

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างโดยการบูรณาการ กระบวนการทอรีรีแฟกชัน
และการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยกำหนดสัดส่วนของส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพ

**PRODUCTION OF ELEPHANT DUNG BIOFUEL BY INTERGRATING
TORREFACETION AND BRIQUETTE PROCESSES:
DETERMINTION OF EFFECTIVE INGREDIENTS
AND THEIR PROPORTIONS**



อาทิตยา มานันแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างโดยการบูรณาการ
กระบวนการทอรรีแฟกชัน และการอัดแท่งเชื้อเพลิง
โดยกำหนดสัดส่วนของส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพ

ผู้วิจัย

อาทิตย์ มาอินแก้ว

สาขาวิชา

พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัช ฌรัฐ จันทร์ศรี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.นพดล เหล่าศิริพจน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัช ฌรัฐ จันทร์ศรี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ โชติเดชณรงค์)

วันที่ 25 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างโดยการบูรณาการกระบวนการทอรีรีแฟกชัน และการอัดแท่งเชื้อเพลิง โดยกำหนดสัดส่วนของส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพ

ผู้วิจัย : อาทิตยา มาอินแก้ว

สาขาวิชา : พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ อนุรักษ์ จันท์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

: รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

บทคัดย่อ

ป้างช้างในตำบลกุดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ประสบปัญหาเกี่ยวกับการจัดการมูลช้างที่มีปริมาณมากส่งผลให้ทำลายสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านมูลช้างที่ผลิตด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชัน พร้อมหาสัดส่วนการผสมที่มีประสิทธิภาพต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง มูลช้างจึงถูกนำพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งถูกออกแบบด้วยสมการกำลังสองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) กระบวนการทอรีรีแฟกชันใช้อุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการป้อนวัตถุดิบ 600 กรัมต่อชั่วโมง เพื่อแปลงสภาพมูลช้างให้เป็นของแข็งทอรีรีไฟด์ น้ำมันชีวภาพ และแก๊ส เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งของแข็งทอรีรีไฟด์จากมูลช้างมีความหนาแน่นเท่ากับ 613 และ 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นทางพลังงานเท่ากับ 9.09 และ 11.93 กิโลจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ ปริมาณผลผลิตเชิงมวลร้อยละ 79 และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 20 โดยการอัดแท่งเชื้อเพลิงใช้ของแข็งทอรีรีไฟด์จากมูลช้าง ตัวประสาน และน้ำ ในอัตราส่วน 5 : 2.5 : 1 ด้วยแรงดัน 40 บาร์ เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง ของแข็งทอรีรีไฟด์จากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากทอรีรีไฟด์จากมูลช้าง มีค่าความร้อนสูง 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตามค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดแท่งต่ำกว่า 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากกระบวนการผลิตมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 7 แม้ว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจะมีอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ และคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี แต่มีค่าความทนทานต่ำส่งผลให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (FCR), อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแบบจำเพาะ (SFC) และกำลังการใช้พลังงาน (PC) สูงจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่า

ร้อยละ 7 ข้อดีคือการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มากกว่าแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ถึง 40 เท่า ในขณะที่แก๊สชนิดอื่นที่ปล่อยออกมาน้อยกว่า การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า ราคาของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีต้นทุน และระยะการคืนทุนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เนื่องจากมาจากการแปรสภาพมูลช้างเป็นของแข็งทอรัรีไฟด์ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง กระบวนการผลิต และการเลือกใช้เตาเผาชีวมวลที่เหมาะสม พร้อมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สอดคล้องกับการดำเนินงานตามสภาพจริง

คำสำคัญ : มูลช้าง, ของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้าง, เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง, เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้าง, เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น



The Title : Production of Elephant Dung Biofuel by Integrating, Torrefaction and Briquette Processes: Determination of Effective Ingredients and Their Proportions

The Author : Artidtaya Mainkaew

Program : Community Energy and Environment

Thesis Advisors

: Assistant Professor Dr. Surachai Narat Jansri Advisor

: Associate Professor Dr. Adisak Pattiya Co – advisor

ABSTRACT

An elephant sanctuary in Kuet Chang Subdistrict, Mae Taeng District, Chiang Mai Province, Thailand, has the problem with managing large amounts of elephant dung, which results in damage to the environment. This research investigated the production of bio – solid fuel from elephant dung and torrefied elephant dung, as well as finding the optimal mixing ratio for the production of fuel briquettes. The economic feasibility of the production process was also evaluated. The optimal condition for the production of fuel briquettes from elephant dung was predicted using a quadratic reciprocal equation at a 95% confidence level ($p < 0.05$). The optimal condition required a raw material, binder, and water ratio of 5:2.5:1, compressed at a pressure of 40 bar. This optimal condition was used to produce fuel briquettes from elephant dung and from torrefied elephant dung solid, which was a product of the torrefaction process using a continuous torrefaction reactor at 280°C with a feed rate of 600 g/h. Both products had densities of over 600 and 800 kg/m³, which meet the standard. This resulted in energy densities of 9.09 and 11.93 GJ/kg. Fuel briquettes from torrefied elephant dung had better chemical, thermal, and water resistance properties than fuel briquettes from elephant dung but had lower shatter resistance. This resulted in a higher fuel burn rate, specific fuel consumption rate, and calorific value, leading to a thermal efficiency of less than 7%. The advantage is that it releases 40 times more carbon dioxide (CO₂) than carbon monoxide (CO), while other gases are emitted less. Economic cost analysis found that

fuel briquettes from torrefied elephant dung had a higher cost and payback period than fuel briquettes from elephant dung. This is because the conversion of elephant dung to torrefied solid requires electrical energy. The quality of fuel briquettes should be improved. Production process and selecting the appropriate biomass burner along with evaluating the economic worthiness in line with actual operations.

Keywords : Elephant Dung, Torrefied Elephant Dung, Elephant Dung Briquettes, Torrefied Elephant Dung Briquettes ,Basic Economics



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย อนุรักษ์จันทร์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา และแนวทางในการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา และแนวทางในการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์นี้ และให้คำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. นวตล เหล่าศิริพจน์ ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนวิจัยของสำนักงานและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน (สนพ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ หน่วยวิจัยพลังงานชีวภาพและทรพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และปางช้างในตำบลกุดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อทุน สถานที่เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำวิจัย

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย ที่คอยแนะนำ ให้แนวทาง และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อาทิตยา มาอินแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	๗
ABSTRACT	๘
กิตติกรรมประกาศ.....	๙
สารบัญ	๗
สารบัญตาราง	๙
สารบัญภาพ.....	๙
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
กรอบแนวคิดการวิจัย	4
2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
ชีวมวล.....	6
ประเภทของชีวมวล	10
ชีวมวลจากข้าง.....	14
การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน.....	19
กระบวนการแปรรูปชีวมวลเชิงความร้อน	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2	
กระบวนการทอรีรีแฟกซ์	26
ตัวประสาน	29
เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเชื้อเพลิง	29
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	31
การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์	37
เอกสารที่เกี่ยวข้อง	39
3	
วิธีดำเนินการวิจัย	41
การเตรียมวัตถุดิบ	41
การผลิตมูลขี้ังทอรีรีไฟต์	42
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี	43
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง	43
การศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิง ชีวมวลขี้ัง	44
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	52
4	
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	54
เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง	54
สมบัติทางเคมี	60
สมบัติทางกายภาพ	64
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	69

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4	
ความเข้มข้นการปล่อยมลพิษไอเสียของเรือเพลิงอัดแท่ง.....	71
ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเรือเพลิงอัดแท่ง	72
5 สรุป และข้อเสนอแนะ	74
สรุป.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก การเก็บข้อมูลการทดลอง.....	90
ภาคผนวก ข เอกสารการตรวจวิเคราะห์.....	96
ภาคผนวก ค การเผยแพร่บทความวิจัย.....	112
ประวัติผู้วิจัย	142

สารบัญตาราง

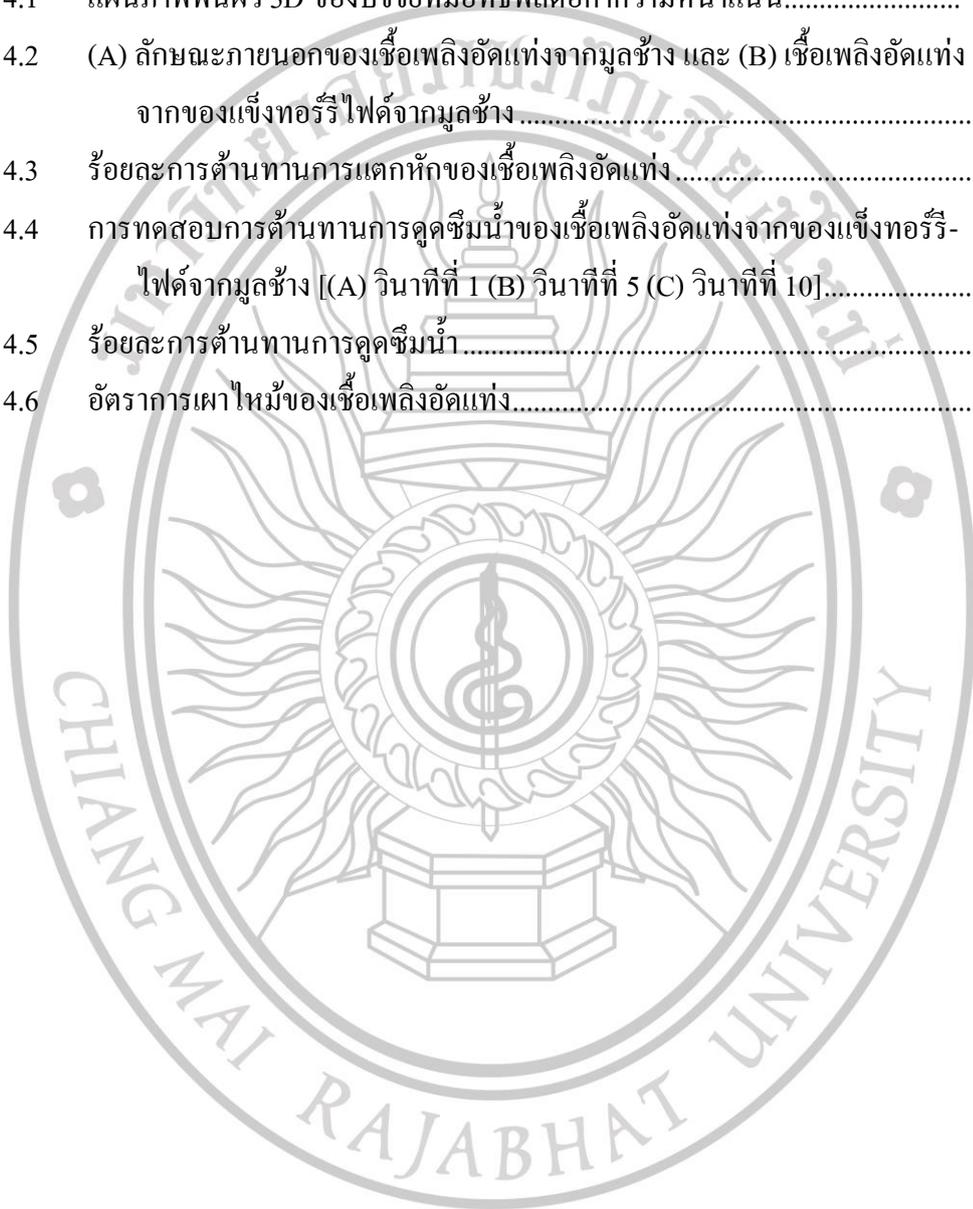
ตารางที่	หน้า
2.1	ประเภทของขยะเชื้อเพลิง..... 12
2.2	ประเภทและปริมาณของอาหารที่ช้างบริโภคต่อวัน 15
2.3	ความสมดุลทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 25
3.1	ช่วงของการแปรค่าตัวแปรอิสระ..... 45
3.2	ผลการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 45
4.1	การออกแบบการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 55
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการตอบสนองต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง..... 57
4.3	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดแท่ง 61
4.4	คุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงจากมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์ และกิ่งไม้ลำไย..... 70
4.5	ค่าความเข้มข้นการปล่อยมลพิษไอเสียของเชื้อเพลิงอัดแท่ง 71

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย	5
2.1 องค์ประกอบของชีวมวล	7
2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	8
2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	8
2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	9
2.5 แหล่งที่มาของชีวมวล	10
2.6 มูลช้าง	16
2.7 การผลิตกระดาษสามูลช้าง	17
2.8 บ่อผลิตแก๊สชีวภาพ	18
2.9 ปุ๋ยหมักมูลช้าง	18
2.10 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้	21
2.11 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	22
2.12 กระบวนการไพโรไลซิส	24
2.13 กระบวนการทอรรีแฟกชัน	26
2.14 ขั้นตอนของกระบวนการทอรรีแฟกชัน	27
2.15 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอรรีแฟกชัน	27
2.16 ตัวอย่างของแถบที่ผ่านกระบวนการแปรรูปก่อนและหลัง	28
2.17 การบีบอัดชีวมวลแบบการใช้ตัวประสาน	30
3.1 กระบวนการทอรรีแฟกชัน	41
3.2 กระบวนการทอรรีแฟกชัน	42
3.3 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกและกระบออัด	43
3.4 การวัดการยึดตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	47
3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	48
3.6 การทดสอบด้วยวิธีแบบต้มน้ำเดือด	49
3.7 กระบวนการทดสอบ Water Boiling Test (WBT) ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	50
3.8 การวิเคราะห์การปล่อยมลพิษไอเสีย	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.1	แผนภาพพื้นผิว 3D ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่น..... 59
4.2	(A) ลักษณะภายนอกของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และ (B) เชื้อเพลิงอัดแท่ง จากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง 65
4.3	ร้อยละการต้านทานการแตกหักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง 67
4.4	การทดสอบการต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รี- ไฟต์จากมูลช้าง [(A) วินาทีที่ 1 (B) วินาทีที่ 5 (C) วินาทีที่ 10]..... 67
4.5	ร้อยละการต้านทานการดูดซึมน้ำ 68
4.6	อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง..... 69



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตำบลกีดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ มีปางช้างกระจายในพื้นที่จำนวน 28 แห่ง มีช้างประมาณ 400 เชือก ด้วยพื้นที่ที่มีปริมาณช้างมากทำให้ชุมชนประสบปัญหาเกี่ยวกับการจัดการมูลช้างที่มีปริมาณมากถึงวันละ 12,000 กิโลกรัม ผู้ประกอบการต้องแบกรับค่าใช้จ่ายในการจัดการมูลช้างค่อนข้างสูง ขณะเดียวกัน อบต.กีดช้าง มีนโยบายในการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในชุมชน โดยนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการสนองต่อนโยบายขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และลดภาระการจัดการของเสีย ผู้ประกอบการจึงได้นำมูลช้างมาผลิตเป็นกระดาษสา โดยใช้กระบวนการที่ปรับปรุงจากการผลิตกระดาษสามูลช้างของวันชัย อัสววิบูลย์กิจ (2550) และงานวิจัยของเรวัตน์ เต็มกล้า และคนอื่น ๆ (2559) ได้ทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากมูลช้างตามวิธีมาตรฐานผลิตกระดาษ โดยเทคนิค Technical Information Paper (TAPPI) คือ น้ำหนัก ความหนา ความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด ความต้านการหักพับ และความความต้านแรงดิ่ง พบว่ามีคุณสมบัติเหมาะสม อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการยังคงแบกรับภาระด้านค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการมูลช้างสูงอยู่ เนื่องจากการผลิตกระดาษสามูลช้างใช้มูลช้างน้อยกว่าร้อยละ 10 ของปริมาณมูลช้างที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน

ผู้ประกอบการจึงได้แก้ปัญหาโดยนำมูลช้างส่วนที่เหลือไปกองไว้ใกล้แหล่งน้ำหลักตามธรรมชาติ (แม่น้ำแม่แตง) เพื่อให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติ การดำเนินการนี้นอกจากใช้เวลานาน และใช้พื้นที่ค่อนข้างมากแล้วยังอาจทำให้เชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับมูลช้างไหลลงสู่แม่น้ำสายหลัก สามารถส่งผลกระทบต่อ การดำเนินชีวิตของคนในพื้นที่ได้ (วีระพันธ์ อนุชนชัยวิช, 2559) แต่ถ้ามูลช้างที่กองทิ้งไว้ไม่สามารถย่อยสลายไม่ทัน หรือพื้นที่ไม่สามารถรองรับมูลช้างที่มีปริมาณมากผู้ประกอบการบางรายจัดการ โดยการเผาทิ้งในที่โล่งแจ้ง (กิตติกร สาสุจิตต์, 2556) การกองทิ้งไว้และการเผาทำลายนอกจากก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ และทางอากาศแล้วยังส่งผลทำให้เป็นการทำลายทัศนียภาพของชุมชนและสถานที่ท่องเที่ยวต่าง ๆ ในชุมชน

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้มีหลายหน่วยงานได้เข้ามาแก้ไขโดยการนำมูลช้างนำมาใช้ประโยชน์ในรูปของการผลิตเป็นกระดาษสามูลช้าง (มยุรี เรื่องสมบัติ, 2552; วีระพันธ์ อะนันชัยวัช, 2559) และการทำปุ๋ยหมัก (มานพ ชุมภูแก้ว, 2557) นอกจากนี้ยังได้มีการนำมูลช้างเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) (อัจฉรา พิเลิศ, 2555; พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น, 2559) แม้มีการศึกษาการแปรรูปมูลช้างเป็นพลังงานในรูปแก๊สชีวภาพแต่ด้วยวิถีของคนในชุมชนยังนิยมใช้เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งเป็นหลักจึงทำให้เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สไม่เป็นที่นิยม ดังนั้นกระบวนการที่เหมาะสมและสอดคล้องกับวิถีชีวิตของคนในชุมชน คือ กระบวนการที่สามารถแปรรูปมูลช้างเป็นเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแข็งที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการที่มีผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เผาไหม้ได้ คือ กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ในลักษณะคล้ายกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ส่วนใหญ่เป็นถ่านที่เรียกว่า ถ่านทอรรีไฟด์ (Torrefied Biomass) นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์อีก 2 ประเภท คือ ของเหลวทอรรีไฟด์ (Torrefied Liquid) และแก๊สทอรรีไฟด์ (Torrefied Gas) เช่น งานวิจัยของสภาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ (2562) ที่นำกระบวนการทอรรีแฟกชันมาแปรรูปไบออยให้เป็นถ่านทอรรีไฟด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบไหลต่อเนื่อง พบว่า ถ่านทอรรีไฟด์มีค่าความร้อน 21.1 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเป็น 1.21 ตามลำดับ

มูลช้างเป็นชีวมวลที่มีค่าความร้อน และค่าความหนาแน่นเชิงความร้อนต่ำ สตีเฟ่น และคนอื่น ๆ (Stepień et al., 2019) จึงได้นำกระบวนการทอรรีแฟกชันมาใช้ในการแปลงสภาพมูลช้างให้เป็นถ่าน โดยถ่านมูลช้างที่ผลิตได้มีค่าความร้อน 20.92 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แต่กระบวนการขึ้นรูปถ่านอัดเม็ดของงานวิจัยนี้ต้องใช้แป้ง (Starch) เป็นตัวประสาน ซึ่งแป้งนี้มีมูลค่า และค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนในการอัดเม็ดเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะหาตัวประสานชนิดอื่นมาทดแทน โดยเฉพาะตัวประสานที่ผลิตได้จากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันมาทดแทน เพื่อลดค่าใช้จ่ายของต้นทุน ซึ่งกระบวนการทอรรีแฟกชันใช้อุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส เพื่อสลายมูลช้างบางส่วนกลายเป็นแก๊ส ถ่านทอรรีไฟด์ และของเหลวทอรรีไฟด์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านมูลช้างที่ผลิตด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน พร้อมหาสัดส่วนการผสมที่มีประสิทธิภาพต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน
2. เพื่อหาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากมูลช้าง และถ่านมูลช้างที่ผลิตด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน
3. เพื่อวิเคราะห์หาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ได้สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากมูลช้าง และถ่านมูลช้างที่ผลิตด้วย และกระบวนการทอรรีแฟกชัน
2. เป็นการสนองต่อนโยบายขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นด้านการจัดการของเสียชุมชน และลดภาระการจัดการของเสียของผู้ประกอบการ
3. ได้การวิเคราะห์หาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. มูลช้าง
มูลช้างที่ได้จากปางช้างในตำบลถักช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ก่อนนำเข้ากระบวนการผลิตด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันต้องตากแดดให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 โดยมวล (มาตรฐานแห้ง)(%d.b.)
2. การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้าง
การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน ใช้อุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส พร้อมวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และค่าความร้อนของถ่านทอรรีไฟด์
3. การศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากถ่านมูลช้าง
การศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากถ่านมูลช้าง โดยการอัดแท่งใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน จากนั้นศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ด้วยวิธีการทดสอบแบบต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test: WBT)

ขอบเขตด้านสถานที่

1. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏ- เชียงใหม่
2. ตำบลกี้ดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่
3. หน่วยวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
4. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

นิยามศัพท์เฉพาะ

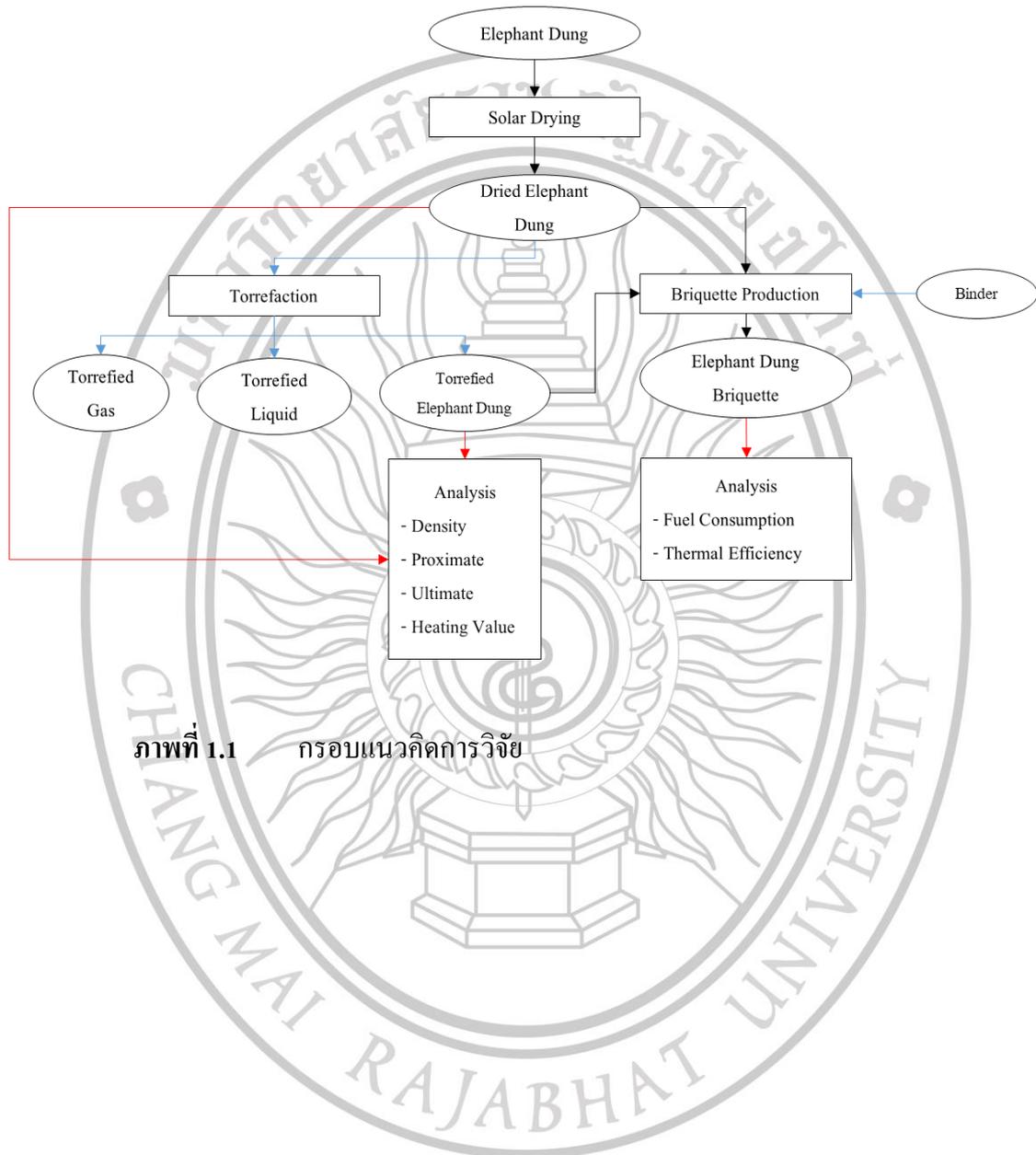
1. มูลช้าง คือ ของเสียจากช้างที่ได้จากปางช้างในพื้นที่ตำบลกี้ดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ มีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 โดยมวล
 2. กระบวนการทอรรีแฟกชัน คือ การแปรรูปมูลช้างโดยใช้กระบวนการทอรรีแฟกชัน ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นมูลช้างทอรรีไฟด์ (Torrefied Elephant Dung) ของเหลวทอรรีไฟด์ (Torrefied Liquid) และแก๊สทอรรีไฟด์ (Torrefied Gas)
 3. ตัวประสาน คือ แป้งมันสำปะหลังที่จำหน่ายตามท้องตลาดผสมน้ำที่อุณหภูมิห้อง
 4. การอัดแท่ง คือ การอัดแท่งเชื้อเพลิงด้วยกระบอกลูกสูบที่ใช้แรงอัดจากแท่นไฮดรอลิก
- คั้น โยก
5. สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากถ่านมูลช้าง คือ อัตราส่วนของวัตถุดิบ ได้แก่ มูลช้างแห้ง และถ่านมูลช้างที่ผลิตได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชัน ต่อแป้งมัน- สำปะหลัง

กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัยสรุปได้ดังภาพที่ 1.1 โดยเริ่มต้นจากการนำมูลช้างมาตากแดดให้แห้งให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 โดยมวล จากนั้นนำมูลช้างที่ผ่านการไล่ความชื้นนำมาแบ่งเข้ากระบวนการ 2 กระบวนการ ดังนี้

กระบวนการที่ 1 กระบวนการทอรรีแฟกชัน คือ การย่อยสลายในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เพื่อสลายมูลช้างบางส่วนกลายเป็นแก๊ส ถ่านทอรรีไฟด์ และของเหลวทอรรีไฟด์ ถ่านทอรรีไฟด์ที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในกระบวนการอัดแท่ง

กระบวนการที่ 2 กระบวนการอัดแท่ง (Briquette Production) เป็นกระบวนการที่เพิ่มความหนาแน่นให้กับมูลช้างหรือถ่านจากมูลช้าง โดยใช้ตัวประสานในรูปของแท่งเชื้อเพลิง พร้อมวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

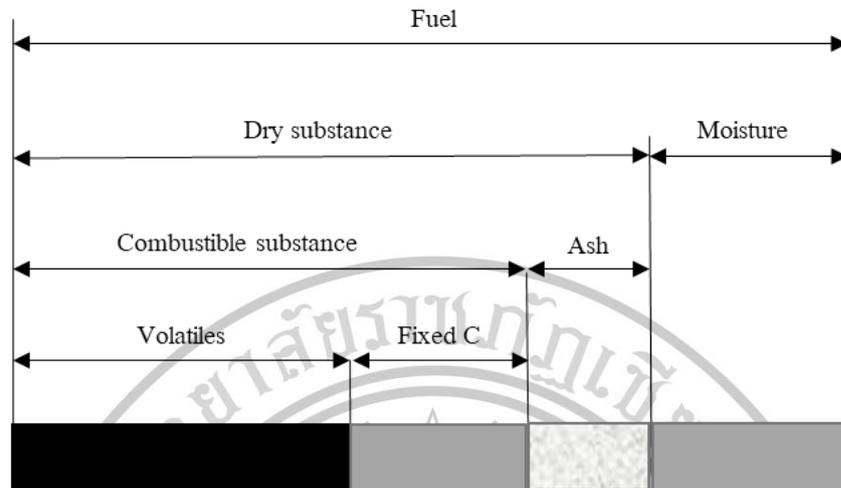
บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ได้มาจากพืชและสัตว์ เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง มูลสัตว์ และของเสียหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะชีวมวลที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย และมีศักยภาพสูง อีกทั้งยังสามารถแปลงสภาพเพื่อใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายตามสมบัติของชีวมวลแต่ละชนิด การใช้ประโยชน์จากชีวมวลนอกจากช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วยังช่วยแก้ปัญหาการจัดการของเสีย และวัสดุเหลือทิ้งได้ในเวลาเดียวกันด้วย โดยชีวมวล ประกอบด้วย องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนี้

ชีวมวลมีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอน (C) ธาตุไฮโดรเจน (H) และธาตุออกซิเจน (O) มากถึงร้อยละ 97 – 99 โดยมีมวล เชิง และอาเซเวโด (Sheng & Azevedo, 2005) องค์ประกอบทางกายภาพของชีวมวล ดังภาพที่ 2.1 ประกอบด้วย ความชื้น (Moisture) และวัตถุแห้ง (Dry Substance) ซึ่งมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ สารที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance) ได้แก่ สารระเหย (Volatiles) คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) และสารที่เผาไหม้ไม่ได้ (Incombustible Substance) ได้แก่ เถ้า (Ash)



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของชีวมวล
ที่มา : เซ็ง และอาเซเวโด (Sheng & Azevedo, 2005)

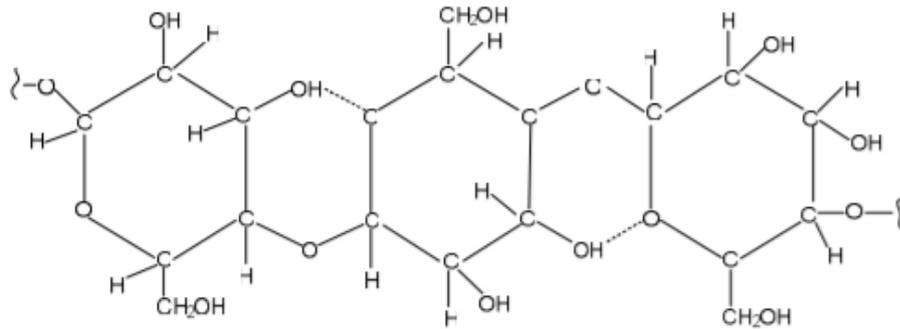
องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้

ชีวมวลมีองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สารระเหย และคาร์บอนคงที่ (กนกพงษ์ ศรีเที่ยง, 2563) สารระเหย ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 18 – 22 โดยมวล แก๊สไฮโดรเจน (H₂) ร้อยละ 18 – 20 โดยมวล และ แก๊สมีเทน (CH₄) ร้อยละ 1 – 2 โดยมวล (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล, 2551) ส่วนคาร์บอนคงที่เป็นโครงสร้างโมเลกุลของธาตุคาร์บอนในชีวมวลที่มีความเสถียร ชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบสูงสามารถติดไฟได้ง่าย โยโกยามะ และยุกิฮิโกะ (Yokoyama & Yukihiko, 2015) และเมื่อพิจารณาชีวมวลที่มีคาร์บอนคงที่ต่ำทำให้มีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ และติดไฟค่อนข้างช้าทำให้เผาไหม้ได้ไม่ดี โยโกยามะ และยุกิฮิโกะ (Yokoyama & Yukihiko, 2015) องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ในชีวมวลมีปริมาณไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณและองค์ประกอบทางชีวเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด องค์ประกอบทางชีวเคมีที่สำคัญของชีวมวลประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) เมื่อได้รับความร้อนองค์ประกอบเหล่านี้สามารถย่อยสลายทางความร้อน และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย

1. เซลลูโลส

ชีวมวลมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (สาลินี ศรีวงษ์ชัย, 2560) ซึ่งมีสูตรเคมี คือ (C₆H₁₀O₅)_n เซลลูโลสเป็นน้ำตาลเชิงเส้นประกอบด้วย

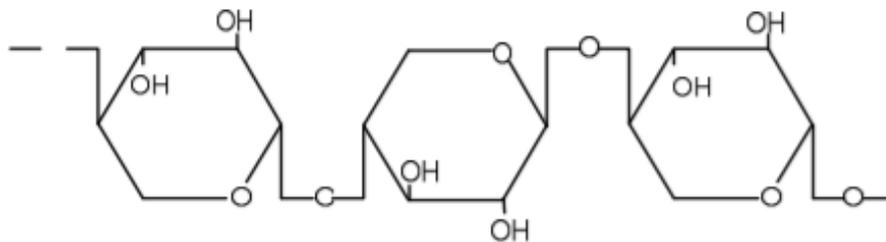
Anhydro – Glucose ที่เชื่อมต่อกันมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นผลึกกลูโคส และโมโนเมอร์หลักของเซลลูโลส (สถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ, 2562) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส
ที่มา : บาซู (Basu, 2010)

2. เฮมิเซลลูโลส

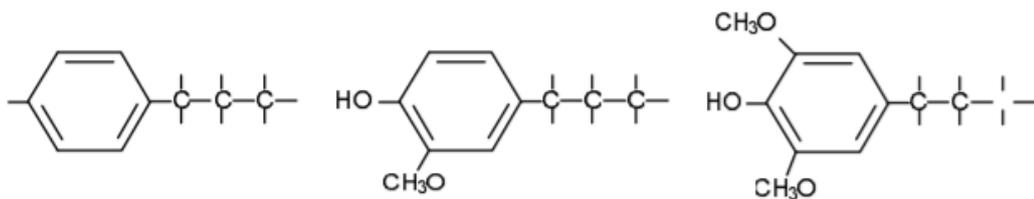
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นกิ่ง ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งรวมมี เฮมิเซลลูโลสมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส ฮวง และคนอื่นๆ (Huang et al., 2019) ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ ไซเลนส์ (Xylane) กลูโคแมนแนน (Glucomannans) และอะราบีโนกาแลคแตน (Arabinogalactans) เฮมิเซลลูโลสในพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันโดยมีอยู่ประมาณร้อยละ 20 – 35 โดยมวล ฮวง และคนอื่นๆ (Huang et al., 2019)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส
ที่มา : บาซู (Basu, 2010)

3. ลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับรองมาจากเซลลูโลส มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังภาพที่ 2.4 สามารถเปลี่ยนเป็นสารกลุ่มเอโรมาติก (Aromatic) ได้ ส่วนมากพบในองค์ประกอบของพืชที่เป็นเส้นใย หาง และคนอื่น ๆ (Huang et al., 2019) อยู่ในช่วงร้อยละ 17 – 30 โดยมวล โมฮัน และคนอื่น ๆ (Mohan et al., 2006)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน
ที่มา : บาซู (Basu, 2010)

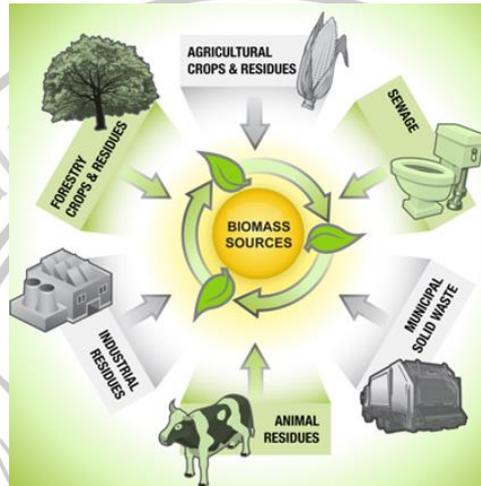
องค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้

ชีวมวลหลังจากถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วเกิดมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Incombustible Substances) หรือที่เรียกว่า เถ้า (Ash) ชีวมวลแต่ละประเภทมีสัดส่วนของปริมาณเถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน วัฒนจิรา และคนอื่น ๆ (Wattanachira et al., 2016) ชีวมวลทั่วไปมีเถ้าเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1 – 3 โดยมวล ยกเว้นแกลบ และฟางข้าว มีสัดส่วนเถ้าประมาณร้อยละ 10 – 20 โดยมวล อบูบาคาร์ และติติโลเย (Abu Bakar & Titiloye, 2013) สัดส่วนของเถ้าในเชื้อเพลิงมีผลต่อการทำงานของเตาปฏิกรณ์ ถ้าสัดส่วนของเถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงทำให้พลังงานเชื้อเพลิงแก่ลดลง และเตาปฏิกรณ์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บเถ้ามากขึ้น และหากชีวมวลมีเถ้าที่สามารถหลอมตัวได้สามารถสร้างปัญหาในการเผาไหม้ และการกำจัด อชีกาลิม (Açikalın, 2015)

องค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้ เช่น ความชื้น ซึ่งชีวมวลส่วนมากเป็นผลผลิตหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีน้ำเป็นองค์ประกอบร้อยละ 8 – 10 โดยมวล ซู และคนอื่น ๆ (Xu et al., 2014) ดังนั้นก่อนนำชีวมวลไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนต้องลดความชื้น (Moisture) ของชีวมวลให้ลดลง เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นต่ำจะทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเผาไหม้จึงต้องนำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งก่อน

ประเภทของชีวมวล

ชีวมวลสามารถจำแนกออกเป็น 6 ประเภทหลัก ได้แก่ ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้จากป่า ผลผลิตและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร น้ำเสีย ขยะมูลฝอยชุมชน ของเสียทางอุตสาหกรรม และของเสียจากสัตว์ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แหล่งที่มาของชีวมวล
ที่มา : ซาฟาร์ (Zafar, 2019)

ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้จากป่า

ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากป่า (Forestry Crops and Residues) เป็นชีวมวลที่มีอยู่ตามธรรมชาติ หรือที่เกิดจากเพาะปลูกมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งในอดีตเชื้อเพลิงที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากป่าไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากนัก ส่วนมากเป็นเพียงการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในครัวเรือนตามชนบทเท่านั้น ต่อมาเมื่อเชื้อเพลิงที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า เช่น น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และแก๊สธรรมชาติ เริ่มมีราคาสูงขึ้น ประกอบกับความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น จึงมีการนำเศษวัสดุเหลือใช้บางประเภท เช่น ใบ กิ่ง ลำต้น และราก มาใช้วัตถุดิบในการผลิตเป็นพลังงานชีวมวลมากขึ้น เช่น การอัดแท่งเชื้อเพลิงจากเศษใบไม้อัดด้วยเครื่องอัดแบบมือ (วัชรภรณ์ ยุบลเขต, 2560) และการศึกษาการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากไม้ที่ได้จากป่าทางตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกาให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความหนาแน่นสูงและสามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าและพลังงานความร้อนได้ ไนเดอร์ไมเออร์ และคนอื่น ๆ (Neidermeier et al., 2020)

ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural Crops and Residues) เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด และอ้อย ผลผลิตและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ทั้งการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาคลุมดิน และการใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้ เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้สำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน (วรรณรพ ขันธิรัตน์ และคนอื่น ๆ, 2562) และการผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวที่เป็นของเสียทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศฟิลิปปินส์ สุนทราราม และ นาฏราช (Sundaram & Natarajan, 2009)

ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทยที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์มีมากถึง 43 ล้านตันต่อปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับปริมาณน้ำมันดิบ 3 พันล้านตัน วัสดุเหลือใช้เหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ได้ไม่มีหมด รัฐบาลจึงมีนโยบายผลักดันให้มีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้น เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป และมีราคาสูง รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าจากต่างประเทศได้ แม้ปัจจุบันความต้องการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากขึ้น แต่ยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับการจัดเก็บ และการขนส่งเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

น้ำเสีย

น้ำเสีย (Waste Water) เกิดจากการใช้น้ำในกิจกรรมของครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรม อาหาร โรงฆ่าสัตว์ และห้องเย็นแช่อาหาร ถ้ามีการกำจัดน้ำเสียที่ไม่ถูกวิธีทำให้เกิดน้ำเสียและส่งกลิ่นเหม็น การบำบัดน้ำเสียสามารถดำเนินการได้หลายวิธีทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน (เพอริคลอไรด์ และ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์) ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (อนุภัทร สุกบรรทัดย์ และณัฐวิ ช้างชัย, 2561)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในปัจจุบันมักใช้พลังงานและสารเคมีมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสูง และมีความยุ่งยากในการดูแลรักษา รวมถึงการดำเนินการ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เนื่องจากใช้ไฟฟ้าเพียงน้อยส่วนใหญ่ใช้พลังงานในรูปแบบพลังงานแสงอาทิตย์ (จริยา ยัมรัตน์บวร, 2549) และประเทศสวีเดนแลนด์มีการจัดการน้ำเสียด้วยระบบกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์เสีย โดยประยุกต์ใช้ในการระเหยน้ำเสียในกระบวนการอุตสาหกรรมกัลวาโนพลาสติก (Galvanoplasty) เพื่อระเหยน้ำเสียให้ได้น้ำกลั่นนำกลับไปใช้ในกระบวนการอีกครั้ง ดินด์ และชมิท (Dind & Schmid, 1978) นอกจากนั้นน้ำเสียยัง

สามารถนำมาใช้ในกระบวนการการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เชื้อเพลิง สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน เช่น การหมักร่วมระหว่างมูลไก่ค่อน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน พบว่าอัตรา 30 ต่อ 200 มีอัตราผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุดโดย ชันวานี จิใจ และชัยรัตน์ ศิริพัธนะ (2559)

ขยะมูลฝอยชุมชน

ขยะมูลฝอยชุมชน (Municipal Solid Waste) เช่น พลาสติก กระดาษ และเศษอาหาร เป็นต้น เป็นของเหลือทิ้งจากการอุปโภคซึ่งไม่ต้องการใช้แล้ว ปัจจุบันนี้มีเทคโนโลยีมากมายที่ช่วยเปลี่ยนขยะพลังงานเพื่อรองรับปริมาณขยะที่เกิดขึ้น

ขยะมูลฝอยชุมชนถูกส่งเข้าสู่กระบวนการจัดการด้านต่าง ๆ เช่น การคัดแยกวัสดุที่เผาไหม้ได้ออกมา การฉีกหรือตัดขยะมูลฝอยออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ การลดขนาด และการลดความชื้น เพื่อเป็นการปรับปรุงและแปลงสภาพขยะให้เป็นเชื้อเพลิง (วสันต์ ปินะเต, 2559) ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งถูกเรียกว่า ขยะเชื้อเพลิง (Refuse Derived Fuel: RDF) (กรมควบคุมมลพิษ, 2561)

พลังงานจากขยะมูลฝอยชุมชนที่ได้ออกมาส่วนมากอยู่ในรูปของความร้อน ไฟฟ้า และเชื้อเพลิง เช่น การศึกษารูปแบบการจัดตั้งโรงงานแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากพลาสติก กระดาษ และไม้ ซึ่งใช้ปูนขาวเป็นตัวประสานเป็นวัตถุดิบหลักในการกระบวนการผลิต (กรกมล สราญรัมย์ และวิทยา ขงเจริญ, 2558)

ตารางที่ 2.1 ประเภทของขยะเชื้อเพลิง

ชนิด	กระบวนการ	ระบบการเผาไหม้
RDF 1 MSW	คัดแยกส่วนที่เผาไหม้ได้ออกด้วยมือรวมทั้งขยะที่มีขนาดใหญ่	Stoker
RDF 2 Coarse RDF	มีการบดหรือตัดขยะมูลฝอยอย่างหยาบ ๆ	Fluidized Bed Combustor, Multi fuel Combustor
RDF 3 Fluff RDF	คัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก เช่น โลหะ แก้ว และอื่น ๆ มีการบดหรือตัดจนทำให้ร้อยละ 95 ของขยะมูลฝอยที่คัดแยกแล้วมีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว	Stoker

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิด	กระบวนการ	ระบบการเผาไหม้
RDF 4 Dust RDF	นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มา ทำให้อยู่ในรูปของผงฝุ่น	Fluidized Bed Combustor, Multi fuel Combustor
RDF 5 Densified RDF	นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มา ผ่านกระบวนการอัดแท่งโดยให้มีความหนาแน่นมากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	Fluidized Bed Combustor, Multi fuel Combustor
RDF 6 RDF Slurry	นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มา ผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปของ เชื้อเพลิงเหลว และ Slurry	Swirl Burner
RDF 7 RDF Syngas	นำขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มา ผ่านกระบวนการ Gasification เพื่อ ผลิต Syngas ที่ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ได้	Burner, Integrated Gasification – Combined Cycle (IGCC)

ที่มา : วัสน์ ปิยะเต, 2559; กรมควบคุมมลพิษ, 2561

ของเสียทางอุตสาหกรรม

เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่ได้จากของเสียทางอุตสาหกรรม (Industrial Waste) เช่น เศษไม้ กากของเสีย หรือตะกอนเปียก เป็นต้น ของเสียเหล่านี้สามารถนำสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่วัสดุโดยตรง เช่น การนำเศษไม้เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้มาใช้และสร้างต้นแบบในงานสถาปัตยกรรมให้เกิดประโยชน์ด้านความงามและการใช้สอย (ธนกร นิรันดร์นุต, 2556) ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมความเป็นไปได้ในการลงทุนเกี่ยวกับการผลิตพลังงานจากของเสีย จึงได้นำของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานของตนมาผลิตเป็นพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานพื้นฐาน เช่น การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล (เอกลักษณ์ กิติภักดิ์ถาวร, 2556) การนำของเสียทางอุตสาหกรรมมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยชีลื้อยสำหรับนำไปใช้

ประโยชน์ด้านการปรุงอาหารและใช้ในอุตสาหกรรม ชยามาลี และคนอื่น ๆ (Shyamalee et al., 2015)

ของเสียจากสัตว์

มูลสัตว์เป็นของเสียจากสัตว์ (Animal Waste) ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด ทั้งในรูปของวัสดุปรับปรุงดิน และเชื้อเพลิง มูลสัตว์ที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ มูลสุกร มูลวัว มูลไก่ และมูลแพะ เป็นต้น มูลสัตว์เหล่านี้ถูกแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง 2 รูปแบบ คือ เชื้อเพลิงสถานะของแข็ง และสถานะแก๊ส การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากมูลสัตว์เริ่มจากการนำมูลสัตว์ตากแห้งแล้วนำไปอัดเป็นเชื้อเพลิงแท่ง หรือเชื้อเพลิงเม็ด เช่น การอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากมูลควายด้วยเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงต้นแบบระบบอัดเย็น และการศึกษาศักยภาพของมูลวัวในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงผสมกับฟางข้าวสาลี และแกลบ อีฟติคาร์ และคนอื่น ๆ (Iftikhar et al., 2019) ส่วนการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ทำได้โดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่น การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักร่วมระหว่างมูลม้ากับน้ำลำไยในถังหมักขนาด 10 ลิตร (ศิริประภา ชัยเนตร, 2555) และการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลแพะกับก้านข้าวโพด จาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2013) พลังงานชีวมวลจากมูลสัตว์สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ปั่นไฟ แก๊สโซลีนขนาดเล็กโดยใช้แก๊สชีวภาพจากการหมักไบโอมและมูลวัวโดยใช้ถั่วเหลืองแห้งบดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (อัญชณา อุประภูล และคนอื่น ๆ, 2560)

ชีวมวลจากช้าง

ช้าง (Elephant) เป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม วงศ์ Elephantidae มีอยู่ 3 สายพันธุ์ คือ ช้างแอฟริกา (Africana Elephant) ช้างป่าแอฟริกา (African Forest Elephant) และช้างเอเชีย (Elephant Maximus) กระจายตัวอยู่ทั่วแอฟริกาใต้ เอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ช้างแอฟริกา เมื่อโตเต็มที่สูงประมาณ 3.5 เมตร มีงาทั้งตัวผู้และตัวเมีย ช้างแอฟริกาชอบอาศัยอยู่ในป่าโปร่งไม่กั้วต่อแสงแดด และทนความร้อนได้ดี แต่มีนิสัยดุร้ายจึงไม่มีการนำมาฝึกเพื่อใช้งานบลานซ์ (Blanc, 2008) แต่ช้างป่าแอฟริกา มีขนาดเล็กกว่าพอสมควร มีใบหูเล็ก งาเรียวยาว และตรง บางตัวงาอาจชี้ลงพื้น ตัวผู้มีขนาดโตกว่าเล็กน้อย ถิ่นอาศัยมักอยู่ตามป่าที่บดบังทุ่งหญ้าตอนกลางทางตะวันตกของทวีปแอฟริกา ช้างป่าแอฟริกาถูกเรียกว่าเป็น "ช้างแคระ" เนื่องจากมีขนาดใหญ่เต็มที่น้ำหนักเพียง 900 กิโลกรัม เดอบรอยน์ (Debruyne, 2003) ส่วนช้างเอเชียมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 3 เมตร ตัวผู้มีงา เรียกว่า ช้างพลาย ส่วนช้างตัวผู้ที่ไม่มีงา เรียกว่า ช้างสืออ ซึ่งสามารถพบได้แต่มีจำนวนน้อย สำหรับช้างตัวเมีย เรียกว่า ช้างพัง ปกติไม่มีงา แต่ถ้าช้างตัวเมียนั้นมีงามันถูก

เรียกว่า “ขนาย” ช้างเอเชียเป็นสัตว์ที่ชอบอากาศชุ่มชื้น และไม่ชอบแสงแดดจัด ช้างเอเชียมีความเฉลียวฉลาดสามารถนำมาฝึกไว้ใช้งาน บลานซ์ (Blanc, 2008)

จำนวนประชากรช้าง

ปัจจุบันโลกมีประชากรช้างประมาณ 450,000 เชือก ส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในทวีปแอฟริกา ซึ่งมีจำนวน 400,000 เชือก ส่วนที่เหลืออาศัยในทวีปเอเชียมีจำนวน 50,000 เชือก สตีเฟ่น และคนอื่น ๆ (Stepień et al., 2019) สำหรับประเทศไทยมีจำนวนประชากรช้างประมาณ 3,000 – 3,500 เชือก (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2557) กระจายออกไปในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย

การบริโภคของช้าง

ช้างบริโภคอาหารแต่ละวันตามประเภทและปริมาณดังตารางที่ 2.2 คิดเป็นร้อยละ 6 – 12 ของน้ำหนักตัว ศรี โคตเพชร (Srikotaphet, 2017) หรือประมาณวันละ 200 – 300 กิโลกรัม (จिरชัย อาคะจักร และวุฒินันท์ พวงสาย, 2558) และดื่มน้ำวันละ 2 – 3 ครั้ง (อัจฉรา พิเลศ, 2555)

ตารางที่ 2.2 ประเภทและปริมาณของอาหารที่ช้างบริโภคต่อวัน

ประเภทอาหาร	อาหารสำหรับช้าง 1 เชือก
อ้อย	100 กิโลกรัม
กล้วยสุก	20 หวี หรือ 20 กิโลกรัม
สับปะรด	20 หวี หรือ 20 กิโลกรัม
แตงโม	20 หวี หรือ 20 กิโลกรัม
แตงกวา	20 กิโลกรัม
มันแกว	20 กิโลกรัม
รวม	200 กิโลกรัม

ที่มา : สมิธ และจอห์นสัน (Smith, & Johnson, 2010); จิรัชย์ อาคะจักร และวุฒินันท์ พวงสาย, 2558

มูลช้าง

ช้างขับถ่ายวันละ 15 – 20 ครั้ง ครั้งละ 5 – 8 ก้อน มูลช้างแต่ละก้อนมีน้ำหนักประมาณ 1 – 2 กิโลกรัม (เรวัชน์ เต็มกล้า และคนอื่น ๆ, 2559) ดังนั้นใน 1 วันช้างแต่ละเชือกมีการขับถ่ายประมาณวันละ 100 – 150 กิโลกรัม (ร้อยละ 60 ของปริมาณอาหารที่กินในแต่ละวัน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอายุ และสายพันธุ์ (Srikotaphet, 2017) มูลช้างประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ร้อยละ 47.36, 18.97 และ 14.91 ตามลำดับ สารีพรรณ และเรืองแสง (Saripan & Reungsang, 2014) และมูลช้างมีความชื้นที่ร้อยละ 49.19 โดยมวล อินทรียัตถุมิคำร้อยละ 48.90 โดยมวล ถั่วมีคำร้อยละ 50.81 โดยมวล และค่าความร้อนมีค่า 11.41 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สตีเฟ่น และคนอื่น ๆ (Stepieñ et al., 2019)



ภาพที่ 2.6 มูลช้าง

การใช้ประโยชน์จากมูลช้าง

มูลช้างเป็นของเสียที่ประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นหลักจึงยากต่อการจัดการเนื่องจากต้องใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติเป็นเวลานาน และต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ของมูลช้างทั้งในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ และการแปรรูปเป็นพลังงานดังนี้

1. กระดาษสา

มูลช้างถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูปเป็นกระดาษสา (อัจฉรา พิเลิศ, 2555) ดังภาพที่ 2.7 โดยเริ่มต้นจากการทำความสะอาดมูลช้าง และต้มเหี่ยวมูลช้าง ซึ่งได้เยื่อที่เปื่อยยุ่ยทำการตีปั่นเยื่อหรือทุบเยื่อ สุดท้าย คือ การทำแผ่นกระดาษโดยนำตะแกรงซ้อนตักเยื่อ นำไปตากแดดให้

แห่ง การทำกระดาษมูลช้างนอกจากเป็นการกำจัดมูลช้างได้โดยตรงแล้ว ที่สำคัญเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเสียด้วย แต่พบว่าการใช้ประโยชน์มูลช้างโดยรูปแบบนี้สามารถลดปริมาณมูลช้างได้เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณมูลช้างที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน



ภาพที่ 2.7 การผลิตกระดาษสามูลช้าง

2. แก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) จากมูลช้าง (กิตติกร สาสุจิตต์, 2556) เป็นการนำของเสียจากช้างมาผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) รองลงมาเป็นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สอื่น ๆ

งานวิจัยของ หทัยทิพย์ สินธูยา และชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาถ (2564) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้วัตถุดิบมูลช้างซึ่งเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส มูลช้างสดถูกเจือจางด้วยน้ำเพื่อให้ได้น้ำชะมูลช้างในอัตราส่วนของมูลช้างต่อน้ำ 1 : 2 โดยทำการหมักแบบกะภายใต้การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นเวลา 60 วัน มีการผลิตแก๊สมีเทนในปริมาณที่สูงจึงได้เลือกในการหมักน้ำชะมูลช้างด้วยระบบหมักกึ่งต่อเนื่องขนาด 50 ลิตรเป็นเวลา 120 วัน ที่อัตราการบรรจุสารอินทรีย์ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมของสารอินทรีย์ต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรต่อวัน ผลการวิจัยพบว่าอัตราการบรรจุสารอินทรีย์ที่ 1.5 กิโลกรัมของสารอินทรีย์ต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรต่อวันสามารถให้ผลผลิตสูงสุด



ภาพที่ 2.8 บ่อผลิตแก๊สชีวภาพ
ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2560

3. ปุ๋ยหมัก

การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารข้างร่วมกับมูลช้างและกากมูลหมัก (แก่งกาจ จันทร์กวีกุล และฐนิยา รังษีสุริชะชัย, 2563) เป็นการหมักด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว โดยทำการหมักในอัตราส่วนหญ้าเนเปียร์ : เหง้าสับปะรด : มูลช้าง : กากมูลช้างหมักด้วยกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 2.5 : 2.5 : 3.5 : 1.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่าปุ๋ยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งกึ่งเหลว สีน้ำตาล กลิ่นของปุ๋ยมี ลักษณะเป็นกลิ่นเปรี้ยว ปัจจัยควบคุมต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - ด่างอยู่ในช่วง 5 - 6 ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 70 - 80 และค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 - 55 องศาเซลเซียส ในส่วนของค่าธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ปุ๋ยหมักมูลช้าง

4. การผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง

การผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Biofuel) จากมูลช้างในรูปของ Refuse-Derived Fuel 5 (RDF-5) เป็นการนำมูลช้างมาผ่านกระบวนการอัดแท่งโดยใช้ตัวประสาน การศึกษารูปแบบที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างของอาทิตยามาอินแก้ว และสุรชัย ฌรัฐ จันทรศรี (2562) พบว่า การผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่มีขนาด 0.841 มิลลิเมตร (20 Mesh) โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง และน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสาน เชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ได้มีลักษณะเป็นแท่ง ส่วนผสมประสานกันดี ไม่มีรอยร้าว นอกจากนี้สามารถนำมูลช้างมาผลิตเป็นถ่านได้ เช่น งานวิจัยของ สตีเฟน และคนอื่น ๆ (Stepień et al., 2019) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรีรีเฟกชันเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการประกอบอาหารในครัวเรือนในพื้นที่ชนบท

การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน

การแปรสภาพชีวมวลเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะของชีวมวลให้มีคุณค่าเพิ่มขึ้นทั้งความชื้น (Moisture) และค่าความร้อน (Heating Value) ทำให้สะดวกต่อการเก็บรักษา อีเซมิน และคนอื่น ๆ (Isemin, et al., 2017) การแปรสภาพชีวมวลที่ได้รับความนิยม สามารถแบ่งได้ดังนี้

การแปรรูปเชิงกายภาพ

การแปรรูปเชิงกายภาพ (Physical Conversion) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปเป็นขยะเชื้อเพลิง การนำเอาองค์ประกอบของขยะที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้มาปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมกับการใช้งาน ได้แก่ กระบวนการอัดแท่ง (Densification) การคัดแยกเฉพาะส่วน และการสกัดน้ำมัน (Oil Extraction) เช่น งานวิจัยของวรัญญา เทพศาสน์กุล และคนอื่น ๆ (2559) ได้ทำการศึกษาการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยวัสดุที่ใช้ คือ เศษกะลามะพร้าว นำมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชัน และนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งด้วยสกรูแบบอัดเย็น และงานวิจัยของณิศาสกร นำเจริญพิณิจ และวิชากร จารุศิริ (2560) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสเศษไม้ชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพบนเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง พบว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสเศษไม้ชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพ น้ำมันชีวภาพมีสมบัติที่ยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้โดยตรง ควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งาน

การแปรรูปเชิงชีวเคมี

การแปรรูปเชิงชีวเคมี (Biochemical Conversion) เป็นการเปลี่ยนมวลชีวภาพในรูปแบบต่าง ๆ เป็นการใช้ประโยชน์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยแก๊สชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน และกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อการผลิตเอทานอล เช่น งานวิจัยของเก่งกาจ จันทร์กวีกุล และฐนียา รังษิสุริยะชัย (2563) ได้ทำการศึกษาการผลิตบิวหมักจากเศษอาหารข้างร่วมกับมูลช้างและกากมูล หมักด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ ด้วยวัสดุผสมระหว่าง เศษหญ้าเนเปียร์ เหง้าสับประรด กากมูลหมัก และมูลช้าง และงานวิจัยของ เหมนิจจารีย์ สารพันธ์ (2560) ได้ศึกษาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจน จากเปลือกสับประรดโดยจุลินทรีย์จากมูลวัว ทำการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศ ปมที่อุณหภูมิห้อง ค่ากรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงแล้วมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน ทำให้จุลินทรีย์ที่ผลิตไฮโดรเจนสามารถผลิตไฮโดรเจนได้น้อยลง

การแปรรูปทางเคมี

การแปรรูปทางเคมี (Chemical Conversion) เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น งานวิจัยของนภาพิทย ปรางทอง และคนอื่น ๆ (2561) ศึกษาการผลิตไบโอ-ดีเซล (Biodiesel) จากแบคทีเรียจำนวน 3 ไอโซเลต คือ GS-4, WWSC-2 และ HCUC9-2 เพื่อนำไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) และงานวิจัยของจุฑาภรณ์ ชนะถาวร และคนอื่น ๆ (2562) ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดกระบก พบว่าสามารถนำน้ำมันจากเมล็ดกระบกมาใช้เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยวิธีการสกัดทางกลและทางเคมีสามารถนำมาใช้ในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดกระบกได้ โดยการสกัดทางเคมีให้ปริมาณน้ำมันสูงสุดร้อยละ 44.53 เมื่อใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุดร้อยละ 83.20

การแปรรูปเชิงเคมีความร้อน

การแปรรูปเชิงเคมีความร้อน (Thermo – Chemical Conversion) เป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน คือ การเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิส ดังภาพที่ 2.10 เช่น งานวิจัยของเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ (2561) ได้พัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ด โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน การทดสอบระบบทำโดยการเผาชีวมวลอัดเม็ดในเตาแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สใช้ชีวมวลอัดเม็ด ปริมาตร 20 ลิตร สามารถโปรดิวเซอร์แก๊สได้ประมาณ 40 นาที โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 590 วัตต์ และงานวิจัยของธนพร เทพสมุทร และคนอื่น ๆ (2564) ได้

นำขยะมูลฝอยและของเหลือทิ้งทางการเกษตรผลิตถ่านระดับชุมชนสามารถทำอุณหภูมิได้ประมาณ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาประมาณ 140 นาที อัตราการให้ความร้อนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันอยู่ที่ประมาณ 2.4 องศาเซลเซียสต่อนาที นเรศวร์ ชื่นอินมณ และ ยุทธชัย บรรเทงจิตร (2556) ได้ศึกษาการกำหนดค่าตัวแปรในผลิตไฟฟ้าด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันจากการใช้แกลบที่เป็นวัตถุดิบ พบว่า ชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสมในเชิงธุรกิจ



ภาพที่ 2.10 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้

กระบวนการแปรรูปชีวมวลเชิงความร้อน

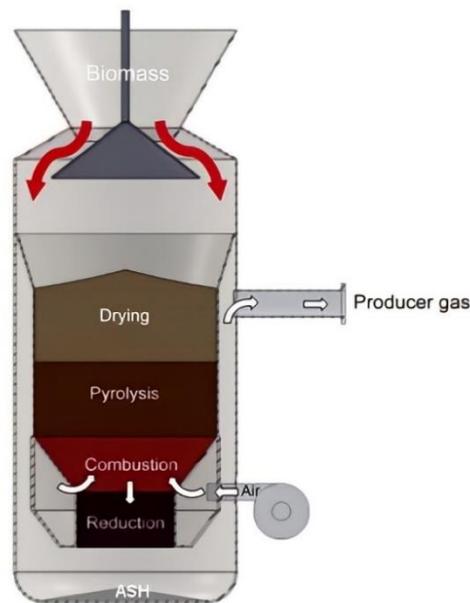
ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น ซึ่งชีวมวลที่นำมาใช้ได้มาจากเศษวัสดุเหลือใช้ที่ส่วนมากเป็นของเสียจากกระบวนการผลิต เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานได้หลายวิธี ดังนี้

การเผาไหม้โดยตรง

การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผาเกิดกระบวนการในที่ซึ่งมีอากาศ เพื่อให้การเผาไหม้ชีวมวลที่สมบูรณ์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง ชีวมวลแต่ละชนิดให้ค่าความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น เปลือกกระดาษมีค่าความร้อน 18.2 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (รัฐกร สวัสดิ์แดง, 2561) ขี้เลื่อยไม้สนมีค่าความร้อน 24.54 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (จารุณี เข้มพิลา และ ภูมินทร์ คงโต, 2564) การใช้กระบวนการความร้อนในการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อเพิ่มค่าพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นกว่าเดิม พรอสคูรินา และคนอื่น ๆ (Proskurina et al., 2017)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง ซึ่งประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหภูมิ (Thermo – Chemical Reaction) ภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) หรือสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน กระณีการ์และรีเสิร์จ (Kanniappan & Research, 2015) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่ง โชนการเกิดปฏิกิริยาได้ 4 โชน ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
ที่มา : ริชาร์ดสัน และคนอื่น ๆ (Richardson et al., 2015)

1. โชนอบแห้ง

โชนอบแห้ง (Drying Zone) เป็นโชนที่ทำหน้าที่ระเหยน้ำออกจากชีวมวลด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 40 – 200 องศาเซลเซียส (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2560) ซึ่งสามารถลดความชื้นของชีวมวลได้ประมาณร้อยละ 5 และค่าความชื้นของชีวมวลเริ่มต้นที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานควรมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้ลดระยะเวลาในการไล่ความชื้นในโชนนี้ และทำให้ชีวมวลติดไฟได้ง่ายขึ้น

2. โซนไพโรไลซิส

โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) หรือเรียกอีกอย่างว่าโซนกลั่นตัว (Distillation Zone) เป็นโซนที่อยู่ระหว่างโซนอบแห้ง และโซนเผาไหม้ โซนนี้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2560) ซึ่งได้รับความร้อนโดยตรงจากโซนเผาไหม้ ผลึกภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ประกอบด้วย ถ่าน และแก๊ส

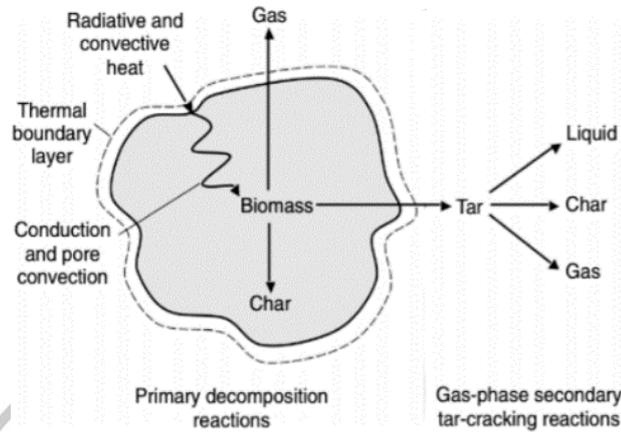
3. โซนเผาไหม้

4. โซนเผาไหม้ (Combustion Zone) โซนนี้มีอุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส เอมีเลีย และคนอื่น ๆ (Emilia et al, 2021) วัตถุประสงค์หรือถ่านคาร์บอนที่เกิดจากโซนไพโรไลซิส เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทโดยตรงให้กับโซนรีดักชันและโซนไพโรไลซิส และถ่ายเทให้กับโซนอบแห้งโซนรีดักชัน

โซนรีดักชัน (Reduction Zone) เป็นโซนที่ผลิตแก๊สสังเคราะห์ ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยกระบวนการแปลงสภาพเป็นแก๊สสังเคราะห์ ปฏิกิริยาเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

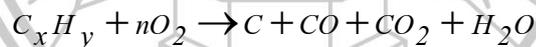
กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่ใช้กระบวนการแปรรูปทางความร้อน (Thermal Conversion Process) ชีวมวลสลายตัวทางความร้อนโดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เปชา และการ์เซีย – เปเรซ (Pecha & Garcia – Perez, 2020) ในสภาวะไร้ออกซิเจน (นันทปรีชา สิงห์ทอง และคนอื่น ๆ, 2563) การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแปรผันตามช่วงของอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ 155 – 200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการระเหยของน้ำ อุณหภูมิที่ 200 – 280 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิ 280 – 380 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการระเหยของแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซี และคนอื่น ๆ (She et al., 2022) โดยแสดงกระบวนการไพโรไลซิส ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กระบวนการไพโรไลซิส
ที่มา : รุยโว่ (Ruivo, 2017)

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย 3 สถานะ ได้แก่ สถานะแก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรคาร์บอน (HC)) สถานะของเหลว (สารละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) และน้ำมันดิน (Tar)) และสถานะของแข็ง (ถ่านไม้ (Charcoal)) (จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร, 2560) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการทั้งสภาวะในการทำปฏิกิริยาดังสมการ ริชาร์ดสัน และคนอื่นๆ (Richardson et al., 2015) ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และชนิดของเทคโนโลยี



กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า ไพโรไลซิสแบบกลาง ไพโรไลซิสแบบเร็ว กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และกระบวนการเทอร์ริแฟกชัน

1. ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) หรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศ กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งหลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส (สถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ, 2562)

ตารางที่ 2.3 ความสมดุลทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ร้อยละของ ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	200	300	400	500	600
C	32.0	28.0	27.0	27.0	25.2
H ₂ O	36.5	32.5.0	27.0	27.0	22.5
CH ₄	8.5	10.0	10.0	10.0	9.0
CO ₂	23.9	28.0	35.0	35.0	36.0
CO	0.0	0.0	1.2	1.2	4.5

ที่มา : อันตัล และกรอนลี (Antal & Grønli, 2003)

2. ไพโรไลซิสแบบกลาง

กระบวนการไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate pyrolysis) เป็นกระบวนการที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวร้อยละ 50 ขณะที่ของแข็งและแก๊สมีประมาณร้อยละ 25

3. ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นการให้ความร้อน 10 – 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวร้อยละ 50 – 60 ของแข็งร้อยละ 25 – 30 และแก๊สร้อยละ 15 – 20 เคอร์ซีค และคนอื่น ๆ (Khurshed et al., 2021)

4. แก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้อากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำในกระบวนการเผาไหม้บางส่วนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

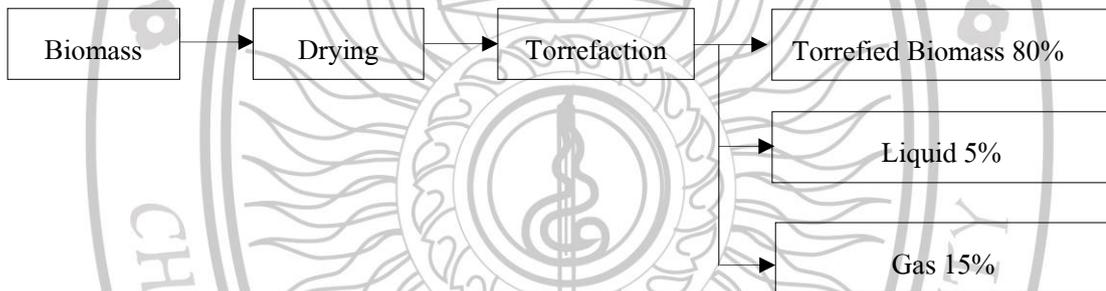
5. ทอรรีแฟกชัน

กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นของแข็ง เรียกว่า ถ่านทอรรีไฟด์ ประมาณ

ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์รองเป็นของเหลว และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ประมาณร้อยละ 5 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

