1.7% ต่อปี และ ค.ศ. 2025-2035 ประมาณ 1.1% ต่อปี

ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณความต้องการการใช้พลังงานหลักของประเทศในกลุ่มอาเซียน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 ถึงปัจจุบันและการคาดการณ์จนถึง ค.ศ. 2035 (Mtoe) ประเทศที่อยู่ในองค์กรความร่วมมือและพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ (Organization for Economic Cooperation and Development : OECD) มีแนวโน้มอัตราการใช้พลังงานที่ค่อนข้างคงที่ในช่วง ค.ศ. 2012-2030 โดยมีอัตราการขยายตัวเพียงแค่ 0.2% ต่อปี และมีแนวโน้มจะลดลงในตั้งแต่ ค.ศ. 2030 เป็นต้นไป ในทางตรงกันข้ามประเทศที่ไม่ใช่สมาชิกองค์กรความร่วมมือและพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ (Non-Organization for Economic Cooperation and Development : Non OECD) มีอัตราการขยายตัว 2.3% ต่อปี

ตารางที่ 1.1 ความต้องการการใช้พลังงานหลักของประเทศในกลุ่มอาเซียนตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 ถึงปัจจุบันและการคาดการณ์จนถึง ค.ศ. 2035 (Mtoe) [2]

Country	Year					
	1990	2011	2020	2025	2035	2011-2035
Indonesia	89	196	252	282	358	2.50%
Malaysia	21	74	96	106	128	2.35%
Philippines	29	40	58	69	92	3.50%
Thailand	42	118	151	168	206	2.30%
Rest of ASEAN	42	119	161	178	221	2.60%
Total ASEAN	223	549	718	804	1004	2.50%

ประเทศในกลุ่มอาเซียนซึ่งเป็นประเทศที่อยู่ในกลุ่ม Non OECD มีความต้องการการใช้พลังงานหลักที่เพิ่มขึ้น 83% ในช่วงระยะเวลาประมาณการจาก 549 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบใน ค.ศ. 2011 เป็น 1004 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบใน ค.ศ. 2035 อัตราการเติบโตเฉลี่ยจะลดลงจาก 3% ต่อปี เป็น 2.3% ต่อปีในช่วง ค.ศ. 2020 - 2035 โดยที่ประเทศในกลุ่มอาเซียนนั้นยังพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลประมาณ 80%

ในประเทศไทยมีการจัดทำสถิติการใช้พลังงานของประเทศใน ค.ศ. 2013 โดยกระทรวงพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศไทยซึ่งมีประมาณ 75,000 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้า 2.6% โดยแบ่งเป็นการใช้พลังงานในเชิงพาณิชย์(น้ำมันสำเร็จรูป ไฟฟ้า ถ่านหิน ลิกไนต์และก๊าซธรรมชาติ) พลังงานหมุนเวียน(แสงอาทิตย์ ฟืน วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ขยะและก๊าซชีวภาพ) และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม (ฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร) [3]

แต่เนื่องจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลส่งผลโดยตรงต่อปัญหาภาวะทางอากาศซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ปัญหาดังกล่าวนี้นี้เห็นได้ชัดจากอุณหภูมิของพื้นผิวโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา และการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ จากรายงานของ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเดือนมีนาคม 2015 มีค่าสูงกว่า 400 ppm (parts per million) ซึ่งสูงสุดตั้งแต่ที่ได้มีการบันทึกมา [4]

จากผลกระทบเรื่องมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้และปัญหาการผันผวนของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล ภาครัฐส่วนต่างๆทั่วโลก รวมไปถึงรัฐบาลไทยได้มีการส่งเสริมให้ภาคส่วนต่างๆ ส่งผลให้เกิดการลงทุนด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทนมากขึ้น ซึ่งการลงทุนของทั้งภาครัฐและเอกชนด้านพลังงานทดแทนใน ค.ศ. 2013 มีมากกว่า 70,000 ล้านบาท [5]

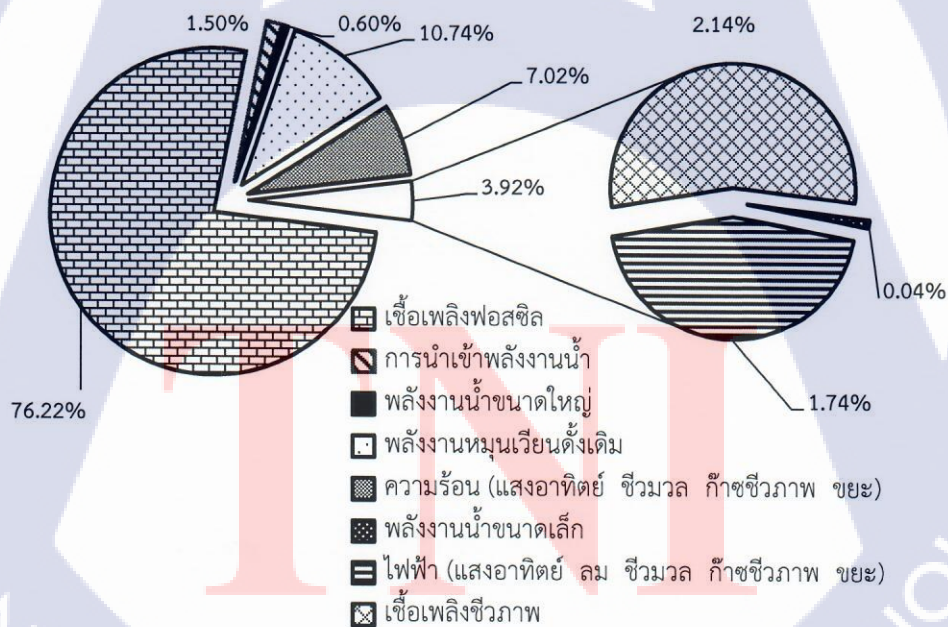
จาก ตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่ามีการใช้พลังงานหมุนเวียนและพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมในอัตราที่สูงขึ้นมากซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการส่งเสริมด้านพลังงานทดแทนของภาครัฐ โดยที่ปริมาณการใช้พลังงานหมุนเวียนและพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิมมากกว่าปริมาณการใช้น้ำมันดิบและลิกไนต์ถึง 11,624 ktoe ในค.ศ. 2013

TNI

TAHITI - NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ตารางที่ 1.2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามชนิดพลังงาน [3]

การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (จำแนกตามชนิดพลังงาน)	ปริมาณ (ktoe)			อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
	ค.ศ. 2011	ค.ศ. 2012	ค.ศ. 2013	ค.ศ. 2012	ค.ศ. 2013
การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย(รวม)	70,143	74,639	78,077	6.4	4.6
● พลังงานเชิงพาณิชย์	48,344	52,704	52,736	9	0.1
- น้ำมันดิบ	6,859	7,444	7,363	8.5	-1.1
- ลิกไนต์	5,992	4,754	4,459	-20.7	-6.2
- ก๊าซธรรมชาติ	31,310	36,006	36,405	15	1.1
- คอนเดนเตส	4,183	4,500	4,509	7.6	0.2
● พลังงานหมุนเวียน	6,623	8,785	9,709	32.6	10.5
● พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม	14,045	11,751	13,739	-16.3	16.9
● เชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอล และไบโอดีเซล)	919	1,259	1,609	37	27.8
● พลังงานอื่นๆ	212	140	284	-34	102.9



รูปที่ 1.2 การใช้พลังงานขั้นสุดท้ายและพลังงานทดแทนขั้นสุดท้าย ค.ศ. 2013 [5]

จากรูปที่ 1.2 และตารางที่ 1.3 แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุด ประมาณ 5,279 ktoe หรือคิดเป็น 7.02 % ของปริมาณการใช้พลังงานทดแทนใน ค.ศ. 2013

ตารางที่ 1.3 สถิติการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยระหว่าง ค.ศ. 2011 – 2013 [5]

การใช้พลังงานทดแทน	ปริมาณ			อัตราการเปลี่ยนแปลง
	(ktoe)			(%)
	ค.ศ. 2011	ค.ศ. 2012	ค.ศ. 2013	ค.ศ. 2013
ไฟฟ้า (แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ขยะ และ ก๊าซชีวภาพ)	372	1,138	1,341	17.8
ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และ ก๊าซชีวภาพ)	5,129	4,886	5,279	8
เชื้อเพลิงชีวภาพ				
- เอทานอล	331	430	707	64.4
- ไบโอดีเซล	547	840	905	7.7
รวม	6,379	7,294	8,232	12.8

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้มีการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกขึ้นเพื่อวางเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนชนิดต่างๆ ภายในปี ค.ศ. 2036 โดยมีกำลังการผลิตในปี ค.ศ. 2014 ประมาณ 7,279 MW และมีเป้าหมายการผลิตในปี ค.ศ. 2036 อยู่ที่ประมาณ 19,635 MW ซึ่งพลังงานทดแทนประเภทชีวมวลมีเป้าหมายการผลิตสูงมาก [6]

จาก ตารางที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลปริมาณมากกว่าพลังงานทดแทนประเภทอื่นโดยมีกำลังการผลิตใน ค.ศ. 2014 ประมาณ 2,199 MW และมีแผนนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 5,570 MW ใน ค.ศ. 2036

ตารางที่ 1.4 แผนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย [6]

ประเภทของพลังงาน	กำลังการผลิต ค.ศ. 2014 (MW)	เป้าหมายการผลิต ค.ศ. 2036
		(MW)
● พลังงานทดแทน		
- พลังงานแสงอาทิตย์	1,570	6,000
- พลังงานลม	220	3,002
- พลังงานน้ำ	3,016	3,282
- เชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย (MSW)	48	501
- ชีวมวล	2,119	5,570
- ก๊าซชีวภาพ	226	600

ตารางที่ 1.5 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ค.ศ. 2013 [5]

ประเภทของพลังงาน	กำลังการผลิต (MW)	ปริมาณ (ktoe)
พลังงานแสงอาทิตย์	823.5	92
พลังงานลม	222.7	26
พลังงานน้ำขนาดเล็ก	108.8	28
เชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย (MSW)	47.5	25
ชีวมวล	2,320.8	1,039
ก๊าซชีวภาพ	265.2	131

ตารางที่ 1.6 การใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานทดแทน ค.ศ. 2013 [5]

ประเภทของพลังงาน	หน่วย Physical Unit	ปริมาณ (ktoe)
พลังงานแสงอาทิตย์	191,788 GJ	5
เชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย (MSW)	740 kton	85
ชีวมวล	20,997 kton	4,694
ก๊าซชีวภาพ	1,422,607,973 m ³	495

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและเศษอาหารที่ถูกทิ้งมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนประเภทชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเป็นทางเลือกในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าหรือนำมาใช้เป็นพลังงานที่ให้ความร้อน เห็นได้จาก ตารางที่ 1.5 และ 1.6 ประเทศไทยมีการใช้ชีวมวลเพื่อการผลิตไฟฟ้า 2,320.8 MW และใช้เป็นพลังงานที่ให้ความร้อน 4,694 ktoe

ถ่านชีวภาพ (Biocoke) เป็นชีวมวลก่อนที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและเศษอาหาร ด้วยกระบวนการอัดร้อนที่ความดันสูง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชีวมวล โดยปราศจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization Process) ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความหนาแน่นสูง ประมาณ $1.1 - 1.3 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสูงกว่าชีวมวลก่อนที่ผลิตจากกระบวนการอื่นตัวอย่างเช่น ชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pallet) ประมาณ 3 เท่า ทำให้ลดพื้นที่ในการขนส่งได้ มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงที่สุดสูง และมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านโค้ก จึงสามารถใช้เป็นพลังงานที่ให้ความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมและการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยที่ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ความดันที่ใช้ในการผลิต ความชื้นของวัตถุดิบ ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คือ สารลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่พบมากบริเวณผนังเซลล์ของพืช ประกอบด้วยสารลิกนิน (Lignin) เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ เพกติน (Pectin) [7]

ผู้วิจัยเล็งถึงโอกาสในการนำกากกาแฟใช้แล้วซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือใช้ที่หาได้ง่าย โดยมีปริมาณการผลิตทั่วโลก ค.ศ. 2013 ประมาณ 8,676 ตัน [8] โดยทั่วไปกากกาแฟที่ใช้แล้วจะมีปริมาณน้ำมันประมาณ 0-15% [9] และมีส่วนประกอบทางเคมีที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ (Biocoke) และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นพบว่าตัวอย่างกากกาแฟที่นำมาเป็นวัตถุดิบของงานวิจัยการผลิตถ่านชีวภาพด้วยเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งนี้มีสารลิกนิน 39.97% เซลลูโลส 18.38 %wt. เฮมิเซลลูโลส 22.95 %wt. โดยที่ %wt. คือ ร้อยละโดยน้ำหนักสารต่อ น้ำหนักแห้งของกากกาแฟ และจากการศึกษาวิจัยของ Adriana Farah [10] พบว่าในเมล็ดกาแฟมีสารเพกติน (Pectin) ซึ่งเป็นสารที่พบบริเวณผนังเซลล์ของพืช ประมาณ 2 %wt. มากไปกว่านั้นยังมีการใช้กากกาแฟเป็นส่วนผสมในการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ไม้ชนิดต่างๆ ในประเทศญี่ปุ่นอีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงทำการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟใช้แล้ว ด้วยเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง และศึกษาผลกระทบของสภาวะการผลิตต่อสมบัติถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 กรรมวิธีการผลิต

ทำการผลิตถ่านชีวภาพด้วยเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง ซึ่งมีขนาดของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ โดยวัตถุดิบดังกล่าวคือกากกาแฟ กำหนดให้มีปริมาณกากกาแฟ 50 g (± 0.01) ต่อการผลิต 1 ครั้ง

1.3.2 การศึกษาผลกระทบของการผลิต

ศึกษาผลกระทบของสภาวะการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ โดยการปรับตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1.) ความชื้นของวัตถุดิบมีค่า 5 - 10 %
- 2.) ขนาดของกากกาแฟมีขนาดเล็กกว่า 1000 Micron
- 3.) ความดันที่ใช้ในการผลิตอยู่ในช่วง 1.0 - 1.6 MPa
- 4.) อุณหภูมิในการผลิตอยู่ในช่วง 150 - 190 °C
- 5.) เวลาในการผลิตอยู่ในช่วง 10 - 20 นาที

1.3.3 การศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

การตรวจสอบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ การหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ค่าความร้อน (Calorific value) ความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis) และการวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านชีวภาพ (Scanning Electron Microscopy)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลกระทบของปัจจัยการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล สามารถนำผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟไปปรับปรุงและพัฒนาการผลิตต่อไปได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