กระบวนการทอรรีแฟกชัน

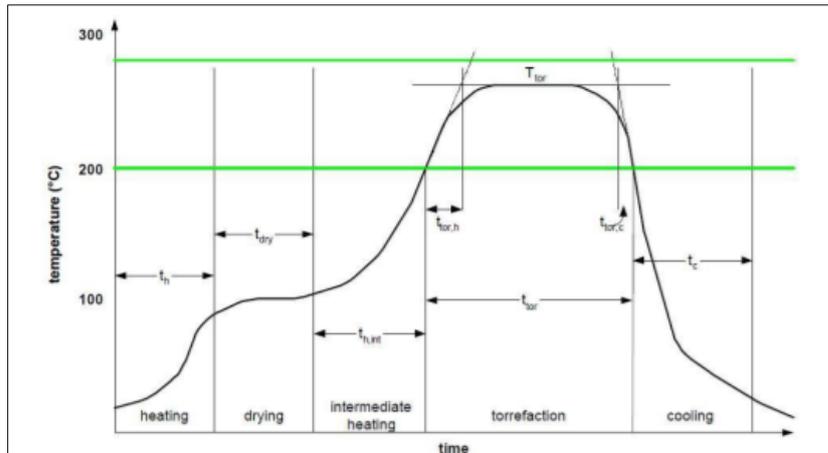
กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) คือ กระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส เจียวเว่ย และคนอื่น ๆ (Jiawei et al., 2022) โดยใช้แก๊สเฉื่อยในระบบเวลาคงอยู่ของของแข็งประมาณ 1 – 120 นาที และอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นของแข็ง เรียกว่า ถ่านทอรรีไฟด์ ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และได้ผลิตภัณฑ์รองเป็นของเหลว และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ประมาณร้อยละ 5 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ไช่ และคนอื่น ๆ (Cai et al., 2017) (สถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ, 2562) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับชีวมวลเริ่มต้น วิกูรซ์ และคนอื่น ๆ (Vigouroux et al., 2008) ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 กระบวนการทอรรีแฟกชัน
ที่มา : จาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2016)

หลักการทํางานของกระบวนการทอรรีแฟกชัน

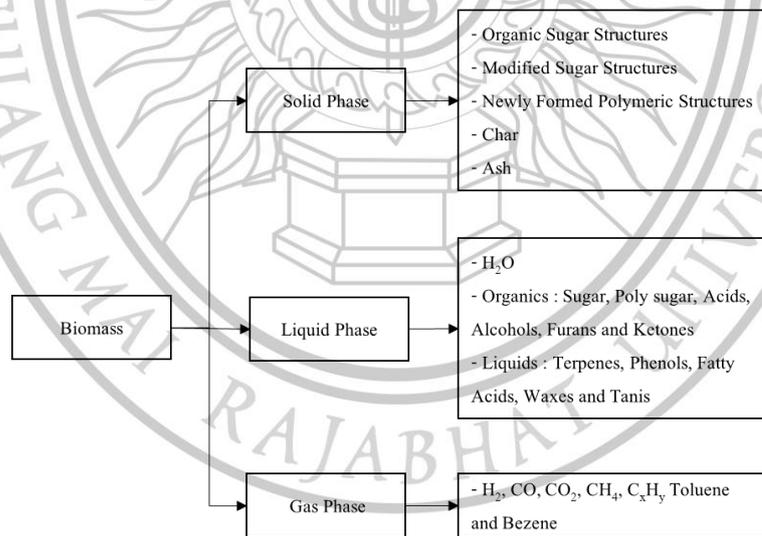
การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน เป็นการเผาไหม้ชีวมวลที่ผ่านการสับละเอียดในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 90 – 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นเพิ่มความร้อนของระบบให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 150 – 200 หรือที่เรียกว่าขั้นตอนการทำความร้อนขึ้นกลาง (Intermediate Heating) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟกชัน และเมื่อระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 200 – 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) ซึ่งต้องรักษาอุณหภูมิของชีวมวลให้คงที่ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการชีวมวลทอรรีไฟด์ถูกปล่อยให้เย็นลง (Cooling) จนถึงอุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ขั้นตอนของกระบวนการทอรรีแฟกชัน
ที่มา : ญัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล (2560)

ผลผลิตจากกระบวนการ

ผลผลิตจากกระบวนการที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการทอรรีแฟกชัน ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา คุณสมบัติชีวมวล (สุรชัย อนุรักษ์ จันทร์ศรี, 2561) ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ผลตกัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอรรีแฟกชัน
ที่มา : สุรชัย อนุรักษ์ จันทร์ศรี, 2561

1. ถ่านทอรรีไฟด์

ถ่านทอรรีไฟด์ (Torrefied Biomass) มีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลเข้ม และมีความมันเงา ดังภาพที่ 2.16 หากมีการปรับปรุงสมบัติของถ่านทอรรีไฟด์มากพอ ถ่านสามารถมีค่าพลังงาน ความร้อนใกล้เคียง หรือดีกว่าถ่านหิน เนื่องจากมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนน้อยมาก จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทดแทนถ่านหิน เช่น งานวิจัยของสถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ (2562) ที่ศึกษากระบวนการทอรรีแฟกชันของใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบท่อไหลแบบต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์ คือ ถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 68 – 89 โดยมวลฐานแห้ง



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างของแกลบที่ผ่านกระบวนการแปรรูปก่อนและหลัง (a) แกลบก่อนกระบวนการแปรรูป (b) แกลบหลังจากอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (c) แกลบที่แปรรูปที่ 250 องศาเซลเซียส (d) แกลบที่แปรรูปที่ 280 องศาเซลเซียส (e) แกลบที่แปรรูปที่ 310 องศาเซลเซียส ที่มา : จาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2016)

2. ของเหลวทอรรีไฟด์

ของเหลวทอรรีไฟด์ (Torrefied Liquid) มีลักษณะเป็นสีดำ โดยกระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส การใช้ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารออกจากเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) ออกมาในรูปของของเหลว (Tar)

3. แก๊สที่ไม่ควบแน่น

แก๊สที่ไม่ควบแน่นหรือแก๊สทอรรีไฟด์ (Torrefied Gas) ในกระบวนการทอรรีแฟกชัน กระบวนการนี้จะมีผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเพียงเล็กน้อย แก๊สที่เกิดจากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีปริมาณน้อย

ตัวประสาน

ตัวประสานเป็นสารที่ผสมลงไปในวัตถุคิบเพื่อทำให้วัตถุคิบเกาะติดกันได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวประสานที่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น แป้งมันสำปะหลัง กาวแป้งเปียก กากน้ำตาล ยางไม้ น้ำมันคิบ และมูลสัตว์ เป็นต้น และตัวประสานที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ ดินเหนียว โคลน เลน และปูนซีเมนต์ เป็นต้น ตัวประสานแต่ละประเภทมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน

ตัวประสานที่สามารถเผาไหม้ได้

ข้อดี

1. หาง่าย และมีราคาถูก
2. มีค่าพลังงานความร้อนสูง

ข้อเสีย

1. มีปริมาณเถ้า
2. มีกลิ่น คว้น และการแตกปะทุขณะติดไฟ

ตัวประสานที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้

ข้อดี

1. หาง่าย
2. สามารถยึดเกาะได้ดีข้อเสีย

ข้อเสีย

1. ราคาแพง
2. มีค่าพลังงานความร้อนสูง
3. การเผาไหม้ใช้เวลานาน และการติดไฟไม่ดี

เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเชื้อเพลิง

การอัดแท่งเชื้อเพลิงเป็นการแปรรูปทางกลซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาแน่นด้วยการใช้แรงกดทำให้ชีวมวลเกิดการอัดแน่นรวมกันเป็นก้อน (ชลดดาไร๋ขาม และคนอื่น ๆ, 2560) โดยการเพิ่มความหนาแน่น (Densification) เป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของชีวมวล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การอัดร้อน และการอัดเย็น

การอัดร้อน

การอัดร้อนที่ความดันสูงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นเทคนิคที่ใช้กับวัสดุหลายชนิด บินเนอร์ และคนอื่น ๆ (Binner et al., 2021) ใช้แรงอัดสูงในการสลายเพกติน (Pectin)

ลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) (นคร ทิพยาวงศ์, 2552) ในเนื้อวัสดุให้กลายเป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงแข็งสามารถใช้กับวัสดุทั่วไปได้ (วรัญญา เทพสาสน์กุล, 2559) เช่น แกลบ ขี้เลื่อย เศษไม้ เป็นต้น

การอัดเย็น

กระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบการอัดเย็นต้องการความดัน และอุณหภูมิต่ำ (พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น, 2559) ซึ่งใช้หรือไม่ใช้ตัวประสานก็ได้ ในกระบวนการการอัดเย็นที่ความดันต่ำอาศัยความสามารถของวัสดุชีวมวลในการจับตัวกันเป็นแท่ง หรือการใช้ตัวประสาน เช่น ปูนขาว แป้งมัน เป็นต้น เติมเข้าไปช่วยเป็นตัวยึดเกาะระหว่างเนื้อวัสดุช่วยในการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (วรัญญา เทพสาสน์กุล และคนอื่น ๆ, 2559) (นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล, 2557)

1. การอัดเย็นแบบการใช้ตัวประสาน

การอัดเย็นแบบการใช้ตัวประสานเป็นการเติมตัวประสาน (Combination) ลงไปเพื่อสารผสมหรือสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (อุกฤษฏ์ นานำปา, 2563) โดยไม่จำเป็นต้องมีการทำให้ลิกนินอ่อนตัว บีบอัดที่ความดัน และอุณหภูมิต่ำ (กระทรวงพลังงาน, 2557) ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การบีบอัดชีวมวลแบบการใช้ตัวประสาน

ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2557

2. การอัดเย็นแบบไม่ใช้ตัวประสาน

การอัดแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิและความดันต่ำโดยไม่ใช้ตัวประสานทำได้เฉพาะกับชีวมวลที่สลายตัวแล้ว (Decayed Biomass) ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่กองทิ้งไว้ข้ามปี (กระทรวงพลังงาน, 2557) หรือชีวมวลสดที่ผ่านกระบวนการหมักย่อยมาแล้วในระดับหนึ่ง (เจตน์สิทธิ์ สำลีรัตน์, 2559)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล ประกอบด้วย การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value) และการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density)

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างทางกายภาพองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบด้วย

1.1 ความชื้น (Moisture) ของชีวมวลที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 3173 บอนซู (Bonsu, 2020) โดยการให้ความร้อนตัวอย่างชีวมวลที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมวล บาการ์ และติติโลเย (Bakar & Titiloye, 2013) ด้วยตู้อบลมร้อน (Drying Oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 104 – 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำที่อยู่ในวัตถุดิบระเหย ค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (Wet Basis: wb.) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

สมการ

$$M = \frac{(W - d)}{W} \times 100$$

M	ค่าความชื้น (ร้อยละ)
W	น้ำหนักตัวอย่างทดลองก่อนอบ (กรัม)
d	น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังอบ (กรัม)

1.2 สารระเหย (Volatile Matter) ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 บอนซู (Bonsu, 2020) คือ ส่วนของเนื้อเชื้อเพลิงอัดแท่งอบแห้งที่ระเหยได้ซึ่งมีสารประกอบคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังสมการ

สมการ

$$V = \left[\left(\frac{W_a - W_b}{W_a} \right) \times 100 \right] - M$$

เมื่อ	V	ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ)
	W_a	น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิงก่อนอบ (กรัม)
	W_b	น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิงหลังอบ (กรัม)

1.3 เถ้า (Ash) เป็นสารอนินทรีย์ในชีวมวลสถานะของแข็งที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ในกระบวนการการสันดาป ปริมาณเถ้าสามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 บอนซู (Bonsu, 2020) โดยการเผาตัวอย่างในเตาเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และค่อย ๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700 – 750 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ น้ำหนักของเถ้าที่เหลือสามารถคำนวณได้ดังสมการ

สมการ

$$N = \frac{(C - D)}{E} \times 100$$

เมื่อ	N	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
	C	น้ำหนักภาชนะพร้อมเถ้า (กรัม)
	D	น้ำหนักของภาชนะ (กรัม)
	E	น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

1.4 คาร์บอนคงที่ ปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยากโดยจะคงเหลืออยู่ในของเสียหลังจากที่เผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon: FC) สูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน (กัมมณี แสงสุข, 2554) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3176 บอนซู (Bonsu, 2020) ดังสมการ

สมการ

$$\%FC = 100 - M - V - N$$

เมื่อ	M	ค่าความชื้น (ร้อยละ)
	V	ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ)
	N	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ธาตุไฮโดรเจน (H) ธาตุไนโตรเจน (N) และธาตุกำมะถัน (S) ที่อยู่ในชีวมวลในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM D3176 บอนซู (Bonsu, 2020) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS

3. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของชีวมวลได้รับการวิเคราะห์ด้วยวิธีบอมบ์แคลอริมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 บอนซู (Bonsu, 2020) โดยนำชีวมวลมาเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนในปริมาณเกินพอ

ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) เป็นการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูงต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำ (อุกฤษฏ์ นานาปา, 2563) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

สมการ

$$HHV = \frac{m_w C_{p,w} (\Delta T_w) + m_e L + m_s C_{p,s} (\Delta T_s)}{m_f \eta}$$

เมื่อ	η	ประสิทธิภาพของเตาทดสอบ (ร้อยละ)
	HHV	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิโลจูล/กิโลกรัม)
	$C_{p,w}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูล/กิโลกรัม-เคลวิน)
	$C_{p,s}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของภาชนะ (กิโลจูล/กิโลกรัม-เคลวิน)

L	ความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ (กิโลจูล/กิโลกรัม)
m_w	มวลของน้ำเริ่มต้น (กิโลกรัม)
m_c	มวลของน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม)
m_s	มวลของภาชนะที่ใช้ (กิโลกรัม)
m_f	มวลของเชื้อเพลิง (กิโลกรัม)
ΔT_w	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นกับอุณหภูมิน้ำเดือด (เคลวิน)
ΔT_s	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของภาชนะเริ่มต้นกับอุณหภูมิของภาชนะในขณะน้ำเดือด (เคลวิน)

4. การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นทางพลังงาน

ความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความหนาแน่นทางพลังงานและศักยภาพในการเลือกใช้ชีวมวล ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างพลังงานกับความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (สุพัตรา บุตรเสรีชัย และคนอื่น ๆ, 2561) ดังสมการ

สมการ

$$\text{Energy density} = HHV \times \rho_{Bulk}$$

เมื่อ Energy density ความหนาแน่นทางพลังงาน
 ρ_{Bulk} ความหนาแน่นรวม (เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

1. ลักษณะภายนอก

ชีวมวลอัดแท่งได้รับการตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยตาเปล่า ซึ่งชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตได้ต้องมีการจับตัวเป็นก้อน เนื้อประสานกันดีมีความแข็งแรง ไม่เปราะ และไม่แตกหักง่าย (วัชรภรณ์ ยุกตเขต, 2560)

2. การยืดและหดตัว

ความชื้นมีผลต่อการยืดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง ถ้าหากมีความชื้นมากเกินไปเมื่อแท่งเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกร่วน แต่ถ้าหากว่าความชื้นน้อย

เกินไปทำให้ส่วนผสมร่วนเกาะกันเป็นแท่งได้ยาก การวัดการยึดตัวและหดตัวทำได้โดยการวัดขนาดความยาวการขยายตัว ความสูงการขยายตัว (กานต์ วิรุณพันธ์, 2560)

3. การทดสอบด้านทานการดูดซึมน้ำ

การทดสอบด้านทานการดูดซึมน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้างแช่น้ำภายในเวลา 30 นาที และชั่งน้ำหนักก่อน และหลังของเชื้อเพลิงอัดแท่ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ (ศุภกร เชื้ออ่ำ, 2561)

สมการ

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{W - W_s}{W_s} \times 100$$

เมื่อ

W_s

น้ำหนักอบแห้ง (กรัม)

W

น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่งหลังจากแช่น้ำ 30 นาที

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพเชิงความร้อน

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ของชีวมวลสามารถทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test: WBT) อาโกสโก และคนอื่น ๆ (Akolgo et al, 2021) (อภิสิทธิ์ พรหมดอน และธนรัฐ ศรีวีระกุล, 2555) ข้อมูลที่ได้นำไปใช้หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิง ดังสมการ ตามลำดับ

สมการ

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{fuel}} \times 100\%$$

เมื่อ

η

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ร้อยละ)

Q_{fuel}

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (กิโลจูล)

Q_u

ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (กิโลจูล)

สมการ

$$\eta_{th} = \frac{M_{w,i}C_{p,w}(T_b - T_i) + (M_{w,evap})H_1}{M_f H_f} \times 100$$

เมื่อ	η_{th}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ร้อยละ)
	$M_{w,i}$	มวลน้ำเริ่มต้น (กิโลกรัม)
	$C_{p,w}$	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 กิโลจูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส)
	T_i	อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)
	T_b	อุณหภูมิของน้ำสูงสุด (องศาเซลเซียส)
	$M_{w,evap}$	น้ำหนักของน้ำที่หายไป (กิโลกรัม)
	H_1	ความร้อนแฝงของน้ำ 540 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม
	M_f	น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่หายไป (กิโลกรัม)
	H_f	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (กิโลแคลอรี/กรัม)

สมการ

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \times LHV$$

เมื่อ	Q_{fuel}	ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (กิโลจูล)
	m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (กิโลกรัม)
	LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (กิโลจูล/กิโลกรัม)

การวิเคราะห์การปล่อยมลพิษอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ คือ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O₂) ไฮโดรเจน (H₂) และธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เมื่อเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิในสถานะที่ใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์จะทำให้ปลดปล่อยแก๊สไอเสียในรูปของแก๊สออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เจียน – จุน และคนอื่นๆ (Jian – jun et al., 2007)

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน โดยใช้อัตราคิดลด (Discount Rate) ตัวใดตัวหนึ่งมาปรับมูลค่าของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาให้มาอยู่ที่จุดเดียวกัน สามารถคำนวณได้จากสมการ

สมการ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i/100)^t}$$

เมื่อ	n	อายุของโครงการ (ปี)
	t	ดัชนีชี้เลขปีในช่วงเวลาของโครงการ (ปี) $t = 1, 2, 3, \dots, n$
	CF_t	กระแสเงินสดสุทธิของโครงการในปีที่เท่ากับกระแสเงินสดรับในปีที่ t- กระแสเงินสดจ่ายในปีที่ t (บาท)
	i	อัตราคิดลดหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (เปอร์เซ็นต์)

เกณฑ์ในการตัดสินใจคือการลงทุนคือโครงการให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อ $NPV \geq 0$ และไม่คุ้มค่าเมื่อ $NPV < 0$

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR)

อัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงถึงอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยของโครงการตลอดอายุโครงการ IRR สามารถคำนวณได้จากสมการ

สมการ

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR/100)^t}$$

เมื่อ	n	อายุของโครงการ (ปี)
	T	ดัชนีชี้เลขปีในช่วงเวลาของโครงการ (ปี) $t = 1, 2, 3, \dots, n$
	CF_t	กระแสเงินสดสุทธิของโครงการในปีที่เท่ากับกระแสเงินสดรับในปีที่ t - กระแสเงินสดจ่ายในปีที่ t (บาท)
	IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน (เปอร์เซ็นต์)

เกณฑ์ในการตัดสินใจคือการลงทุนโครงการให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อ $IRR \geq$ ต้นทุนของเงินทุนของโครงการ

ระยะเวลาคืนทุน (Simple Payback Period, PB)

ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสะสมเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายจากเงินลงทุนเป็นตัวชี้วัดที่ใช้บอกสภาพความเสี่ยงของโครงการได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

สมการ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ต้นทุนซึ่งได้แก่อุปกรณ์เครื่องจักร}}{\text{ผลตอบแทนการดำเนินการ} - \text{ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ}}$$

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ยัวร์ตัน เงินเย็น และคนอื่น ๆ (2561) ได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากมูลสุกร และมูลไก่โดยไม่ใช่ตัวประสาน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดแล้วได้ค่าความร้อนสูงที่สุด สำหรับมูลทั้งสองชนิด คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ด 1 เซนติเมตร และความดันในการอัดเม็ด 40 บาร์

สุพัตรา บุตรเสรีชัย (2561) ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว โดยศึกษาผลของขนาดและความดันในการอัดเม็ดมูลวัว อุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว ซึ่งวัตถุประสงค์เหล่านี้จะถูกอัดเม็ดโดยไม่ใช่ตัวประสาน ด้วยแบบอัดเม็ดสามขนาด คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร ที่ความยาว 1 เซนติเมตร ด้วยระบบไฮดรอลิก พบว่า เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 30 นาที อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส ความดันในการอัดเม็ดมูลวัว มีผลต่อค่าความร้อนของถ่านอัดเม็ด โดยเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่ความดันในการอัดเม็ดมูลวัวที่ 30 40 50 60 และ 70 บาร์ ถ่านอัดเม็ดมูลวัวมีค่าความร้อน คือ 9,750 9,820 10,430 10,520 และ 10,782 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อความดันในการอัดเม็ดมูลวัว 70 บาร์ ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร ถ่านอัดเม็ดมูลวัวมีค่าความร้อน คือ 10,782 11,279 และ 11,682 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ความดันในการอัดเม็ดมูลวัวที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส คือ 70 บาร์ โดยที่ไม่ใช่ตัวประสาน

ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ และคนอื่น ๆ (2563) ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกทุเรียน โดยในขั้นตอนการทดลองเปลือกทุเรียนที่ถูกเตรียมเป็นถ่านเปลือกทุเรียน (DPC) และเปลือกทุเรียน (DP) จะถูกอบและผสมกับตัวประสาน คือ กากไขมัน (WG) ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:1, 2:1, 3:1 พบว่ารูปแบบเชื้อเพลิงจากเปลือกทุเรียนที่เหมาะสม คือ ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ที่อัตราส่วนดังกล่าว มีความแข็งแรง สามารถให้ความร้อนสูง และยาวนาน โดยมีความร้อนสูงถึง 25,996 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และประสิทธิภาพการใช้งานความร้อน ร้อยละ 20.14

สติเฟิน และคนอื่น ๆ (Stepien et al., 2019) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส ที่ 20, 40, 60 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไบโอสาร์ จากกระบวนการได้ค่าความร้อน 13 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของมูลช้างที่ยังไม่ผ่านการดำเนินการค่าความร้อนอยู่ที่ 11.41 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

ญาณสินี สุมา (2564) ได้ศึกษาการนำถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ปรับสภาพด้วย โซเดียมคลอไรด์ และที่ไม่ปรับสภาพมาใช้ในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ในน้ำเสีย สังกะเราะห์ โดยถ่านชีวภาพมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ สามารถดูดซับเหล็กได้ มากกว่าถ่านชีวภาพมูลช้างที่ไม่ปรับ สภาพ ปริมาณดูดซับที่สมดุลแปรผกผันกับมวลของ ถ่านชีวภาพมูลช้างที่ใช้ การดูดซับแบบขั้นเดียวและมีปริมาณดูดซับสูงสุดของถ่านชีวภาพมูลช้างที่ ไม่ปรับสภาพ และถ่านชีวภาพ มูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 13.57 และ 37.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องเป็นการศึกษาด้านการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลสัตว์ หรือวัตถุดิบอื่น ๆ เช่น หญ้า ฟางข้าว เป็นต้น และการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกระบวนการ ไพโรไลซิส อุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ระหว่าง 300 – 700 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันชีวภาพ สำหรับกระบวนการทอรัรีแฟกชัน พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสม ของกระบวนการนี้อยู่ระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส และได้ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากทั้ง 2 กระบวนการได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คือ ลักษณะภายนอกของเชื้อเพลิง การวิเคราะห์แบบประมาณ เช่น การวิเคราะห์ค่าความร้อน พบว่า ค่าความร้อนอยู่ที่ 22.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม จากนั้นนำ ผลิตภัณฑ์ไปอัดแท่งซึ่งสามารถดำเนินการได้ 2 รูปแบบ คือ การอัดร้อน และการอัดเย็น ทั้งแบบใช้ ตัวประสาน และไม่ใช้ตัวประสาน ตัวประสานที่นิยมใช้ คือ แป้งมันสำปะหลัง อัตราส่วนการผสม ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบชีวมวล เช่น ความหนาแน่น ขนาด ผลิตภัณฑ์อัดแท่งได้รับการ วิเคราะห์ค่าความร้อน และทดสอบหาประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยวิธีการหาอัตราการ สิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง พบว่า แบบใช้ตัวประสานมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 13 – 19.91 เมกกะจูล ต่อกิโลกรัม และแบบ ไม่ใช้ตัวประสานมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 40.82. – 45.14 เมกกะจูลต่อ กิโลกรัม และใช้ความดันในการอัดอยู่ระหว่าง 40 – 70 บาร์ ลักษณะภายนอกมีความเหมาะสมต่อ การนำมาใช้งาน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ได้สร้างประโยชน์ให้กับมูลช้างในรูปแบบพลังงานทางเลือกโดยนำมูลช้างมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการทอรีแฟกชัน และหาสัดส่วนที่มีศักยภาพต่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และมูลช้างทอรีไฟด์ ผลกระทบจากกระบวนการทอรีแฟกชัน และกระบวนการอัดแท่งได้รับการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เคมี และความร้อน

การเตรียมวัตถุดิบ

มูลช้างสดที่ได้จากตำบลกุดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ถูกมาคัดแยกด้วยมือ เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนออก เช่น หิน และทราย แล้วนำไปตากให้แห้งด้วยแสงแดดตามธรรมชาติ ประมาณ 3 – 5 วัน เพื่อลดความชื้นให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 ± 1.5 โดยมวล มาอินแก้ว และคนอื่น ๆ (Mainkaew et al., 2022) จากนั้นบดมูลช้างแห้งด้วยเครื่องปั่น และร่อนมูลช้างที่ปั่นแล้วให้มีขนาดเล็กลงกว่า 0.841 มิลลิเมตร (20 Mesh) ดังภาพที่ 3.1 ขนาดของวัตถุดิบที่เตรียมไว้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ มิซซอล และคนอื่น ๆ (Mitchual et al., 2013) ซึ่งกำหนดว่าขนาดของวัตถุดิบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งควรน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร



(ก) มูลช้างสด



(ข) มูลช้างตากแห้ง

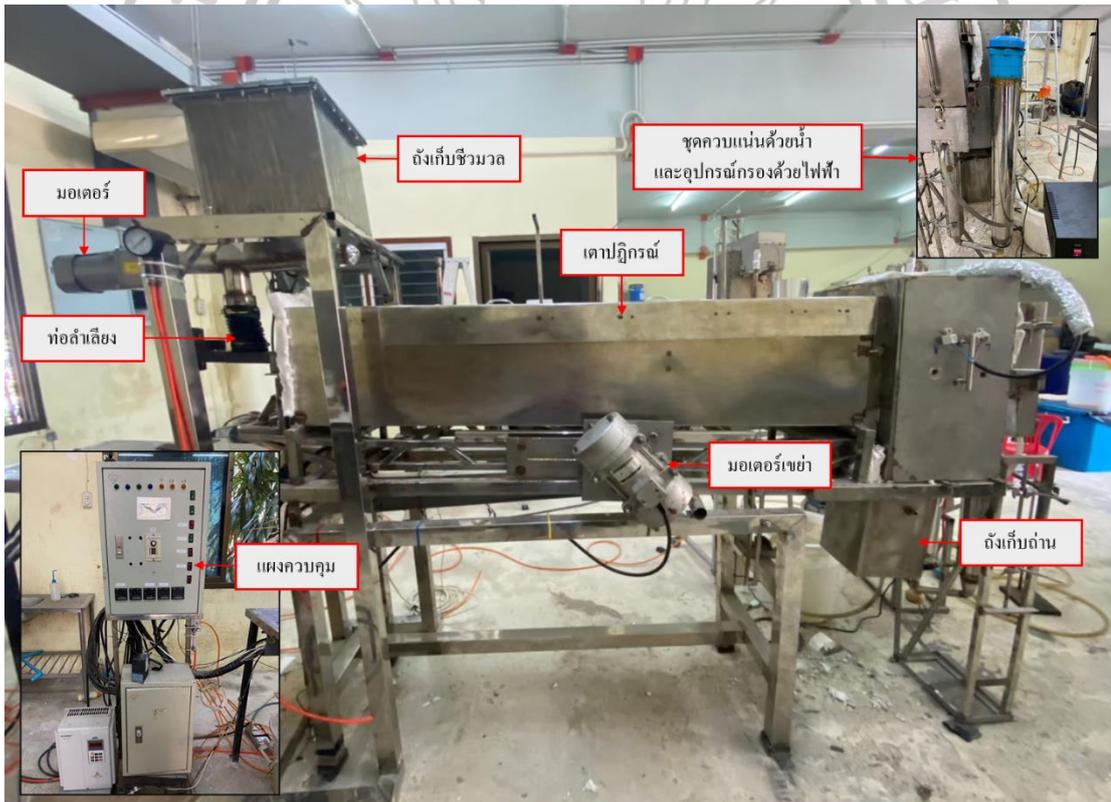


(ค) มูลช้างบดและร่อน

ภาพที่ 3.1 กระบวนการทอรีแฟกชัน

การผลิตมูลช้างทอรรีไฟด์

การผลิตมูลช้างทอรรีไฟด์หรือของแข็งทอรรีไฟด์เป็นการผลิตมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบต่อเนื่อง (สถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ, 2562) ดังภาพที่ 3.2 มีลักษณะเป็นท่อ และใช้การสั่นของมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนมูลช้างทอรรีไฟด์ไปยังถังเก็บ ส่วนไอทอรรีไฟด์ไหลออกจากท่อปฏิกรณ์เข้าสู่กระบวนการควบแน่น เพื่อแยกส่วนที่ควบแน่นได้ให้กลายเป็นเหลวทอรรีไฟด์ และส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้หรือที่เรียกว่า แก๊สทอรรีไฟด์ การผลิตเริ่มต้นจากการนำมูลช้างปริมาณ 1 กิโลกรัม ที่บดและร่อนที่มีขนาดประมาณ 0.2 – 0.8 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราป้อน 1.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตรต่อนาที ใช้อุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของชีวมวลในท่อปฏิกรณ์ 2.30 นาที โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำการทดลอง



ภาพที่ 3.2 กระบวนการทอรรีแฟกชัน

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

มูลซังแห้ง และมูลซังทอรรีไฟด์ ได้รับการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value) และการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นทางพลังงาน (Density) ดังแสดงบทที่ 2 หัวข้อที่ 1 (1.4) โดยส่งตรวจห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (The Joint Graduate School of Energy and Environment: JGSEE)

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง เริ่มจากนั้นมูลซังที่ได้ผสมกับตัวประสาน คือ แป้งมันสำปะหลัง ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป และผสมกับน้ำอุณหภูมิห้องลงในส่วนผสม จากนั้นผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน โดยใช้ตะแกรงตาข่าย 0.841 มิลลิเมตร เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดมีความสม่ำเสมอ จากนั้นนำส่วนผสมอัดเป็นแท่งในกระบอกอัดดังภาพที่ 3.2 โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแบบคันโยกมือ โดยแม่พิมพ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร และความยาว 25 เซนติเมตร เพื่อสร้างรูในส่วนกลางของเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้ข้อต่อเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร และความยาว 5 เซนติเมตร เป็นแท่งเหล็กที่ตั้งตรงกลาง และกระบอกอัดมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร และความสูง 25 เซนติเมตร ถูกออกแบบให้มีรูตรงกลางเพื่อควบคุมเชื้อเพลิงอัดแท่งในระหว่างการผลิต ก่อนที่จะนำเชื้อเพลิงอัดแท่งออกจากแม่พิมพ์ ส่วนผสมที่ถูกอัดแล้วต้องอัดในแม่พิมพ์ภายใต้แรงดันอีกเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดแท่งออกจากแม่พิมพ์ทรงกระบอก ทำซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ทำการบันทึกข้อมูลโดยการวัดขนาดของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ทั้งหมด จากนั้นนำไปตากแห้งเป็นเวลา 5 วัน ในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์



ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกและกระบอกอัด

การศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงชีวภาพมูลช้าง

การออกแบบการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเชื้อเพลิงชีวภาพมูลช้าง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเชื้อเพลิงชีวภาพมูลช้างเป็นการศึกษาภายใต้การกำหนดสภาวะการทดลองซึ่งออกแบบโดยใช้โปรแกรมแบบจำลองสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite design: CCD) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกแบบคั่นโยกมือ และแสดงความสัมพันธ์ด้วยระเบียบวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) โดยตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณตัวประสาน และแรงดัน ดังสมการ

สมการ

$$\text{Density} = f(m, b, l, p)$$

เมื่อ	m	ปริมาณวัตถุดิบ
	b	ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง
	l	ปริมาณของเหลว
	p	แรงดัน

การออกแบบการทดลองโดยใช้เงื่อนไขในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ทดลองด้วยวิธี Face Centered Design ซึ่งมีระดับของการทดลอง (Coded level, α) เท่ากับ 3 ระดับ ประกอบไปด้วย -1, 0 และ 1 แทนด้วยค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุดตามลำดับ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ช่วงของการแปรค่าตัวแปรอิสระ

ตัวแปรต้นที่ศึกษา	ระดับของการทดลอง		
	-1	0	1
ปริมาณวัตถุดิบ (กรัม) (m)	40.00	55.00	70.00
ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (กรัม) (b)	17.50	26.25	35.00
ปริมาณน้ำ (กรัม) (l)	6.00	11.75	17.50
แรงดัน (บาร์) (p)	40.00	50.00	60.00

เมื่อกำหนดขอบเขตของตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองแล้วจึงออกแบบเงื่อนไขของการทดลองโดยใช้สมการพหุนามดีกรีสาม สมการเอามาจากโปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ได้ชุดสภาวะการทดลองจำนวน 30 ชุดสภาวะดังตารางที่ 3.2

สมการ

$$\text{Density} = \beta_0 + \beta_1 m + \beta_2 b + \beta_3 l + \beta_4 p + \beta_5 mb + \beta_6 ml + \beta_7 mp + \beta_8 bl + \beta_9 bp \\ + \beta_{10} lp + \beta_{11} m^2 + \beta_{12} b^2 + \beta_{13} l^2 + \beta_{14} p^2$$

เมื่อ Density ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง
 $\beta_0 - \beta_{14}$ ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ลำดับที่	วัตถุดิบ (กรัม)	แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	แรงดัน (บาร์)
1	40.00	17.50	6.00	40.00
2	55.00	26.25	11.75	50.00
3	40.00	17.50	6.00	60.00
4	85.00	26.25	11.75	50.00
5	70.00	35.00	17.50	60.00

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ลำดับที่	วัตถุดิบ (กรัม)	แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	แรงดัน (บาร์)
6	25.00	26.25	11.75	50.00
7	40.00	17.50	17.50	60.00
8	55.00	26.25	23.25	50.00
9	40.00	35.00	17.50	60.00
10	55.00	26.25	11.75	30.00
11	70.00	17.50	17.50	40.00
12	40.00	35.00	6.00	60.00
13	40.00	35.00	17.50	40.00
14	70.00	35.00	6.00	40.00
15	40.00	17.50	17.50	40.00
16	55.00	26.25	0.25	50.00
17	70.00	35.00	6.00	60.00
18	55.00	26.25	11.75	50.00
19	55.00	26.25	11.75	70.00
20	55.00	26.25	11.75	50.00
21	70.00	17.50	6.00	40.00
22	55.00	26.25	11.75	50.00
23	55.00	8.75	11.75	50.00
24	40.00	35.00	6.00	40.00
25	55.00	26.25	11.75	50.00
26	70.00	35.00	17.50	40.00
27	70.00	17.50	17.50	60.00
28	55.00	26.25	11.75	50.00
29	70.00	17.50	6.00	60.00
30	55.00	43.75	11.75	50.00

การประมวลผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างที่เหมาะสม

เมื่อทดลองตามการกำหนดสภาวะการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ โดยนำค่าที่ได้มานั้นมาวิเคราะห์เพื่อทำนายเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง โดยอาศัยหลักการทางสถิติโดยการวิเคราะห์ผลความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกับวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ซึ่งพิจารณาสมการที่มีระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p < 0.05$) จัมโบ และคนอื่น ๆ (Jambo et al., 2019) ทั้งนี้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้าง สามารถประมวลผลได้จากการแก้สมการพหุนามกำลังสองที่สร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์

นอกจากเงื่อนไขที่เหมาะสมถูกนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างเพื่อทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ แล้วยังถูกนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอรีไรไฟด์ด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

1. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

1.1 ลักษณะภายนอก โดยชีวมวลอัดแท่งได้รับการตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยตาเปล่า ซึ่งชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตได้ต้องมีการจับตัวเป็นก้อน เนื้อประสานกันดีมีความแข็งแรงไม่เปราะ และไม่แตกหักง่าย (วัชรารักษ์ ยุกตเขต, 2560)

1.2 การยึดตัวและหดตัว การวัดการยึดตัวและหดตัว ดังภาพที่ 3.4 ทำได้โดยการวัดการยึดและหดตัวตามแนวยาว และแนวรัศมี ตั้งแต่นำเชื้อเพลิงอัดแท่งออกจากกระบอกลอดจากนั้นผึ่งแห้งแล้ววัดการยึดและหดตัวทุก ๆ 7 วัน จำนวน 3 ครั้ง ค่าที่ได้นำไปคำนวณร้อยละของการยึดตัวและหดตัว ดังบทที่ 2 หัวข้อที่ 2



ภาพที่ 3.4 การวัดการยึดตัวหดตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

1.3 การทดสอบต้านทานการดูดซึมน้ำ โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และถ่าน
 มูลช้างที่ผึ่งแห้งเป็นเวลา 21 วัน ได้รับการทดสอบการดูดซึมน้ำ ดังภาพที่ 3.5 โดยจุ่มเชื้อเพลิง
 อัดแท่งในน้ำที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก่อนและหลังของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ในขณะที่
 เชื้อเพลิงอัดแท่งได้จุ่มเวลาทุก 1 วินาที และสังเกตการขยายตัว ผลที่ได้นำไปคำนวณร้อยละ
 การดูดซึมน้ำ ดังบทที่ 2 หัวข้อที่ 2

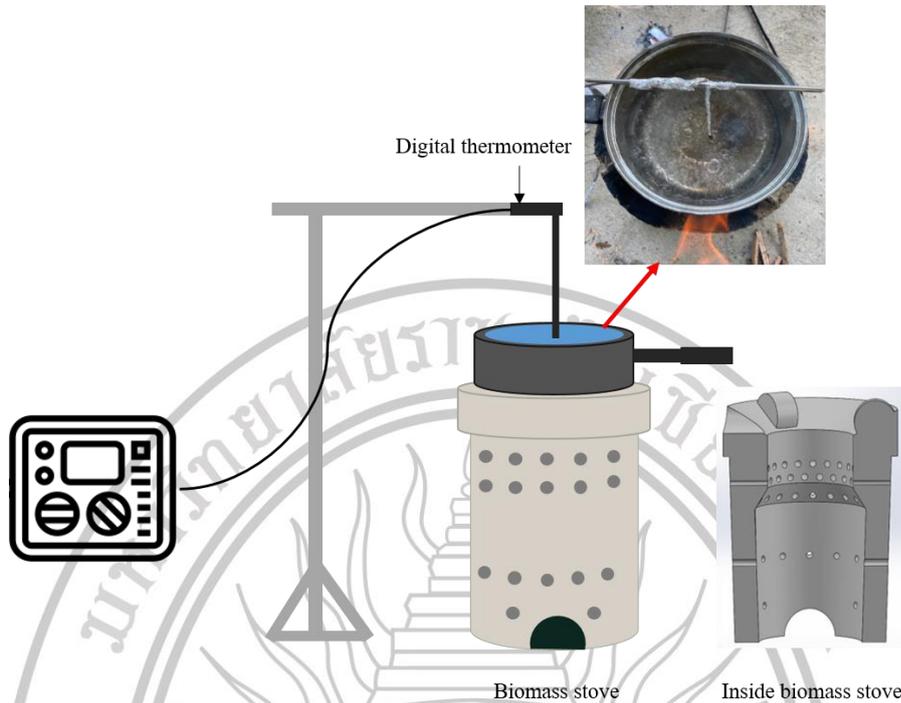


ภาพที่ 3.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

2. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านเกณฑ์การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพได้รับการวิเคราะห์สมบัติ
 ทางเคมี เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของมูลช้างทอร์รี่ ไฟด์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รี่แฟกชัน
 คือ การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แยกธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน และวิเคราะห์
 ค่าความหนาแน่น

1.1 การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ
 ชีวมวลอัดแท่งจากมูลช้าง โดยเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอร์รี่ ไฟด์ และกิ่งไม้ลำไย
 ด้วยวิธีแบบต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test: WBT) ดังภาพที่ 3.6

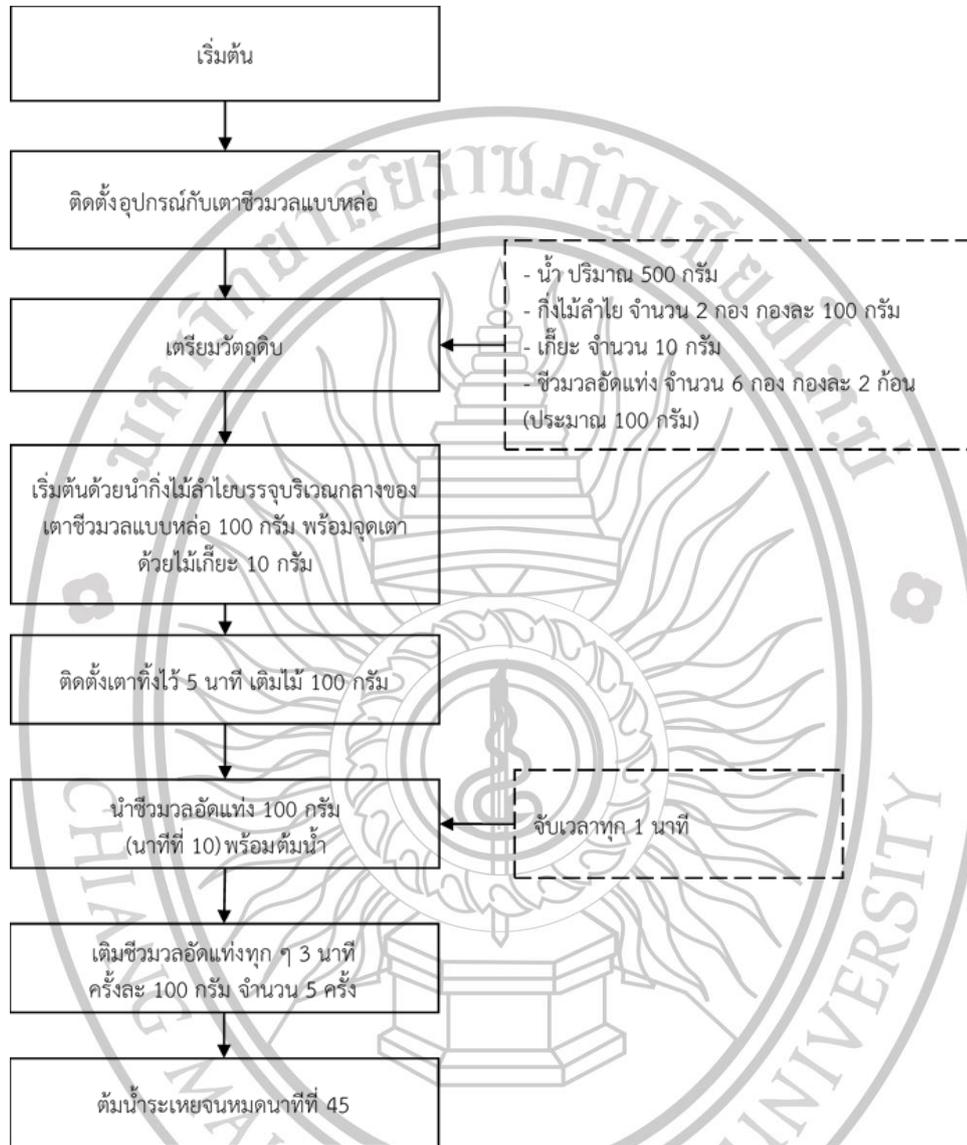


ภาพที่ 3.6 การทดสอบด้วยวิธีแบบต้มน้ำเดือด

การทดสอบการต้มน้ำเดือดเป็นการต้มน้ำปริมาณ 500 กรัม ด้วยเตาชีวมวลแบบหล่อบรรจุน้ำในภาชนะหุงต้ม และใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอร์รีไฟด์เปรียบเทียบกับกิ่งไม้ลำไย การทดสอบได้ติดตามอุณหภูมิของน้ำ และอุณหภูมิเตาตามตำแหน่งต่าง ๆ และปริมาณน้ำ ตั้งแต่ก่อนจุดเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด (อภิสิทธิ์ พรหมคอน และธนรัฐ ศรีวีระกุล, 2555) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงตามลำดับ

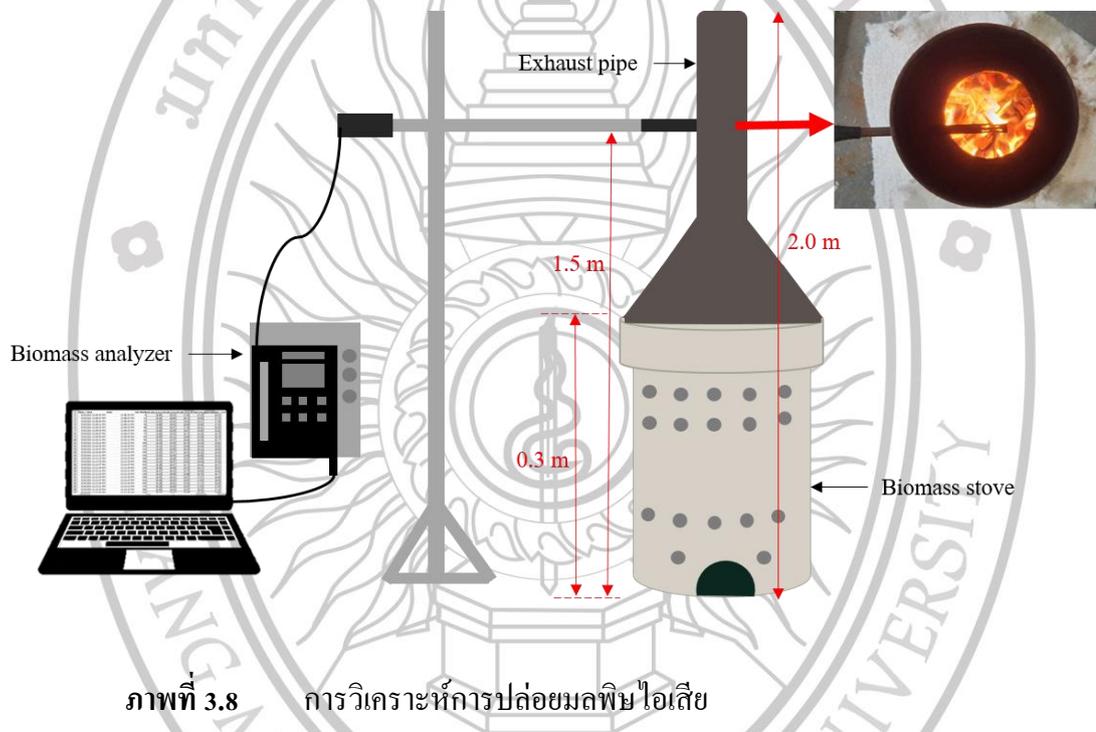
การทดสอบแบบต้มน้ำเดือดของการเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังภาพที่ 3.7 ในสถานะที่เหมาะสม โดยใช้เตาชีวมวลแบบยกขึ้นที่ออกแบบ โดยใช้กิ่งไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงเริ่มต้น ประมาณ 100 กรัม จุดในห้องเผาไหม้ของเตา และหลังจากผ่านไป 2 นาที เปลวไฟก็จะคงที่ หลังจากนั้นจึงวางหม้อสแตนเลสที่มีน้ำอยู่ประมาณ 500 มิลลิลิตร ไว้บนเตาและใส่กิ่งไม้ลำไยกองที่สอง ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 100 กรัม ใส่ลงในเตาหลังจากจุดไฟแล้ว 5 นาที จากนั้นเติมเชื้อเพลิงอัดแท่งจำนวน 100 กรัม อย่างต่อเนื่องทุกๆ 5 นาที ต้มจนน้ำร้อนระเหยหมด เมื่อน้ำระเหยหมดแล้ว ทำการบันทึกข้อมูล

ปริมาณเชื้อเพลิง และเต้าที่หล่อ และเต้าที่หล่อ พร้อมทั้งวิเคราะห์หาอัตราสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิง ดังบทที่ 2 หัวข้อที่ 4



ภาพที่ 3.7 กระบวนการทดสอบ Water Boiling Test (WBT) ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

1.2 การวิเคราะห์การปล่อยมลพิษไอเสีย โดยการวัดการปล่อยมลพิษของ เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างและมูลช้างทอรัรีไฟด์ ทำการวิเคราะห์ค่าออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และกำมะถัน (SO_2) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) ยี่ห้อ TESTO รุ่น TESTO 350 สำหรับการทดสอบจะดำเนินการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการ ทดสอบการต้มน้ำเดือด เปรียบเทียบกับกิ่งไม้ลำไย เตาชีวมวลที่จุดติดไฟแล้วด้านบนของเตาจะถูก ติดตั้งด้วยท่อแก๊สไอเสียสูง 1.7 เมตร และที่ตำแหน่ง 1.2 เมตร ของท่อไอเสียจะมีช่องสำหรับใส่ อุปกรณ์ตรวจวัดค่าไอเสีย ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การวิเคราะห์การปล่อยมลพิษไอเสีย

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างและจากมูลช้างทอรัรีไฟต์ได้รับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของชุมชนอย่างยั่งยืน โดยวิเคราะห์ผลตอบแทนของการประเมินต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยพิจารณาการลงทุนของระบบ วัสดุ อุปกรณ์ในการผลิต ในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง โดยมีเป้าหมายหลัก และน้ำเป็นตัวประสาน และแรงดันในอัตราส่วน 40 กรัม : 18.87 กรัม : 6 กรัม : 40 บาร์ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV) ของกระแสเงินสดตลอดอายุของโครงการ ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการหรือต้นทุนของเงินลงทุนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

สมการ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

โดยที่

n

อายุของโครงการ (ปี)

t

ดัชนีชี้เลขปีในช่วงเวลาของโครงการ (ปี) $t = 1, 2, 3, \dots, n$,

CF_t

กระแสเงินสดสุทธิของโครงการในปีที่ t เท่ากับ กระแสเงินสดรับในปีที่ t - กระแสเงินสดจ่ายในปีที่ t (บาท)

i

อัตราคิดลดหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (%) ซึ่งมีเกณฑ์ในการตัดสินใจ คือ การลงทุนโครงการให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าเมื่อ $NPV \geq 0$ และไม่คุ้มค่าเมื่อ $NPV < 0$

อัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return, IRR) ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

สมการ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t}$$

โดยที่	n	อายุของโครงการ (ปี)
	t	ช่วงเวลาทั้งหมด
	CF _t	กระแสเงินสดในช่วงเวลา t
	IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน (%)

โดยมีเกณฑ์ในการตัดสินใจ ผลตอบแทนที่คุ้มค่า เมื่อ $IRR \geq$ ต้นทุนของเงินทุน และไม่คุ้มค่าเมื่อ $IRR <$ ต้นทุนของเงินทุน โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ต้นทุนของโครงการเท่ากับ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารไทยพาณิชย์

ระยะเวลาคืนทุน (payback period: PB) ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสะสมเท่ากับเงินที่ลงทุนไปเป็นตัวชี้วัดที่ใช้บอกสภาพความเสี่ยงของโครงการได้ โครงการที่มีระยะเวลาคืนทุนสั้นจะมีความเสี่ยงต่ำกว่าโครงการที่มีระยะเวลาคืนทุนยาว ซึ่งมีเกณฑ์ในการตัดสินใจ คือจะยอมรับโครงการเมื่อ $PB \leq$ ระยะเวลาคืนทุนเป้าหมาย (target payback period) และไม่ยอมรับโครงการเมื่อ $PB >$ ระยะเวลาคืนทุนเป้าหมาย แสดงว่าการลงทุนของโครงการไม่คุ้มค่า สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

สมการ

$$PB = \frac{\text{การลงทุนเริ่มต้น}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับต่อปี}}$$

โดยที่	การลงทุนเริ่มต้น	จำนวนเงินที่ลงทุนตั้งแต่เริ่มต้น
	กระแสเงินสดที่ได้รับต่อปี	จำนวนเงินที่ได้รับในแต่ละปี

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างและมูลช้างที่ผ่านการแปรสภาพด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน โดยศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากมูลช้าง ประกอบด้วย มูลช้าง และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงจากมูลช้างในรูปแบบต่าง ๆ ได้รับการวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ เคมี และความร้อน พร้อมทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างประโยชน์จากมูลช้างในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็งในอนาคต

เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การใช้มูลช้างเป็นวัตถุดิบในการอัดแท่งเชื้อเพลิง และใช้แบริ่งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสานในสัดส่วนที่แตกต่างกัน และแรงดัน จะส่งผลต่อสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่ง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างที่ผลิตได้ต้องมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 600 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รามิเรซ – รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez – Ramírez et al., 2022) ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นมีผลอย่างนัยสำคัญภายใต้การกำหนดสถานะการทดลอง ซึ่งออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ มูลช้างแห้ง แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ และแรงดัน ค่าที่ได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ขั้วการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ลำดับ	มูลซัง (กรัม)	แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	แรงดัน (บาร์)	ค่าความ หนาแน่น (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	ค่า ความคลาด เคลื่อน มาตรฐาน
1	40.00	17.50	17.50	60.00	646.48	16.03
2	70.00	35.00	17.50	40.00	798.44	15.90
3	55.00	26.25	0.25	50.00	621.34	16.14
4	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	16.43
5	85.00	26.25	11.75	50.00	642.12	16.97
6	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	17.44
7	40.00	17.50	6.00	60.00	753.44	18.06
8	55.00	43.75	11.75	50.00	679.08	18.73
9	70.00	35.00	6.00	40.00	639.82	19.52
10	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	20.17
11	70.00	17.50	17.50	40.00	660.07	21.05
12	40.00	35.00	17.50	40.00	845.32	21.98
13	55.00	8.75	11.75	50.00	557.64	21.95
14	70.00	17.50	6.00	40.00	615.84	21.54
15	25.00	26.25	11.75	50.00	716.33	22.03
16	40.00	17.50	6.00	40.00	641.07	23.46
17	70.00	35.00	17.50	60.00	668.13	24.46
18	55.00	26.25	11.75	30.00	647.22	25.93
19	70.00	17.50	6.00	60.00	626.14	27.20
20	40.00	17.50	17.50	40.00	525.08	27.92
21	40.00	35.00	6.00	60.00	926.57	21.58
22	70.00	35.00	6.00	60.00	723.71	15.49
23	55.00	26.25	11.75	70.00	859.41	17.09
24	70.00	17.50	17.50	60.00	691.58	11.35
25	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	11.01
26	40.00	35.00	17.50	60.00	761.98	12.79

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ลำดับ	มูลซ้าง (กรัม)	แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	แรงดัน (บาร์)	ค่าความ หนาแน่น (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	ค่า ความคลาด เคลื่อน มาตรฐาน
27	40.00	35.00	6.00	40.00	765.07	14.59
28	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	15.98
29	55.00	26.25	23.25	50.00	691.21	18.65
30	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48	23.01

การประเมินสมการการทำนายค่าความหนาแน่นอาศัยหลักการทางสถิติค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์กำลังสอง สมการการทำนายดังแสดงในสมการเป็นสมการกำลังสองแบบแปรผกผัน ให้การทำนายค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.767 หรือร้อยละ 76.70 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการ โดยค่า p – value อยู่ที่ 0.0003 และ F – value อยู่ที่ 6.90 ดังตารางที่ 4.2 ที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมการกำลังสองมีความสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

$$1/density = 4.986580 - (0.027690 \times m) - (0.097857 \times b) - (0.068383 \times l) - (0.045543 \times p) + (0.000327 \times m \times b) - (0.000513 \times m \times l) + (0.000097 \times m \times p) + (0.000034 \times b \times l) + (0.000168 \times b \times p) + (0.000976 \times l \times p) + (0.000220 \times m^2) + (0.001157 \times b^2) + (0.001877 \times l^2) + (0.000193 \times p^2)$$

ค่า p – value และ F – value ดังตารางที่ 4.2 ถูกใช้เพื่อกำหนดตัวแปรเมื่อพิจารณาผลกระทบเชิงเส้น พบว่าปริมาณมูลซ้าง และแป้งมันสำปะหลัง มีผลต่อค่าความหนาแน่นของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยมีค่า p – value เท่ากับ 0.0015 และ 0.0071 และค่า F – value เท่ากับ 15.040 และ 9.700 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำ รองลงมา คือ แป้งมันสำปะหลัง และมูลซ้าง เป็นพหุนามกำลังสองที่ส่งผลต่อการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยมี ค่า p – value เท่ากับ 0.0010, 0.0020 และ 0.0055 ตามลำดับ และค่า F – value เท่ากับ 16.770, 14.020 และ 10.490 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการตอบสนองต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

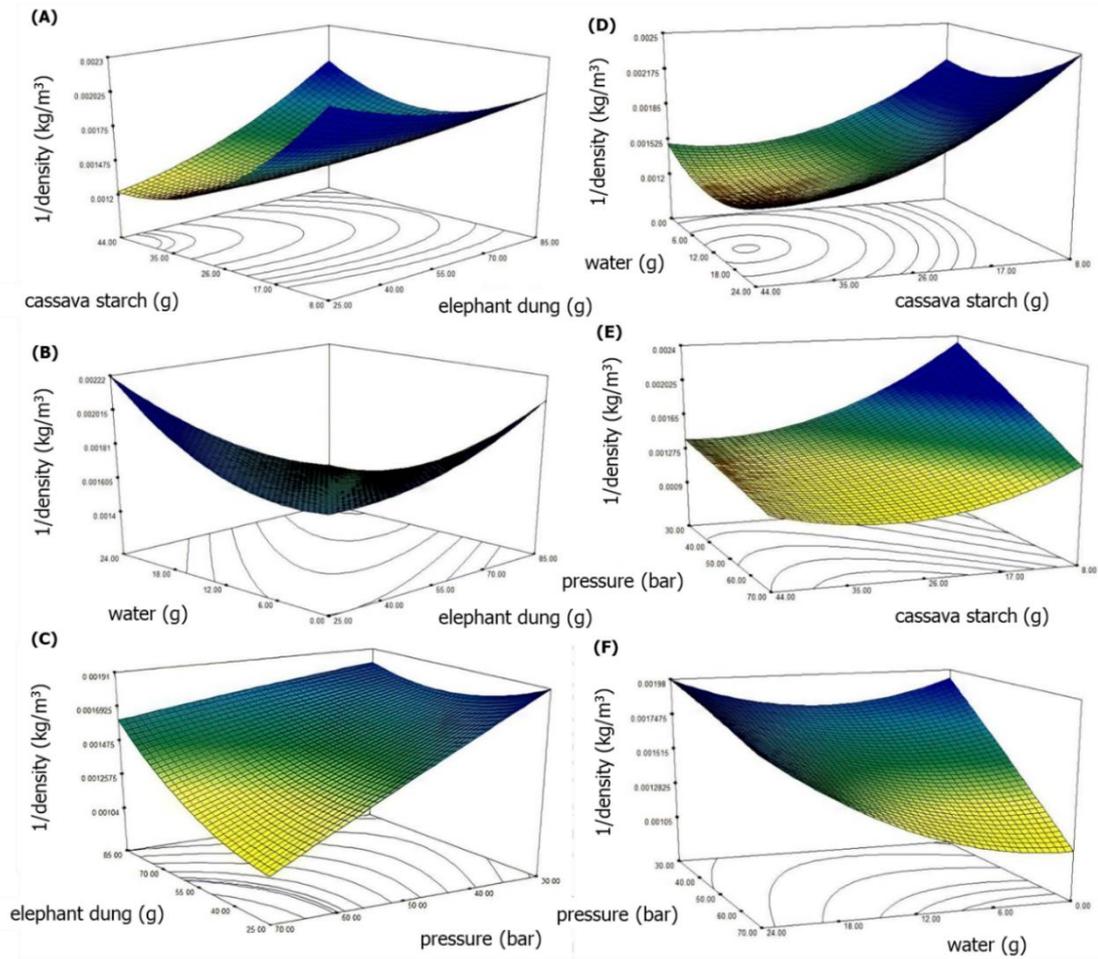
Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	Prob>F
Model	1.050	14	0.075	6.900	0.0003	significant
m – elephant dung	0.110	1	0.110	9.700	0.0071	
b – cassava starch	0.160	1	0.160	15.040	0.0015	
l – water	0.014	1	0.014	1.250	0.2811	
p – pressure	0.018	1	0.018	1.670	0.2160	
mb	0.024	1	0.024	2.220	0.1570	
ml	0.022	1	0.022	2.000	0.1781	
mp	5.700×10^{-3}	1	5.700×10^{-3}	0.530	0.4795	
bl	1.639×10^{-4}	1	1.639×10^{-4}	0.015	0.9038	
bp	4.161×10^{-4}	1	4.161×10^{-4}	0.038	0.8473	
lp	0.029	1	0.029	2.640	0.1249	
m²	0.110	1	0.110	10.490	0.0055	
b²	0.150	1	0.150	14.020	0.0020	
l²	0.180	1	0.180	16.770	0.0010	
p²	1.062×10^{-3}	1	1.062×10^{-3}	0.098	0.7586	
Residual	0.160	15	0.011			
Lack of Fit	0.047	5	9.420×10^{-3}	0.820	0.5650	not significant
Pure Error	0.120	10	0.012			
Cor Total	1.210	29				
R²	0.767					
Adjusted R²	0.549					
C.V.%	8.920					

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประกอบด้วย มูลช้าง 40.00 กรัม แป้งมันสำปะหลัง 18.87 กรัม น้ำ 6.00 กรัม และแรงดัน 40.00 บาร์ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งภายใต้เงื่อนไขนี้เป็นไปตามการตอบสนองในพื้นที่ผิวสามมิติ

(3D) ดังภาพที่ 4.1 โดยอาศัยสมการการออกแบบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และสถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการศึกษาพบว่า มูลขี้ังและแป้งมันสำปะหลังมีผลต่อค่าความหนาแน่น ดังภาพที่ 4.1(A) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง และในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณมูลขี้ัง และลดปริมาณแป้งมันสำปะหลังลงจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงลดลง ภาพที่ 4.1(B) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของมูลขี้ัง และปริมาณของน้ำมีผลต่อค่าความหนาแน่น โดยค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณมูลขี้ัง และปริมาณน้ำ การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น และแรงดันของเชื้อเพลิงอัดแท่งต่อมูลขี้ัง และแรงกด ดังภาพที่ 4.1(C) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งสูงขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณมูลขี้ังมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อลดปริมาณมูลขี้ัง และแรงดันลงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นน้อยลง ภาพที่ 4.1(D) บ่งชี้ว่าปริมาณน้ำและแป้งมันสำปะหลังมีผลต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งและการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังเกินระดับที่เหมาะสมจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งลดลง นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 12 กรัม แรงดันและปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ดังภาพที่ 4.1(E) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในช่วง 25 – 35 กรัม ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แรงดัน และปริมาณน้ำส่งผลต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งดังภาพที่ 4.1(F) พบว่าเมื่อลดปริมาณน้ำลง ค่าความหนาแน่นและแรงดันของเชื้อเพลิงอัดแท่งจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ และแรงดันจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นให้ลดลง



ภาพที่ 4.1 แผนภาพพื้นผิว 3D ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากปัจจัยที่ศึกษาพบว่ามูลช้าง แป้งมันสำปะหลัง น้ำ และแรงดัน มีผลต่อค่าความหนาแน่น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ มูอาซุ และคนอื่นๆ (Muazu et al., 2015) ลักษณะของเชื้อเพลิงอัดแท่งของแกลบและซังข้าวโพด พบว่าวัตถุดิบมีผลอย่างมากต่อค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ตัวประสานและความชื้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเพิ่มความคงทนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นลดลง เมื่อตัวประสานถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มอนุภาคเชิงโครงสร้างในเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของชีวมวลที่มีค่าลิกนินต่ำ โอบีเอต และคนอื่นๆ (Obiet et al., 2022) ปริมาณตัวประสานมีผลต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง รวมถึงแรงดันและความต้านทานการแตกหัก โอบีเอต และคนอื่นๆ

(Obiet al., 2022) นาร์ชาเรียด และคนอื่น ๆ (Narzaryet et al., 2022) นอกจากตัวประสาน และ ความชื้นที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งแล้วยังมีผลต่อแรงดันด้วย

จากการศึกษาของ มิชชอล และคนอื่น ๆ (Mitchual et al., 2013) กล่าวว่าตัวประสาน และแรงดัน มีความสัมพันธ์กัน และความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ พบว่า แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ และแรงดันมีผลต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง และสอดคล้องกับการศึกษาของ อรานซิโอลา และคนอื่น ๆ (Aransiola et al., 2019) ตัวประสานและแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรอิสระแต่ละตัวในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง คือ มูลช้าง 40.00 กรัม แบริ่งมันสำปะหลัง 18.87 กรัม น้ำ 6.00 กรัม และแรงดัน 40.00 บาร์ ที่ส่งผลให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง 613 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่ามากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สมบัติทางเคมี

มูลช้าง

การนำมูลช้างมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้นเริ่มต้นการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่ประกอบในมูลช้าง และศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นพลังงานความร้อน โดยผลการศึกษาค้นคว้าพื้นฐานของมูลช้าง ดังตารางที่ 4.3 พบว่า มูลช้างมีค่าความร้อน 14.05 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณสารระเหย ร้อยละ 61.70 ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 11.60 ปริมาณเถ้า ร้อยละ 26.70 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 5.60 คาร์บอน (C) ร้อยละ 37.90 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 1.30 กำมะถัน (S) ร้อยละ 0.30 จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันที่มีค่าน้อยมากทำให้สอดคล้องกับคุณสมบัติพื้นฐานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่กรมโรงงานกำหนด โดยกำหนดค่ามาตรฐานไว้ไม่เกินร้อยละ 2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม; 2555) ที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อเผาไหม้จะมีการปนเปื้อนของสารอันตรายน้อย

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดแท่ง

คุณสมบัติ	กิ่งไม้ลำไย	มูลช้าง	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง	ของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง
การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)					
1 ค่าความร้อน (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	18.89	14.05	17.00	17.00	16.70
2 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	7.00	5.56	4.03	2.43	7.11
3 ปริมาณสารระเหย (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	75.49	61.70	73.30	60.30	67.60
4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	21.89	11.60	17.80	20.20	19.20
5 ปริมาณเถ้า (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	2.62	26.70	8.90	19.50	13.20
การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate analysis)					
1 ไฮโดรเจน (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	6.60	5.60	6.30	5.30	6.40
2 คาร์บอน (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	47.90	37.90	42.90	45.10	45.10
3 ไนโตรเจน (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	0.60	1.30	0.70	1.40	3.00
4 กำมะถัน (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)	0.20	0.30	0.20	0.20	0.20

ของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง

ปริมาณผลได้เชิงมวลของของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างจากการผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ด้วยการป้อนมูลช้างแห้ง 1 กิโลกรัม มีปริมาณผลได้เชิงมวลของแข็งทอร์รีไฟต์ร้อยละ 78.54 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และได้ น้ำส้มควันไม้ร้อยละ 11.31 ของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างมีความชื้นร้อยละ 2.43 ต่ำกว่ามูลช้างแห้ง และกิ่งไม้ลำไย ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานเยอรมัน DIN 51731 อิวาชชุก และคนอื่น ๆ (Ivashchuk et al., 2022) มาตรฐานยุโรป EN ISO 17225 รวมถึงเป็นไปตามมาตรฐานชีวมวล (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้างมีค่าความร้อน 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณสารระเหยร้อยละ 60.29 ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 20.21 ปริมาณเถ้า ร้อยละ 19.50 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 5.30 คาร์บอน (C) ร้อยละ 45.10 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 1.40 กำมะถัน (S) ร้อยละ 0.20 ของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้างมีปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้าต่ำกว่ามูลช้าง แต่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่ามูลช้าง และค่าความร้อนของของแข็งทอรรีไฟต์สูงกว่ามูลช้าง และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบอื่นกับมูลช้าง พบว่าปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนของของแข็งทอรรีไฟต์สูงกว่ามูลช้าง และปริมาณคาร์บอนสูงกว่ามูลช้าง แต่มีค่าต่ำกว่ากิ้งไม้ลำไย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ สตีเฟน และคนอื่น ๆ (Stepień et al., 2019) ที่ใช้อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้เวลาต่างกัน พบว่างานวิจัยนี้ได้ปริมาณมูลช้างทอรรีไฟต์มากกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่า

เชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้าง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยตัวประสาน คือ แป้งมันสำปะหลัง ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป และผสมกับน้ำอุณหภูมิห้องผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำส่วนผสมอัดเป็นแท่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์มูลช้างมีค่าความร้อน 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณสารระเหยร้อยละ 73.30 ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 17.80 ปริมาณเถ้าร้อยละ 8.90 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 6.30 คาร์บอน (C) ร้อยละ 42.90 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 0.70 และกำมะถัน (S) ร้อยละ 0.20 จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้างมีค่าความร้อนสูงกว่ามูลช้าง แต่ต่ำกว่ากิ้งไม้ลำไย ดังตารางที่ 4.3 มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ แมทธิวส์ และคนอื่น ๆ (Mathews et al., 2011) ซึ่งเส้ไนโยในมูลช้างที่ได้จากการชะล้างสิ่งเจือปนออกมีค่าความร้อนอยู่ที่ 17.45 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างต่ำกว่างานวิจัยของ รานารajah และคนอื่น ๆ (Ranaraja et al., 2015), รามิเรซ – รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez – Ramírez et al., 2022) และงานวิจัยของ อินเน็กเบเดียน และคนอื่น ๆ (Inegbedion et al., 2023) โดยมีค่าความร้อนระหว่าง 16.32 – 19.44 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แต่มีค่าสูงกว่างานวิจัยของ สathyabarathi และคนอื่น ๆ (Sathiyabarathi et al., 2022) ที่มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 14.61 – 16.45 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม จากการศึกษาพบว่า การใช้ตัวประสานสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมทำให้ค่าความร้อนของมูลช้างมีค่าสูงขึ้น เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างมีปริมาณสารระเหยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 73.30 และ มูลช้างมีปริมาณสารระเหยต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 61.70 เนื่องจากใช้ตัวประสานคือแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วาฮยอนนี่ และคนอื่น ๆ (Wahyuni et al., 2022) พบว่าเมื่อสัดส่วนของตัวประสานเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงเมื่อติดไฟจะทำให้เกิดควันจำนวนมากส่งผลให้เกิดจากปริมาณสารระเหยสูง

วาชยอนนี่ และคนอื่น ๆ (Wahyuni et al., 2022) ในงานวิจัยของ รามิเรซ – รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez – Ramírez et al., 2022) กล่าวว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งควรมีปริมาณสารระเหยสูง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ได้เร็ว ซึ่งจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด การเผาไหม้จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก มูลช้างจึงถูกนำมาพัฒนาให้เป็นเชื้อเพลิงอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้ฟืน

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้าง

จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างมีค่าความร้อน 16.70 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณความชื้น ร้อยละ 7.11 ปริมาณสารระเหย ร้อยละ 67.60 ปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 19.20 ปริมาณไฮโดรเจน ร้อยละ 13.20 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 6.40 คาร์บอน (C) ร้อยละ 45.10 ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 3.00 และกำมะถัน (S) ร้อยละ 0.20 ดังตารางที่ 4.3

จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างมีค่าต่ำกว่ามูลช้างทอร์รีไฟด์ เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานในการอัดแท่ง และค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้างทอร์รีไฟด์สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้างทอร์รีไฟด์มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่า และค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอร์รีไฟด์ มีความชื้นสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และกึ่งไม้ลำไย แต่ยังคงอยู่ในมาตรฐานของชีวมวล (มผช.) ต้องไม่เกินร้อยละ 8 – 12 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2564) เกเบเดอ และคนอื่น ๆ (Kebede et al., 2022) และมาตรฐานเยอรมัน DIN 51731 อิวาชชุก และคนอื่น ๆ (Ivashchuk et al., 2022) มาตรฐานยุโรป EN ISO 17225 กล่าวว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งต้องมีค่าความชื้น ต่ำกว่าร้อยละ 15 คอฟแมน (Kofman, 2016) ปริมาณคาร์บอนคงที่ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เนื่องจากมูลช้างถูกแปลงสภาพให้เป็นของแข็งทอร์รีไฟด์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และมีปริมาณคาร์บอนคงที่ต่ำกว่าของแข็งทอร์รีไฟด์ เพราะในเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างมีความชื้นสูงกว่าของแข็งทอร์รีไฟด์

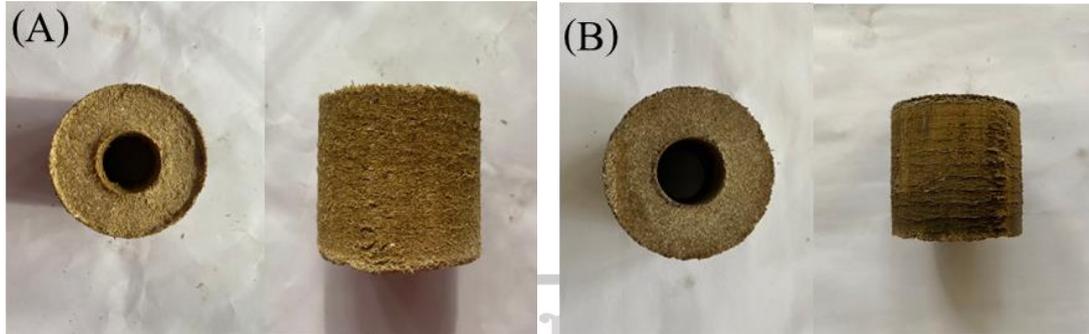
ในทางตรงกันข้ามปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างต่ำกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และกึ่งไม้ลำไย อย่างไรก็ตามปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงอัดแท่งทั้งสองชนิดมีปริมาณสารระเหยสูงกว่าวัตถุดิบ (มูลช้าง, ของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้าง) เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งมีการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานอาจเพิ่มปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งส่งผลให้เกิดควันมากระหว่างการเผาไหม้ วาชยอนนี่ และคนอื่น ๆ (Wahyuni et al., 2022)

ในขณะที่ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างต่ำกว่าของแข็งทอรรีไฟด์แต่มีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และกึ่งไม้ลำไย ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างสอดคล้องกับงานวิจัยของ เคเบเดอ และคนอื่น ๆ (Kebede et al., 2022) ปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดแท่งต่ำกว่าวัสดุคิบ และไม่เป็นไปตามมาตรฐานของเยอรมัน DIN 51731 อิวาซชุก และคนอื่น ๆ (Ivashchuk et al., 2022) และมาตรฐานยุโรป EN ISO 17225 คอฟแมน (Kofman, 2016) อาจส่งผลให้มีปริมาณของสารอินทรีย์สูงขึ้นในระหว่างการเผาไหม้รามิเรซ – รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez – Ramírez et al., 2022) จากการศึกษาปริมาณเถ้าของมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอรรีไฟด์ คือ 26.65, 8.86 และ 13.22 ตามลำดับ ในการศึกษาที่มีปริมาณเถ้าสูงกว่างานวิจัยของ อินเน็กเบเดียน และคนอื่น ๆ (Inegbedion et al., 2023) เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกผลปาล์ม คือ ร้อยละ 6.68 ในทางตรงกันข้ามมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านอัดแท่งในงานวิจัยของ สathyabarathi และคนอื่น ๆ (Sathyabarathi et al., 2022) และงานวิจัยของ ซาโบ และคนอื่น ๆ (Sabo et al., 2022)

สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะภายนอกเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพภายนอกของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอรรีไฟด์ โดยมีแป้งมันสำปะหลัง และน้ำ เป็นตัวประสานด้วยอัตราส่วน 40 กรัม : 18.87 กรัม : 6 กรัม ตามลำดับ อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแบบคั้น โยคมือที่แรงดัน 40 บาร์ ใช้พิมพ์เหล็กทรงกระบอกเป็นอุปกรณ์การทดลอง ดังภาพที่ 3.2 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นแท่ง เนื้อประสานกันดี แดกหักยาก มีผิวขรุขระ และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้าง มีลักษณะเป็นแท่ง เนื้อประสานกันดี แดกหักง่ายกว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวภาพจากมูลช้าง และมีผิวขรุขระ ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 (A) ลักษณะภายนอกของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และ (B) เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้าง

การยืดตัวและหดตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง หลังจากครบ 3 สัปดาห์ยืดตัวตามแนวยาวเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 0.1 – 0.2 และระยะยืดและหดตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างยืดตัว และหดตัว ตามแนวยาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.54 – 4.52 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัณณิ แสงสุข (2559) การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษเชื้อไม้ ขี้เลื่อย และค้าย เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 14 วัน แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละการขยายตัวด้านความยาว อยู่ระหว่างร้อยละ 0.77 – 3.79 ความชื้นมีผลต่อการยืดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง ถ้าหากมีความชื้นมากเกินไปเมื่อแท่งเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกร่วน แต่ถ้าหากว่าความชื้นน้อยเกินไปทำให้ส่วนผสมร่วนเกาะกันเป็นแท่งได้ยาก (กานต์ วิรุณพันธ์ และคนอื่น ๆ, 2560)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

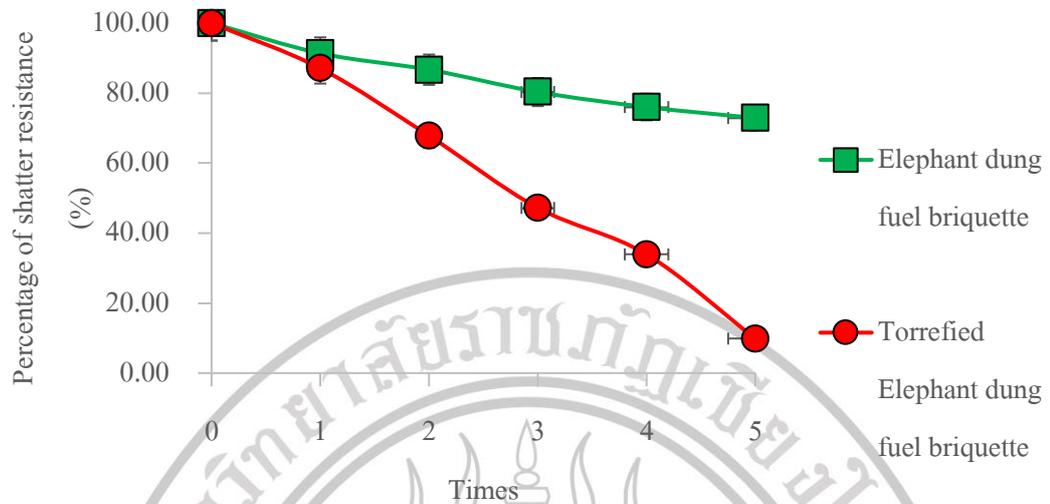
เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างมีความหนาแน่นเท่ากับ 613 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งของแข็งทอร์รีไฟด์จากมูลช้างมีค่าเท่ากับ 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E873 เชื้อเพลิงอัดแท่งต้องมีค่าความหนาแน่นมากกว่าหรือเท่ากับ 600 – 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รามิเรซ-รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez – Ramírez et al., 2022) เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงส่งผลให้ใช้เวลาในการเผาไหม้นาน และมีความแข็งแรงไม่แตกหักง่าย (นาซีเราะ เจมะ และคนอื่น ๆ, 2563) การเพิ่มความหนาแน่นให้กับแท่งเชื้อเพลิงนอกจากเป็นการลดปริมาตรของวัตถุดิบแล้วยังเป็นการเพิ่มอัตราส่วนพลังงานต่อปริมาตรด้วย รามิเรซ-รามิเรซ และคนอื่น ๆ (Ramírez–Ramírez et al., 2022) ซึ่งพบว่า

ความหนาแน่นทางพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอรัรีไฟค์ มีค่าเท่ากับ 9.09 และ 11.93 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

การทนทานต่อการแตกหักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ตามมาตรฐาน ASABE S269.4 (2003) ไฟซาล และคนอื่น ๆ (Faizal et al., 2022) เชื้อเพลิงอัดแท่งมีความทนทานดีเมื่อมีความทนทานการแตกหักมากกว่าร้อยละ 80 ปานกลางเมื่อมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70 – 80 และต่ำเมื่อมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 70 ความทนทานการแตกตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างพบว่าอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 78.66 ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงน้อยกว่าการศึกษาของ สติยาบาราธิ และคนอื่น ๆ (Satiyabarathi et al., 2022) และ กุมาร์ และคนอื่น ๆ (Kumar et al., 2022) ความทนทานการแตกสลายของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างต่ำกว่าเชื้อเพลิงมูลวัวอัดแท่ง และเม็ดมะม่วงหิมพานต์อัดแท่ง ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากซังข้าวโพด และกะลามะพร้าว โดยใช้แป้งเป็นตัวประสาน โดย ซาโบ และคนอื่น ๆ (Sabo et al., 2022) นอกจากนี้ยังพบว่าการผลิตแท่งเชื้อเพลิงใช้ตัวประสาน เช่น กัมอารบิกหรือกัมธรรมชาติ (Natural Gum) ที่ได้จากต้นไม้อินแถบประเทศตะวันออกกลาง แท่งเชื้อเพลิงมวลเบาต้านทานการแตกของวัสดุแต่ละชนิดจะต่ำกว่างานวิจัยนี้

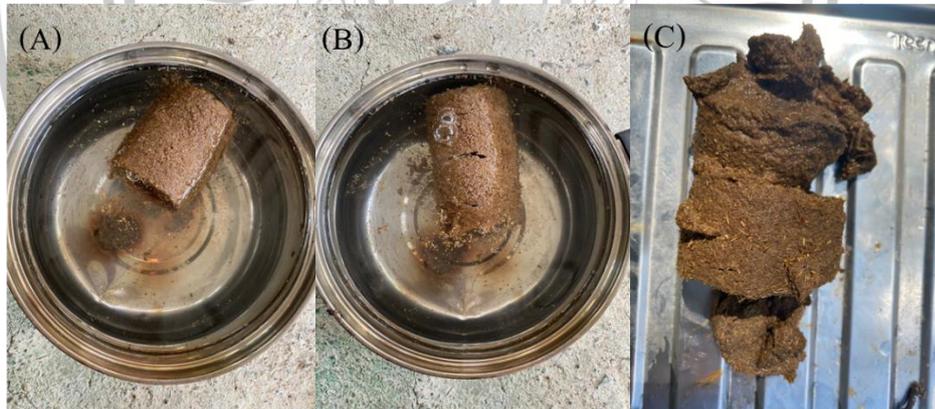
ร้อยละการทนทานต่อการแตกหักของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างเท่ากับร้อยละ 78.66 ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟค์จากมูลช้างร้อยละ 52.59 ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างมีการทนทานต่อการแตกหักมากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟค์จากมูลช้าง เนื่องจากปัจจัยเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟค์จากมูลช้างมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง



ภาพที่ 4.3 ร้อยละการต้านทานการแตกหักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

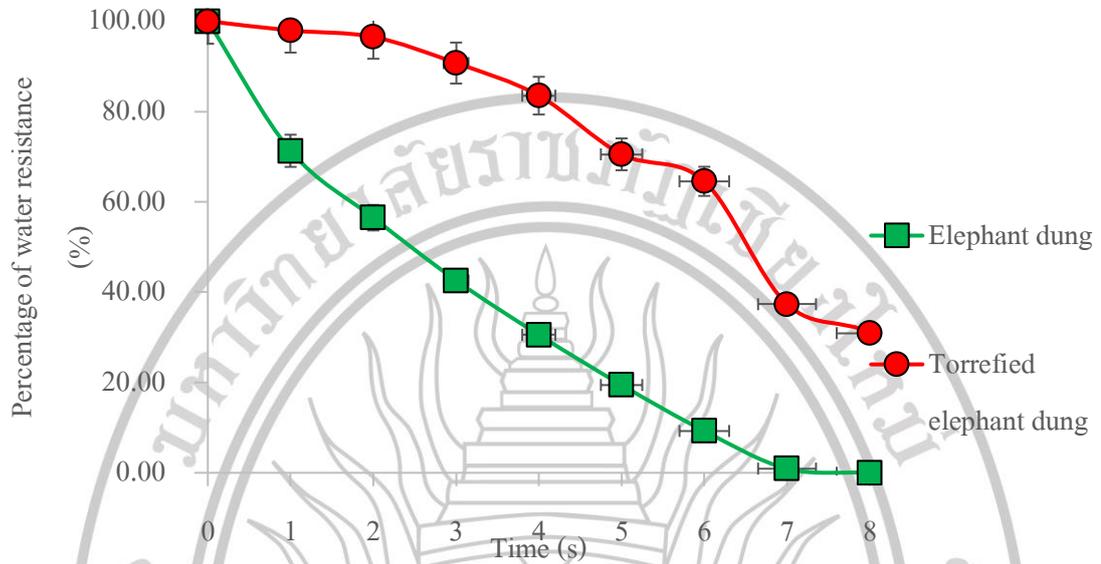
เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้เพียงร้อยละ 38.57 ทำให้เมื่อนำเชื้อเพลิงอัดแท่งแช่น้ำจะสลายตัวภายในวินาทีที่ 10 ดังภาพที่ 4.4 C



ภาพที่ 4.4 การทดสอบการต้านทานการดูดซึมน้ำของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรีไฟด์จากมูลช้าง [(A) วินาทีที่ 1 (B) วินาทีที่ 5 (C) วินาทีที่ 10]

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรีไฟด์จากมูลช้างต้านทานการดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 50.94 เมื่อนำไปแช่น้ำจึงส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดแท่งไม่จับตัวกันเป็นก้อน ดังภาพที่ 4.4 C ดังนั้นเพื่อป้องกัน

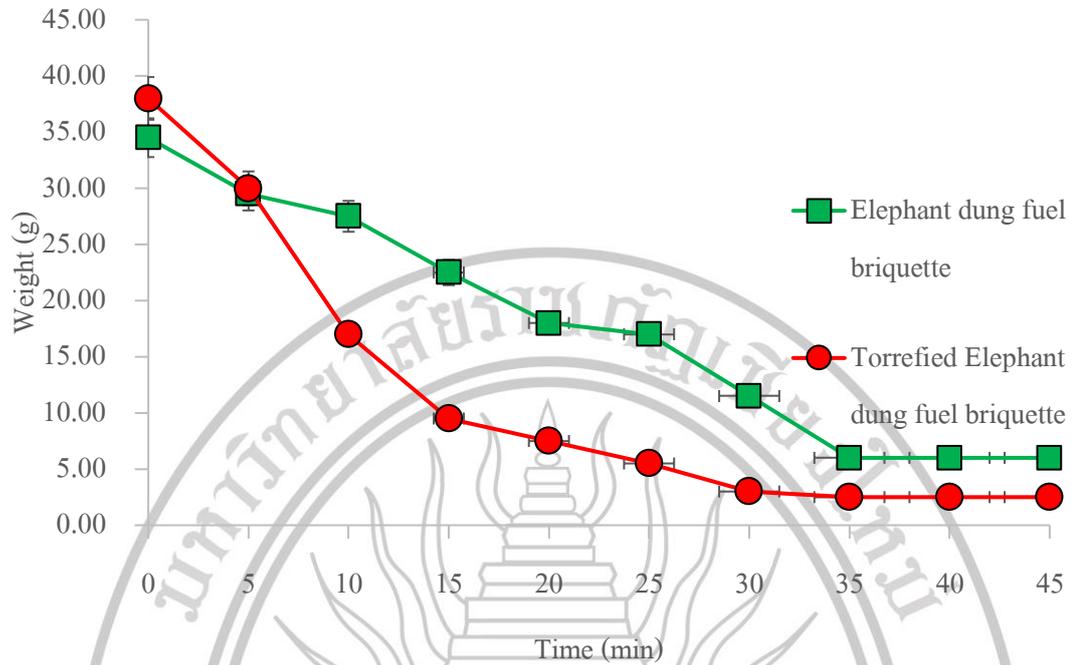
การสลายตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างและเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้าง ต้องจัดเก็บในพื้นที่ที่มีความชื้นต่ำ หรือพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการต้านทานการดูดซึมน้ำ

อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ค่าความหนาแน่น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า มีผลต่ออัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง รวมทั้งการใช้เวลานานขึ้นมีผลต่ออัตราการเผาไหม้จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและปริมาณเถ้าสูงขึ้น นูร์ฮายาตี (Nurhayati, 2022) อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างอยู่ที่ 0.63 กรัมต่อนาที และอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างอยู่ที่ 0.79 กรัมต่อนาที ซึ่งมากกว่าอัตราการเผาไหม้ในงานวิจัยของ โอนุกัก และคนอื่น ๆ (Onukak et al., 2017) จะอยู่ที่ 0.12 – 0.18 กรัมต่อนาที เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างมีความหนาแน่น และปริมาณเถ้าสูง



ภาพที่ 4.6 อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ผลการทดสอบแบบต้มน้ำเดือด เพื่อหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลได้ทำการเปรียบเทียบ ระหว่างเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างทอร์รีไฟด์ และกิ่งไม้ลำไย โดยใช้น้ำปริมาณ 500 มิลลิลิตร และเวลาในการต้ม 47 นาที จากการศึกษาพบว่าแม้จะใช้เวลาต้มน้ำเท่ากัน แต่การใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างต้มน้ำด้วยเตาชีวมวลทำให้เตาชีวมวลมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 21.79 เตาชีวมวลที่ใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 17.06 และเตาชีวมวลของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 6.1 ซึ่งน้อยกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เนื่องจากของแข็งทอร์รีไฟด์มีค่าปริมาณสารระเหยสูง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงจากมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์ และกิ่งไม้ลำไย

คุณสมบัติ	หน่วย	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง	กิ่งไม้ลำไย
ประสิทธิภาพความร้อน	ร้อยละ	21.79	6.10	17.06
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (FCR)	กิโลกรัมต่อ นาฬิกา	0.015	0.029	0.017
ปริมาณเชื้อเพลิง (SFC)	กิโลกรัมต่อ กิโลกรัม	0.75	2.50	0.86
ปริมาณพลังงาน (PC)	กิโลวัตต์	3.91	7.00	4.99

จากการทดสอบการต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง โดยใช้เชื้อเพลิงปริมาณ 1.56 กิโลกรัม เวลา 47 นาที ในการต้มน้ำ 500 มิลลิลิตร ซึ่งใช้เวลานานกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้าง และกิ่งไม้ลำไย 22 นาที และใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมากกว่า 0.69 กิโลกรัม และ 0.36 กิโลกรัม ตามลำดับ เวลาในการต้มน้ำเดือดของงานวิจัยนี้ช้ากว่างานวิจัยของ โอนุคัก และคนอื่น ๆ (Onukak et al., 2017) 0.14 – 0.16 นาที และงานวิจัยของ สาทิยาพรานู และคนอื่น ๆ (Sathiyabarathi et al., 2022) 6.52 – 12.40 นาที และคิซิทโต้ และคนอื่น ๆ (Kizito et al., 2022) 3.63 นาที - 10.74 นาที เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งมากกว่าทั้งสามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ใช้เชื้อเพลิงหนัก 25 กรัม, 84 กรัม – 124 กรัม และ 750 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และไม้ลำไย เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง แต่ลดประสิทธิภาพความร้อนโดยรวมของเตาชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นเหนือร้อยละ 6.1 นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง ยังมีค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.029 กิโลกรัมต่อนาที ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ 2.7 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณพลังงาน 7.4 กิโลวัตต์ ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และกิ่งไม้ลำไย ดังนั้นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากทอร์รีไฟต์จากมูลช้างแม้จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ แต่เชื้อเพลิงอัดแท่งจากทอร์รีไฟต์จากมูลช้างไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวล จึงควรเลือกเตาชีวมวลที่เหมาะสมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งนี้

ความเข้มข้นการปล่อยมลพิษไอเสียของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นการปล่อยมลพิษไอเสียของเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยทำการวิเคราะห์ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ค่าไฮโดรเจน (H₂), ค่าไนโตรเจนออกไซด์ (NO₂) และค่ากำมะถัน (SO₂) ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง และกิ่งไม้ลำไย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นการปล่อยมลพิษไอเสียของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

มลพิษไอเสีย	หน่วย	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้าง	กิ่งไม้ลำไย	*มาตรฐานคุณภาพอากาศทั่วไป (1 ชั่วโมง)	**มาตรฐานคุณภาพอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	ใน ส่วน ล้านส่วน	5.50×10^4	3.50×10^4	5.20×10^4	N/A	N/A
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ใน ส่วน ล้านส่วน	2.10×10^3	8.40×10^2	4.90×10^2	30.00	690.00
ไฮโดรเจน (H ₂)	ใน ส่วน ล้านส่วน	1.90×10^2	2.10×10^2	1.30×10^2		200.00
ค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	ใน ส่วน ล้านส่วน	1.00×10^2	82.90	94.20	0.17	N/A
ค่าไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	ใน ส่วน ล้านส่วน	1.10×10^2	87.10	98.90	N/A	
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	ใน ส่วน ล้านส่วน	0.00	0.00	0.00	0.30	60.00

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2564; กรมควบคุมมลพิษ, 2564

จากการศึกษาพบว่า การปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างต่ำกว่ากิ่งไม้ลำไย เมื่อเทียบกับการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพอากาศทั่วไปที่กำหนดโดยการประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2538) และมาตรฐานการปล่อยมลพิษของโรงงานอุตสาหกรรม

ที่กำหนดโดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2549) กำหนดไว้ไม่เกิน 690 ส่วนในล้านส่วน การปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงอัดแท่งและอุณหภูมิของเตาที่ทดสอบ และปริมาณตัวประสานที่ใช้ เวอร์ชินินา และคนอื่น ๆ (Verashinina et al., 2022) ค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณสูง แสดงให้เห็นว่ามี การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เมื่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกออกซิเดชัน ปิลูซา และคนอื่น ๆ (Pilusa et al., 2013) การปล่อยความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ พบว่ากึ่งไม้ลำไยมีปริมาณสูงที่สุดอยู่ที่ 1,302 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งทั้ง 2 ชนิด เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้าง เกิดจากการปล่อยแก๊สจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่แตกต่างกันและเกิดจากการกระจายอุณหภูมิภายในเตา และการสลายตัวทางความร้อนของปฏิกิริยาองค์ประกอบชีวมวล และเชื้อเพลิง (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2558) และพบว่าปริมาณการปล่อยค่าความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่ามาตรฐานคุณภาพอากาศทั่วไปของประเทศไทย (2538) และมาตรฐานคุณภาพอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย (2549) และการปล่อยค่าความเข้มข้นกำมะถันของเชื้อเพลิงอัดแท่ง เมื่อเริ่มติดไฟปริมาณของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างจะมีค่าสูงสุด เมื่อเชื้อเพลิงอัด-แท่งมีปริมาณลดลง และดับสนิท

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การประเมินต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง โดยพิจารณาการลงทุนของระบบ วัสดุ อุปกรณ์ในการผลิต การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง โดยมีแบริ่งมันล่าปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน และแรงดัน ในอัตราส่วน 40 กรัม : 18.87 กรัม : 6 กรัม : 40 บาร์ ตามลำดับ

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

ผลจากการคำนวณทางด้านต้นทุนการผลิตต่อหน่วยทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง จากอัตราส่วนผสมที่กำหนด โดยใช้อัตราส่วนผสมของมูลช้างเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต และแบริ่งมันล่าปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน พบว่าผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผสมดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด เท่ากับ 2.98 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งหากมีค่ากำลังการผลิตอยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อวัน ระยะเวลาการทำงานแต่ละปีเท่ากับ 260 วัน เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ หากใช้ต้นทุนในปีที่ 1 เท่ากับ 155,131 บาท ราคาขายอยู่ที่กิโลกรัมละ 10 บาท

สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 3.03 ปี มีความเหมาะสมที่จะส่งเสริมให้ผู้ประกอบการ หรือผู้ที่สนใจในการใช้ประโยชน์

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้าง

ผลจากการคำนวณทางด้านต้นทุนการผลิตต่อหน่วยทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้างด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน หากใช้ต้นทุนในปีที่ 1 เท่ากับ 278,307.26 บาท อย่างไรก็ตามราคาต้นทุนนี้ประมาณร้อยละ 80 เกิดมาจากค่าพลังงานที่ใช้ เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับขนาดห้องทดลองจึงใช้ไฟฟ้าราคาขายอยู่ที่ กิโลกรัมละ 15 บาท สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 6.06 ปี

จากผลการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่าราคาของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้างมีต้นทุนและระยะการคืนทุนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เนื่องจากมาจากค่าพลังงานที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับขนาดห้องทดลองมีการใช้ไฟฟ้าในการผลิตวัตถุดิบเพื่อปรับปรุงคุณภาพของของแข็งทอรรีไฟต์อัดแท่งให้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันอีกอย่างหนึ่งคือของเหลว คือน้ำส้มควันไม้ที่มีสรรพคุณไล่หรือกำจัดแมลง ในปัจจุบันมีการซื้อขายน้ำส้มควันไม้ราคาอยู่ในช่วง 80 – 300 บาทต่อลิตร การ์เด็น (Garden, 2018) อย่างไรก็ตามควรนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติเปลี่ยนแปลงเทียบกับน้ำส้มควันไม้ และการนำของเหลวไปทดลองไล่หรือกำจัดแมลง

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

สรุป

การเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากมูลช้าง เป็นการประเมินสมการการทำนายค่าความหนาแน่นอาศัยหลักการทางสถิติ สมการการทำนายที่ได้เป็นสมการกำลังสองแบบแปรผกผัน ให้ R^2 เท่ากับ 0.767 หรือร้อยละ 76.70 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการโดยค่า p -value อยู่ที่ 0.0003 และ F -value อยู่ที่ 6.90 แสดงให้เห็นว่าสมการกำลังสองสมบูรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากสมการประกอบด้วย ปริมาณมูลช้าง และแป้งมันสำปะหลัง มีผลกระทบเชิงเส้นต่อความหนาแน่นของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยมีค่า p -value เท่ากับ 0.0015 และ 0.0071 และค่า F -value เท่ากับ 15.040 และ 9.700 ตามลำดับ ปริมาณน้ำ แป้งมันสำปะหลัง และมูลช้าง เป็นพหุนามกำลังสองที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า p -value เท่ากับ 0.0010, 0.0020 และ 0.0055 ตามลำดับ และค่า F -value เท่ากับ 16.770, 14.020 และ 10.490 ตามลำดับ การทำนายแสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสม ประกอบด้วย มูลช้าง 40.00 กรัม แป้งมันสำปะหลัง 18.87 กรัม น้ำ 6.00 กรัม และแรงดัน 40.00 บาร์

การปรับปรุงสมบัติมูลช้างด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชันด้วยเครื่องทอรีรีแฟกชันแบบสั้นพบว่า ของแข็งทอรีรีไฟด์จากมูลช้างมีปริมาณความชื้น (ร้อยละ 2.43) ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ 60.30) และปริมาณเถ้า (ร้อยละ 19.50) ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามูลช้าง แต่มีปริมาณคาร์บอนคงตัว (ร้อยละ 20.20) และค่าความร้อน (17.00 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ของของแข็งทอรีรีไฟด์จากมูลช้างสูงกว่ามูลช้าง และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบอื่นกับมูลช้าง พบว่า ปริมาณไฮโดรเจน (ร้อยละ 5.60) และปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ 11.60) สูงกว่ามูลช้าง แต่มีค่าต่ำกว่าคิงไมล์ไย เมื่อมีการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ของปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณคาร์บอนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยกำหนดให้ต้องไม่เกินร้อยละ 6 และ 40 ตามลำดับ

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม พบว่ามีปริมาณความร้อน 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เชื้อเพลิงอัดแท่งมูลช้างมีค่าความร้อนสูงกว่ามูลช้าง แต่ต่ำกว่ากิ่งไม้ลำไย เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเคมี พบว่ามีปริมาณสารระเหย (ร้อยละ 73.30) ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ 17.80) ปริมาณเถ้า (ร้อยละ 8.90) ปริมาณไฮโดรเจน (ร้อยละ 6.30) ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ 42.90) ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ 0.70) และปริมาณกำมะถัน (ร้อยละ 0.20) เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีระยะยึดตัวและหดตัวร้อยละ 0.1 – 0.2 และ 0.54 – 4.52 ตามลำดับ ร้อยละการทนทานต่อการแตกหัก 78.66 และ 52.59 ตามลำดับ การต้านการดูดซึมน้ำร้อยละ 38.57 และ 50.94 ตามลำดับ

นอกจากนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง ถูกนำไปมาใช้เป็นสัดส่วนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้าง ซึ่งเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตได้มีค่าความร้อน 16.70 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณความชื้น (ร้อยละ 7.11) ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ 67.60) ปริมาณคาร์บอนร้อยละ (19.20) ปริมาณเถ้าร้อยละ (13.20) ไฮโดรเจน (ร้อยละ 6.40) คาร์บอน (ร้อยละ 45.10) ไนโตรเจน (ร้อยละ 3.00) และกำมะถัน (ร้อยละ 0.20) สมบัติทางกายภาพพบว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างอยู่ที่ 0.63 และ 0.79 กรัมต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ พบว่าสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีค่าความร้อนสูงกว่ามูลช้าง และคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีร้อยละการทนทานต่อการแตกหักมากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างร้อยละ 52.59 และ 78.66 ตามลำดับ แต่เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีอัตราการเผาไหม้ และการต้านการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างร้อยละ 50.94 และ 38.57 ตามลำดับ

ทั้งนี้คุณสมบัติทางความร้อน และปริมาณสารระเหย ค่าความชื้น และการปล่อยแก๊สมลพิษ เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง และคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าการต้านทานการแตกหักของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีสมบัติที่ดีกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นสูง และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างมีศักยภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจากมูลช้าง แต่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรัรีไฟด์จากมูลช้างร่วมกับเตาเผาที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งภายในเตาเผาได้อีกด้วย

ด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้างใช้ต้นทุนในปีที่ 1 ราคาขายอยู่ที่กิโลกรัมละ 10 บาท สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 3.03 ปี และเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ราคาขายอยู่ที่กิโลกรัมละ 15 บาท สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 6.06 ปี เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างมีต้นทุนและระยะการคืนทุนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง เนื่องจากมาจากการแปรสภาพมูลช้างเป็นของแข็งทอร์รีไฟต์ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

1. ต้องศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอร์รีไฟต์จากมูลช้างเพิ่มเติม เนื่องจากเพื่อให้ทราบการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อนสูง ความหนาแน่นพลังงานสูง และความทนทานดี ส่งผลให้เผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน
2. ศึกษาตัวประสานอื่นเพิ่มเติมนอกจากแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานอาจจะทำให้เกิดปริมาณความร้อน ปริมาณสารระเหย และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้สูงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเชื้อเพลิงอัดแท่ง
3. ควรศึกษาประเภทหรือรูปแบบเตาชีวมวลที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลให้สูงขึ้น
4. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่สะท้อนข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และสอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น
5. ควรมีการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับกระบวนการทอร์รีแฟกชัน เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บรรณานุกรม

- เจตน์สิทธิ์ ลำลิรัตน์. (2559). *เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร: ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้* [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจริญพร ถาวรประเสริฐ. (2558). *การสกัดน้ำมันจากกากผลปาล์มของกระบวนการหีบแบบแห้งด้วยตัวทำละลาย* [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เอกลักษณ์ กิติภักดิ์ถาวร, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, และวลัยรัตน์ อุดตมะปรากรม. (2556). เชื้อเพลิงอัดแท่งจากการผลิตร่วมของตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 10(3), กันยายน – ธันวาคม.
- กนกพงษ์ ศรีเที่ยง. (2563). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกสับประรด. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม*, 3(1), 101 – 110.
- กรกมล สราญรมย์ และวิทยา ขงเจริญ. (2558). การศึกษารูปแบบการจัดตั้งโรงงานแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงกรณีศึกษาเทศบาลนครนนทบุรีจังหวัดนนทบุรี. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 12(2), 36 – 46.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2561). *ก๊อชเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ทางออกของการกำจัดขยะชุมชน*. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560). *พลังงานชีวมวล*. กรุงเทพฯ. กลุ่มพลังงานชีวมวล สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน. กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). *พลังงานชีวมวล*. กรุงเทพฯ. สำนักถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2557). *คู่มือความรู้เรื่องช้างและข้อควรปฏิบัติตนเมื่อพบช้างป่า*. สำนักอนุรักษ์สัตว์ป่า กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- กระทรวงพลังงาน. (2543). *การผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลช้าง*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน.
- กระทรวงพลังงาน. (2557). *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาห่วงโซ่อุปทานของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน.
- กฤตย์ภรณ์ ตรังคประสิทธิ์. (2553). *การเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทางใบและเปลือกนอกต้นปาล์มน้ำมัน* [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- กัณมณี แสงสุข, นุตา ศุภกต, และเสกสรร พาป้อง. (2559). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษเชื้อไม้
 จี้เลื่อย และด้าย โดยเทคนิคการเชื่อม และการสานกัน. *การประชุมวิชาการระดับชาติ
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 13: ตามรอยพระยุคลบาท
 เกษตรศาสตร์กำแพงแสน* (น. 1554 – 1561). สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน เขต
 กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กิตติกร สาสุจิตต์. (2556). การพัฒนาแก๊สชีวภาพจากมูลช้างเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในชุมชน
 พื้นที่ต้นน้ำ. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- กิริติณัฐ ฐนกิจธรรมกุล. (2553). *การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไฟโรไลซิสแบบเร็ว*.
 [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กุลนันท์ วีรณรงค์กร และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. (2558). ไฟโรไลซิส. *วารสาร BIOFUEL Energy
 & Environmental*, 42, 61 – 64.
- เก่งกาจ จันทร์ทวีกุล และฐนียา รังสีสุริยะชัย. (2563). การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารซึ่งร่วมกับมูล
 ช้างและการมูลหมักด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
 แห่งชาติ ครั้งที่ 25* (น. 1 – 6). วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์. (2560). ผลของค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจนจาก
 เปลือกสับปะรดโดยกลุ่มจุลินทรีย์ในมูลวัว. *วารสารวิจัยไร่ไพพรรณี*, 12(2), 25 – 34.
- จารุณี เข้มพิล และภูมินทร์ คงโต. (2564). การปรับปรุงสมบัติทางเคมีความร้อนของชีวมวลข้าวโพด
 ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน. *วารสารวิชาการปทุมวัน*, 1(11), 96 – 113.
- จรียา ยี่มรัตน์บวร, บุญชัย วิจิตรเสถียร, และสุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. (2549). การบำบัดน้ำทิ้งจาก
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. *วารสาร มลก.
 วิชาการ*, 9(18), 66 – 78.
- จิรัชย์ อาคะจักร และวุฒินันท์ พวงสาย. (2558). *การศึกษาพฤติกรรมการกินพืชอาหารของช้างฝูง
 และช้างในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง*. สถานีวิจัยสัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย.
- จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร. (2560). ไฟโรไลซิส: เทคโนโลยีเพื่อการจัดการขยะและผลิตพลังงาน.
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์, 7(2), 1 – 14.
- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, ปวีณา สมเสาร์, อาทิตยา มาอินแก้ว, และอดิศักดิ์ ปัตติยะ. (2562). เทคนิคการ
 สกัดน้ำมันและการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดกระบก. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.
 พระนคร: สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 13(1), 149 – 157.
- เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์. (2561). ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน.
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 11(3), 25 – 50.