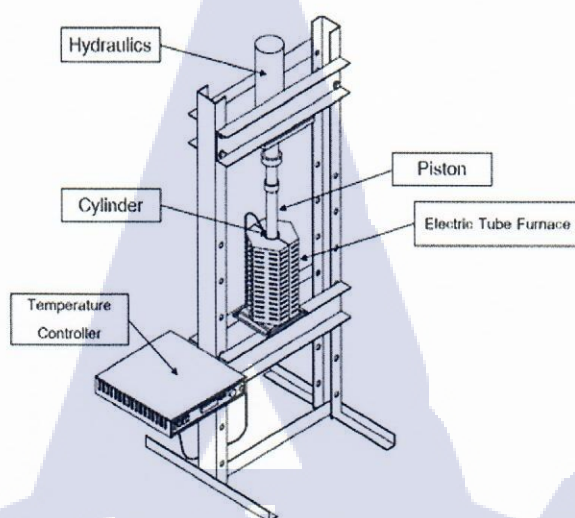
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ถ่านชีวภาพ (Biocoke)

ถ่านชีวภาพเป็นชีวมวลก้อนแข็งที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษอาหาร และเศษวัสดุจากอุตสาหกรรม ถ่านชีวภาพให้ค่าความร้อนสูง และมีค่าความหนาแน่นสูง สามารถใช้แทนถ่านโค้กในอุตสาหกรรมได้ และช่วยลดการเกิดมลพิษ จากข้อมูลการตลาดเบื้องต้นในการผลิตถ่านชีวภาพจากเศษวัสดุทางการเกษตรและของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรของ ห้องวิจัยกระบวนการวัสดุขั้นสูง ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น พบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าความร้อนประมาณ 3,000-6,000 kcal/kg และค่าความหนาแน่นประมาณ 1.1-1.3 g/cm³ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และจากงานวิจัยของ Ito et al [11] พบว่าถ่านชีวภาพที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47.75 ± 0.5 mm สูง 85 mm มีค่าความหนาแน่นประมาณ 1.3 g/cm³ ซึ่งมากกว่าชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellet) ประมาณ 3 เท่า

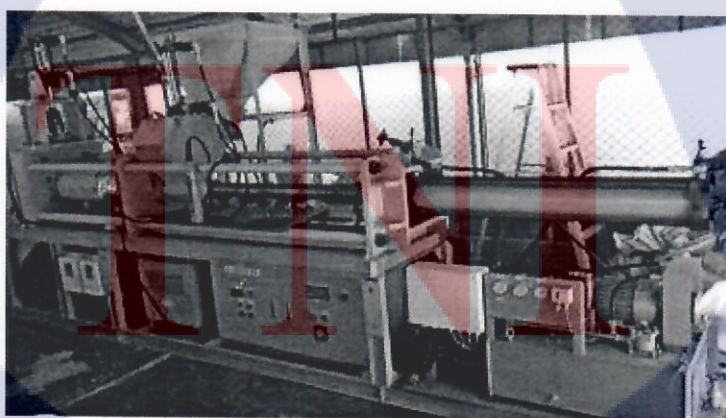


รูปที่ 2.1 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดแนวตั้งก่อนติดตั้งกระบอกลัดและฮีตเตอร์



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง [12]

รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องผลิตถ่านชีวภาพด้วยการอัดแนวตั้งก่อนติดตั้งกระบอกอัดและฮีตเตอร์ และรูปที่ 2.2 แสดงภาพจำลองเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งหลังจากติดตั้งสำหรับการทดลอง เนื่องจากเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้งนั้นออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ไม่เหมาะสมในการผลิตในปริมาณมาก สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพในปริมาณมากจะใช้เครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถใช้ผลิตถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบที่มีปริมาณมากได้ โดยมีกำลังการผลิตประมาณ 96 ชิ้นต่อวัน



รูปที่ 2.3 เครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวนอน

2.1.2 กาแฟคั่วบด (Used Coffee Ground)

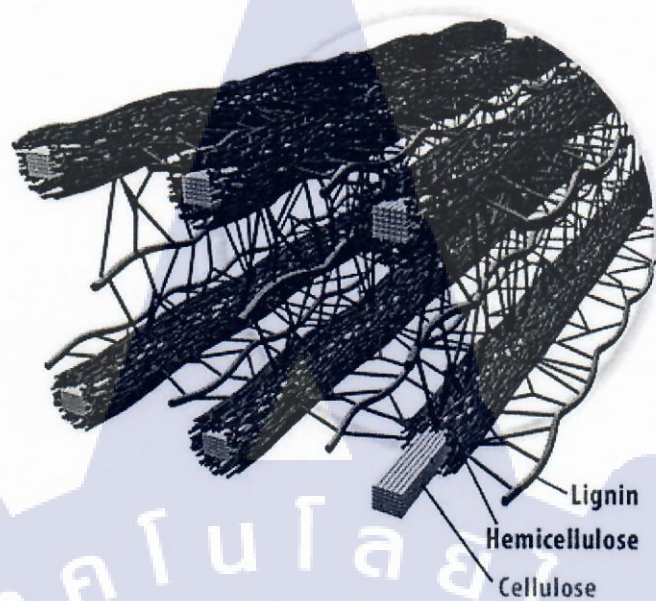
กาแฟคั่วบดซึ่งในที่นี้หมายถึงวัสดุที่เหลือทิ้งของกาแฟคั่วบด (Ground Roasted Coffee) หลังจากที่ได้ผ่านกรรมวิธีสกัดสารที่ละลายในน้ำได้ออกไปแล้ว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรอีกชนิดหนึ่งที่หาได้ง่ายในปัจจุบัน จากรายงานของการผลิตกาแฟทั่วโลกของ International Coffee Organization [8] พบว่ามีการผลิตเมล็ดกาแฟใน ค.ศ. 2013 ประมาณ 8,676,000 ตัน ทำให้ปริมาณกากกาแฟนั้นสูงตามไปด้วย จาก ตารางที่ 2.1 พบว่ากากกาแฟมีส่วนประกอบของลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของกากกาแฟ (Used Coffee Ground) [13]

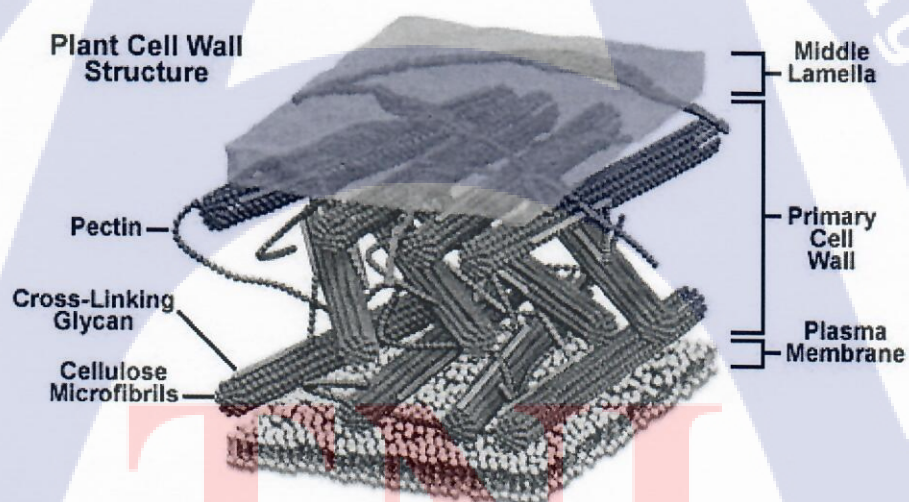
ส่วนประกอบทางเคมี	%
Crude protein	10–12
Crude fiber	35–44
Lignin	13–16
Cellulose	22–28
Lipids (ether extract)	22–27
Minerals	0.3-1

2.1.3 ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose)

ลิกโนเซลลูโลสเป็นวัสดุผสมที่สังเคราะห์โดยเซลล์พืช โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส [14] เรียงตัวกันตามรูปที่ 2.4 ซึ่งจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันในชีวมวลประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [12] นอกจากนั้นบริเวณผนังเซลล์ของพืชยังมีเพกทิน (Pectin) [14, 15] ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ของพืช รวมอยู่กับเซลล์ของเซลลูโลสอีกด้วย



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส [16]



รูปที่ 2.5 โมเลกุลของเพกทิน บริเวณผนังเซลล์ของพืช [14]

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน [15]

ชนิดของวัตถุดิบ	% เซลลูโลส	% เฮมิเซลลูโลส	% ลิกนิน	% อื่นๆ
ฟางข้าว	38	36	16	10
ต้นข้าวโพด	53	15	16	16
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
ไม้ไผ่	76	26	27	7

2.1.4 ชีวมวล (Biomass)

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [17] ได้ให้ความหมายคำว่า ชีวมวล ไว้ในรายงานเรื่องชีวมวลว่า “สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร” ชีวมวลประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นธาตุหลัก ผลิตจาก เศษไม้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และสิ่งปฏิกูล นอกจากนี้ชีวมวลยังสามารถเปลี่ยนไปเป็นสถานะก๊าซ เช่น มีเทน หรือสถานะของเหลว เช่นเอทานอลและไบโอดีเซลได้อีกด้วย

ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงทำให้ปริมาณของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีมาก ประกอบกับค่าความร้อนที่ได้จากการทำชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหมาะสมในการใช้เป็นพลังงานทดแทน ทำให้มีปริมาณการผลิตชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม ฯลฯ สูง จากตารางที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลสูงถึง 1,752 MW และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 ตารางค่าความร้อนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในไทย [15]

ชนิด	วัสดุเหลือใช้	ค่าความร้อน (kcal/kg)	ชนิด	วัสดุเหลือใช้	ค่าความร้อน (kcal/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	3,439	มะพร้าว	เปลือก	3,876
	ยอดและใบ	4,153		กะลา	4,282
ข้าว	แกลบ	3,408		ทะลาย	3,678
	ฟางข้าว	2,445		ทาง	3,821
น้ำมันปาล์ม	ทะลายปาล์ม	4,265	มันสำปะหลัง	ต้น	4,399
	เส้นใย	4,208	ข้าวโพด	ซัง	4,356
	กะลา	4,409	ถั่วลิสง	เปลือก	3,023
	กากทาง	2,347	ฝ้าย	ลำต้น	3,460
	ทะลายตัวผู้	3,900	ถั่วเหลือง	ลำต้นและใบ	4,643
เศษไม้	กิ่งก้าน	3,577	ข้าวฟ่าง	ใบและต้น	4,593

2.1.5 ชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellet)

ชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงที่ทำจากเศษไม้ซึ่งมีความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ประมาณ 0.7 g/cm^3 มีความชื้นต่ำทำให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง มีปริมาณขี้เถ้าต่ำกว่าชีวมวลประเภทอื่นประมาณ 3 % และสามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเนื่องจากมีขนาดและน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมาก [18] ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellet) [19]

2.1.6 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะชุมชน (Municipal Solid Waste Gasification: MSW Gasification)

จากรายงานเรื่องพลังงานจากขยะสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [18] ได้ให้คำนิยามเทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะชุมชนไว้ว่า “เป็นกระบวนการทำให้ขยะเป็นก๊าซโดยการทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion) โดยสารอินทรีย์ในขยะจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนปริมาณจำกัด ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งนำไปผลิตไฟฟ้าหรือให้ความร้อนโดยตรงต่อไป” ตัวอย่างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะชุมชนในประเทศไทยแสดงดัง **รูปที่ 2.7** แต่เทคโนโลยีนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทย แต่ในทวีปอเมริกาเหนือ ทวีปยุโรป รวมไปถึงประเทศญี่ปุ่น เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้อย่างแพร่หลายมาก เนื่องจากประเทศเหล่านี้มีการจัดการขยะ สามารถแยกชนิดของขยะเพื่อนำกลับมารีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.7 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะชุมชนในประเทศไทย [20]

2.1.7 ถ่านโค้ก (Coke)

ถ่านโค้กดังรูปที่ 2.8 เป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เกิดจากการนำถ่านหิน (Coal) ชนิดบิทูมินัส มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ในเตาอิฐที่อุณหภูมิ 1,100 °C โดยใช้เวลาประมาณ 14-36 ชั่วโมง [21] ถ่านโค้กนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 80-90% ทำให้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนได้เป็นอย่างดี ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กจะนำถ่านโค้กที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วผสมกับแร่เหล็กและหินปูนใส่ลงในเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace) ถ่านโค้กที่ดีควรมีค่า Compressive strength (ความต้านทานแรงอัด) สูงเนื่องจากจะต้องรองรับแรงจากแร่เหล็กในเตาหลอม และควรมีกำมะถันน้อยเพราะจะทำให้เหล็กเกิดความเปราะได้และเกิดมลภาวะทางอากาศสูง [22] อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศสูง

และถ่านหินที่มีคุณภาพดีต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก จึงมีความไม่มั่นคงทางด้านพลังงานในอนาคตหากต้องพึ่งพาการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก



รูปที่ 2.8 ถ่านโค้ก [23]

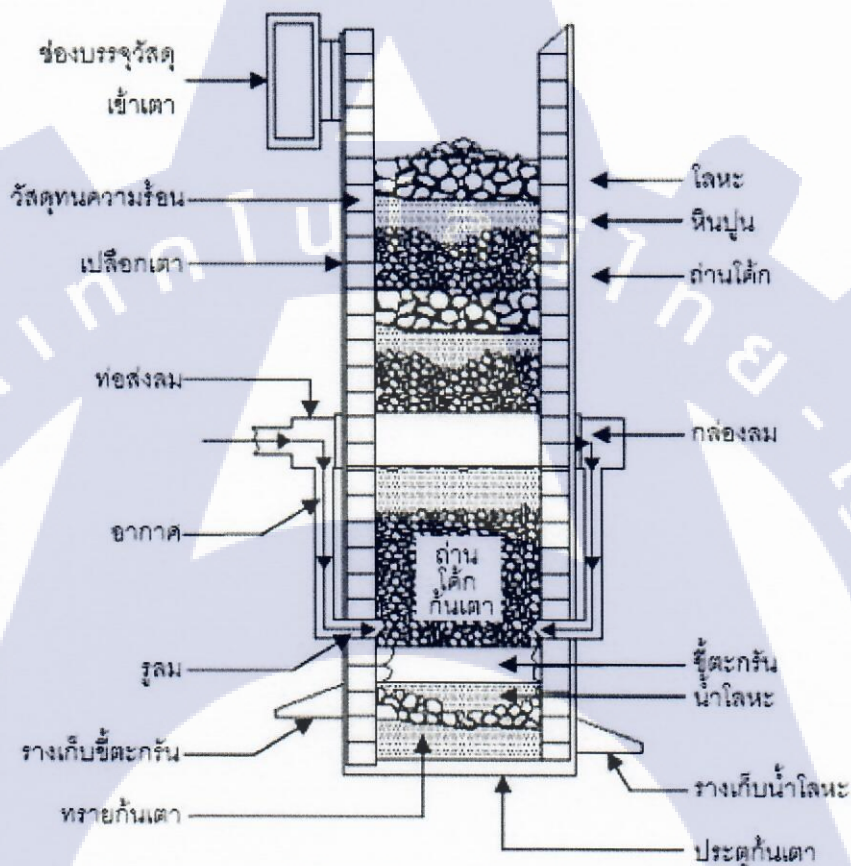
ตารางที่ 2.4 สมบัติของถ่านโค้กแต่ละชนิด [24]