- ชินย่า โยโกยามะ และมัดสีมุซาระ ยูกิฮิโกะ. (2551). *คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล*. ป่าไม้และประมง.
- ชันวาจิ จิใจ และชัยรัตน์ ศิริพัชณะ. (2559). การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขมจีน. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, 13(1), 1 – 12.
- ชลลดา ไร่ขาม, จันท์ประดับ พิทักษ์, วรรณฤ นงลักษณ์, วัฒนศรี วรรณญา, ศิริพร ปัญญาวัฒน์, และวรรณญา บุญช่วย. (2560). เชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร: เทคโนโลยีและแนวโน้ม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*, 7(2), 15 – 24.
- ชโลมศักดิ์ แต่งงาม, วิชัย ศิวะโกศิษฐ, และเกียรติไกรดี ไกรอายุวัฒน์. (2555). การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบสามส่วนเชื้อเพลิง. *ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- ณิศาธร นำเจริญพินิจ และวิชากร จารุศิริ. (2560). การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสเศษไม้ชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพบนเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(2), 123 – 134.
- ณัฐรัตน์ นัตถวิบูลกุล. (2560). *การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันด้วยเตาเผาแบบหมุน* [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ธนกร นิรันดร์นุต. (2556). *โครงการออกแบบผลิตภัณฑ์จากเศษไม้เหลือใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเพื่อส่งเสริมงานตกค้างทางสถาปัตยกรรม: กรณีศึกษาบริษัทสยาม วัสดุเท็ค จำกัด* [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ธนพร เทพสมุทร, กิตติศักดิ์ อินทร์จันทร์, และสมชาย บุญจริง. (2564). การออกแบบและสร้างเตาผลิตถ่านจากชีวมวลและขยะมูลฝอยระดับชุมชน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร*, 20(2), 113 – 122.
- นคร ทิพยาวงศ์. (2552). *เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล*. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี.
- นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล. (2557). การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและครัวเรือน. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 6(11), 66 – 77.

- นาตยา เจริญสุข และชนกฤต ภัทรเกษวิทย์. (2558). การออกแบบระบบการหมุนเวียนความร้อนที่ส่งผลต่อปฏิบัติการเผาไหม้ในกระบวนการรีดักชันสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- นเรศวร์ ชื่นอินมณู และยุทธชัย บรรเทิงจิตร. (2556). การกำหนดค่าตัวแปรในการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันจากแกลบ. วารสารวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 23(3), 121 – 130.
- นันทปรีชา สิงห์ทอง, ณัฐวุฒิ พันธุ์เยี่ยม, ณัฐวุฒิ กองชัย, ชัยวัฒน์ วัฒนพงศ์, และชिरศักดิ์ นาคประสงค์. (2563). การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยกระบวนการไพโรไลซิส. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์, 10(2), 1 – 11.
- ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. (2551). เทคโนโลยี GTL เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด. *Energy Technology*. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์, ศิริวรรณ แก้วสวิง, และอมรประภา ทิศกระโทก. (2563). การผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกทุเรียน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 21(2), 27 – 36.
- พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. (2559). การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล จากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชน และการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 9(1), มกราคม 2559 – มิถุนายน 2559.
- มยุรี เรืองสมบัติ, ยูดี พรธราพงศ์, ทินวงศ์ รักอิสระกุล, และมณฑนา ทองสุพล. (2552). การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจากกระดาษสามูลช้าง เพื่อสร้างรายได้ให้แก่ชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร: กรุงเทพฯ.
- มานพ ชุมภูแก้ว. (2557). การเตรียมวัสดุแหล่งคาร์บอนจากมูลช้างโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ไดตีพิมพ์]. สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น.
- ยุวรัตน์ เงินเย็น, ชนิภรณ์ อุตส่าห์, และกนกวรรณ ฤทธิรุช. (2561). เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากมูลสุกรและมูลไก่โดยไม่ใช้ตัวประสาน. *RAJABHAT AGRIC*, 17(1), 8 – 16.
- รัฐกร สวัสดิ์แดง. (2561). สักยภาพของเปลือกกะลาเผาในการผลิตไบโอชาร์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, 17(2), 23 – 32.

- เรวัตน์ เต็มกล้า, ชูชาติ พยอม, ทรงศักดิ์ มีมกระโทก, และสุทธิศักดิ์ แก้วแกมจันทร์. (2559). การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกระดาษจากมูลช้างผู้ผลิตภัณฑ์ชุมชน. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่*, 14(2), 1 – 16.
- วรรณรพ ชันธิรัตน์, นรงค์ วิชาพา, อนุชา ศรีบุรัมย์, และอุทัย ธารพรศรี. (2562). การคัดเลือกเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมนกลชัยบุรี*, 1, 33 – 44.
- วรัญญา เทพสาสน์กุล, วรัญญา ธรรมชาติ, และอักรินทร์ อินทนิเวศน์. (2559). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภท. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12*. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- วสันต์ ปินะเต. (2559). *การผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน : กรณีศึกษา*. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- วัชรภรณ์ ยุกตเขต และดาวิวรรณ เศรษฐธรรม. (2560). เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะเศษใบไม้ที่ได้จากการอัดด้วยเครื่องอัดและอัดด้วยมือ. *วารสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 17(4), 85 – 96.
- วิชัย ศิวะโกศิษฐ และชนศักดิ์ แก้วสมบูรณ์. (2557). พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการทำนายลักษณะการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบใส่เชื้อเพลิงเป็นชุดชนิดไหลขึ้น. *ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51*. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิระพันธ์ อดันชัยธวัช. (2559). การศึกษาการจัดการมูลช้างบ้านแม่ตะมานจังหวัดเชียงใหม่. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยฟาร์อีสเทอร์น*, 10(1), 156 – 156.
- วันชัย อัสววิบูลย์กิจ. (2550). กรรมวิธีการผลิตกระดาษมูลช้าง. *กระดาษ อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง*, 2(1), 1 – 16.
- วรัญญา เทพสาสน์กุล, วรัญญา ธรรมชาติ, และอักรินทร์อินทนิเวศน์. (2559). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทกะลามะพร้าว. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12* (น. 610 – 618). โรงแรมวังจันทร์เรอริวิ จังหวัดพิษณุโลก.
- ศิริประภา ชัยเนตร, กัทริน วงษ์พันธ์กมล, และวรวุช ชัยเนตร. (2555). *การใช้ประโยชน์จากของเสียอินทรีย์ร่วมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลม้า*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่.

- ศุภกร เชื้ออ่ำ, ศิรินทร ทองแสง, และแววบุญ แยมแสงสังข์. (2561). สมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจาก ช้างข้าวโพดและกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพลาสติก. *ในการประชุมวิชาการ เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 19* (น. 145 – 154). มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล. (2551). *การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน*. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย. (2543). *ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้าง*. ศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย จังหวัด ลำปาง.
- สถาพร สอนสุภาพ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ. (2562). การปรับปรุงสมบัติของไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ ทอร์รีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 14(1), 106 – 115.
- สาลินี ศรีวงษ์ชัย. (2560). *การผลิตไบโอดีเซลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทาง เทคโนโลยีชีวภาพ*. มหาวิทยาลัยบูรพา
- สุพัตรา บุตรเสรีชัย, วราภรณ์ จันทร์เวียง, และฐานิตา คล่องวาจา. (2561). การศึกษาและปรับปรุง คุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัวเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง. *วารสารวิศวกรรมสาร เกษมบัณฑิต*, 8(1), 135 – 147.
- ญาณสินี สุมา (2564). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของเหล็ก(III) โดยใช้ถ่านชีวภาพ จากมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 22(1), 1 – 12.
- สุรัช ธีรัฐ จันทร์ศรี. (2561). *เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล*. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- หทัยทิพย์ ลินธูยา และชยานนท์ สวัสดิ์นันทน (2564). *การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดย กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน*. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- อนุภัทร สุกบรรพทิศ และณัฐวิ ชังชัย. (2561). การกำจัดชีโอคีนน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีด้วย วิธีการตกตะกอนทางเคมี. *วารสาร.มทรส.* 6(2), 171 – 181.
- อบต.กีดช้าง. (2562). *แผนยุทธศาสตร์การพัฒนาระยะ 5 ปี ขององค์การบริหารส่วนตำบลกีดช้าง (พ.ศ. 2557 – 2562)*. องค์การบริหารส่วนตำบลกีดช้าง.
- อภิสิทธิ์ พรหมดอน และธนรัฐ ศรีวีระกุล. (2555). การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุง ต้มประสิทธิภาพสูงเมื่อจำนวนและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูรังผึ้งเปลี่ยนแปลงไป.

ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (น. 116 – 121). จังหวัดเชียงราย.

- อัจฉรา พิเลิศ. (2555). การผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลช้างและน้ำเสียจากการผลิตกระดาษสามูลช้างร่วมกับฟางข้าว [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- อัญชณา อุประภูต, นงนุช ศรีเล็ก, เฉลิมพล วัฒนาตระกูลวงศ์, นเรศใหญ่วงศ์, ชัชชัย วรพัฒน์, เสกสรร วินยางค์กุล, มิ่งขวัญ สมพฤกษ์, จริญญา คนแรง, วิภพ ใจแข็ง, และพัฒนพงษ์ วัชรยุทธกำจร. (2560). การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ปั่นไฟแก๊สโซลีนขนาดเล็กโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากไบโอดองผสมมูลวัว และถั่วเหลืองแห้งบด. *วารสารการวิจัยกาสะลองคำ*, 11(3), 115 – 123.
- อาทิตยา มาอินแก้ว และสุรชัย ฌรัฐ จันทรศรี. (2562). รูปแบบการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง. ใน *The 12th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-12)* (น. 280 – 286). Naresuan University.
- อุกฤษฏ์ นาจำปา. (2563). การอัดเชื้อ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี*, 12(2), 45 – 54.
- Abu Bakar, M. S., & Titiloye, J. O. (2013). Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 362 – 368.
- Açıklım, A.F., Güler, S., & Demiral, T. (2015). Ash behavior during combustion and melting in a bubbling fluidized bed biomass combustor. *Fuel Processing Technology*, 134, 310 – 319.
- Akolgo, G. A., Adjaye, J. D., & Bakobie, N. G. (2021). Fuel characterization and combustion properties of biomass briquettes produced from shea nut cake and rice straw blends. *Energy Reports*, 7, 1441 – 1450. <https://doi.org/10.1007/s13399-016-0206-x>
- Ansari, K. B., Rehan, M., & Al-Muhtaseb, A. H. (2021). Pyrolysis of biomass for biofuel production: A review. *Energies*, 14(12), 3881.
- Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art science and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619 – 1640. <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- Asadullah, M. Rahman, M.A. Ali, M.M. Rahman, M.S. Motin, M.A. Sultan, M.B. & Alam, M.R. (2007). Production of bio – oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, 86(16), 14 – 20. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.007>

- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis practical design and theory* [Unpublished master's thesis]. Universidad de Guanajuato.
- Bhattacharya, S. C., Shrestha, R. M., Technology, A. I., & Center, R. E. R.I. (1990). *Biocoal: Technology and Economics: Asian Institute of Technology*. Regional Energy Resources Information Center, Asian Institute of Technology 1990.
- Binner, J., & Murthy, T. S. R. C. (2021). *Hot pressing: Fundamentals and applications*. CRC Press.
- Bridgwater, A. V., & Grassi, G. (2012). *Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization*. Springer Science & Business Media.
- Bruun, E. W. (2011). *Application of fast pyrolysis biochar to a loamy soil – Effects on carbon and nitrogen dynamics and potential for carbon sequestration*. Information service department riso national laboratory for sustainable energy technical university of Denmark.
- Bonsu, B. O. (2020). Moisture content of yam flour as a determinant of its shelf life: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 1 – 10.
- Blanc, J. (2008). Projection of Future Changes in Elephant Population in Amboseli under Representative Concentration Pathways. *Loxodonta africana. American Journal of Climate Change*, 7(4), 2167 – 9509. [https://doi: 10.4236/ajcc.2018.74040](https://doi:10.4236/ajcc.2018.74040)
- Cai, W., Fivga, A., Kaario, O., & Liu, R. (2017). Effects of torrefaction on the physicochemical characteristics of sawdust and rice husk and their pyrolysis behavior by thermogravimetric analysis and pyrolysis–gas chromatography/mass spectrometry. *Energy & Fuels*, 31(2), 1544 – 1554. <https://doi:10.1021/acs.energyfuels.6b01846>
- Debruyne R., Barriel V., & Tassy, P. (2003). Status of the so – called African pygmy elephant (*Loxodonta pumilio* (NOACK 1906)): Phylogeny of cytochrome b and mitochondrial control region sequences. *Comptes Rendus de Biologie*, 326(7), 687 – 690.
- Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24(5), 471 – 482. <https://doi:10.1080/00908310252889979>
- Dind, P., & Schmid, H. (1978). Application of solar evaporation to waste water treatment in galvanoplasty. *Solar Energy*, 20(3), 205 – 211.
- Emilia E., Chi H., González V., Hugo O., Méndez V., Arreola J., & Liu, H. (2011). Coupling the biochemical and thermochemical biorefinery platforms to enhance energy and product

- recovery from agave tequilana bagasse. *Applied Energy*, 299(1).
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117293>
- Forster, A. (1927). The Chemistry of Cellulose and Wood. *Nature*, 120(3020), 399 – 400.
<https://doi:10.1038/120399a0>.
- Iftikhar, M., Asghar, A., Ramzan, N., Sajjadi, B. a. & Wei-yin C. (2019). Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, 122, 1 – 16.
- Jayamane, A. (2002). *Application of up flow anaerobic floating filter (UAFF) system in series for high strength and low degradable wastewater treatment*. AIT Bangkok, Thailand.
- Jian – jun, W., Yu-dong, F., & Xiao – yan, W. (2007). Air pollution and respiratory health among children in a rural area of the North China Plain. *Environmental Health Perspectives*, 115(11), 1513 – 1517.
- Huang, J., Fu, S., Gan, A., & Chen, L. (2019). Structure and Characteristics of Lignin. *In Title of the Book (Eds.)*, 25 – 50.
- Kanniappan, K. & Research, A. (2015). Production of Biomass by Gasification Using Coconut Shell. *IJSR*, 4(5), 1 – 6.
- Kosov, V., Sinelshchikov, V., Sytchev, G., & Zaichenko, V. (2014). Effect of torrefaction on properties of solid granulated fuel of different biomass types. *High Temperature*, 52, 907 – 912.
- McKendry, P. (2002). McKendry, P.: Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresour. Technol. Bioresource Technology*, 83, 37 – 46. [https://doi:10.1016/S0960 – 8524\(01\)00118 – 3](https://doi:10.1016/S0960 – 8524(01)00118 – 3)
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Single, binary and multi-component adsorption of copper and cadmium from aqueous solutions on Kraft lignin a biosorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*, 297(2), 489 – 504.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.023>
- Neidermeier, A., Danks, C., Coleman, K., & Wallin, K. (2020). Forest pests and wood pellets: A literature review of the opportunities and risks in the United States' northeastern forests. *Forest Ecology and Management*, 476, 118 – 415.

- Pecha, M. B., & Garcia-Perez, M. (2020). Chapter 29 - Pyrolysis of lignocellulosic biomass: oil, char, and gas. In A. Dahiya (Ed.), *Bioenergy (Second Edition)*. *Academic Press*, 581 – 619.
- Proskurina, S., Junginger, M., Heinimö, J., & Vakkilainen, E. (2017). Effect of drying on the energy characteristics of biomass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 87(1), 012006.
- Rafail Isemin, Alexander Mikhalev, Dmitry Klimov, Panagiotis Grammelis, Nikolaos Margaritis, Dimitrios-Sotirios Kourkoumpas, & Viktor Zaichenko. (2017). Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw. *Fuel*, 210(1), 859 – 865.
- Reed, M. S., Allen, K., Attlee, A., Dougill, A. J., Evans, K. L., Kenter, J. O., Hoy, J., McNab, D., Stead, S. M., Twyman, C., Scott, A. S., Smyth, M. A., Stringer, L. C., & Whittingham, M. J. (1992). A place-based approach to payments for ecosystem services. *Global Environmental Change*, 92 – 106.
- Richardson, Y., Drobek, M., Julbe, A., Blin, J., & Pinta, F. (2015). Biomass gasification to produce syngas. In *Recent advances in thermo-chemical conversion of biomass*. *Elsevier*, 213 – 250.
- Pandey, T., Bhaskar, M., Stöcker, & Sukumaran R. K. (2015) Recent Advances in Thermo – Chemical Conversion of Biomass. *Boston: Elsevier*, 213 – 250.
- Ruivo, J. M. (2017). Pyrolysis: A review of the process and its applications. *Energies*, 10(12), 2042.
- Saripan, A. F., & Reungsang, A. (2014). Simultaneous saccharification and fermentation of cellulose for bio-hydrogen production by anaerobic mixed cultures in elephant dung. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 9028 – 9035.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.066>
- Sheng, C., & Azevedo, J. (2005). Estimating the higher heating value of biomass from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28, 499 – 507. <https://doi:10.1016/j.biombioe.2004.11.008>
- She, M., Zhang, Y., Li, C., Liu, S., & Wang, S. (2022). Catalytic pyrolysis of pine wood for hydrocarbon production. *Fuel*, 324, 124631.

- Shyamalee, D., Amarasinghe, S., & Senanayake, N. (2015). Evaluation of different binding materials in forming biomass briquettes with saw dust. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(3), 1 – 8.
- Smith, J., & Johnson, A. (2010). The role of volatile plant secondary metabolites as pre-ingestive cues and potential toxins dictating diet selection by African elephants. *In The Ecology of Elephants*. 13(5), 75 – 90.
- Srikotaphet, P. S., M. & Jantamala, U. (2017). *The Development of design product from elephant dung Surin Province*. Silpakorn University.
- Srikrachang, M. (2003). *Conservation and Management of Elephants in Thailand*. Mahidol University, Bangkok.
- Stepien, P., Swiechowski, K., Bialowiec, A., Stegent, S., Abrowska, D., Jacek A. Manczarski P., & Białowiec, A., (2019). Waste to carbon: biocoal from elephant dung as new cooking. *Fuel*, 12(22), 4344. <https://doi.org/10.3390/en12224344>
- Pütün, AE., Önal E., Uzun, BB., & Özbay, N. (2007). Comparison between the “slow” and “fast” pyrolysis of tobacco residue. *Industrial Crops and Products*. 26(3), 307 – 314.
- Sundaram, E., & Natarajan, E. (2009). Pyrolysis of coconut shell. *An Experimental Investigation. J Eng Res*, 6, 33 – 39. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol6iss2pp33-39>
- Suma, Y., Pasukphun, N., Eaktasang, N., & Laor, P. (2019). Preliminary study of dye removal from aqueous solution using elephant dung activated carbon. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 291. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/291/1/012013>
- Theivarasu, C., Chandra, S., (2013). Adsorption performance of activated carbon prepared from elephant (*Elephas maximus*) dung for the removal of reactive yellow 15 from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 16(51), 40 – 42.
- Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748 – 3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Vigouroux, R., Majari, M., & Björnbohm, E. (2008). *Biomass pre-treatment by torrefaction*. OA.mg is built in Stockholm, London, and Seoul. <https://oa.mg/work/18332647>
- Vitali, L., Zamansky, V., & Swanson, L. (2008). *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3173-11>

- Wattanachira, L., Laapan, N., Chatchavarn, V., Thanyacharoen, A., Rakruam, P., & Journal, D. (2016). Development of Biobriquettes from mixed rice- straw and longan waste residues. *Journal of multidisciplinary academic research and development*, 39(2), 239 – 255.
- Xu, C. Y., Wang, L. S., & Chen, H. P. (2014). Co-combustion of high-moisture biomass with coal: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 494 – 509.
- Yokoyama, S., & Yukihiko, Y. (2015). The present status and future scope of bioenergy in Japan. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 94(10), 1079 – 1086.
- Zafar, S. (2019). *An Introduction to biomass energy*. Blogging with a difference.
- Zanzi R., Sjöström K., & Björnbom E. (1996). Rapid high- temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor. *Fuel*. 75(5), 545 – 50.
- Zhang, S., Dong, Q., Chen, T., & Xiong, Y. (2016). Combination of light bio- oil washing and torrefaction pretreatment of rice husk: its effects on physicochemical characteristics and fast pyrolysis behavior. *Energy & Fuels*, 30(4), 3030 – 3037.
- Zhang, T., Liu, L., Song, Z., Ren, G., Feng, Y., Han, X., & Yang, G. (2013). Biogas production by co – digestion of goat manure with three crop residues. *Plos one*, 8(6), 66845.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเก็บข้อมูลการทดลอง

การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

ภาคผนวก ก.1 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท/หน่วย)	ราคาสุทธิ (บาท)
1. เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก	1 ระบบ	17,300	17,300
2. กระบอกลัดไฮดรอลิก	1 ระบบ	10,000	10,000
3. เครื่องบด	1 ระบบ	1,200	1,200
4. เครื่องร่อน	1 ระบบ	19,700	19,700
5. ถังผสม	10 ใบ	30	300
ราคาต้นทุนรวม (บาท)			48,500

ภาคผนวก ก.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจาก
มูลช้าง

รายการ	หน่วย	ราคา
1. ต้นทุนการผลิต	บาท	48,500
2. ค่าดำเนินการ		
5.1 ค่าแรงงาน	บาท/ปี	84,500*
5.2 ค่ามูลช้าง (เฉพาะค่าขนส่ง) กิโลกรัมละ 1 บาท	บาท/กก.	9,000
5.3 ค่าวัตถุดิบ (แป้งมันสำปะหลัง) กิโลกรัมละ 40 บาท	บาท/ปี	10,400
5.4 ค่าไฟฟ้าเครื่องบด (1,200 W) ค่าไฟหน่วยละ 3.50 บาท	บาท/ปี	252
5.5 ค่าไฟฟ้าเครื่องร่อน (0.25 kW) ค่าไฟหน่วยละ 3.50 บาท	บาท/ปี	53.80
5.6 ค่าบำรุงรักษา คิดเป็น 5% ของเงินลงทุนการผลิต	บาท/ปี	2,425
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	บาท/ปี	155,131
ราคาค่าต้นทุนเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลช้าง	บาท/กก.	2.98
ราคาขายส่งเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลช้าง	บาท/กก.	10

หมายเหตุ * คิดจากอัตราค่าแรงขั้นต่ำจังหวัดเชียงใหม่ปี 2564 เป็นเงิน 325 บาท ระยะเวลาทำงาน 260 วัน/ปี

ผลจากการคำนวณทางด้านต้นทุนการผลิตต่อหน่วยทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งจากมูลช้าง จากอัตราส่วนผสมที่กำหนด โดยใช้อัตราส่วนผสมของมูลช้างเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต และแป้งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน พบว่าผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผสมดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด เท่ากับ 2.98 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งหากมีค่ากำลังการผลิตอยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อวัน ระยะเวลาการทำงานแต่ละปีเท่ากับ 260 วัน เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ หากใช้ต้นทุนในปีที่ 1 เท่ากับ 157,580.80 บาท ราคาขายอยู่ที่กิโลกรัมละ 10 บาท สามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาประมาณ 3.03 ปี มีความเหมาะสมที่จะส่งเสริมให้ผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจในการใช้ประโยชน์

ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้าง

การประเมินต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้าง โดยพิจารณาการลงทุนของระบบ วัสดุ อุปกรณ์ในการผลิต ในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยมีแบริ่งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน และแรงดัน ในอัตราส่วน 40 กรัม : 18.87 กรัม : 6 กรัม : 40 บาร์ ตามลำดับ

ภาคผนวก ก.3 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟต์จากมูลช้าง

รายการ	กำลังไฟฟ้า
1. เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แบบต่อเนื่อง	
1.1 ปั๊มน้ำหล่อเย็น (30 วัตต์/ชั่วโมง)	0.030
1.2 มอเตอร์รอบเร็ว (85.3 วัตต์/ชั่วโมง)	0.085
1.3 มอเตอร์ถ่วงป้อน (75.8 วัตต์/ชั่วโมง)	0.076
1.4 มอเตอร์สั่น (236.9 วัตต์/ชั่วโมง)	0.237
1.5 เครื่องแยกแก๊สไนโตรเจน (14.2 วัตต์/ชั่วโมง)	0.014
1.6 ชุดดักจับไฟฟ้าสถิต (68.7 วัตต์/ชั่วโมง)	0.069
รวมกำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	0.511
2. กำลังไฟฟ้าที่ให้กับขบวนการความร้อนด้วยอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส (มูลช้าง 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง x 8 ชั่วโมง x 30 วัน)	240.00
2.1 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (หน่วย) = (กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อวัน (หน่วย/วัน) + กำลังไฟฟ้าที่ให้กับขบวนการความร้อนในช่วงแรก (หน่วย/วัน) x 30 (วัน)) + จำนวนชีวมวลที่ใช้ต่อเดือน (กิโลกรัมต่อเดือน)	767.90

ประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนที่อัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

ภาคผนวก ก.4 ประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนที่อัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

รายการ	อนุภูมิ (280 องศาเซลเซียส)
1. ค่าพื้นฐานไฟฟ้า	
1.1 ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท) (4.4217 บาท/หน่วย)	3,395.42
1.2 ค่าบริการ (บาท)	312.24
1.3 รวมค่าไฟฟ้าฐาน (บาท)	3,707.66
2. ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft)	
2.1 จำนวนพลังงานไฟฟ้า x ค่า Ft (บาท)	- 0.1532
3. ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%	
3.1 (ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า Ft) x 7/100 (บาท)	259.53
รวมเงินค่าไฟฟ้า (บาท)	3,967.04

* ค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ ธุรกิจรวมกับบ้านอยู่อาศัย อุตสาหกรรม ส่วนราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กร ปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ สถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศหรืออื่น ๆ

การคำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างด้วยเตาปฏิกรณ์แบบ
 สั่น

ภาคผนวก ก.5 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้างด้วยเตาปฏิกรณ์
 แบบสั่น

รายการ	จำนวน	ราคาต่อ หน่วย (บาท/ หน่วย)	ราคาสุทธิ (บาท)
1. การผลิตถ่านมูลช้างจากกระบวนการทอรรีไฟด์ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบสั่น	1 ระบบ	3,967.04	3,967.04
2. เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก	1 ระบบ	17,300.00	17,300.00
3. กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก	1 ระบบ	10,000.00	10,000.00
4. เครื่องบด	1 ระบบ	1,200.00	1,200.00
5. เครื่องร่อน	1 ระบบ	19,700.00	19,700.00
6. ถังผสม	10 ใบ	30.00	300.00
ราคาต้นทุนรวม (บาท)			52,467.04

หมายเหตุ * คัดจากอัตราค่าแรงขั้นต่ำปี 2564 เป็นเงิน 325 บาท ระยะเวลาการทำงาน 260 วัน/ปี

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

ภาคผนวก ก.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

รายการ	หน่วย	ราคา
1. ต้นทุนการผลิต	บาท	52,467.04
2. ค่าดำเนินการ		
2.1 ค่าแรงงาน*	บาท/ปี	84,500.00
2.2 ค่ามูลช้าง (เฉพาะค่าขนส่ง) กิโลกรัมละ 1 บาท	บาท/กก.	9,000.00
2.3 ค่าวัตถุดิบ (แบริ่งมันสำปะหลัง) กิโลกรัมละ 40 บาท	บาท/ปี	10,400.00
2.4 ค่าไฟฟ้าเครื่องบด (1,200 W) ค่าไฟหน่วยละ 3.50 บาท	บาท/ปี	252.00
2.5 ค่าไฟฟ้าเครื่องร่อน (0.25 kW) ค่าไฟหน่วยละ 3.50 บาท	บาท/ปี	53.80
2.6 ค่าบำรุงรักษา คิดเป็น 5% ของเงินลงทุนการผลิต	บาท/ปี	2,623.35
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	บาท/ปี	278,307.26
ราคาขายส่งเชื้อเพลิงจากถ่านมูลช้างด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชัน	บาท/กก.	15.00
กำลังการผลิต	กก./วัน	176.64
รายรับสุทธิ	บาท/ปี	46,926.40
ระยะคืนทุน	ปี	6.06

ภาคผนวก ข

เอกสารการตรวจวิเคราะห์

การวิเคราะห์คุณสมบัติมูลช้าง

ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับห้องงานเคมีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเชลียงทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150
โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี/TAX ID 0994000160097
Report code: CAL-R004-2022 Ref. code: CAL-QT004-2022
หน้า 1 / 1

3 พฤศจิกายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

नामลูกค้า : มหาวิทยาลัยรามคำแหง
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 21 ตุลาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 25 ตุลาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : มูลละอียด, สีนํ้าตาล
 ชื่อเครื่องมือ : Bomb calorimeter, LECO, AC 350
 วิธีการทดสอบ : Automatic isoperibol (stirred-liquid bomb)

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Higher Heating value (Cal/g, dry basis)
SBM 21075	มูลช้าง	3,357.8

ผู้ดำเนินการตรวจวัด: *ฐิติมา สอนพิทักษ์*
(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)
วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

ผู้รับรองผล: *นคร วรสุวรรณรักษ์*
(รศ. ดร. นคร วรสุวรรณรักษ์)
วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

ขอสงวนลิขสิทธิ์เอกสารฉบับนี้
ห้ามทำซ้ำหรือคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับห้องงานเคมีและสิ่งแวดล้อม
----- END -----


 The Joint Graduate School of Energy and Environment
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachasathi Road, Tungkong, Bangkok Thailand 10140
 Tel: (662) 4708309-10, 6729014-5 Fax: (662) 479523 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th


 Center for Energy Efficiency and Energy Conservation
 King Mongkut's University of Technology Thonburi

ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับสำนักงานสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเวียนทอง 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com หมายเลขบัญชีเงินภาษี/TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R001-2022 Ref. code: CAL-QT004-2022
 หน้า 1 / 1



3 พฤศจิกายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 21 ตุลาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 29 ตุลาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : ผงละเอียด, สีน้ำตาล
 ชื่อเครื่องมือ : Thermogravimetric Analyzer (TGA), PerkinElmer, Pyris 1 TGA
 สภาพการทดสอบ : Nitrogen at 100ml/min action occurs immediately
 1. Heat from 40.0°C to 110.0°C at 10.0°C/min
 2. Hold for 10.0 min at 110.0°C
 3. Heat from 110.0°C to 900.0°C at 10.0°C/min
 Switch the gas to air at 100ml/min if the time is >=1.0min
 4. Hold for 10.0 min at 900.0°C

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Proximate analysis (%wt, dry basis)		
		Volatile matter	Fixed carbon	Ash
SPR 21064	มูลช้าง	61.7	11.6	26.7

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

ฐิติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. นศ. วรสุวรรณรักษ์

(ดร. นศ. วรสุวรรณรักษ์)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น

ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง หรือนำไปใช้ในการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับสำนักงานสิ่งแวดล้อม

END



The Joint Graduate School of Energy and Environment
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pochairatthi Road, Tunghua, Bangkok Thailand 10140
 Tel: (662) 4708309-10, 8723014-5 Fax: (662) 4279025 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับแผนกสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยวิเศษพล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150

โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี/TAX ID 0994000160097

Report code: CAL-R002-2022 Ref. code: CAL-QT004-2022

หน้า 1 / 1



3 พฤศจิกายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 21 ตุลาคม 2564
วันที่ทำการทดสอบ : 28 ตุลาคม 2564
ลักษณะตัวอย่าง : ผงละเอียด, สีน้ำตาล
ชื่อเครื่องมือ : Elemental analyzer, J-science, JM10
วิธีการทดสอบ : In house method base on ASTM D5873 - 16 และ WI-08.Rev.01

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Ultimate analysis (%wt, dry basis)		
		Hydrogen	Carbon	Nitrogen
SEA 21087	มูลช้าง	5.6	37.9	1.3

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

กวีวงศ์ วงศ์อริยา

(นายกวีวงศ์ วงศ์อริยา)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. นสร วรสุวรรณรักษ์

(รศ. ดร. นสร วรสุวรรณรักษ์)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างเท่านั้น

ห้ามทำก๊อปปี้หรือคัดลอก ดัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการกลางบัณฑิตวิทยาลัยร่วมกับแผนกสิ่งแวดล้อม

----- END -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment

King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Bangkok, Thailand 10140
Tel: (662) 4708309-10, 8729014-5 Fax: (662) 4279023 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเขื่อนลพ 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R003-2022 Ref. code: CAL-QT004-2022
 หน้า 1 / 1



3 พฤศจิกายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 21 ตุลาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 25 ตุลาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : ผงละเอียด, สีน้ำตาล
 ชื่อเครื่องมือ : Carbon/Sulfur analyzer, Horiba, Emie-220 V2
 วิธีการทดสอบ : High frequency induction furnace

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Sulfur (%wt, dry basis)
SCS 21041	มูลช้าง	0.3

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

ฐิติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. วรสุวรรณ์รักษ์

(ดร. ดร. วรสุวรรณ์รักษ์)

วันที่ 3 พฤศจิกายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น
 ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง ให้นำไปใช้ในการโฆษณาหรือบริการอื่นโดยมิชอบด้วยกฎหมายและสิ่งแวดล้อม

----- END -----

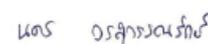


The Joint Graduate School of Energy and Environment

King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Bangkok, Thailand 10140
 Tel: (662) 4708309-10, 6729014-5 Fax: (662) 4279625 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th

Center for Energy and Environmental Policy Research and Development

การวิเคราะห์คุณสมบัติของแข็งทอรัรีไฟต์จากมูลช้าง

		
ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150 โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com		
เลขที่รายงาน : R030-L/2565 หน้าที่ 1/1	เลขที่อ้างอิง : QT024/2565	วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565
รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ		
नामลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเมือก ต.ช้างเมือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50900 วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565 วันที่ทำการทดสอบ : 28 กุมภาพันธ์ 2565 ลักษณะตัวอย่าง : ผสมแกลบเฝือ, สีนํ้าทาลอมเขียว ชื่อเครื่องมือ : Bomb calorimeter, LECO, AC 350 วิธีการทดสอบ : Automatic Isooperibol (stirred-liquid bomb)		
ผลการตรวจวัด ทดสอบ:		
Sample code	Sample name	Higher Heating value (Cal/g, dry basis)
SBM 22018	Torrefied elephant dung	4,050.1
ผู้ดำเนินการตรวจวัด:  (นางสาววิศิมา สอนพิทักษ์) วันที่ 1 มีนาคม 2565	ผู้รับรองผล:  (รศ. ดร. นทว วรสุวรรณรักษ์) วันที่ 1 มีนาคม 2565	
รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น ห้ามทำก๊อปปี้ ดัดแปลง ยกเว้นได้รับการอนุญาตจากห้องปฏิบัติการสถาบันบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม -----สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----		
 The Joint Graduate School of Energy and Environment King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Prachasathi Road, Bangkok, Bangkok Thailand 10140 Tel: (662) 4762009-10, 0229014-5 Fax: (662) 47623 www.jgsee.kmutt.ac.th Email: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th		
		



ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยส่วนด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R027-1/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 25 และ 28 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : มงปนเส้นใย, ใยน้ำพาลอมเขียว
ชื่อเครื่องมือ : Thermogravimetric Analyzer (TGA), PerkinElmer, Pyris 1 TGA
สภาวะการทดสอบ : Nitrogen at 100ml/min action occurs immediately
1. Heat from 40.0°C to 110.0°C at 10.0°C/min
2. Hold for 10.0 min at 110.0°C
3. Heat from 110.0°C to 900.0°C at 10.0°C/min
Switch the gas to air at 100ml/min if the time is >=1.0min
4. Hold for 10.0 min at 900.0°C

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Proximate analysis (9wt, dry basis)		
		Volatile matter	Fixed carbon	Ash
SPR 22084	Torrefied elephant dung	60.3	20.2	19.5

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

จิรติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวจิรติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรองผล:

นคร วรสุวรรณวิทย์

(ดร. ดร. นคร วรสุวรรณวิทย์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างเท่านั้น

ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง ยกเว้นได้รับการอนุญาตจากห้องปฏิบัติการสถาบันบัณฑิตวิทยาลัยส่วนด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

----- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Bangkok Thailand 10140
Tel: (662) 4708009-10, 8729014-5 Fax: 8626-4279623 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th





ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเพชรเกษม 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R028-1/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 26 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
เครื่องมือทดสอบ : Elemental analyzer, JS-science, JM10
วิธีการทดสอบ : In house method base on ASTM D5373 - 16 และ WI-03.Rev.01

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Ultimate analysis (%wt, dry basis)		
		Hydrogen	Carbon	Nitrogen
SEA 22065	Torrefied elephant dung	5.3	45.1	1.4

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

กวีวงศ์ วงษ์อัยยา

(นายกวีวงศ์ วงษ์อัยยา)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรองผล:

นตส อรุณวรรณรัตน์

(ทศ. ดร. นตส อรุณวรรณรัตน์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยอัตโนมัติ

ห้ามทำการคัดลอก ดัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

----- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment

King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Tungkrui, Bangkok, Thailand 10140
Tel: (662) 4708809-10, 6729014-5 Fax: (662) 4279625 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th





ห้องปฏิบัติการทดสอบดินที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R029-1/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 26 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
ชื่อเครื่องมือ : Carbon/Sulfur analyzer, Horiba, Emia-220 V2
วิธีการทดสอบ : High frequency induction furnace

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Sulfur (%wt, dry basis)
SCS 22043	Toreffied elephant dung	0.2

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

รัตนา สอนพิทักษ์

(นางสาวรัตนา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรองผล:

ดร. วรสุวรรณ์รักษ์

(รศ. ดร. นศร วรสุวรรณ์รักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่ระบุ
ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง อนุรักษ์ไว้รับทราบจากห้องปฏิบัติการทดสอบดินที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ



The Joint Graduate School of Energy and Environment
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Tungkru, Bangkok Thailand 10140
Tel: (662) 4708309-10, 6729014-5 Fax: (662) 4279623 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลช้าง

ห้องปฏิบัติการทดสอบวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมและพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเรียงรอย 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R013-2021 Ref. code: CAL-QT055-2021
 หน้า 1 / 1

1 กันยายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นางลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 16 สิงหาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 16 สิงหาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : ผงละเอียด, สีน้ำตาล อย.เขียว
 ชื่อเครื่องมือ : Bomb calorimeter, LECO, AC 350
 วิธีการทดสอบ : Automatic Isoperibol (stirred-liquid bomb)

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Higher Heating value (Cal/g, dry basis)
SBM 21068	Elephant dung	4,060.5

ผู้ดำเนินการตรวจวัด: *จิตติมา สอนพิทักษ์*
 (นางสาวจิตติมา สอนพิทักษ์)
 วันที่ 1 กันยายน 2564

ผู้รับรองผล: *ดร. อรุณวรรณรัตน์*
 (ดร. ดร. อรุณวรรณรัตน์)
 วันที่ 1 กันยายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น
 ห้ามทำการคัดลอก ตัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมและพลังงานทดแทน

----- END -----

The Joint Graduate School of Energy and Environment
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Bangkok, Thailand 10140
 Tel: (662) 4708309-10, 8229014-5 Fax: (662) 4279023 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th

CEE PERDO
 Group Technology Environment

ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุชีวภาพร่วมกับสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7345 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี/TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R012-2021 Ref. code: CAL-QT055-2021
 หน้า 1 / 1



1 กันยายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก พ.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 16 สิงหาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 16 สิงหาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : มะละเอ็ด, สีน้าตาล รมเขียว
 ชื่อเครื่องมือ : Thermogravimetric Analyzer (TGA), PerkinElmer, Pyris 1 TGA
 สภาพการทดสอบ : Nitrogen at 100ml/min action occurs immediately
 1. Heat from 40.0°C to 110.0°C at 10.0°C/min
 2. Hold for 10.0 min at 110.0°C
 3. Heat from 110.0°C to 900.0°C at 10.0°C/min
 Switch the gas to air at 100ml/min if the time is >=1.0min
 4. Hold for 10.0 min at 900.0°C

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Proximate analysis (96wt, dry basis)		
		Volatile matter	Fixed carbon	Ash
SPR 21049	Elephant dung	73.3	17.8	8.9

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

จิตติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวจิตติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 กันยายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. นรุต วรรณรัตน์

(ดร. นรุต วรรณรัตน์)

วันที่ 1 กันยายน 2564

รายงานฉบับนี้ผลิตเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น

ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยวัสดุร่วมกับสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

----- END -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Procharathi Road, Tungkru, Bangkok Thailand 10140
 Tel.(662) 470809-10, 6729014-5 Fax. (662) 4279623 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail:jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุชีวเคมีร่วมกับห้องงานเลอจิงแมคเคียม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R014-2021 Ref. code: CAL-QT055-2021
 หน้า 1 / 1



1 กันยายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 ถ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 16 สิงหาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 27 สิงหาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : มงอะเอียด, สีน้ำตาล อย.เขียว
 ชื่อเครื่องมือ : Elemental analyzer, J-science, JM10
 วิธีการทดสอบ : In house method base on ASTM D5373 - 16 และ WI-03.Rev.01

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Ultimate analysis (%wt, dry basis)		
		Hydrogen	Carbon	Nitrogen
SEA 21076	Elephant dung	6.3	42.9	0.7

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

กวีวงศ์ วงษ์อักษร
 (นายกวีวงศ์ วงษ์อักษร)

วันที่ 1 กันยายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. วรสุพรรณรักษ์
 (รศ. ดร. วรสุพรรณรักษ์)

วันที่ 1 กันยายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่ระบุ
 ห้ามทำการศึกษา คัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการทางเคมีชีวเคมีร่วมกับงานเลอจิงแมคเคียม
 ----- END -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pachasathi Road, Tungkru, Bangkok Thailand 10140
 Tel: (662) 470809-10, 023014-5 Fax: (662) 479523 www.jgsee.kmutt.ac.th Email: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
 โทรศัพท์ 02-470-7348 Email: lab.jgsee@gmail.com เลขประจำตัวผู้เสียภาษี TAX ID 0994000160097
 Report code: CAL-R015-2021 Ref. code: CAL-QT055-2021



หน้า 1 / 1

1 กันยายน 2564

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 16 สิงหาคม 2564
 วันที่ทำการทดสอบ : 20 สิงหาคม 2564
 ลักษณะตัวอย่าง : ผงละเอียด, สีน้ำตาล ละเอียด
 ชื่อเครื่องมือ : Carbon/Sulfur analyzer, Horiba, Emie-220 V2
 วิธีการทดสอบ : High frequency induction furnace

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Sulfur (%wt, dry basis)
SCS 21034	Elephant dung	0.2

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

ฐิติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 กันยายน 2564

ผู้รับรองผล:

ดร. นศ. วรสุวรรณรักษ์

(ดร. นศ. วรสุวรรณรักษ์)

วันที่ 1 กันยายน 2564

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น
 ห้ามทำการคัดลอก ดัดแปลง หารนำไว้ใช้ในการโฆษณาหรือจากห้องปฏิบัติการภาคบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

----- END -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment

Rangsit University of Technology (Thonburi), 126 Prochaabhit Road, Tungkrui, Bangkok Thailand 10140
 Tel: (662) 4708809-10, 6729014-5 Fax: (662) 4279625 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของแข็งทอรรีไฟด์จากมูลช้าง

		
ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150 โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com		
เลขที่รายงาน : R030-2/2565 หน้าที่ 1/1	เลขที่อ้างอิง : QT024/2565	วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

नामลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างม่ือ อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
 วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
 วันที่ทำการทดสอบ : 28 กุมภาพันธ์ 2565
 ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
 ชื่อเครื่องมือ : Bomb calorimeter, LECO, AC 350
 วิธีการทดสอบ : Automatic Isoperibol (stirred-liquid bomb)

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Higher Heating value (Cal/g, dry basis)
SBM 22019	Torrefied elephant dung + Binder	3,967.7

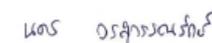
ผู้ดำเนินการตรวจวัด:



(นางสาวจิตติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรองผล:



(รศ. ดร. วรสุวรรณรักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างนี้เท่านั้น
 ห้ามทำการคัดลอก ดัดแปลง อนุรักษ์ไว้สำหรับการเผยแพร่จากห้องปฏิบัติการสถาบันบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม
 -----สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----



ห้องปฏิบัติการทดสอบบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเทียบทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R027-2/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างม่ือ ต.ช้างม่ือ อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 25 และ 28 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
ชื่อเครื่องมือ : Thermogravimetric Analyzer (TGA), PerkinElmer, Pyris 1 TGA
สภาวะการทดสอบ : Nitrogen at 100ml/min action occurs immediately
1. Heat from 40.0°C to 110.0°C at 10.0°C/min
2. Hold for 10.0 min at 110.0°C
3. Heat from 110.0°C to 900.0°C at 10.0°C/min
Switch the gas to air at 100ml/min if the time is >=1.0min
4. Hold for 10.0 min at 900.0°C

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Proximate analysis (%wt, dry basis)		
		Volatile matter	Fixed carbon	Ash
SFR 22035	Torrefied elephant dung + Binder	67.6	19.2	13.2

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

ฐิติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรอง:

ดร. บศ. วรสุวรรณรักษ์

(ดร. บศ. วรสุวรรณรักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่ระบุ

ห้ามทำการคัดลอก คัดแปลง หรือแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ



The Joint Graduate School of Energy and Environment
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Procharat Road, Tungkro, Bangkok, Thailand 10140
Tel: (662) 470809-10, 0221014-5 Fax: (662) 427923 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th





ห้องปฏิบัติการทดสอบดินที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R028-2/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

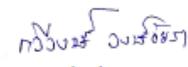
รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก อ.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 26 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
เครื่องมือทดสอบ : Elemental analyzer, JS-science, JM10
วิธีการทดสอบ : in house method base on ASTM D5373 - 16 และ WI-03.Rev.01

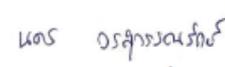
ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Ultimate analysis (%wt, dry basis)		
		Hydrogen	Carbon	Nitrogen
SEA 22064	Torrefied elephant dung + Binder	6.4	45.1	3.0

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:


(นายวิรัช วงษ์อัยรา)
วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรายละเอียด:


(ดร. นต วรสุวรรณรักษ์)
วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะตัวอย่างที่ระบุไว้เท่านั้น

ห้ามทำการศึกษา คัดแปลง ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการทดสอบดินที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

----- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Tungkhro, Bangkok Thailand 10140
Tel: (662) 4708309-10, 6729104-5 Fax: (662) 4279523 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th





ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
49 ซอยเทียนทะเล 25 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
โทรศัพท์ 02-470-7343 Email: lab.jgsee@gmail.com

เลขที่รายงาน : R029-2/2565 หน้าที่ 1/1

เลขที่อ้างอิง : QT024/2565

วันที่ออกรายงาน: 1 มีนาคม 2565

รายงานผลการตรวจวัด ทดสอบ

นามลูกค้า : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ลูกค้า : 202 อ.ช้างเผือก ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300
วันที่รับตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2565
วันที่ทำการทดสอบ : 26 กุมภาพันธ์ 2565
ลักษณะตัวอย่าง : ผงปนเส้นใย, สีน้ำตาลอมเขียว
ชื่อเครื่องมือ : Carbon/Sulfur analyzer, Horiba, Ema-220 V2
วิธีการทดสอบ : High frequency induction furnace

ผลการตรวจวัด ทดสอบ:

Sample code	Sample name	Sulfur (%wt, dry basis)
SCS 22044	Torefiled elephant dung + Binder	0.2

ผู้ดำเนินการตรวจวัด:

ฐิติมา สอนพิทักษ์

(นางสาวฐิติมา สอนพิทักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

ผู้รับรองผล:

นคร วรสุวรรณ์รักษ์

(รศ. ดร. นคร วรสุวรรณ์รักษ์)

วันที่ 1 มีนาคม 2565

รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะข้ออ้างเท่านั้น
ห้ามทำการคัดลอก คัดแปล ยกเว้นได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการสถาบันที่วิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม
----- สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ -----



The Joint Graduate School of Energy and Environment

King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Road, Tungkhro, Bangkok Thailand 10140
Tel: (662) 4708309-10, 8723014-5 Fax: (662) 470923 www.jgsee.kmutt.ac.th E-mail: jgsee@jgsee.kmutt.ac.th



ภาคผนวก ก

การเผยแพร่บทความวิจัย

6. งานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติชื่อ Bioresource Technology Reports ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลสากล Scopus โดยใช้ชื่อเรื่อง Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions

Bioresource Technology Reports 21 (2023) 101328



Contents lists available at ScienceDirect

Bioresource Technology Reports

journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/bioresource-technology-reports



Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions

Artidtaya Mainkaew^a, Adisak Pattiya^b, Surachai Narat Jansri^{a,*}

^a Asian Development College for Community Economy and Technology (adCET), Chiang Mai Rajabhat University, Khiesik, Mae Rim, Chiang Mai 50180, Thailand
^b Biomass Pyrolysis Frontier Research Group, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kawieng, Kanchanawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand





Contents lists available at ScienceDirect

Bioresource Technology Reports

journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/bioresource-technology-reports

Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions

Artidaya Mainkaew^a, Adisak Pattiya^b, Surachai Narat Jansri^{a,*}

^a Asian Development College for Community Economy and Technology (adCET), Chiang Mai Rajabhat University, Khuek, Mae Rim, Chiang Mai 50180, Thailand

^b Biomass Pyrolysis Frontier Research Group, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kawriang, Kantharawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Elephant dung
Fuel briquette production
Low-pressure densification
Briquette quality
Emission

ABSTRACT

Elephant dung is densely packed with undigested fiber, complicating disposal. To manage this waste more efficiently, the dung was converted into biofuel briquettes. Four variables in the briquette production were investigated using three levels of optimization techniques, including a response surface and a central composite design with 95 % confidence. The results show that when compressing a 7:3:1 weight ratio of elephant dung, binder, and water at 40 bars, a briquette density of 613 kg/m³ or 9.09 GJ/m³ could be achieved. Although its dimensional stability was consistent and its shatter resistance was acceptable, its water resistance was poor. The briquettes had atomic ratios of 0.15 and 1.17 for H/C and O/C, respectively. It had a high heating value of 17 MJ/kg and could enhance the stove's overall thermal efficiency by 22 %. The emission study demonstrated that the combustion of the briquettes released mainly CO₂ (5.49 × 10⁴ ppm), whereas other gases were negligible.

1. Introduction

The current demand for renewable energy is rising due to the shortage of fossil fuels and the impacts of global warming (Wang et al., 2019). Biomass is a potential resource for a significant quantity of renewable energy used to generate heat and power in most countries (Roya and Corscadden, 2012; Shelke et al., 2016). Biomass energy may be obtained from natural biomass, residual biomass, energetic crops, and animal waste (Obi et al., 2022). The rising importance of biomass as a source of energy provides a challenge for developing countries (Omuk et al., 2017), particularly in terms of meeting demands and improving biomass quality within their local context. Biomass energy provides countries with great profitability, considerable potential, and social and environmental advantages (Shelke et al., 2016). Despite continued global targets to electrify and develop alternative clean energy infrastructure based on biomass, it is projected that biomass for cooking will remain a primary energy source for rural and low-income areas until 2030 (Song et al., 2019).

A solid fuel derived from biomass densification appears to be a simple and appealing method for improving energy density, adding value, reducing transportation costs, and serving as a convenient alternative to firewood and charcoal (Nazrin et al., 2008; Sharma et al.,

2015). There are several biomass resources that may be utilized as raw materials to produce green fuel briquettes, including rice husk, corncob, banana tree waste, coffee husk, onion peel, tamarind shell, and sugarcane bagasse (Muazu and Stegemann, 2015; Ahmad et al., 2018; Brunerová et al., 2020; Tesfaye et al., 2022; Velusamy et al., 2022). Many researchers have employed agricultural and industrial residues to produce fuel briquettes, but animal waste, particularly animal dung, has been infrequently investigated. Animal dung is a cheap and widely available biomass resource. It is currently mostly used for biogas generation, fermentation media, and composting (Song et al., 2019). However, some researchers are investigating animal dung-based fuel briquettes, either as a main raw material or as a binder, such as in the studies of Anataaya et al. (Anataaya et al., 2019; Patil et al., 2021; Sathiyabarathi et al., 2022; Shuma and Madyira, 2019). As previously stated, cow dung comprises the biggest proportion of animal dung used to produce fuel briquettes. Elephant dung, on the other hand, has been identified as a possible source (Stępień et al., 2019).

The net production of elephant dung might be 100–150 kg (wet weight) per day, or 60 % of the daily food intake, consisting of Napier grass, maize stalks, sugar cane, and some fruit depending on age and breed (Stępień et al., 2019; Stanbrook, 2018; Abeyasinghe et al., 2022). Elephant camps in Thailand house about 3500 domestic elephants

* Corresponding author.

E-mail address: surachai_nar@gcmru.ac.th (S.N. Jansri).

<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101328>

Received 30 November 2022; Received in revised form 27 December 2022; Accepted 29 December 2022

Available online 4 January 2023

2589-014X/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

(Vithumakun et al., 2018), producing >360 tons of dung every day. As a result, elephant dung is very common in Thailand. Every day, a considerable volume of elephant dung from elephant camps is disposed of either by piling it near natural water sources or burying it in the ground for natural decomposition. Elephants have a poor digestive system, and thus their dung contains a high percentage of undigested fiber, including cellulose (34.46–47.36 %), hemicellulose (28.22–30.10 %), and lignin (14.91–18.15 %) (Saripan and Reungsang, 2014; Sawatdeenarunat et al., 2021). Therefore, disposal of such a quantity of elephant dung is a complicated and lengthy process. According to the findings of Chokcharoen and Sukmasuan (2012) and Vanleeuwe and Probert (2014), elephant dung has a sluggish natural degradation rate of 3.00×10^{-2} – 6.37×10^{-2} kg/day. The disposal technique, as mentioned above, is the cause of water contamination as well as odor and toxic gas emissions (Abeyasinghe et al., 2022; Mathews and Thadathil, 2011). Moreover, during the dry season, when natural decomposition is impractical, the dung is simply incinerated, which contributes to air pollution (Mathews and Thadathil, 2011), according to Zhang et al. (2022), who discovered that animal dung burning emits particulate matter, organic carbon, elemental carbon, ions, polycyclic aromatic hydrocarbons, and volatile organic compounds. The improper disposal of tamed elephant dung becomes a concern for the community. As a result, several researchers have proposed finding ways to use elephant dung to produce valuable products such as paper (Mathews and Thadathil, 2011; Rattanaburi et al., 2022), souvenirs (Rattanaburi et al., 2022), consumer goods (Hartono et al., 2022), adsorbents (Abeyasinghe et al., 2022), and energy (Stepien et al., 2019; Sukasem and Prayoonkham, 2017).

Green fuel briquettes are another product that can add value to elephant dung (Mathews and Thadathil, 2011) and can be produced in response to the requirement to appropriately dispose of the large volume of dung produced in elephant camps. Moreover, they may be used directly as solid fuel in household biomass gas stoves. Although the production of fuel briquettes from elephant dung has been explored since 2011, it was observed that only shorter fiber from washed elephant dung was employed in the study by Mathews et al. (2011). Moreover, they only evaluated the high heating value of the briquette, which was 17.45 MJ/kg. In contrast to Mathews et al. (2011), the fuel briquettes in this study were produced from unwashed elephant dung with inorganic contaminants removed, and all characteristics of the briquettes were investigated. This study started in 2020 with a preliminary experiment to determine a feasible approach for producing fuel briquettes from elephant dung, as mentioned in Mainkaew and Janari (2020). A 16:4:1 ratio of ground and sieved elephant dung sized 0.297–2.000 mm (10–50 Mesh), cassava starch, and ambient temperature water was required for briquetting. The briquettes had a cylindrical shape with no fractures after being removed from the mold. At a compression pressure of 70 kg/cm² (68.64 bar), briquette densities of 496–790 kg/m³ were achieved. The briquette length expanded by 0.1–1.5 cm after three weeks in the shade and at ambient temperature.

However, to ensure briquette quality, the parameters must be kept consistent while converting elephant dung to solid fuel briquettes. As a result, improving process parameters for experimental testing and data analysis were employed to get the finest briquette density with the optimal variables. Pressure, binder content, water addition, portion of raw material, raw material moisture content, and raw material particle size were all important factors in achieving the optimal briquette density (Aransiola et al., 2019; Chukwunke et al., 2020; Mohd-Faizal et al., 2022; Li and Zou, 2022; Ajith Kumar and Ramesh, 2022). Several studies have used response surface methodology to optimize fuel briquette production from various biomass, including process parameters, such as the studies of Chukwunke et al. (2020), Li and Zou (2022), and Ajith Kumar and Ramesh (2022). However, there is no conclusive evidence about the product or optimization of elephant dung fuel briquettes. As a result, the central composite design, which was based on response surface methodology, provided the effect of all variables to be contributed

for elephant dung briquette density with all data on key variables over the required range of experimental parameters and mathematical model of the process. Moreover, the physical, chemical, and combustion characteristics of elephant dung fuel briquettes, including their emission, were investigated in detail to gain further insight into employing this type of fuel in practical applications such as households, communities, and small industrial systems.

2. Material and methods

2.1. Experimental apparatus

A manual hydraulic press machine with a compressing capacity of 30 tons and a cylindrical steel mold were employed as experimental equipment, as shown in Fig. 1. The mold had an inner diameter of 5 cm and a length of 25 cm. To create a hole in the center of the briquette, a steel shaft with an outer diameter of 2 cm and a length of 25 cm was used as a rod in the center. The piston, which had an outside diameter of 5 cm and a height of 25 cm, was designed with a hole in the center to fix the rod's position during production. The equipment was placed on the first removable plate, which contained a groove for inserting the mold and rod. The first plate was removed once the sample had been squeezed to the required pressure. The mold, complete with rod and piston, was then positioned on top of the second plate, which functioned as the ejection guide plate. To eject the sample from the mold, a little force was applied through the rod. The rod was manually extracted after 5 min of releasing the sample.

2.2. Elephant briquette production

The elephant briquette production, as shown in Fig. 2, began with hand sorting to eliminate contaminants such as rock and sand from fresh elephant dung collected from the elephant camp in Kuead Chang Sub-district, Mae Tang District, Chiang Mai Province, Thailand. The dung was left in the sunlight for 3–5 days to reduce the moisture content to $<15 \pm 1.5$ wt%. According to the previous study by Mainkaew and Janari (2020), the material was ground and sieved to a particle size of 0.841 mm. This preprocessed material size was consistent with the findings of Mitchual et al. (2013), which recommended that the particle size of raw materials for fuel briquettes should be <1 mm. The processed dung was then blended with cassava starch, which was acquired from a local market in Chiang Mai, Thailand. Furthermore, to assist briquette production, ambient-temperature water was added to the mixture in this investigation. The mixture was then sieved three times using a 0.841-mm net sieve to ensure uniformity. According to the experimental design, the mixture was then compressed into briquettes in a cylindrical mold using a manual hydraulic press machine. Prior to compressing the briquette out of the mold, the pressed mixture was held in the mold under the required pressure for 5 min. After that, the punch was retracted, and the briquette was instantaneously released from the mold. In total, three experimental design sets were used. Finally, the dimensions of all the produced briquettes were measured, and they were then dried for 5 days in the shade at room temperature before being analyzed.

2.3. Design of experiment

In this study, response surface methodology (RSM) in conjunction with central composite design (CCD) was employed, not only for the design and statistical analysis of the experiment but also for identifying the significant process parameters impacting the process (Bharadwaj et al., 2019). The CCD model was created to reduce the cost and number of experimental runs needed to produce elephant dung green fuel briquettes (Tanui et al., 2018). In addition, the optimal conditions for achieving the criterion of product density >600 kg/m³ for densified-refuse-derived fuel (RDF-5) had to be determined (Punin et al.,

briquette were measured immediately after it was taken from the mold and every day until its measurements stopped changing. The dimensional stability of the briquette was calculated using Eq. (3).

$$DS = 100 - \left(\frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \right) \quad (3)$$

where DS is dimensional stability (%), V_1 is the volume of the briquette after releasing (cm^3) and V_0 is the volume of the briquette after production (cm^3).

2.4.1.3. Relaxed density. After allowing the briquettes to dry, their weight was measured. Since the briquettes were cylindrical in shape, the volumes were calculated based on their height and diameter. Eq. (4) was used to calculate the relaxed density of briquettes using the mass and volume, as recommended by as recommended by Mandal et al. (2019) and Ndindeng et al. (2015).

$$\rho = \frac{M}{\pi H(r_2^2 - r_1^2)} \quad (4)$$

where ρ is relaxed density (kg/m^3), M is briquette mass (kg), π is mathematical constant, H is briquette height (m) and r_2 and r_1 were inner and outer radius of briquette (m).

2.4.1.4. Water resistance. The porosity of briquettes determines their ability to absorb water. Their porosity was assessed by measuring the amount of water absorbed in each sample, as described in Kpalo et al. (2020). After drying, a pre-weighted briquette was immersed in water at ambient temperature. Following that, its weight was measured again, and the relative weight change as well as the time necessary for dispersion were recorded (Samomasa et al., 2021). The water resistance was calculated using Eq. (5) as suggested by Adu-Poku et al. (2022).

$$WR = 100 - \left(\frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \right) \quad (5)$$

where WR is water resistance (%), W_d is dry weight of briquette (g) and W_w is wet weight of briquette after immersed in water (g).

2.4.1.5. Shatter resistance. The shatter resistance of the briquette reflects its durability, which was measured by the proportion of briquettes that remained unshattered (Kpalo et al., 2020; Wang et al., 2015). Briquette shatter resistance was evaluated by subjecting it to a free fall from a constant height (Tanui et al., 2018). The dried briquette sample was dropped onto a concrete floor five times from a height of 2 m. The weight retained by the briquettes after breaking was measured, and the shatter resistance was determined using Eq. (6) as proposed by Adu-Poku et al. (2022) and Ramaraja et al. (2022).

$$SR = 100 - \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \right) \quad (6)$$

where SR is shatter resistance (%) and W_1 and W_2 are weight of briquette before and after shattering (cm), respectively.

2.4.2. Chemical properties

A proximate analysis was performed to assess the percentages of moisture content (MC) (liquid state), volatile matter (VM) (gaseous state), fixed carbon (FC) (solid state), ash content (AC) (inorganic waste material), and high heating value (HHV) in the raw material and optimal condition samples. Through ultimate analysis, the percentages of hydrogen (H), carbon (C), oxygen (O), nitrogen (N), and sulfur (S) in the material and product were also determined (Chukwunke et al., 2020; Tanui et al., 2018; Mandal et al., 2019). The chemical properties of fuel were analyzed by the Joint Graduate School of Energy and Environment-Central Analytical Laboratory (JGSEB-CAL), which is certified by the Thai Industrial Standard Institute (TISI) according to TIS

No.17025:2548: ISO17025:2017.

The energy density was calculated using the previously examined HHV result and Eqs. (7)–(9) as shown in the study by de Souza et al. (2022).

$$LHV = HHV - (0.23 \times H) \quad (7)$$

where LHV is low heating value (MJ/kg).

$$NHV = (((LHV \times 238.85) \times (1 - (0.01 \times MC))) - (6 \times MC)) / 238.85 \quad (8)$$

where NHV is net heating value (MJ/kg).

$$ED = NHV \times \rho \quad (9)$$

where ED is energy density (MJ/m^3).

2.4.3. Combustion properties

2.4.3.1. Ignition time. The ignition time is the length of time it takes for a known mass of fuel to ignite, as measured using a technique established by Omukak et al. (2017). The elephant dung fuel briquettes were placed on a wire mesh grid and immediately burned on a liquefied petroleum gas (LPG) stove. The briquettes caught fire once the stove was ignited. The ignition time was calculated using Eq. (10).

$$IT = t_1 - t_0 \quad (10)$$

where IT is ignition time (min), t_1 is time the briquette ignited (min) and t_0 is time the LPG gas stove was lighted (min).

2.4.3.2. Burning rate. The burning rate is the rate at which a specific mass of fuel burns in the air (Omukak et al., 2017). The samples were placed on the wire mesh grid and ignited using the LPG gas stove. The weight of the burning briquettes was recorded until they were completely burned, and a constant weight was maintained, as determined by an Omukak et al. (2017) developed process. The weight loss at a specified time was calculated using Eq. (11).

$$B_r = \frac{Q_1 - Q_2}{t} \quad (11)$$

where B_r is burning rate (g/min), Q_1 is initial weight of briquette before burning (g), Q_2 is final weight of briquette after burning (g) and t is total burning time (min).

2.5. Briquette performance in stove

The water boiling test (WBT) of optimal condition production was carried out in an open kitchen environment using a fabricated household updraft biomass gas stove, as shown in Fig. 3A. The study was compared to the longan branch, which was a type of traditional firewood in the area obtained from waste after pruning the longan tree. The first pile of longan branches, weighing approximately 100 g, was placed in the combustion chamber of the stove. The stove was ignited, and after 2 min (to let the fire stabilize), a stainless-steel pot with 500 mL of tap water was placed on the stove. The second pile of longan branches, weighing approximately 100 g, was added to the stove 5 min after it was ignited. Then, 100 g of elephant briquettes were continuously added every 5 min until the hot water had entirely evaporated. Finally, once the water had completely evaporated, the remaining briquettes, charcoal, and ash were measured. The fuel consumption and thermal efficiency of both fuels used in the stove were calculated using Eqs. (12)–(15) as recommended by Kole et al. (2022).

$$\eta_r = \left[\frac{(M_w C_w) \times (T_f - T_i) + M_s L_v}{((M_f \times (1 - (1.12 \times x))) - (1.5 \times M_c)) \times LHV} \right] \times 100 \quad (12)$$

where C_w is specific heat capacity of water ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$), L_v is latent heat

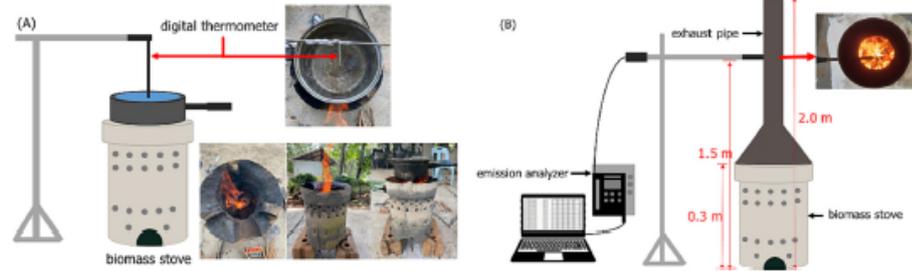


Fig. 3. The water boiling test (A) and the emission test (B).

of water vaporization (kJ/kg), LHV is low heating value (kJ/kg), M_c , M_f , M_w and M_r are the weight of remained charcoal, initial fuel, initial water, and water evaporated (kg), respectively, and T_i and T_f are initial and final of water temperature ($^{\circ}\text{C}$), respectively, x is moisture content.

$$FCR = \frac{(M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c))}{t} \quad (13)$$

where FCR is fuel consumption rate (kg/min).

$$SFC = \frac{(M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c))}{M_w} \quad (14)$$

where SFC is specific fuel consumption (kg/kg water).

$$PC = \frac{[(M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c)) \times LHV]}{60t} \quad (15)$$

where PC is power consumption (kg/kg water).

2.6. Emission test

The exhaust gas from the burning of the elephant dung briquette sample was analyzed for oxygen (O_2), carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO), hydrogen (H_2), nitrogen oxide (NO_2 and NO_x), sulfur dioxide (SO_2) using a flue gas analyzer (Testo 350 XL-fuel gas analyzer) and compared to the longan branch. A 2 m exhaust gas pipe was mounted on the top of the stove, and a 1.5 m exhaust gas pipe with a probe of analyzer was installed, as shown in Fig. 3B. The fuel was ignited and added in the following step of the WBT process. After that, the exhaust gas was detected with a pump flow rate of around 0.78 L/min.

3. Results and discussion

3.1. Statistical analysis and modeling of elephant dung green fuel briquette

3.1.1. Statistical analysis

The results of an elephant dung fuel briquette experiment based on CCD and their densities are presented in Table 2, and ANOVA analysis is reported in Table 3. In terms of actual parameters, a complete design equation is an inverse full quadratic equation, as given in Eq. (16). The coefficient of determination (R^2) was calculated to assess model fitness. R^2 provided predictive values for density in the range of 0.767, which possibly accounted for 76.70 % of the variability. That is, 23.3 % of the total variations in Eq. (16) could not be explained by the model, which meant good fitness and confirmed the adequacy of the regression model. Moreover, the validity of the model was assessed using P-values and F-values. The significance of the corresponding coefficient increases with a smaller p-value and a greater F-value (Bharadwaj et al., 2019; El-Gendy et al., 2015). The design model was determined to have a

Table 2
Design of fuel briquette production performed.