สมบัติ	ถ่านโค้ก	ถ่านชีวภาพ	ผงถ่าน (Charcoal)	วิธีทดสอบ
ค่าความร้อน	7000	4000-6000	8000	Bomb Calorimeter
ความต้านทาน แรงกดสูงสุด	20 MPa	40-100 MPa	1-3 MPa	Compression test
ความต้านทาน แรงกดสูงสุดที่ ความดันสูง	N/A	High	Average	Pressurized combustion test/SEM
ความหนาแน่น	1.1 g/cm ³	1.4 g/cm ³	0.3 g/cm ³	Actual measurement

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของถ่านโค้ก ถ่านชีวภาพ และผงถ่าน (Charcoal) ซึ่งพบว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับถ่านโค้ก แต่มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดและค่าความหนาแน่นสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด

2.1.8 เตาอุตสาหกรรมแบบ Cupola Furnace

เตา Cupola Furnace ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ ที่ใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะเตาเป็นแบบทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในมีฉนวนกันความร้อน บริเวณด้านล่างของเตาจะเป็นแอ่งสำหรับพักโลหะที่ถูกหลอมก่อนจะถูกส่งออกภายนอกดังรูปที่ 2.8 [25] ซึ่งถ่านชีวภาพ (Biocoke) สามารถนำไปใช้ร่วมกับถ่านโค้กที่ใช้ในเตาชนิดนี้ได้โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเตาหลอม



รูปที่ 2.9 เตา Cupola Furnace [25]

2.1.9 การอัดร้อนที่ความดันสูง

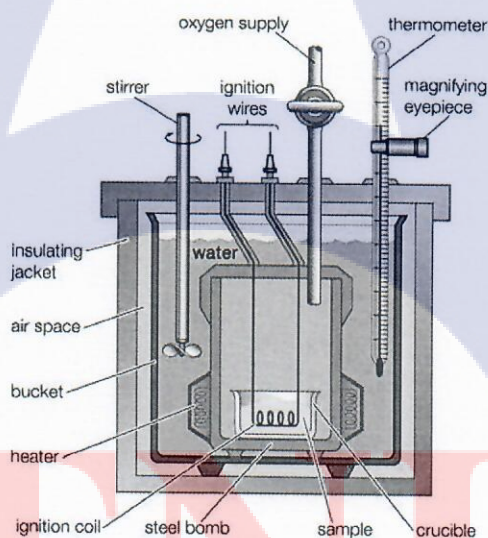
การอัดร้อนที่ความดันสูงเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้กับชีวมวล ซึ่งการอัดร้อนที่ความดันสูงเป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด จากอิทธิพลของแรงอัดนี้ทำให้เพกติน (Pectin) ซึ่งเป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนประกอบของไม้เกิดการแปลงสภาพกลายเป็นตัวประสานของชีวมวล นอกจากนั้นยังเกิดการยึดเกาะภายในเนื้อวัสดุซึ่งเกิดจากสารลิกนินที่อ่อนตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 130-190 °C และสารเฮมิเซลลูโลสที่เกิดการแปรสภาพระหว่างกระบวนการ [15] โดยที่กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจะใช้วิธีการอัดแท่งด้วยกระบอกสูบ มีหลักการ

คือลูกสูบจะทำหน้าที่ดันวัตถุเข้าในกระบอกสูบ เพื่อทำให้วัตถุเกิดการอัดตัวแน่นภายใน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิประมาณ $150-300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่กระบอกสูบ และทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการยึดเกาะตัวกัน วัตถุ

2.2 หลักการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

Bomb Calorimeter เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ส่วนประกอบของ Bomb Calorimeter แสดงดังรูปที่ 2.8 ของเป็นภาชนะปิดสนิท มีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายใน วัสดุที่ต้องการรู้ค่าความร้อนจะถูกบรรจุไว้ภายในที่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอต่อการสันดาบ มีลวดจุดระเบิดเชื่อมระหว่างวัสดุนั้นๆ กับปุ่มภายนอกภาชนะ โดยที่ภาชนะดังกล่าวจะถูกหุ้มด้วยถังน้ำอีกชั้นหนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะทำให้ลวดจุดระเบิดเกิดความร้อน ส่งผลให้วัสดุเกิดการเผาไหม้ จากนั้นทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น [26]



รูปที่ 2.10 ภาพจำลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ [26]

2.2.2 ค่าความร้อน (Calorific Value) ของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือ ปริมาณความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อยู่ในรูปของไอน้ำ [26]

2.2.3 การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยใช้ Bomb Calorimeter

การหาค่าความร้อนโดยใช้ Bomb Calorimeter เริ่มจากการนำเชื้อเพลิงที่ต้องการทดสอบไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาสันดาปภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่มีมากเพียงพอ ความร้อนที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำที่หล่อเย็นอุปกรณ์อยู่ ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงจากสมการที่ 2.1 [26]

$$Hg = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2.1)$$

โดยที่

H_g = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (cal/g)

m = มวลของเชื้อเพลิงแห้ง (g)

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

W = ค่าน้ำสมมูลย์ของ Bomb Calorimeter

e_1 = ค่าแก้เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริกในกระบวนการสันดาป สามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 29.3 (Calories)

e_2 = ค่าแก้เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟูริกในกระบวนการสันดาป มีค่าเท่ากับมวลของเชื้อเพลิงแห้งคูณด้วย 13.974

e_3 = ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากเส้นลวดไฟฟ้าที่ใช้จุดระเบิด สามารถคำนวณได้จากความยาวของเส้นลวด (cm) ที่ใช้ในการสันดาปคูณด้วย 2.3

2.2.4 ความหนาแน่นของของแข็ง

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนาแน่นของถ่านชีวภาพ [15] คือ

- 1) ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ
- 2) ขนาดของวัตถุดิบ เนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กจะง่ายต่อการอัดตัว
- 3) อุณหภูมิ

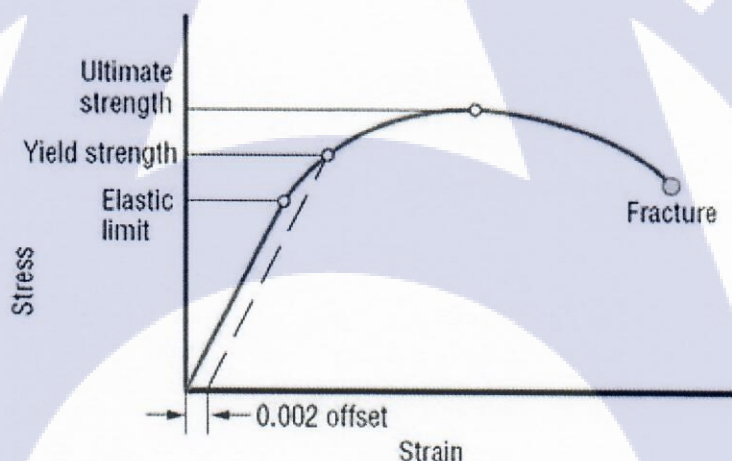
4) ความดัน

การคำนวณค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟนั้นจะใช้วิธีการหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของวัตถุ ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นที่รวมช่องว่างที่เกิดขึ้นทั้งหมดในวัตถุ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 [27]

$$\text{ความหนาแน่นรวมของวัตถุ} = \frac{\text{มวลของวัตถุ}}{\text{ปริมาตรของวัตถุ}} \quad (2.2)$$

2.2.5 ความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength)

การทดสอบความต้านทานแรงอัดสูงสุดทำได้โดยการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของวัตถุ จากรูปที่ 2.9 จุด Ultimate Strength คือขีดจำกัดสูงสุดของวัตถุที่สามารถรับแรงอัดได้หรือความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) ที่ใช้ในการศึกษานี้ [28]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [29]

2.2.6 การวิเคราะห์ผิวของถ่านชีวภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

กราด (Scan Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่องดูโครงสร้างของวัตถุระดับจุลภาค ผิวของวัสดุจะถูกลำอิเล็กตรอนกวาดผ่านจากนั้นจะตรวจจำอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมา แสดงผลด้วยการกวาดด้วยอัตราเดียวกันเหมือนจอโทรทัศน์ กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะอยู่ระหว่าง 10 - 50,000 เท่า [28]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้งถูกใช้ทำการวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น ใน ค.ศ. 2009 Sawai et al [30] ได้ผลิตถ่านชีวภาพ (Bio-coke) ซึ่งในขณะนั้นถูกเรียกว่า Bio-Solid Fuel จากเศษไม้ของต้นบ๊วยและต้นพลับ โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อสมบัติของ Bio-Solid Fuel โดยทำการวัดค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) ของชิ้นงาน Bio-Solid Fuel ผลิตจากเศษไม้ดังกล่าว Bio-Solid Fuel จากต้นบ๊วยมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์อยู่ระหว่าง 140-160 °C โดยที่ขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุด ส่วน Bio-Solid Fuel จากต้นพลับนั้นจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 180 °C และจะมีค่าความต้านทานลดลงตามขนาดของอนุภาคที่ลดลง

Mizuno et al [31] ได้ศึกษาปัจจัยการผลิต (ความชื้นและอุณหภูมิ) ที่มีต่อความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของชีวมวลที่ผลิตจากสมุนไพรของญี่ปุ่น โดยที่ความหนาแน่นสูงสุดที่ผลิตได้คือ 1.38 g/cm³ และมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 127 MPa นอกจากนี้ Mizuno และคณะได้รายงานว่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดสามารถควบคุมได้จากการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

Mizuno et al [32] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและปริมาณของคาร์บอน (Carbon Content) นอกจากนี้ยังนำการวิเคราะห์ทางความร้อนมาเพื่อประเมินค่าความร้อนของวัตถุดิบก่อนที่จะนำมาผลิตถ่านชีวภาพอีกด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนจะแปรผกผันกับความต้านทานแรงอัดของถ่านชีวภาพ

Ito et al [11] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก Knotweed ญี่ปุ่น ปัจจัยดังกล่าวคือ อัตราการไหลของอากาศ ความชื้นของถ่านชีวภาพ และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านชีวภาพ โดยแบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้สูง (สูงกว่า 325 °C) และอุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้ต่ำ (ต่ำกว่า 325 °C) ผลการทดลองพบว่าในกรณีปฏิบัติการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้สูงพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะเกิดการเผาไหม้ก่อนก๊าซเฟส แต่ที่อุณหภูมิของอากาศก่อนการเผาไหม้ต่ำก๊าซเฟสจะเกิดการเผาไหม้ก่อนกรณีอัตราการไหลของอากาศ ทั้งสองเงื่อนไขจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านชีวภาพก่อนการเผาไหม้ของก๊าซเฟสในอัตราการไหลของอากาศสูง กรณีความชื้นของถ่านชีวภาพ ทั้งสองเงื่อนไขจะเกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านชีวภาพก่อนการเผาไหม้ของก๊าซเฟสเมื่อค่าความชื้นของถ่านชีวภาพต่ำ

ใน ค.ศ. 2012 Fuchihata et al [33] ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพจากการผสมกันระหว่างผิวด้านในของเมล็ดกาแฟ ผิวด้านนอกของเมล็ดกาแฟ และกากกาแฟ ในสัดส่วน ที่ต่างกัน และนำมาวัดประสิทธิภาพการสันดาปของถ่านชีวภาพ โดยทำการจับเวลาที่ใช้ตลอดการสันดาป แบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงก่อนสันดาป ช่วงการสันดาป และหลังการสันดาป ผลการทดลองพบว่า

นอกจากระยะเวลาช่วงและหลังการสันดาปแล้วยังมีอีกปัจจัยหนึ่งคือการขยายตัวของสารที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสันดาป

ใน ค.ศ. 2012 Torii et al [34] ทำการผลิตถ่านชีวภาพที่ผสมระหว่างไม้ไผ่และถ่านซีตาร์ทูปีน เพื่อตรวจสอบความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูง ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันของการผลิตเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงกดสูงสุดที่อุณหภูมิสูงจะมากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนจากถ่านซีตาร์ทูปีนสูงขึ้น โดยที่มีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดประมาณ 32.6 MPa

ใน ค.ศ. 2013 Mizuno et al [35] ทำการศึกษาผลกระทบเรื่องขนาดพื้นที่หน้าตัดของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากใบชาเขียวต่อค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดภายใต้อุณหภูมิสูง ผลการทดลองพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากใบชาเขียวจะมีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดที่อุณหภูมิ 700 °C และขนาดพื้นที่หน้าตัดมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดภายใต้อุณหภูมิสูง โดยที่ถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมีค่าความต้านทานแรงกดมากกว่าที่อุณหภูมิ 700 °C

ตารางที่ 2.5 แสดงผลสรุปของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยถ่านชีวภาพระหว่าง ค.ศ. 2009 - 2013 จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีหลายปัจจัย เช่น ขนาดวัตถุดิบ ความชื้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิ เป็นต้น ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงจะทำการศึกษาปัจจัยการผลิตได้แก่ ขนาดอนุภาคของกากกาแฟ อุณหภูมิการผลิต และระยะเวลาที่คงอุณหภูมิการผลิต ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟซึ่งมีอยู่ปริมาณมากในประเทศไทย โดยควบคุมความชื้นเริ่มต้นของกากกาแฟในช่วงที่กำหนดไว้

TNI

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยถ่านชีวภาพ

ผู้วิจัย / ปี	วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ	ศึกษา	ผลสรุป
Sawai et al [30]	เศษไม้ของต้นบัวและต้นพลับ	ปัจจัยการผลิต (ขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิ) ที่มีผลต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ	อุณหภูมิและขนาดอนุภาคของวัตถุดิบมีผลต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด
Mizuno et al [31]	สมุนไพรของญี่ปุ่น	ปัจจัยการผลิต (ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิ) ที่มีผลต่อความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ	1. ความหนาแน่นสูงสุดมีค่า 1.38 g/cm ³ และความต้านทานแรงอัดสูงสุดมีค่า 127 MPa 2. ความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพ
Mizuno et al [32]	เปลือกคอกี๋ ใบเชอร์รี่แห้ง เม็ดมะม่วง	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุดและปริมาณของคาร์บอน	ความต้านทานแรงอัดสูงสุดแปรผกผันกับปริมาณของคาร์บอน
Ito et al [11]	Knotweed ญี่ปุ่น	ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพ	1. อุณหภูมิก่อนการเผาไหม้มีผลต่อการติดไฟที่ผิวของถ่านชีวภาพ 2. ความชื้นของถ่านชีวภาพจะต้องมีค่าต่ำ 3. อัตราการไหลของอากาศมีผลต่อการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพ

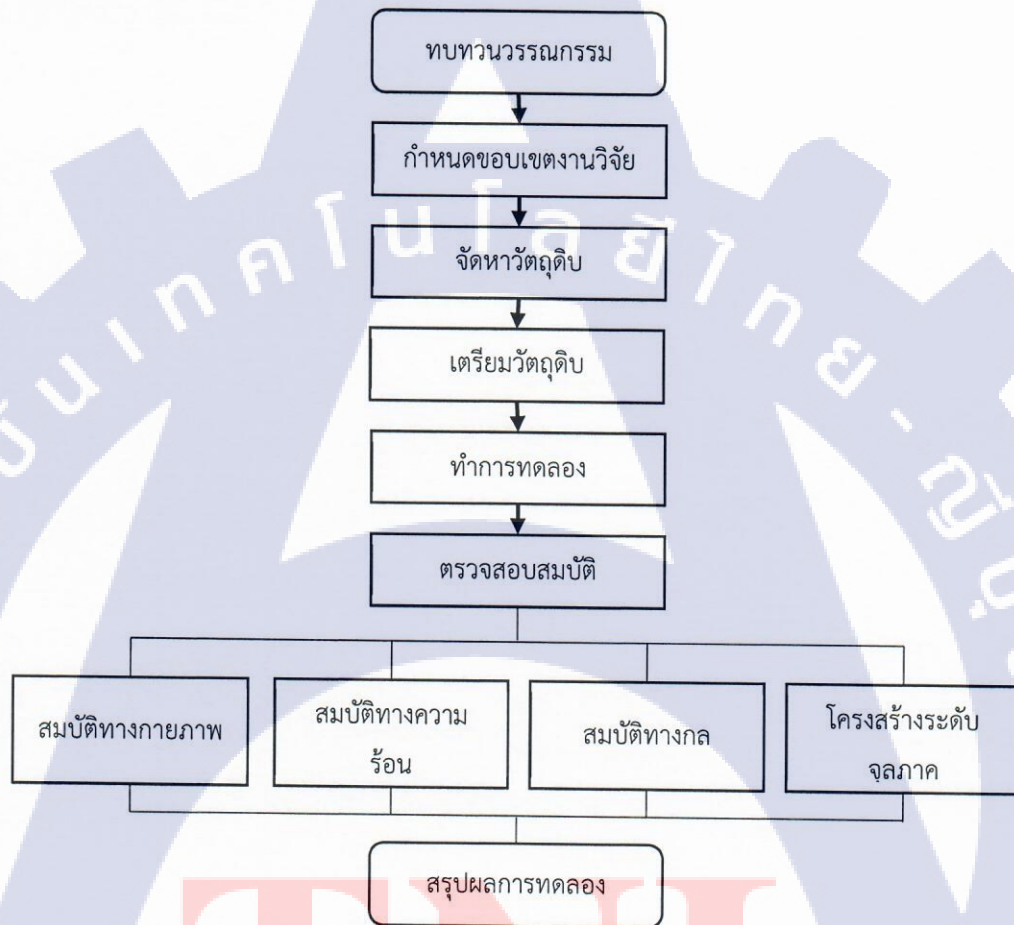
ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยถ่านชีวภาพ (ต่อ)

ผู้วิจัย / ปี	วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพ	ศึกษา	ผลสรุป
Torii et al [34]	วัตถุดิบผสมระหว่างไม้ไผ่และถ่านซีตาร์ญี่ปุ่น	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนจากถ่านซีตาร์ญี่ปุ่นกับความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูง	ความต้านทานแรงกดสูงสุดที่อุณหภูมิสูงจะมากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนจากถ่านซีตาร์สูงขึ้น
Fuchihata et al [33]	วัตถุดิบผสมระหว่างกากกาแฟ เปลือกด้านนอกของเมล็ดกาแฟและเปลือกด้านในของเมล็ดกาแฟ	การสันดาปของถ่านชีวภาพ	1.ระยะเวลาช่วงก่อนและหลังการสันดาปส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสันดาป 2. รอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในถ่านชีวภาพส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสันดาป
Mizuno et al [35]	ชาเขียว	ผลกระทบด้านกายภาพ (พื้นที่หน้าตัดของถ่านชีวภาพ) ต่อความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูง	1. ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากชาเขียวจะมีความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิสูงสุดที่อุณหภูมิ 700 °C 2. พื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กจะค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแผนผังงานดัง รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

3.1 กำหนดขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟด้วยเครื่องเผาถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้ง กำหนดให้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1.1 ตัวแปรต้น

- 1) เวลาที่ใช้ในการอัด แบ่งออกเป็น 3 เวลา ได้แก่ 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที
- 2) ความดันที่ใช้ในการอัด แบ่งเป็น 4 ความดัน ได้แก่ 10 MPa 12 MPa 14 MPa และ 16 MPa
- 3) อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด แบ่งเป็น 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 150 °C 160 °C 170 °C 180 °C และ 190 °C

รวมทั้งหมดเป็น 60 กรณี ดัง ตารางที่ 3.1 โดยที่ในแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จะได้ถ่านชีวภาพรวม 120 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล

3.1.2 ตัวแปรตาม

- 1) ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)
- 2) ค่าความร้อนที่วัดจาก Bomb Calorimeter (kcal/kg)
- 3) ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa)

3.1.3 ตัวแปรควบคุม

- 1) กากกาแพที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดอราบิก้า ที่ปลูกในจังหวัดเชียงราย และผ่านกระบวนการชงแบบไทย
- 2) วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพมีความชื้นระหว่าง 5 - 10%

TNI

ตารางที่ 3.1 ตารางการทดลองที่สภาวะการผลิตต่างๆ

ลำดับ	เงื่อนไขการผลิต		
	เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)
1	10	150	10
2	10	160	10
3	10	170	10
4	10	180	10
5	10	190	10
6	10	150	12
7	10	160	12
8	10	170	12
9	10	180	12
10	10	190	12
11	10	150	14
12	10	160	14
13	10	170	14
14	10	180	14
15	10	190	14
16	10	150	16
17	10	160	16
18	10	170	16
19	10	180	16
20	10	190	16

ตารางที่ 3.1 ตารางการทดลองที่สภาวะการผลิตต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	เงื่อนไขการผลิต		
	เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)
21	15	150	10
22	15	160	10
23	15	170	10
24	15	180	10
25	15	190	10
26	15	150	12
27	15	160	12
28	15	170	12
29	15	180	12
30	15	190	12
31	15	150	14
32	15	160	14
33	15	170	14
34	15	180	14
35	15	190	14
36	15	150	16
37	15	160	16
38	15	170	16
39	15	180	16
40	15	190	16

ตารางที่ 3.1 ตารางการทดลองที่สภาวะการผลิตต่างๆ (ต่อ)

ลำดับ	เงื่อนไขการผลิต		
	เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (Mpa)
41	20	150	10
42	20	160	10
43	20	170	10
44	20	180	10
45	20	190	10
46	20	150	12
47	20	160	12
48	20	170	12
49	20	180	12
50	20	190	12
51	20	150	14
52	20	160	14
53	20	170	14
54	20	180	14
55	20	190	14
56	20	150	16
57	20	160	16
58	20	170	16
59	20	180	16
60	20	190	16

3.2 การจัดหาวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ทำการทดลองเป็นกากกาแฟที่ใช้แล้วจากร้านกาแฟโบราณแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นกาแฟชนิดอราบิก้าปลูกที่จังหวัดเชียงราย ผ่านกระบวนการชงที่ไม่มีความดันเกี่ยวข้องในกระบวนการ ตัวอย่างกากกาแฟที่ใช้ในการศึกษาก่อนทำการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วัตถุดิบก่อนนำเข้าตู้อบ

3.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการทดลอง

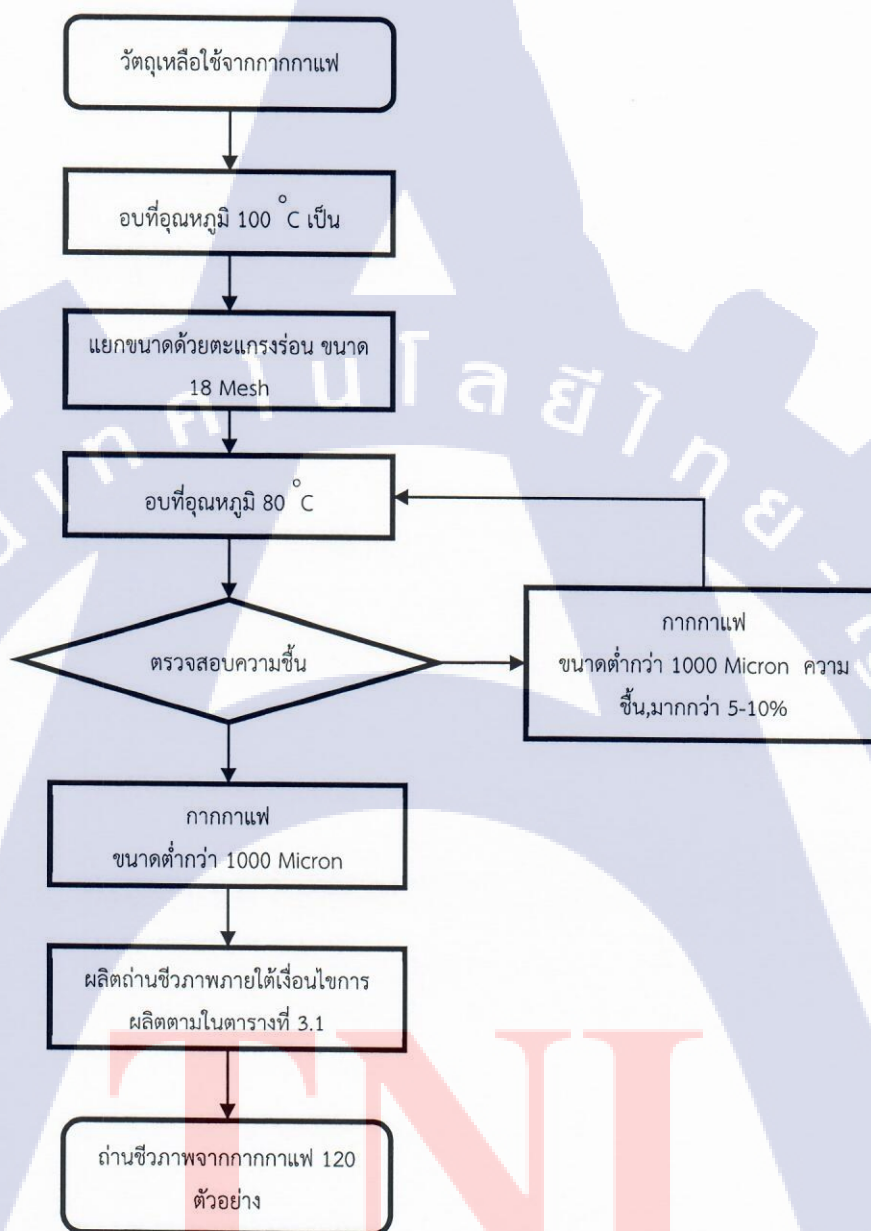
เนื่องจากกากกาแฟที่ได้รับมามีปริมาณความชื้นสูง ดังนั้นก่อนจะนำวัตถุดิบนี้มาใช้จะต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กากกาแฟแห้งพอที่จะนำไปแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนแยกขนาดได้ จากนั้นนำกากกาแฟมาร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว สูง 2 นิ้ว ขนาด 18 Mesh

3.4 การทดลอง

รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ การทดลองผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟนี้จะใช้เครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดแนวตั้ง ซึ่งแสดงส่วนประกอบดัง รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 โดยเครื่องดังกล่าวได้รับการอนุเคราะห์จาก Kinki University ประเทศญี่ปุ่น

การทดลองเริ่มต้นจากการนำกากกาแฟที่ผ่านการแยกขนาดและอบจนได้ค่าความชื้นที่ต่ำกว่า 10% แล้ว ใส่เข้าในกระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 48 mm ความหนา 3 mm สูง 300 mm ที่หนุนด้วยแท่งทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm สูง 20 mm และปิดทับด้วยแท่งทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 mm สูง 50 mm มีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล โดยที่

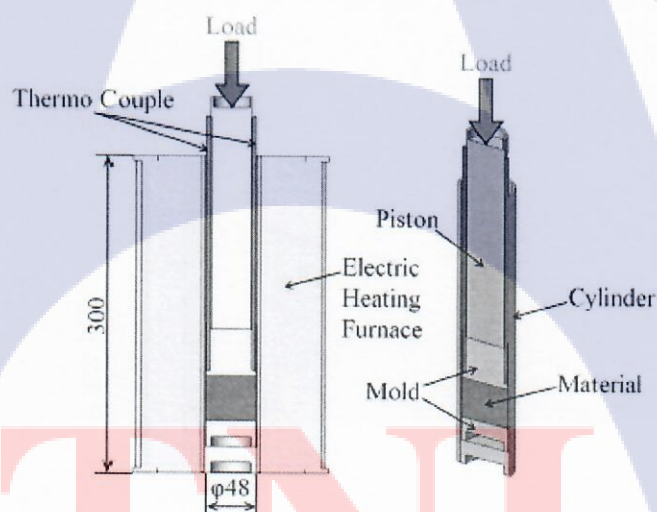
ก้อนทองเหลืองที่ปิดทับนี้มีเบาไว้สำหรับรองรับลูกสูบ จากนั้นทำการอัดด้วยไฮดรอลิกที่ความดันที่ต้องการ และใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าครอบกระบอกสูบ ทำการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ ตาม ตาราง 3.1



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง ก่อนติดตั้งกระบอกอัดและฮีทเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของเครื่องผลิตถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง [30]

3.5 การตรวจสอบสมบัติของถ่านชีวภาพ

ทำการตรวจสอบสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ค่าความร้อน (Calorific value) ความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 สมบัติทางกายภาพ

สามารถหาได้จากการหาค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟที่ผลิตในแต่ละเงื่อนไขมาทำการชั่งน้ำหนักและวัดความสูง จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นรวมจาก สมการที่

3.1

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} \quad (3.1)$$

โดยจะทำการวัดขนาดทั้ง 2 ตัวอย่างและนำมาหาค่าเฉลี่ยในทุกเงื่อนไขการทดลอง

3.5.2 สมบัติทางความร้อน

สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 Plain Jacket แสดงใน รูปที่ 3.6 โดยจะทำการวิเคราะห์เงื่อนไขละ 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ครั้ง มีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ชั่งถ่านชีวภาพให้มีน้ำหนักประมาณ 1 g ใส่ลงในถ้วยโลหะ และนำถ้วยโลหะวางลงในตำแหน่งหัวไฟฟ้าของ Bomb
- 2) ใส่น้ำลงในลูก Bomb ประมาณ 1 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ในบรรยากาศอิมมิดด้วยไอน้ำ
- 3) ตัดเส้นลวด Fuse Wire ความยาว 10 mm ต่อเข้ากับขั้วจุดระเบิด และงอเส้นลวดให้สัมผัสกับถ่านชีวภาพ
- 4) ประกอบฝาเข้ากับ Bomb โดยปิดฝาลูก Bomb ให้แน่นพอดี
- 5) อัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าในลูก Bomb อย่างช้าๆ โดยให้มีความดันประมาณ 25 บาร์ แล้วปลด Release Valve เพื่อถ่ายก๊าซออกซิเจนส่วนเกินทิ้ง

- 6) ตวงน้ำกลั่นจำนวน 2,000 cc โดยใช้กระบอกล้างใส่ลงในภาชนะสเตนเลส (Calorimeter Bucket) แล้วนำภาชนะดังกล่าวใส่ลงในถัง (Insulated Jacket) โดยวางภาชนะตามจุดล้อยึด
- 7) ต่อสายไฟฟ้า 2 เส้นที่ออกจากถังเข้ากับขั้วจุดระเบิดของ Bomb ซึ่งขั้วดังกล่าวจะต่อกับเส้นลวดจุดระเบิด (Ignition Wire)
- 8) ต่อสายพานจากมอเตอร์เข้ากับแกนเพลลาของใบกวน (Stirrer) แล้วเปิดเครื่องเพื่อให้ใบกวนทำงานประมาณ 3 นาที รอจนอุณหภูมิของน้ำค้างที่ สังเกตอุณหภูมิของน้ำจากเทอร์โมมิเตอร์
- 9) กดปุ่มจุดระเบิด ทำการบันทึกอุณหภูมิด้วย Data Acquisition Systems ทุก 0.5 วินาที ซึ่งเชื่อมต่อกับ Resistance Temperature Detector (RTD) Band 3 Pt-100 จนเมื่อพบว่าอุณหภูมิคงที่มากกว่า 5 นาที
- 10) ถอดอุปกรณ์ออก ทำการวัดขนาดความยาวของลวดที่เหลือหลังการสันดาป (cm) คำนวณหาค่าความร้อนของสารตัวอย่างจาก สมการที่ 3.2

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (3.2)$$

โดย H_g คือ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ (kcal/kg)

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

W คือ ค่าน้ำสมมูลของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

m คือ มวลของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบ (g)

e_1 คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริกในกระบวนการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 23.9

e_2 คือ ค่าแก้ความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟิวริกที่เกิดในกระบวนการการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ $13.7 \times 1.02 \times$ มวลของสารตัวอย่าง

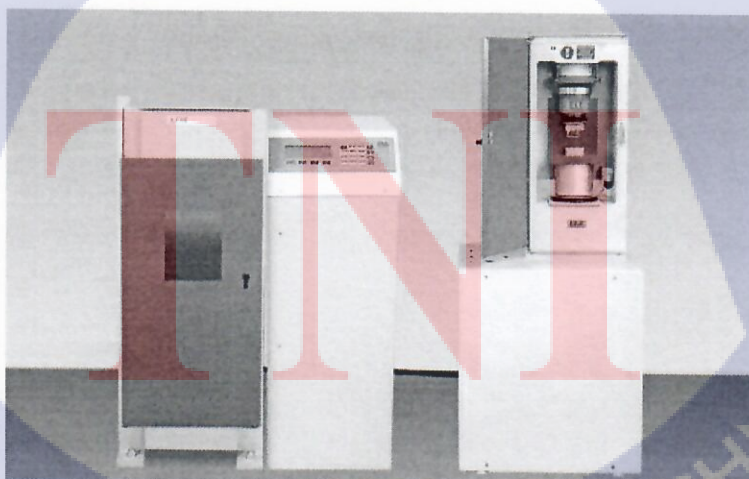
e_3 คือ ค่าแก้จากความร้อนที่เกิดจากการลุกไหม้ของขดลวดตัวนำ มีค่าเท่ากับ $2.3 \times$ ความยาวของลวดที่ใช้จุดระเบิดในหน่วยเซนติเมตร



รูปที่ 3.6 ภาพถ่าย Bomb Calorimeter Parr รุ่น Model 1341 และ RTD Band 3 Pt-100

3.5.3 สมบัติทางกล

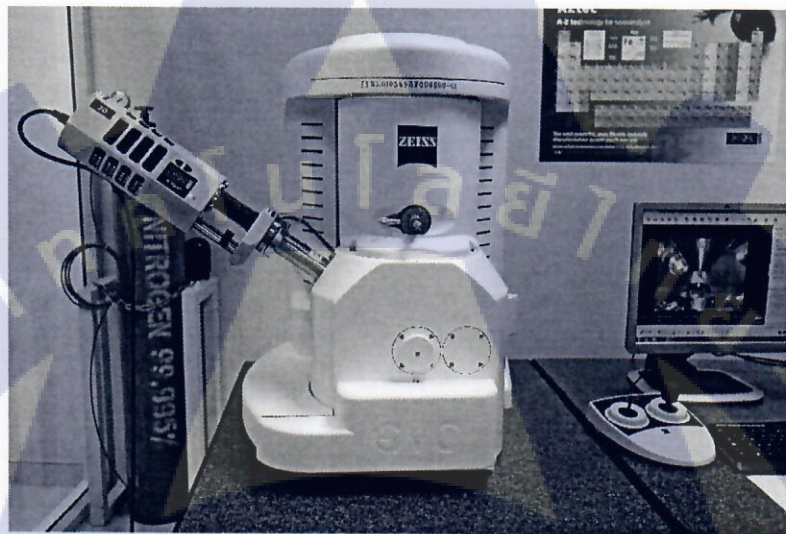
สามารถหาได้จากการทดสอบความต้านทานแรงอัด ด้วยเครื่อง Maximum Compressive Strength ADR-Auto V2.0 3000 BS EN Compression Machine



รูปที่ 3.7 ภาพถ่าย EL36-4145/01 ADR Auto 2000/250 EN Compression Machine [37]

3.5.4 โครงสร้างจุลภาค

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพก่อนผลิต และหลังการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งในกรณีการทดสอบคุณสมบัติทางกลสามารถทำได้แค่บางกรณี เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือทดสอบ รูปที่ 3.8 แสดงภาพเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



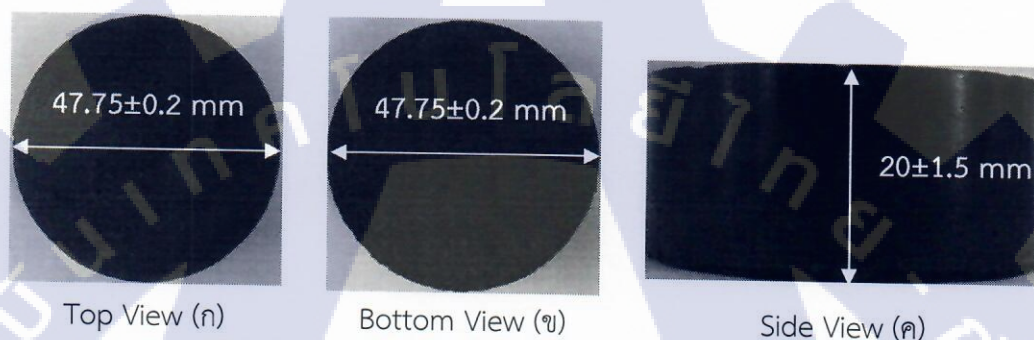
รูปที่ 3.8 ภาพถ่าย เครื่อง EVO MA10 Versatile Multipurpose SEM

TNI

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟมีลักษณะเป็นก้อนทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 47.75 ± 0.2 มิลลิเมตร สูง 20 ± 1.5 มิลลิเมตร โดยที่ถ่านชีวภาพที่เงื่อนไขการผลิตที่ต่างกันจะมีขนาด ความสูง และน้ำหนักที่แตกต่างกัน **รูปที่ 4.1** แสดงลักษณะ ด้านบน ด้านล่าง และด้านข้าง ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ เงื่อนไขการผลิต 15 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180°C



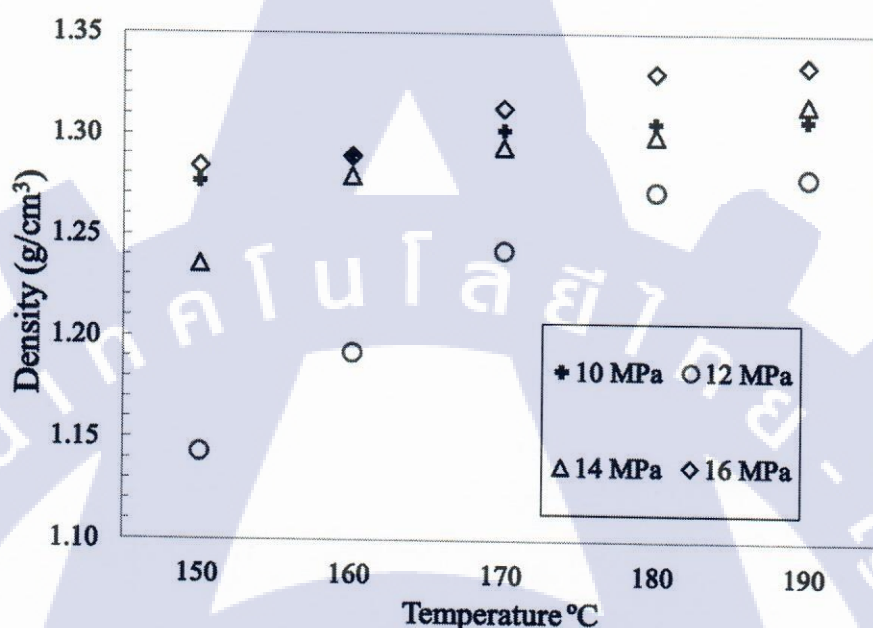
รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ ที่ เวลา 15 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180°C

4.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพในงานวิจัยนี้ ทำได้โดยใช้สมการที่ (3.1) การหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของแต่ละเงื่อนไขการผลิตที่ต่างกันคือ เวลาที่ใช้ในการผลิต 10 15 และ 20 นาที ความดันที่ใช้ในการผลิต 10 12 14 และ 16 MPa อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต 150 160 170 180 และ 190°C

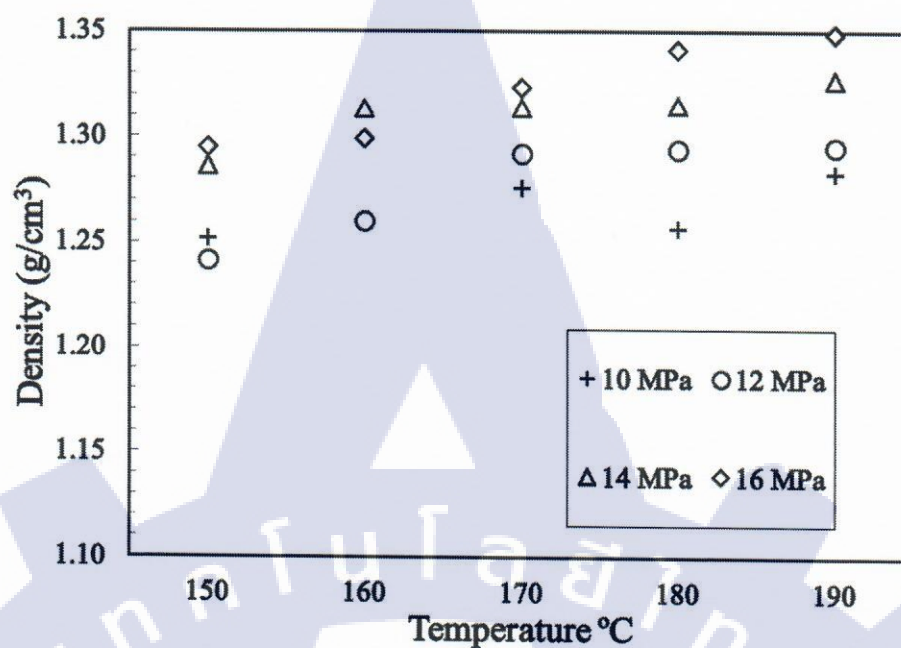
รูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการผลิตต่อค่าความหนาแน่นของถ่านชีวภาพที่สภาวะการผลิต 10 12 14 และ 16 MPa เป็นเวลา 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นที่ได้จากการวิจัยการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟสอดคล้องกับทฤษฎีปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนาแน่นรวมที่เสนอโดย นคร ทิพย์วงศ์ [14] จาก **รูปที่ 4.2** แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ใช้ความดัน 10 MPa เวลา 10 นาที ในการผลิต มีค่าสูงกว่าที่ความดันอื่น เนื่องจากแรงดันที่และ

เวลาที่น้อยเกินไป ส่งผลให้การแตกตัวของเพกติน (Pectin) ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และสารโมเลกุลต่ำอื่นๆ มีน้อย ทำให้เกิดการยึดเกาะตัวกันน้อย สอดคล้องกับน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยความดัน 10 MPa เวลา 10 นาทีนั้นมีค่าสูง เมื่อนำไปหารด้วยปริมาตรของถ่านชีวภาพจากสมการ (3.1) จึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าที่ความดันการผลิตอื่น

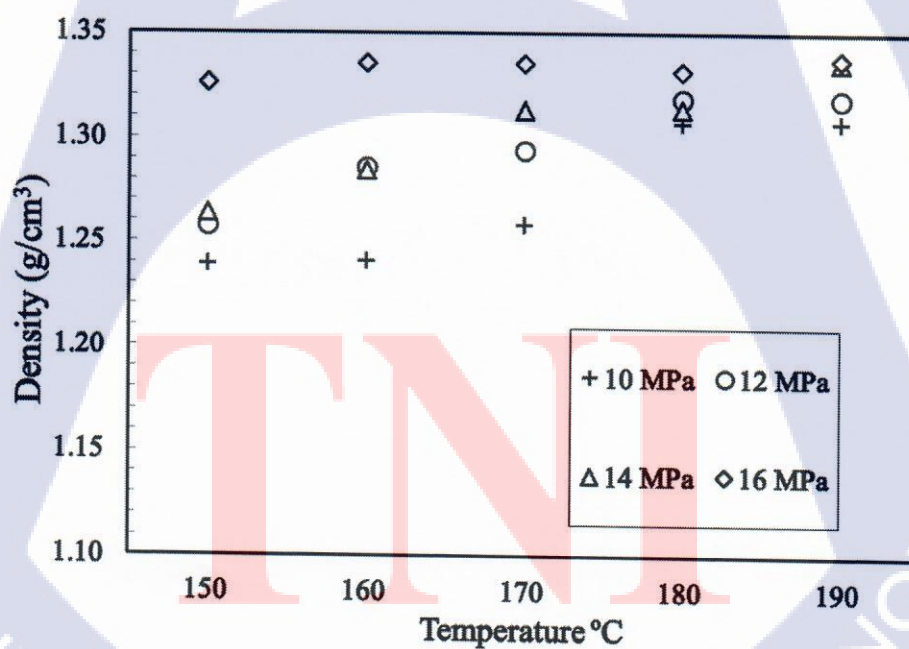


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที

ความหนาแน่นรวมสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.349 g/cm^3 ที่ความดัน 16 MPa เมื่อใช้อุณหภูมิในการผลิต 190°C เวลา 15 นาที ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 สาเหตุเนื่องจากการสลายตัวของเพกติน (Pectin) ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และสารโมเลกุลต่ำอื่นๆ ในถ่านชีวภาพที่ผลิตที่ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 190°C เวลา 20 นาที เกิดขึ้นมากกว่าการใช้เวลาในการผลิต 15 นาที ที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน จึงได้ถ่านชีวภาพที่มีน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อหารด้วยปริมาตรของถ่านชีวภาพทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมที่ต่ำกว่าเวลา 15 นาทีเล็กน้อย ซึ่งความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟมีค่าใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก Knotweed ของญี่ปุ่นในงานของ Ito et al [10] ในกรณีของผลกระทบของความดันที่ใช้ในการผลิตพบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากแรงกดในแนวตั้งส่งผลประสิทธิภาพการยึดเกาะตัวกันภายในถ่านชีวภาพนั้นเพิ่มขึ้น [14]



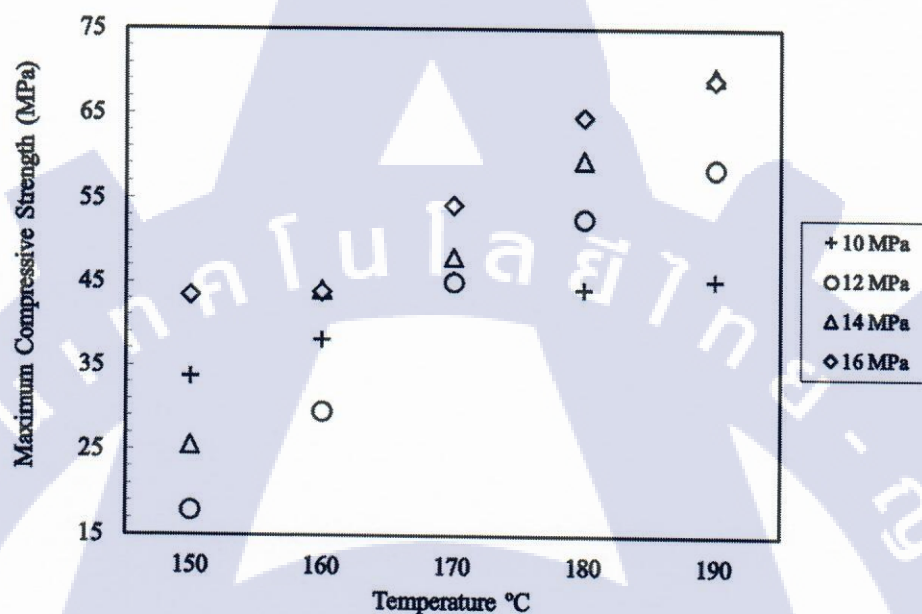
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 20 นาที

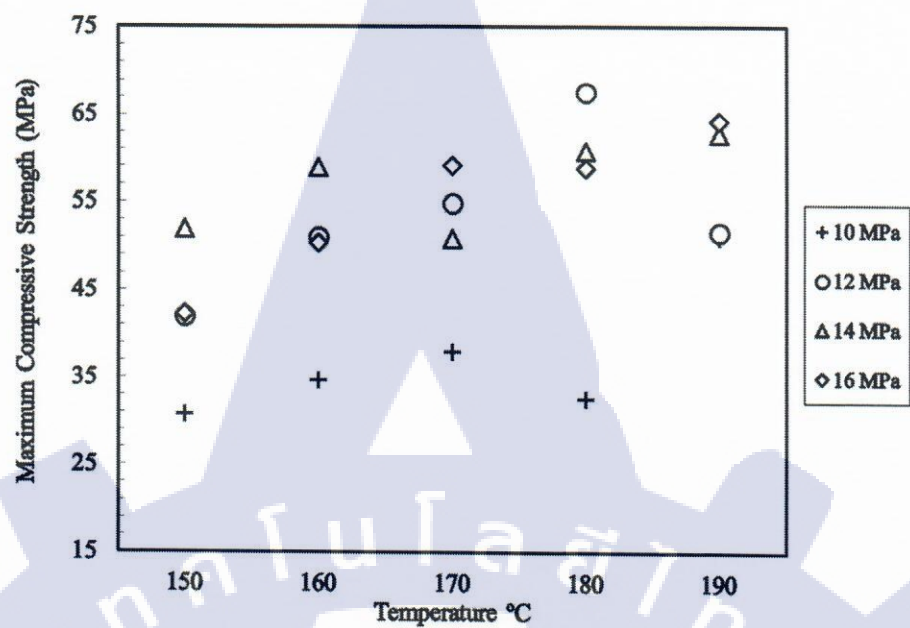
4.2 สมบัติทางกลของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

การวิเคราะห์สมบัติทางกลของถ่านชีวภาพทำได้โดยการหาความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) ด้วยเครื่อง EL36-4145/01 ADR Auto 2000/250 EN Compression Machine แสดงในรูปที่ 3.8

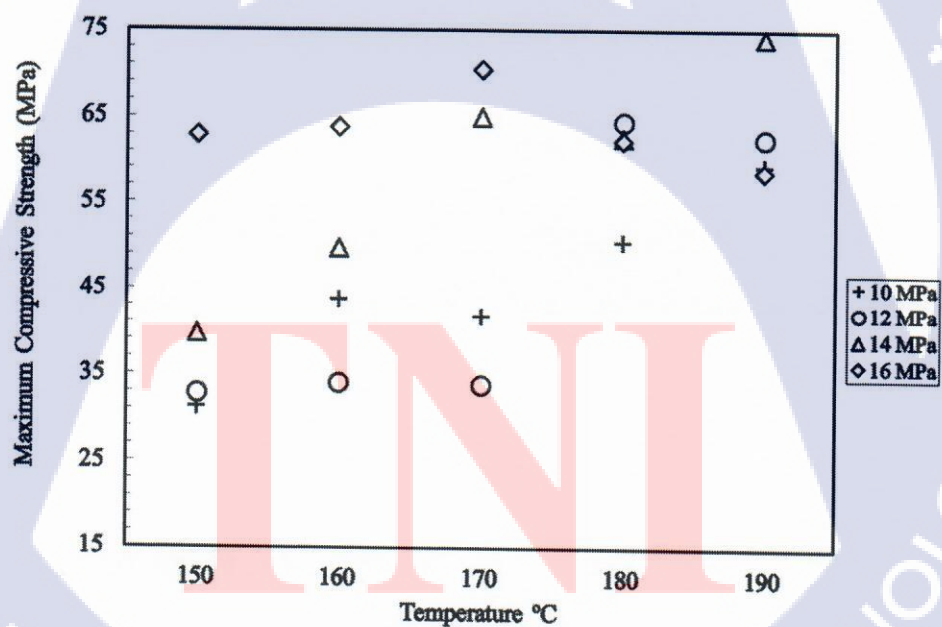


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที

รูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 แสดงผลค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟที่เงื่อนไขการผลิต 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันที่ใช้ในการผลิตและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดพบว่า อุณหภูมิการผลิต ความดันการผลิต และระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด ซึ่งเป็นสาเหตุจากการอ่อนตัวของสารประกอบ ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ที่โดยปกติแล้วหากชีวมวลมีความชื้นอยู่ภายใน จะทำให้เกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 130 – 190 °C [14] จากงานวิจัยของ Sawai et al กล่าวว่า หากถ่านชีวภาพมีความชื้น 15% เฮมิเซลลูโลสจะเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิ 120 - 130 °C ซึ่งผลจากการหลอมละลายนี้จะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลนั้นลดลง ทำให้ถ่านชีวภาพมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงมาก โดยมีค่ามากที่สุดประมาณ 70 MPa เมื่อผลิตที่อุณหภูมิ 170 °C ความดัน 16 MPa เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที

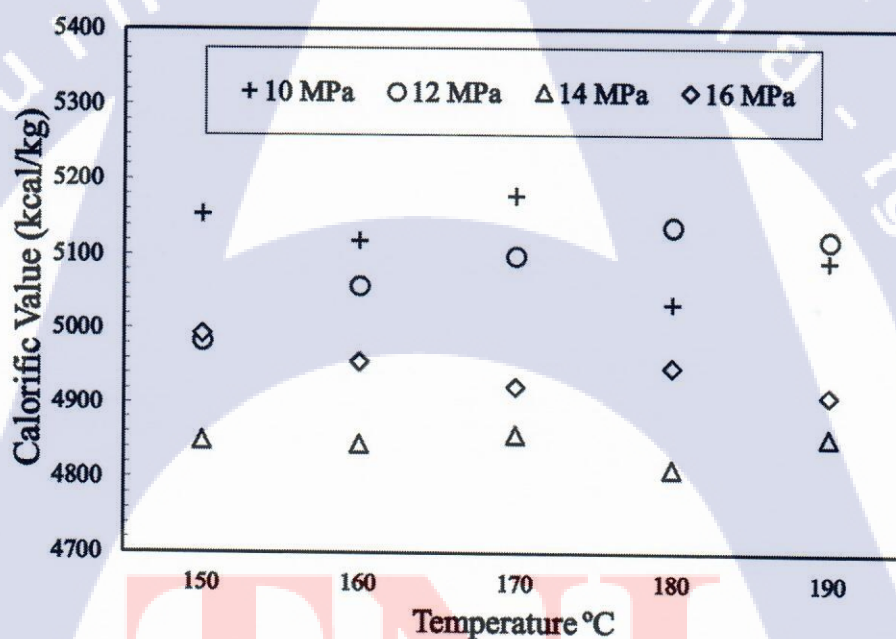


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดสูงสุด (MPa) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 20 นาที

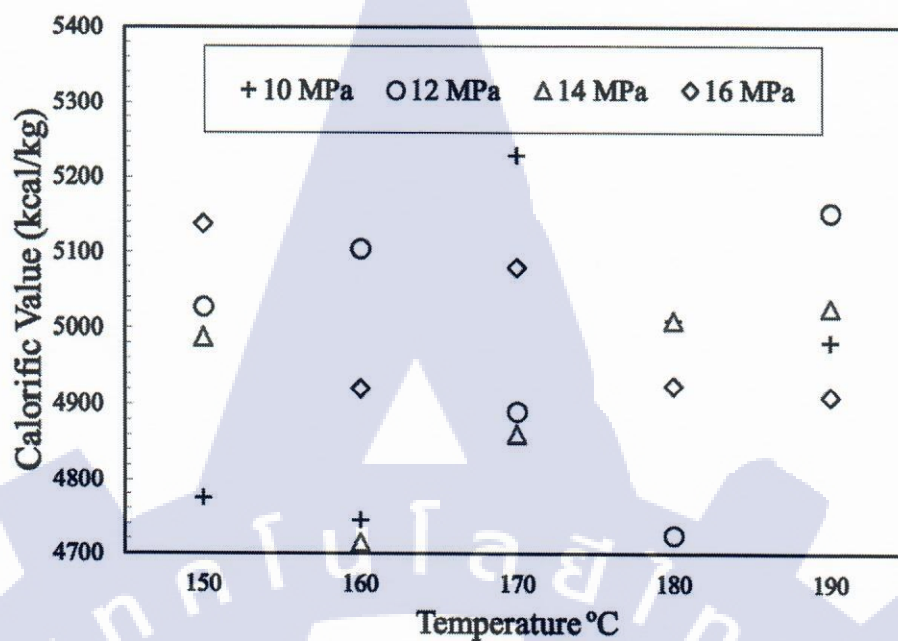
4.3 สมบัติทางความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

การวัดค่าความร้อน (Calorific Value) ในงานวิจัยนี้ใช้ Resistance Temperature Detector (RTD) Band 3 Pt-100 ในการวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป และใช้ Data Acquisition Systems ในการเก็บข้อมูลที่มีความละเอียด 0.1 °C ซึ่ง RTD จะมีความแม่นยำในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานเท่ากับ 0.11 °C เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณที่ใช้มวล 1 กรัม จะส่งผลให้ค่าความร้อนที่คำนวณได้จาก สมการ 3.7 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นประมาณ ± 236 kcal/kg

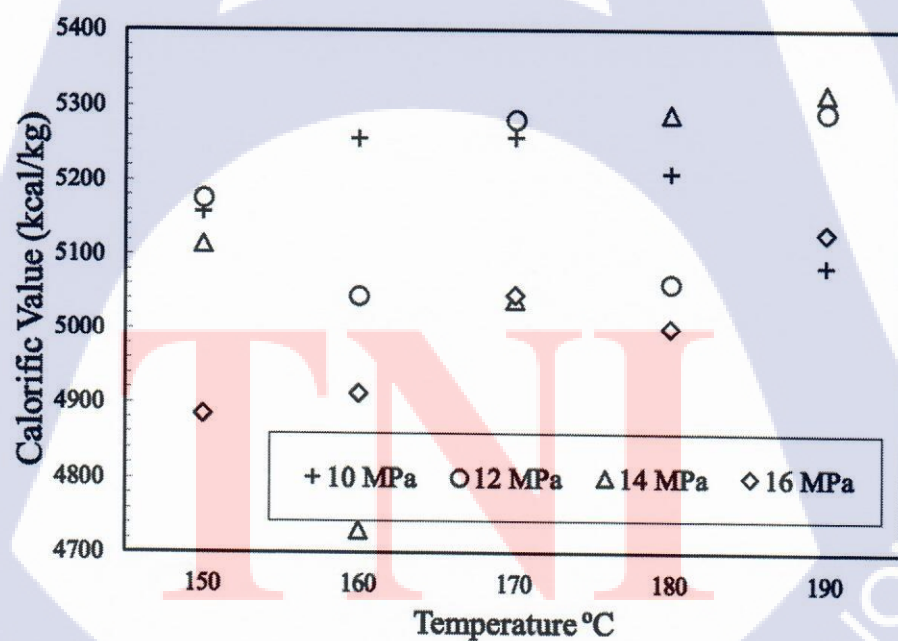
ผลกระทบของความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตต่อค่าความร้อน (Calorific Value) แสดงดังรูปที่ 4.8 - 4.10 โดยพบว่าค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่สภาวะต่างๆ มีความแตกต่างกัน น้อยมากและอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวัด จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลกระทบอย่างชัดเจนต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟในทุกเวลาการผลิต



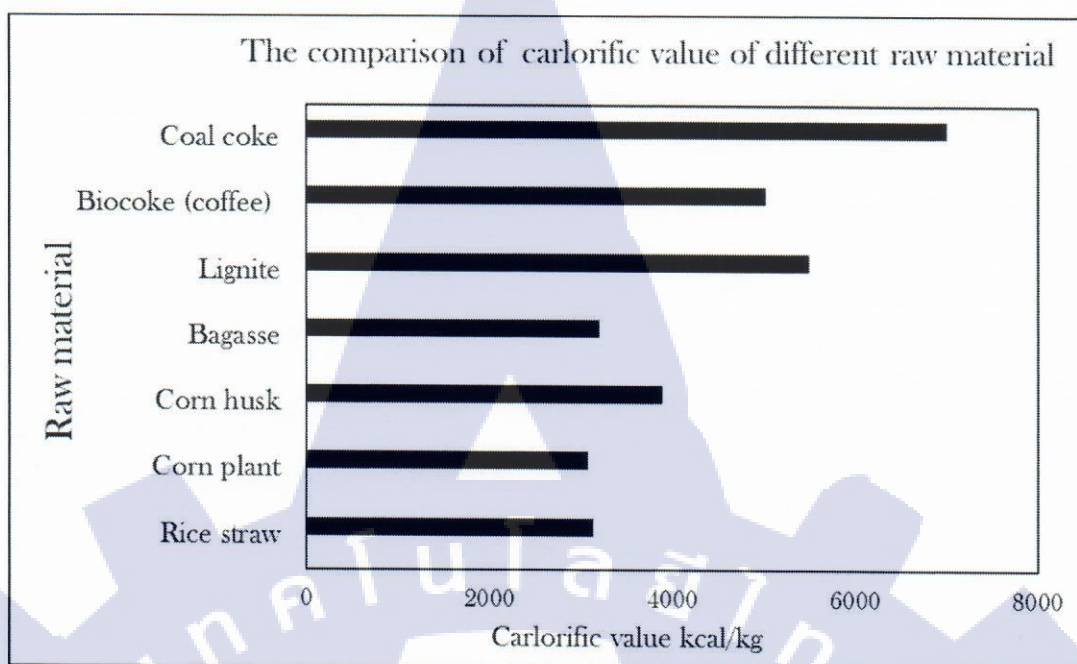
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 15 นาที



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ที่ความดัน 10 12 14 และ 16 MPa เวลา 20 นาที

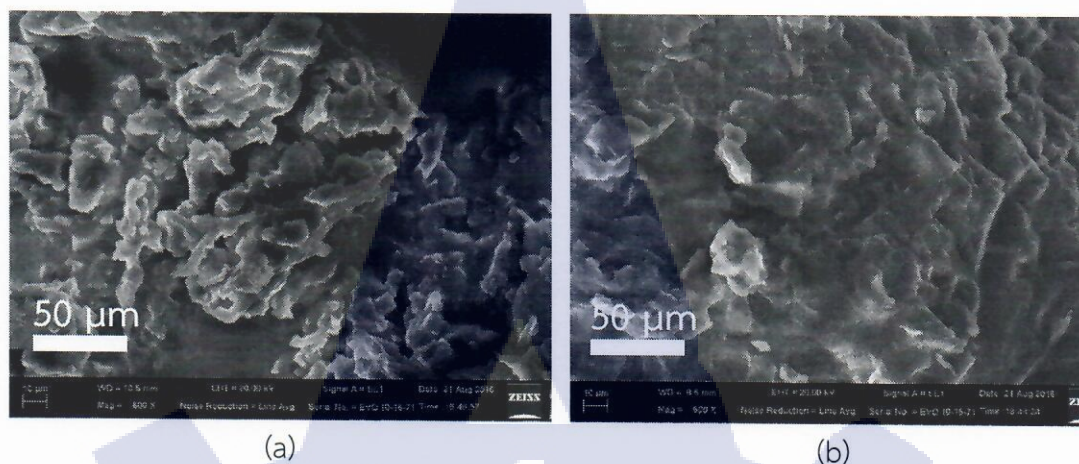


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ใช้ในประเทศไทย [15]

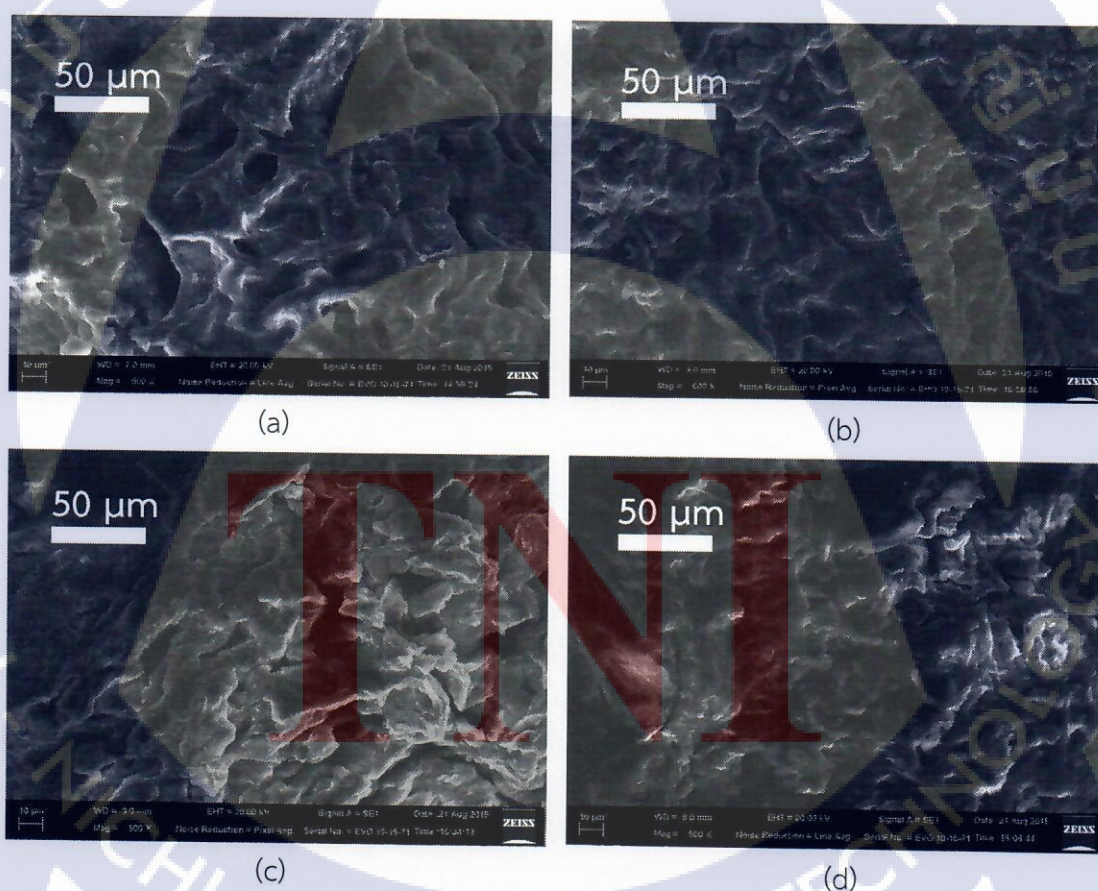
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ใช้อยู่ในประเทศไทย รวมไปถึงค่าความร้อนของถ่านลิกไนท์ จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าความร้อนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านลิกไนท์ที่มีอยู่ในประเทศไทย และมีความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด อย่างเห็นได้ชัด แต่ยังมีค่าต่างจากถ่านโค้กเล็กน้อย

4.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ

รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะพื้นผิวกากกาแฟจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ของถ่านชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูป และลักษณะพื้นผิวด้านในของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทดสอบแรงอัดมาแล้ว จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าหลังจากผ่านกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพด้วยเครื่องอัดถ่านชีวภาพโดยการอัดในแนวตั้ง ที่เงื่อนไขการผลิต เวลา 20 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180 °C โมเลกุลของกากกาแฟเกิดการยึดเกาะตัวกันเป็นก้อน จากรูปจะเห็นได้ว่าหลังจากที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว ช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากอิทธิพลของความร้อนและความดัน ที่ทำให้ถ่านชีวภาพ ยึดเกาะตัวกันมากขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นสูง และสามารถต้านแรงอัดได้มากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 500 เท่า (a) ลักษณะพื้นผิวของกากกาแฟก่อนผ่านกระบวนการผลิต (b) ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟที่เงื่อนไขการผลิต เวลา 20 นาที ความดัน 16 MPa อุณหภูมิ 180 °C



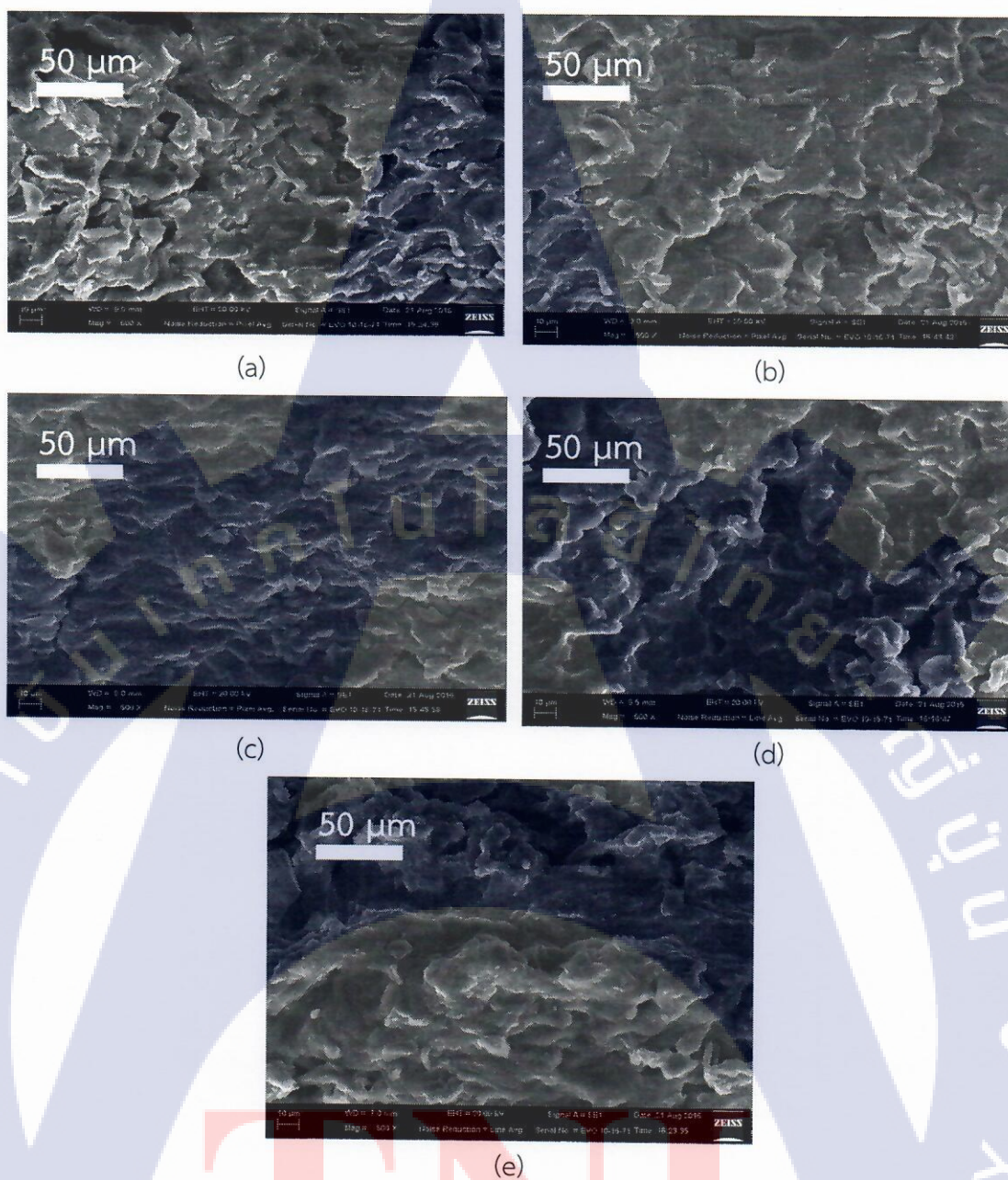
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 180 °C
(a) 10 MPa (b) 12 MPa (c) 14 MPa (d) 16 MPa

จาก รูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 180 °C ที่ความดัน 10 MPa 12 MPa 14 MPa และ 16 MPa จะเห็นได้ว่า ที่ความดัน 10 MPa ช่องว่างที่พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีลักษณะใหญ่กว่าช่องว่างพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ความดันอื่นอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความหนาแน่นรวมและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.8 ซึ่งถ่านชีวภาพที่ใช้ความดัน 10 MPa ในการผลิต (ที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกัน) มีค่าความหนาแน่นรวมและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดต่ำที่สุด

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่แตกต่างกันในอุณหภูมิการผลิตที่ต่างกัน ที่เวลา 15 นาที ความดัน 16 MPa ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องขนาดของรูพรุน ในลักษณะเดียวกันกับรูปแบบของความดันที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้ คือขนาดของช่องว่างพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะมีขนาดลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพควบคู่กับค่าความหนาแน่นใน รูปที่ 4.3 และค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดใน รูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันเช่นเดียวกัน



TNI



รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เวลา 15 นาที ความดัน 16MPa
(a) 150 °C (b) 160 °C (c) 170 °C (d) 180 °C (e) 190 °C

4.5 สรุป

จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกกกาแพข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นรวม และความต้านทานแรงอัดสูงสุด คืออุณหภูมิการผลิต และ ความดันการผลิต ตามลำดับ ซึ่งสมบัติทั้งสองนี้ มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันคือความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านชีวภาพจะสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นรวมมากขึ้น ด้วยเหตุผลที่ว่าเมื่ออุณหภูมิและการ

ผลิตสูงทำให้โมเลกุลของกากกาแฟสามารถยึดเกาะตัวกันได้มากกว่า ช่องว่างของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยอุณหภูมิและความดันต่ำ ส่งผลให้สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชีวภาพ

	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความต้านทาน แรงอัดสูงสุด (MPa)	ความต้านทาน แรงอัดสูงสุดที่ ความดันสูง (MPa)	ค่าความร้อน
ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ (10 นาที, 190 °C, 16 MPa)	1.33	69	N/A	4910
ถ่านชีวภาพจากกิ่งไม้ต้นบัว และพลับ [31]	N/A	100-110	N/A	N/A
ถ่านชีวภาพจากสมุนไพรมะขาม ญี่ปุ่น [32]	1.38	127	N/A	N/A
ถ่านชีวภาพจากเปลือกเคอร์รี่ [33]	N/A	130	N/A	N/A
ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ผสมไม้ซี ดาร์ญี่ปุ่น [35]	1.39	110	2	N/A
ถ่านโค้ก [24]	1.1	20	N/A	7,000

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของถ่านชีวภาพ ผลิตจากวัตถุดิบต่างๆ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ งานวิจัยชิ้นนี้ และสมบัติของถ่านโค้ก ถ่านโค้กมีค่าความหนาแน่น 1.1 g/cm³ และความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 20 MPa ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสมบัติดังกล่าวของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟมีค่าสูงกว่าของถ่านโค้กค่อนข้างมาก แต่เมื่อเทียบผลดังกล่าวกับถ่านชีวภาพจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดนั้นยังมีความแตกต่างกันเกือบเท่าตัว เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มีขนาดอนุภาคต่างกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของวัตถุดิบกับความต้านทานแรงกดสูงสุดในงานของ Torii et al [34] แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบขนาดเล็กจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดต่ำกว่าวัตถุดิบขนาดใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟและถ่านโค้กพบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะการผลิต ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการผลิต แบ่งเป็น 3 เวลา คือ 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที ความดันที่ใช้ในการผลิต คือ 10 MPa 12 MPa 14 MPa และ 16 MPa และอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต คือ 150 °C 160 °C 170 °C 180 °C และ 190 °C ต่อสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) สมบัติทางความร้อน (Calorific Property) ได้แก่ ค่าความร้อน (Calorific Value) และสมบัติทางกล (Mechanical Property) ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Maximum Compressive Strength) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ ซึ่งเป็นกาแฟชนิดอราบิก้าปลูกที่ทางเหนือของประเทศไทยและผ่านกระบวนการชงแบบไทย (กาแฟโบราณ) ซึ่งสามารถสรุปได้จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทั้งสามประการได้จากการหาค่าความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดของถ่านชีวภาพ

5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นรวมของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต ความดันที่ใช้ในการผลิต และ เวลาที่ใช้ในการผลิตตามลำดับ โดยที่มีความสัมพันธ์ในเชิงบวก กล่าวคือ ถ่านชีวภาพจะมีความหนาแน่นรวมสูงเมื่ออุณหภูมิ ความดันและ เวลา ในการผลิตเพิ่มขึ้น

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน (Calorific Property)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ คือ ความดันและเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยที่ความดันที่ใช้ในการผลิตนั้นส่งผลเชิงลบต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ ซึ่งหมายความว่าหากความดันในการผลิตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพลดลง แต่ค่าความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการผลิตมากขึ้น แต่ปัจจัยทั้งสองที่กล่าวมานี้ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ

5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกล (Mechanical Property)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด คือ อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ใช้ในการผลิตตามลำดับ โดยทั้งสามปัจจัยการผลิตนี้ส่งผลในเชิงบวกต่อค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟจะมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากหากใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการผลิต ในกรณีของเวลาที่ใช้ในการผลิตจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด

นอกเหนือจากการสรุปปัจจัยการผลิตที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพแล้ว งานวิจัยนี้ยังสามารถสรุปได้อีกว่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อกัน

โดยพบว่า ถ่านโค้กมีค่าความหนาแน่น 1.1 g/cm^3 ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 20 MPa และมีค่าความร้อน $7,000 \text{ kcal/kg}$ ซึ่งจากผลการทดลองในกรณีของค่าความหนาแน่น ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟทุกเงื่อนไขการผลิตมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของถ่านโค้ก และมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดสูงกว่าถ่านโค้กทุกกรณี ยกเว้นกรณีที่ใช้เวลาในการผลิต 10 นาที ความดัน 12 MPa ความร้อน 150°C ในการผลิต และมีค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านโค้กเล็กน้อยในทุกกรณี

สภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิการผลิต 190°C ความดัน 16 MPa เวลา 10 นาที เนื่องจากสภาวะการผลิตดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของถ่านโค้กอย่างมาก และมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับสภาวะการผลิตอื่นๆ ดังนั้นจึงพิจารณาที่เวลาที่ใช้ในการผลิต ซึ่งหากนำไปต่อยอดการผลิตในปริมาณมาก เวลาในการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองขั้นต้นเพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และทำการทดลองเพิ่มเติม ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการทดลองอีกหลายขั้นตอน ก่อนจะนำเข้าสู่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

5.2 แนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง

- 1) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของวัตถุดิบและถ่านชีวภาพที่ได้ด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพเพิ่มเติม
- 2) ทำการทดลองเพิ่มเติมที่อุณหภูมิการผลิตที่สูงขึ้น เพื่อดูแนวโน้มค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ
- 3) ทำการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ โดยผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อาทิเช่น แกลบ ฟางข้าว ซึ่งมีอยู่มากในประเทศไทย เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของถ่านชีวภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] BP PLC, "*BP Statistical Review of World Energy*," [Online] Available: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>. [Accessed: Dec. 10, 2014].
- [2] International Energy Agency, "*South East Asia Energy Outlook*," [Online] Available: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/southeastasiaenergyoutlook_weo2013specialreport.pdf. [Accessed: Dec. 10, 2014].
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "*Thailand Energy Statistics 2013*," [Online] Available: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/report13/statistics2556r_p.pdf. [Accessed: Jan. 3, 2015]
- [4] E. Dlugokencky and P. Tans "*Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*," National Oceanic and Atmospheric Administration [Online] Available: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ff.html>. [Accessed: Mar. 14, 2015]
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "*Thailand Alternative Energy Situation 2013*," [Online] Available: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/report13/alternative%20energy2013%20.pdf. [Accessed: Jan. 3, 2015]
- [6] Federal Ministry for Economic Affairs, "*Thailand: Renewable Energy Policy Update*," [Online] Available: http://www.thai-german-cooperation.info/download/20150520_pdp_re_%20policy%20factsheet.pdf [Accessed: Sep. 9, 2015]
- [7] L. J. Jönsson et al., "Bioconversion of lignocellulose: inhibitors and detoxification," *Biotechnology for Biofuels*, vol. 6, pp.1-10, January, 2013.
- [8] International Coffee Organization, "*Statistics on Coffee*," [Online] Available: <http://www.ico.org/historical/2010-19/PDF/TOTPRODUCTION.pdf>. [Accessed: Jan. 3, 2015].

- [9] N. Kondamudi et al., "Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, pp. 11757–11760, December, 2008.
- [10] A. Farah, "*Coffee: Emerging Health Effects and Disease Prevention*," John Wiley & Sons, [Online] Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119949893.ch2/summary> [Accessed: Jun. 14, 2015].
- [11] H. Ito et al., "Ignition Behavior of Bio-Coke (Highly Densified Biomass Fuel) in High-Temperature Air Flows," *Journal of Thermal and Technology*, vol.6, no. 1 pp. 111-122, November, 2011.
- [12] สุพิชญา เชิดเกียรติกุล, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ," *The 3rd National Interdisciplinary Academic Conference, TNIAC2015*, กรุงเทพมหานคร, 15 พฤษภาคม 2558, หน้า 66.
- [13] A. S. Franca and L. S. Oliveira., "Coffee Processing Solid Wastes: Current Uses and Future Perspectives," *Agricultural Wastes Nova Science Publisher*, vol.1, pp. 155-189, 2009.
- [14] Molecular Expressions Cell Biology and Microscopy Structure and Function of Cells & Viruses, "Plant Cell Wall," [Online] Available: <http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html>. [Accessed: Jun. 7, 2015].
- [15] นคร ทิพย์วรงค์, *พลังงานชีวภาพ: เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2553.
- [16] A. Brandt et al., "Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids," *Royal Society of Chemistry*, December, 2012 [Online] Available: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/gc/c2gc36364j>. [Accessed: Jan. 27, 2015].
- [17] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, "ชีวมวล," [Online] Available: <http://www.eppo.go.th/eng/Load/ET08.pdf>. [Accessed: Jan. 3, 2015].
- [18] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, "เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด," [Online] Available: http://www.ete.eng.cmu.ac.th/article_detail.php?aid=13.

- [19] Vietnam Trading Promotion, "Wood Pellet with High Quality," [Online] Available: <http://www.vtraco.com/0504-16-Wood-pellet-with-High-Quality>. [Accessed: Feb. 8, 2015].
- [20] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, "พลังงานจากขยะ," [Online] Available: <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET13.pdf>. [Accessed: Jan. 3, 2015].
- [21] Pollution Prevention and Abatement Handbook, "Coke Manufacturing," [Online] Available: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/9ecab70048855c048ab4da6a6515bb18/coke_PPAH.pdf?MOD=AJPERES. [Accessed: Feb. 8, 2015].
- [22] เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยจันทระเกษม, "กรรมวิธีผลิตเหล็กกล้า," [Online] Available: <http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/iron/iron2.html>. [Accessed: Feb. 8, 2015].
- [23] Energy Business Directory, "Foundry Coke Coal," [Online] Available: http://www.isplc2006.org/b2b/energy/6/foundry_coke_coal_253.html. [Accessed: Feb. 8, 2015].
- [24] Mizuho Information and Research Institute, "Project for Promoting the Spread of Technologies to Counter Global Warming," [Online] Available: http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/001062.pdf. [Accessed: Jun. 8, 2015].
- [25] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "เตาอุตสาหกรรม," [Online] Available: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Fac/Fac_14.pdf. [Accessed: Feb. 8, 2015].
- [26] เดชะ ต้นมีสุข และ วรางคณา สุขสม, "ค่าความร้อนเชื้อเพลิง: ปฏิบัติการเคมี," กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น, 2558.
- [27] มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา "ความหนาแน่น," [Online] Available: http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/Book-CeramicTest/physic-chapter3.html. [Accessed: Feb. 15, 2015].
- [28] วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์, "สมบัติทางกลของโลหะ: วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน," กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2548.

- [29] ALFA Testing Equipment “*Compression Tester*,” [Online] Available: <http://www.alfalab.eu/alfa/news/05.html>. [Accessed: Feb. 15, 2015].
- [30] 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. 36-40, May, 2011.
- [31] S. Mizuno et al., “Formation Characteristics of High-density and High-hardness New Briquette Based on Herby biomass,” *Journal of Japan Institute of Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 41-47, February, 2011.
- [32] S. Mizuno et al., “A Study of Physical Properties of High-Density Solid Biomass, Bio-coke, with Unutilized Biomass,” *Journal of Japan society of Mechanical Engineers*, vol. 11, no. Special Issue, pp. s19-s24, February, 2012.
- [33] M. Fuchihada et al., “Influence of Production Condition of High Hardness Solid Fuel Made from Coffee Residues on the Combustion Property,” *Journal of Smart Processing*, vol. 2, no. 2, pp. 88-93, April, 2013.
- [34] Y. Torii et al., “Forming Characteristics of Bio-coke with a Mixture of Bamboo and Carbonized Japanese Cedar,” *Journal of Smart Processing*, vol. 1, no. 2, pp. 63-70, January, 2013.
- [35] S. Mizuno et al., “Scale Effect of Compressive Strength Properties under High Temperature, for Green Tea Bio-coke,” *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, vol. 13, no. 2, pp. 190-193, December, 2013.
- [36] Ingeo Trade Company, “*Concrete Compression Machine*,” [Online] Available: www.ingeo-trade.com. [Accessed: Aug. 19, 2015]

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- [1] J. Chaichanawong, S. Cherdkeattikul, P. Supachutikul, "Effect of Particle Size on Properties of Biocoke from Used Coffee Ground," *TNI Journal of Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 44-47, July-December 2015.

ผลงานตีพิมพ์ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติ

- [1] S. Cherdkeattikul, K. Nantasaksiri, P. Saisermak, J. Chaichanawong, "Effects of Forming Temperature on Biocoke Properties from Used Coffee Ground," *Proceedings of the 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, TSME-ICoME 2015*, Petchaburi, Thailand, December 16-18, 2015.
- [2] S. Cherdkeattikul, K. Nantasaksiri, P. Saisermak, J. Chaichanawong, "Influence of Forming Pressure on Properties of Biocoke from Used Coffee Ground," *Proceedings of the 4th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology, JCREN 2015*, Matsuyama, Japan, December 5-7, 2015.
- [3] J. Chaichanawong, S. Cherdkeattikul, P. Supachutikul, "Preparation of Biocoke from Coffee Grounds," *Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, ATEM'15*, Toyohashi, Japan, October 6-8, 2015.
- [4] J. Chaichanawong, S. Cherdkeattikul, P. Supachutikul, S. Burapornpong, M. Fakkao, T. Ida, "Production of biocoke from biomass resources in Thailand," *Proceedings of the 5th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality, ICCCI 2015*, Kurashiki, Japan, July 7-10, 2015.
- [5] สุพิชญา เชิดเกียรติกุล, ปิ่นทิพย์ ศุภชุตikul, จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ," *The 3rd National Interdisciplinary Academic Conference, TNIAC 2015*, กรุงเทพฯ, 15 พฤษภาคม 2558.