Run	Elephant dung (g)	Cassava starch (g)	Water (g)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)
1	40.00	17.50	17.50	60.00	646.48
2	70.00	35.00	17.50	40.00	798.44
3	55.00	26.25	0.25	50.00	621.34
4	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48
5	85.00	26.25	11.75	50.00	642.12
6	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48
7	40.00	17.50	6.00	60.00	753.44
8	55.00	43.75	11.75	50.00	679.08
9	70.00	35.00	6.00	40.00	639.82
10	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48
11	70.00	17.50	17.50	40.00	660.07
12	40.00	35.00	17.50	40.00	845.32
13	55.00	8.75	11.75	50.00	557.64
14	70.00	17.50	6.00	40.00	615.84
15	25.00	26.25	11.75	50.00	716.33
16	40.00	17.50	6.00	40.00	641.07
17	70.00	35.00	17.50	60.00	668.13
18	55.00	26.25	11.75	30.00	647.22
19	70.00	17.50	6.00	60.00	626.14
20	40.00	17.50	17.50	40.00	525.08
21	40.00	35.00	6.00	60.00	926.57
22	70.00	35.00	6.00	60.00	723.71
23	55.00	26.25	11.75	70.00	859.41
24	70.00	17.50	17.50	60.00	691.58
25	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48
26	40.00	35.00	17.50	60.00	761.98
27	40.00	35.00	6.00	40.00	765.07
28	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48
29	55.00	26.25	23.25	50.00	691.21
30	55.00	26.25	11.75	50.00	753.48

p-value < 0.05. The p-value of 0.0003 and F-value of 6.90 obtained indicated that the model is significant at the 95 % confidence level, as shown in Table 3.

$$\begin{aligned} 1/\text{density} = & 4.986580 - (0.027690 \times m) - (0.097857 \times b) - (0.068383 \times l) \\ & - (0.045543 \times p) + (0.000327 \times m \times b) - (0.000513 \times m \times l) \\ & + (0.000097 \times m \times p) + (0.000034 \times b \times l) + (0.000168 \times b \times p) \\ & + (0.000976 \times l \times p) + (0.000220 \times m^2) + (0.001157 \times b^2) \\ & + (0.001877 \times l^2) + (0.000193 \times p^2) \end{aligned} \quad (16)$$

The p-value and F-value were also used to determine the significance of each variable. When the linear effect is considered, it is shown that the amount of cassava starch and elephant dung affected briquette density, with p-values of 0.0015 and 0.0071 and F-values of 15.040 and 9.700, respectively. Moreover, the quadratic effect of the amount of water, followed by the amount of cassava starch and of elephant dung,

Table 3
ANOVA analysis for response of briquette density.

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value Prob > F	
Model	1.050	14	0.075	6.900	0.0003	Significant
m – elephant dung	0.110	1	0.110	9.700	0.0071	
b – cassava starch	0.160	1	0.160	15.040	0.0015	
l – water	0.014	1	0.014	1.250	0.2811	
p – pressure	0.018	1	0.018	1.670	0.2160	
mb	0.024	1	0.024	2.220	0.1570	
ml	0.022	1	0.022	2.000	0.1781	
mp	5.700 × 10 ⁻³	1	5.700 × 10 ⁻³	0.530	0.4795	
bl	1.639 × 10 ⁻⁴	1	1.639 × 10 ⁻⁴	0.015	0.9038	
bp	4.161 × 10 ⁻⁴	1	4.161 × 10 ⁻⁴	0.038	0.8473	
lp	0.029	1	0.029	2.640	0.1249	
m ²	0.110	1	0.110	10.490	0.0055	
b ²	0.150	1	0.150	14.020	0.0020	
l ²	0.180	1	0.180	16.770	0.0010	
p ²	1.062 × 10 ⁻³	1	1.062 × 10 ⁻³	0.098	0.7586	
Residual	0.160	15	0.011			Not significant
Lack of Fit	0.047	5	9.420 × 10 ⁻³	0.820	0.5650	
Pure Error	0.120	10	0.012			
Cor Total	1.210	29				
R ²	0.767					
Adjusted R ²	0.549					
C.V.%	8.920					

was found to significantly influence the output response values, with p-values of 0.0010, 0.0020, and 0.0055, and F-values of 16.770, 14.020, and 10.490, respectively.

3.1.2. Effect of influencing factor on density of fuel briquette

The optimization included 40.00 g of dried elephant dung, 13.87 g of cassava starch, 6.00 g of water, and a pressure of 40.00 bar (39.22 kg/m²). Under these conditions, the production of fuel briquettes was predicted to meet the density requirement. Response surfaces in three dimensions (3D) were developed, as shown in Fig. 4. They were based on the design equation to analyze the interaction between variables and the optimal condition of each factor for the maximum density of fuel briquettes in terms of the inverse.

The effect of cassava starch and elephant dung on density, as shown in Fig. 4A, indicated that increasing cassava starch loading improved briquette density. Conversely, it was observed that greater elephant dung loading at the expense of cassava starch had less impact on briquette density. Fig. 4B indicates the effect of water and elephant dung on density. The density of the briquettes increased as the amount of water and elephant dung increased. The variation and dependence of briquette density on elephant dung and pressure, as shown in Fig. 4C, revealed that the density of briquettes improved with increasing pressure at greater elephant dung loading. It was also found that as the amount of loaded elephant dung decreased, the reduced pressure had less of an effect on the density. The 3D response plot in Fig. 4D indicates the effect of water and cassava starch on briquette density. It was shown that increasing the cassava starch quantity beyond the optimal level resulted in a drop in briquette density. Moreover, the density was increased by increasing the amount of water to 12 g. The effect of pressure and amount of cassava starch, as shown in Fig. 4E, demonstrated that the briquette density increased with greater pressure. Increasing the amount of cassava starch in the range of 25–35 g was also noted to slightly improve density. The pressure and amount of water that affected the density of the briquette are presented in Fig. 4F. It was revealed that with decreased water loading, the briquette density

increased with pressure. Additionally, as the water loading increased, the pressure had less of an effect on the density.

According to the study by *Muazu and Stegemann (2015)*, who evaluated the operational factors and found an impact on the quality of fuel briquettes made from rice husks and corncobs. The results indicated that the raw material had a considerable influence on the density of the product. Binder and moisture were necessary for good briquette strength since both lowered the relaxed density of the briquette considerably. Binders were used to promote structural particle bonding in biomass briquettes, which was essential for biomass with low lignin concentration (*Obi et al., 2022*). The amount of binder used influences briquette density as well as mechanical qualities including compressive strength and shatter resistance (*Obi et al., 2022; Narasry and Das, 2022*). Briquette density was influenced not only by binder and moisture but also by pressure, as also found in the studies of *Mitchual et al. (2013)*, *Wilaporn (2009)*, and *Granado et al. (2021)*. Moreover, binder and pressure were found to have a relationship in this study, which also agreed with the study of *Aranziola et al. (2019)*, who found that the increase in binder and pressure improved briquette density.

In short, the optimal effective value for each independent variable for briquette production to meet density criteria was 40.00 g of dried elephant dung, 13.87 g of cassava starch, 6.00 g of water, and 40.00 bar of pressure. This result is highly compatible with the full quadratic model calculation conducted with Design-Expert software.

3.2. Elephant dung green fuel briquette

After compressing the mixture of dried elephant dung, cassava starch, and water in the cylinder mold under 40.00 bar of pressure, the volume of briquettes changed by 78.12 %. The resulting briquette was strong, difficult to break, compact, and had a rough surface, as shown in Fig. 5. After drying, dimensional stability was 98.11 %, implying that the percentage of the briquette's volume rarely changed. The change in briquette volume in this investigation was less than the sawdust briquette investigated by *Ramírez-Ramírez et al. (2022)*. The low change in briquette volume was noticed due to the use of high pressure, which halted the expansion of the mixture (*Guo et al., 2020*).

3.3. Physical properties

3.3.1. Density

The density of fuel briquettes is an important physical property. Higher density implies a higher energy-to-volume ratio and thus has a significant influence on the characteristics of handling, transportation, energy content, ignition, and burning (*Onukah et al., 2017; Ramírez-Ramírez et al., 2022; Adeleke et al., 2022; Okot et al., 2019*). However, when density increases, porosity decreases, limiting air movement and lowering the combustion rate (*Okot et al., 2019*). Not only did *Aranziola et al. (2019)* show that binder and pressure had an influence on briquette density, but *Ramírez-Ramírez et al. (2022)* discovered that briquette volumetric expansion was also affected.

In this study, the relaxed density of the briquette under the optimal condition was 613 kg/m³, and this was within the generally accepted briquette density range of 600 kg/m³ to 1300 kg/m³ (*Ramírez-Ramírez et al., 2022*). Although this study found a lower change in briquette volume than *Ramírez-Ramírez et al. (2022)*, it found a lower briquette density owing to briquetting not being performed under high pressure combined with the use of temperature. Moreover, the briquettes produced in this study have a lower briquette density than sawdust briquettes and the cotton flock briquettes investigated by *Sathiyabarathi et al. (2022)* and *Ranaraja et al. (2022)*, respectively. Briquette density can therefore be increased by carefully managing the process and material conditions (*Ramírez-Ramírez et al., 2022*).

3.3.2. Durability

Briquette durability could be assessed by shatter resistance (*Adeleke*

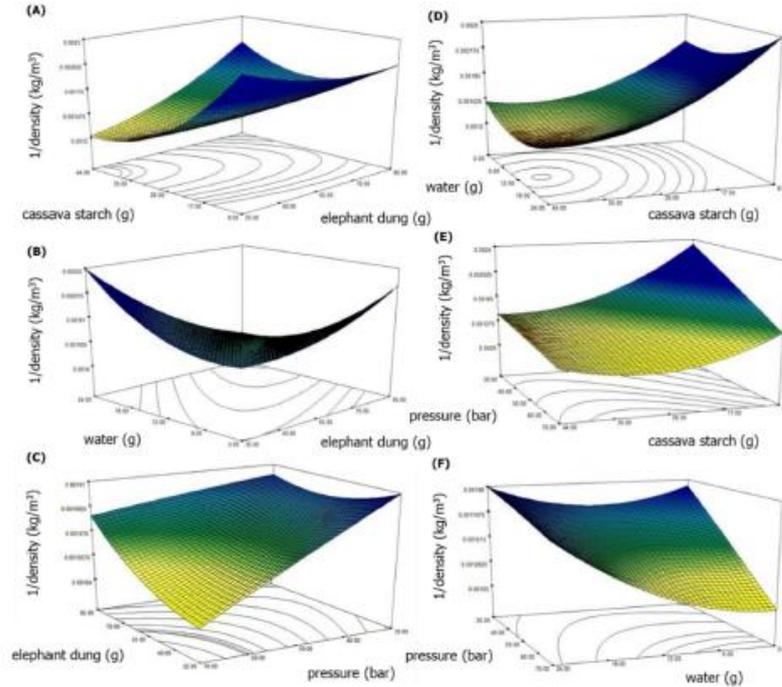


Fig. 4. 3D-surface plot of influencing factor on fuel briquette density.



Fig. 5. Elephant dung green fuel briquette. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

et al., 2022) and water resistance (Sabo et al., 2022). To handle the fuel briquettes without destroying them, it was necessary to have a greater density or add a large amount of binder since this improved shatter resistance (Ramírez-Ramírez et al., 2022). Although binder can improve shatter resistance, employing starch as a binder in briquetting induced the sample to become considerably more moist when directly exposed to water (Verhulst et al., 2022) and decreased energy content (Mohd-Faizal et al., 2022). The shatter resistance and water resistance of the elephant dung briquettes in this study were 78.66 % and 30.57 %, respectively.

According to ASABE Standard S269.4 (2005) (Mohd-Faizal et al., 2022), the briquette had good, medium, and poor durability when shatter resistance was >80 %, between 70 % and 80 %, and <70 %, respectively. The briquette shatter resistance found here was acceptable at a medium level. Due to the lower briquette density than the studies by

Sathiyabarathi et al. (2022) and Ajith Kumar and Ramesh (2022), the shatter resistance of the elephant dung briquette was much lower than that of the cow dung briquette and cashew nutshell briquette, respectively. Similarly, it was lower than the briquettes produced from corncob and coconut shell using starch as a binder in the Sabo et al. (2022) study. Moreover, they found that if the briquette production used a binder such as gum Arabic, the shatter resistance of the briquettes of each material was lower than in this study.

The water resistance of the briquettes produced in this study was comparable to that of the Abura sawdust briquette produced by Orinleye et al. (2022), who used a heating band hydraulic press machine to produce the briquette, with a water resistance range of 23.81 % to 34.62 %. However, it was rather lower than the briquettes produced by Ajith Kumar and Ramesh (2022), and Sabo et al. (2022).

It is interesting to note that, despite using more starch and applying more pressure in this study, the briquettes exhibited poorer durability than reported by Sabo et al. (2022). Consideration of the briquetting process revealed that the binder preparation process was different. Furthermore, because the raw materials used to produce briquettes differ, the physical qualities of the briquettes will affect their durability.

Although the briquettes produced for this study just met the required level, they still provided quite a good feedstock since they are durable enough to be handled, transported, and stored without degrading. Nevertheless, due to their high absorption capacity, briquettes must be kept in a dry environment. Furthermore, briquette absorption capacity should be improved to increase energy content.

3.4. Chemical properties

The proximal, ultimate, and HV properties of the briquette are the main indicators used to assess its energy content and utility (Adeleke et al., 2022). The proximate properties of the elephant dung briquette, as shown in Table 4, had increased VM and FC and decreased MC and AC as compared to the raw material. The H, C, O, N, and S contents of the briquette are also presented in Table 4. The H and C contents of the briquette were higher than those of the raw material because cassava starch was used as a binder, while its O, N, and S contents were lower.

The H/C and O/C atomic ratios obtained for the briquette were 0.15 and 1.17, respectively. The briquette had the H/C ratio like the elephant dung, while its O/C ratio was lower. However, it had a higher atomic ratio than the longan branch. Since atomic ratio values determine the capacity of each fuel to produce heat (Bello et al., 2021), it was found that the briquette had a higher HHV than elephant dung but a lower HHV than the longan branch.

3.4.1. Moisture content

Briquettes with less moisture have a higher HV because less energy is required during combustion to remove any remaining moisture (Onukak et al., 2017; Ivaahchuk et al., 2022). Moreover, the MC is one of the most important parameters that defines the durability of the briquette during transportation, storage, and ignition (Ramírez-Ramírez et al., 2022; Variani, 2021). The MC of the briquette developed in this study was 4.03 %, which was slightly lower than the raw material and, according to Kebede et al. (2022), did not meet the MC acceptable range for biomass briquettes of 8–12 %. It did, however, meet the German standard DIN 51731 with MC < 12 % (Ivaahchuk et al., 2022) and the European standard EN ISO 17225–Solid Biofuels with MC < 15 % in wood briquettes type B (Kofman, 2016). The decreased MC of the biomass briquettes compared to the raw material appears to be compatible with prior studies by Ramírez-Ramírez et al. (2022) who produced briquettes from sawdust, and Ranaraja et al. (2022) who produced briquettes from cotton flock. This might be because compression causes both an increase in material density and a significant decrease in the amount of moisture present (Ivaahchuk et al., 2022). This study revealed that the product had a lower MC than the corncob briquette and coconut shell briquette of Sabo et al. (2022), as well as the palm fruit shell briquette of Inegbedion and Eramah (2023). Besides the influence of the densification technique on the MC, the briquette with the lowest amount of MC could be produced by adjusting the amount of water in its production as well as replacing it with volatile solvents (Mohd-Faisal et al., 2022).

Table 4
Proximate and ultimate properties of material and elephant dung fuel briquette with a dry basis.

Properties	Unit	Elephant dung	Elephant dung fuel briquette	Longan branch
Proximate analysis				
MC	%	5.56	4.03	7.00
VM	%	61.70	73.30	75.50
FC	%	11.60	17.80	21.90
AC	%	26.70	8.90	2.60
HHV	MJ/kg	14.05	17.00	18.89
LHV	MJ/kg	12.61	15.55	17.37
Ultimate analysis				
H	%	5.60	6.30	6.60
C	%	37.90	42.70	47.90
O	%	54.90	50.10	44.70
N	%	1.30	0.70	0.60
S	%	0.30	0.20	0.20

3.4.2. Fixed carbon

Not only a reduction in MC but also a rise in FC was mostly indicated by an increase in HV. Moreover, the rise in FC in the briquette was influenced by the binder concentration in the briquette and moisture loss throughout the production process (Onukak et al., 2017; Mohd-Faisal et al., 2022). This was consistent for the briquette, with HHV increasing from 14.05 MJ/kg to 17.00 MJ/kg throughout the formation of the briquette from elephant dung. According to Adeleke et al. (2022), to be acceptable, the FC of coal and biomass briquettes produced using an organic binder can vary from 65.13 % to 65.25 %. The FC content of the briquettes produced in this study was 17.80 %, which was significantly lower than the required level. Moreover, the FC of the briquette was found to be higher than the sawdust briquette reported by Ramírez-Ramírez et al. (2022), but somewhat lower than the briquette produced by Sathiyabarathi et al. (2022) and Inegbedion and Eramah (2023).

3.4.3. Volatile matter

The briquette with the lowest VM should have the highest energy value (Onukak et al., 2017; Variani, 2021). In addition, the VM influences ignition and combustion rate (Variani, 2021; Kebede et al., 2022). The results indicated that elephant dung green fuel briquettes had the highest concentrations of VM (73.30 %), whereas raw material had the lowest concentrations (61.70 %). The VM value found in this investigation was lower than the finding of Ramírez-Ramírez et al. (2022), which reported that the produced sawdust briquettes contained VM ranging from 79.6 % to 90.9 %. In contrast, its VM was greater than the corncob briquette and coconut shell briquette of Sabo et al. (2022), as well as the cow dung briquette of Sathiyabarathi et al. (2022) and the palm fruit shell briquette of Inegbedion and Eramah (2023).

The VM of briquettes in this study increased with the addition of binder, concurring with the study of Wahyuni et al. (2022), which found that as the proportion of binder increased, so did the VM. In practical application, when ignited, the briquettes induced the generation of a large amount of smoke caused by the high VM in the briquette (Wahyuni et al., 2022). Although Ramírez-Ramírez et al. (2022) suggested that the produced briquette should have a high VM to encourage rapid burning with a minimal environmental effect, the combustion needed a large amount of briquette. Certainly, the briquettes were used to make elephant dung more attractive as an alternative fuel by lowering its environmental impact and consumption. Therefore, further study should aim to improve the quality of briquette production, for example, by including components that reduce VM while increasing FC. Another option is to promote the use of briquettes in conjunction with household updraft biomass gas stoves in order to reduce VM emissions during cooking. In the second stage of the stove, the VM released during primary combustion will be combined with secondary air and burned to provide heat (Hailu, 2022).

3.4.4. Ash content

Ash content is the concentration of inorganic elements in the biomass. It is a key factor in determining the amount of waste that can be formed during the burning of solid biofuels (Ramírez-Ramírez et al., 2022). Briquettes are produced from ash-rich materials, which reduces the burning rate and results in large dust emissions (Inegbedion and Eramah, 2023; Nikiema et al., 2022). The AC value obtained in this study was 8.90 % for the briquettes, which was much lower than the raw material value. However, it cannot meet the recommended AC for high-quality briquettes, which is between 3 % and 4 % (Kebede et al., 2022). Similarly, it cannot reach the standards of the German standard DIN 51731 (Ivaahchuk et al., 2022) and the European standard EN ISO 17225 (Kofman, 2016) with an AC < 1.5 % and 3 %, respectively. The result of AC in this study was higher than the finding of Inegbedion and Eramah (2023), which produced a briquette from palm fruit shell to include AC of 6.68 %. In contrast, AC was lower than the briquettes produced by Sathiyabarathi et al. (2022), Ranaraja et al. (2022), and Sabo et al.

(2022).

3.4.5. Heating value

The quality of the raw material and the conditions of the briquetting process have an impact on energy density (Ramírez-Ramírez et al., 2022). The energy density of the fuel briquettes formed in this study was 9.09 GJ/m³. It was lower than the studies of Ajith Kumar and Ramesh (2022), Ramírez-Ramírez et al. (2022), and Sellin et al. (2022). According to Ramírez-Ramírez et al. (2022) and Sellin et al. (2022), pressure has a positive effect on energy density. As a result, in future studies, the production process should be improved to increase the energy density of the elephant dung briquettes.

The briquette had an HHV of 17.00 MJ/kg, which was higher than the raw material but lower than the longan branch. However, it was quite close to the elephant dung fuel briquettes of the Mathew and Thadathil (2011) study, which used shorter fiber from washed elephant dung and had a reported HHV of 17.45 MJ/kg. In comparison to fuel briquettes produced from other materials, the HHV value from this study was lower than the findings of Ranaraja et al. (2022), Ramírez-Ramírez et al. (2022), and Inegbedion and Eramseh (2023). However, it was within the range of Ajith Kumar and Ramesh (2022) study (16.32–19.44 MJ/kg). Moreover, it was higher than in the study of Sathiyabarathi et al. (2022), which included HHV ranging from 14.61 MJ/kg to 16.45 MJ/kg with exception of the sawdust briquettes employing cow dung as a binder (17.17 MJ/kg). Mohd-Faisal et al. (2022) suggested that the material had been pretreated to increase the carbon content of the briquettes and reduce the use of binder to improve the heating value of the briquettes. This study revealed that the use of binder for producing fuel briquettes was carried out under optimal conditions; hence, the heating value of elephant dung should be improved in the future.

In comparison to firewood and other commercial fuels, 1 kg of these briquettes could replace 0.90 kg of longan branch, 0.66 kg of charcoal (25.70 MJ/kg of HHV) (Otieno et al., 2022), and 0.34 kg of LPO (50.15 MJ/kg of HHV) (Esom Co., LTD., 2014). Although briquettes had a higher consumption rate than other fuels, they could be used as a fuel substitute in household cooking with the fabricated household updraft biomass gas stove. Moreover, their utilization can reduce the environmental impact of inappropriate elephant dung disposal.

3.5. Combustion properties

3.5.1. Ignition time

The igniting time is influenced by functions of the VM, porosity, bonding strength, and particle size of the briquettes (Omukak et al., 2017; Kebede et al., 2022). Moreover, the excess starch employed as a binder, the AC, and the VM all have an impact on the ignition time (Orinaley et al., 2022). The briquettes in this study had an ignition time of 2 min. The ignition time of the briquettes was shorter than in the studies of Omukak et al. (2017) and Kizito et al. (2022), which comprised ignition times ranging from 9.23 min to 17.00 min and 3.6 min to 11 min, respectively, because smaller particle sizes of the raw material and a lower amount of binder were used in this study. Similarly, the briquette igniting time was greater than in the Chukwunneke et al. (2020) research due to the use of larger-particle size raw material and a higher amount of binder.

3.5.2. Burning rate

The density, VM, and AC of the briquettes have an impact on the rate of burning. Longer burning periods result in higher densities and ash contents (Nurhayati et al., 2022). The combustion rate of the briquettes in this study was 0.63 g/min, which was higher than the 0.12 g/min to 0.18 g/min burning rate reported by Omukak et al. (2017) study. Moreover, the burning rate was lower than in the study by Kizito et al. (2022), which reported a burning rate of 3.3 g/min to 8 g/min because of the briquette's low density, low AC, and greater VM.

3.6. Briquette performance in stove

3.6.1. Time to boil

WBT is a function of the VM, HV, and thermal fuel efficiency (Omukak et al., 2017). WBT of elephant dung fuel briquettes was compared with that of longan branches, as shown in Table 5. Using 866 g of the produced briquette, 500 mL of water took 25 min to boil. The study found that, although spending the same amount of time boiling water as using longan branches, utilizing briquettes to boil water with the designed household updraft biomass gas stoves consumed less fuel. The reason for this was because longan branches had a higher VM than briquettes (Table 4). The water boiling time of this study was slower than in the studies of Omukak et al. (2017) (0.14–0.16 min), Sathiyabarathi et al. (2022) (6.52–12.40 min), and Kizito et al. (2022) (3.63–10.74 min). This was due to the fact that this study consumed more briquettes than those three studies, which used weights of 25 g, 84–124 g, and 750 g, respectively.

3.6.2. Stove thermal efficiency

The thermal efficiency reflected the amount of energy in the fuel that was converted to heat energy (Omukak et al., 2017). The results, as shown in Table 5, indicated that the briquettes could enhance the household updraft biomass gas stove with an overall thermal efficiency of 21.79 %, which was higher than using longan branches. When compared to previous studies, the thermal efficiency of the briquette was found to be lower than the studies of Omukak et al. (2017), Chukwunneke et al. (2020), and Kizito et al. (2022), which indicated that the thermal efficiency of briquettes was higher than 20 %, 46 %, and 28 %, respectively.

3.6.3. Fuel consumption rate

The fuel consumption rate depends on the amount of binder in the briquette (Bello, 2021). The PCR of the briquette was 0.015 kg/min, as shown in Table 5, which was lower than the longan branch. The use of binder (29 %) in this study was greater than the study of Chukwunneke et al. (2020) (15 %), resulting in a higher PCR in this study.

3.6.4. Specific fuel consumption

Specific fuel consumption was defined as the amount and density of briquettes required to get a specific amount of water to boiling point (Oluwara et al., 2022). Elephant dung fuel briquettes had a SFC of 0.75 kg/kg water, as shown in Table 5, which was lower than that of longan branch. In the future, the production process should be enhanced to reduce SFC by increasing briquette density.

Table 5
Thermal properties and emissions of elephant dung fuel briquette and longan branch.

Properties	Unit	elephant dung fuel briquette	longan branch
Thermal properties			
Overall thermal efficiency	%	21.79	17.06
PCR	kg/min	0.015	0.017
SPC	kg/kg	0.75	0.86
FC	kW	3.91	4.99
Emissions			
O ₂	ppm	1.64 × 10 ⁵	1.68 × 10 ⁵
CO ₂	ppm	5.49 × 10 ⁴	5.20 × 10 ⁴
CO	ppm	2.07 × 10 ³	4.87 × 10 ²
H ₂	ppm	1.91 × 10 ²	1.25 × 10 ²
NO ₂	ppm	1.05 × 10 ²	94.2
NO _x	ppm	1.10 × 10 ²	98.9
SO ₂	ppm	0.00	0.00

3.6.5. Power consumption

The number of feedstocks employed had no effect on power consumption, whereas the type of biomass and production process did (Olkwara et al., 2022). In this study, the PC of elephant dung fuel briquettes was 3.91 kW, as shown in Table 5, which was lower than the PC of longan branch. Although briquettes and longan branches burned for the same period on the stove, briquettes consumed less energy to boil water.

3.7. Emissions

The average emission concentration, as shown in Table 5, revealed that the combustion of the briquette produced a large amount of CO₂ while emitting a small concentration of CO, but its CO was at least fourfold that of the longan branches. The comparison revealed that CO emissions were higher than the general ambient air quality standard defined by Thailand's National Environment Board Notification (1995, 2001) and polluted air from industrial factory standard defined by Thailand's Ministry of Natural Resources and Environment (2006). The formation of CO₂ is largely influenced by the carbon content of the elephant dung fuel briquettes, as well as the temperature generated by the stove and the amount of oxidation agent employed (Verhinina et al., 2022). CO₂ concentrations exceeded CO concentrations by >26.52 times; hence, fuel briquette combustion is even more appropriate for well-ventilated indoor applications.

The emission of NO₂ and NO_x depended not only on the amount of nitrogen in the biomass but also on the type of fuel, the state of occurrence of nitrogen, the combustion state of fuel, the density of fuel, and the composition of fuel. The NO₂ and NO_x concentrations recorded from briquette combustion were 1.05×10^2 ppm and 1.10×10^2 ppm, respectively. This investigation resulted in lower NO₂ and NO_x emissions because the briquettes have a low concentration of nitrogen compounds (Table 4). Despite the Thai polluted air from industrial factory standard (Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment, 2006), NO₂ and NO_x concentrations were significantly higher in longan branches and the general ambient air quality standard in Thailand (Announcement of the National Environment Board, 1995, 2001).

Moreover, SO₂ emissions are directly related to not only the amount of sulfur content in biomass, but also the amount of alkali and alkaline earth metals in the biomass, the combustion properties, and the condition of sulfur's occurrence (Guo et al., 2020). Briquettes with a low sulfur content may generate a small number of harmful oxides, which are also environmental problems resulting in, for example, air pollution and acid rain formation (Kebede et al., 2022). 0.20 % sulfur content was observed in the briquettes (Table 4), which might produce less than the 1 % acceptable sulfur emission limit during burning, as stated by Kebede et al. (2022). In contrast, the sulfur content value of briquettes observed in this study exceeds the requirement of the European standard EN ISO 17225 (Kofman, 2016). However, the concentration of SO₂ during briquette combustion was <0.00 ppm, meeting the requirements the Thai general ambient air quality standard (Announcement of the National Environment Board, 1995, 2001) and the Thai polluted air from industrial factory standard (Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment, 2006).

The cost analysis of elephant dung green fuel briquettes was calculated using both fixed and variable costs, which included material costs (elephant dung, cassava starch, and water) and production costs (machine cost, labor cost, and utility cost). When 200 kg of fuel briquettes will be produced within a year (260 working days), the production cost will be \$ 0.09 per kg.

4. Conclusion

Green fuel briquettes were produced from elephant dung using cassava starch as a binder and a low densification technique under different process conditions such as material and binder quantity and

pressure. The results showed that the briquette density and energy density reached 600 kg/m³ and 9 GJ/m³. The effect of parameters was statistically investigated via RSM in combination with CCD in four variables (dried elephant dung, cassava starch, water, and pressure) at three levels. The statistical tests indicated that R² provided predictive values of 0.767 for density. The p-value of 0.0003 and F-value of 6.90 indicated that the inverse full quadratic equation was significant at a 95 % confidence level. The amount of cassava starch and elephant dung were the most significant variables influencing briquette density in both linear and quadratic effects ($p < 0.05$). However, the quadratic effect of water was found to have a considerable influence on the output response values ($p < 0.05$), according to the significance level results. The optimal ratio of dried elephant dung to cassava starch and water for producing briquettes was 7:3:1 when compressed at 40 bars. The dimensional stability of dried briquettes (93 %) changed slightly. Briquette's shatter resistance was acceptable, while its water resistance was poor. Despite having a low moisture content, the briquette's high heating value of 17 MJ/kg was rather low due to its low level of fixed carbon and high level of volatile matter. The combustion properties of the briquette revealed an ignition time of 2 min and a combustion rate of 0.63 g/min because of its low density, high volatile matter, and low ash content. According to its ultimate properties, the briquette had a high concentration of C (42.7 %) and O (50.1 %) but a low concentration of H (6.3 %), N (0.7 %), and S (0.2 %). Briquettes could enhance the stove, which had an overall thermal efficiency of 22 %. The briquettes had a specific fuel consumption of 0.75 kg per kg of water and required 3.91 kW to boil water. The emissions showed that only a high amount of CO₂ (concentration of 5.49×10^4 ppm) was released, whereas CO, NO₂, NO_x, and SO₂ were released at lower concentrations of 2.07×10^3 , 1.05×10^2 , 1.10×10^2 , and 0 ppm, respectively. The briquettes could be utilized as an alternative solid fuel based on their attributes, because it will give better and more ecologically friendly heat and help with waste management concerns. However, they must be stored in a dry area for protection from biodegradable decomposition. For further development of the elephant dung briquettes, it is recommended that: (1) the quality of raw material and briquettes must be improved; (2) the production process of briquette to support a higher volume of production at a cost equivalent to or lower than firewood and charcoal must be investigated; (3) a specifically-designed gas stove for applying the briquettes suitable for the local fuel consumption behavior must be explored; and (4) the energy demand and fuel consumption behavior of the local community to achieve full replacement of fuel such as firewood and charcoal by the briquette must also be analyzed.

CRedit authorship contribution statement

Artidaya Mainkaew: Writing – original draft & review, Methodology
Adizak Pattiya: Conceptualization, Writing – editing, Research summaries and recommendation
Surachai Narat Janari: Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, review & editing, Research summaries and recommendation

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no know competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

We would like to express our deep appreciation and gratefully

acknowledge the Asian Development College for Community Economy and Technology (adiCET), Chiang Mai Rajabhat University, Thailand for supporting the research area, as well as the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand for supporting the emission test. The samples of biomass were provided by Pang Chang Mae Taeng Limited Partnership, Chiang Mai, Thailand for which the authors are grateful.

Funding

This work was supported by Office of Naval Research, United States [grant number N00014-19-1-2160]; and Plant Genetic Conservation Project Under The Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn - Chiang Mai Rajabhat University (RSPO-CMRU), Thailand [grant number 24/64].

References

- Abeyinghe, N., Jettiruparab, K., Karunaratna, K.H.T., Chandana, E.P.S., Surawone, S., Kasemiri, P., Chindaprasit, P., Rajjombung, J.T.N., 2022. Synthesis and phosphate adsorption performance of elephant dung biochar modified with magnesium and iron. *J. Mex. Mater. Mine.* 32 (1), 124–133. <https://doi.org/10.55713/jmmun.v32i1.1243>.
- Adeleke, A.A., Oduro, J.K., Ikubanni, P.P., Olabisi, A.S., Nzerem, P., 2022. Briquetting of subbituminous coal and torrefied biomass using bentonite as inorganic binder. *Sci. Rep.* 12 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12685-5>.
- Adu-Poku, K.A., Appiah, D., Asosega, K.A., Derkyi, N.S.A., Uba, F., Kumi, E.N., Akowah, E., Akolo, G.A., Gyantfi, D., 2022. Characterization of fuel and mechanical properties of charred agricultural wastes: experimental and statistical studies. *Energy Rep.* 8, 4319–4331. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.015>.
- Ahmad, K.K., Sazali, K., Kamaruzzaman, A.A., 2018. Characterization of fuel briquettes from banana tree waste. *Mater. Today: Proc.* 5 (10), 21744–21752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.027>.
- Ajith Kumar, T.T., Ramesh, S.T., 2022. Sustainable production of cashew nutshell briquettes: experimental assessment and optimization of factors affecting the physical and fuel characteristics. *Biomass Convers. Biorefinery* 1–22. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02234-x>.
- Anastasya, A., Usniati, N.A.K., Subagio, A., 2019. The effect of binding types on the biomass briquette calorific value from cow manure as a solid energy source. October. In: *E3S Web of Conferences*, Vol. 125. EDP Sciences, p. 13004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912513004>.
- Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment, 2006. Subject: Setting emission standard for polluted air from industrial factory (in Thai), 18 May. Gazette No. 123. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2549/00189175.PDF>.
- Announcement of the National Environment Board, 1995. No. 10 (B.E. 2538) issued under the Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act B. E. 2535. Subject: Determination of general atmospheric air quality standards (in Thai), May 25. Gazette No. 112. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2538/0/042/89.PDF>.
- Announcement of the National Environment Board, 2001. No. 21 (B.E. 2544) issued under the Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act B. E. 2535. Subject: Sulfur dioxide concentration standardization in the general atmosphere for 1 hour (in Thai), April 30. Gazette No. 118. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2544/E/039/38.PDF>.
- Aranisola, E.F., Oyewusi, T.F., Osunbitan, J.A., Ogunjimi, L.A.O., 2019. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corn cob briquette. *Energy Rep.* 5, 909–918. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.011>.
- Bello, R.S., Olorunsola, A.O., Omoniyi, T.E., Onilude, M.A., 2021. Effects of binder concentrations and soaking time on combustion characteristics of briquettes produced from fermented *Gmelina arborea* (Roxb) sawdust and used print paper. *Bioenergy Stud.* 2 (1), 31–34. <https://doi.org/10.51606/bes.2022.0>.
- Bharadwaj, A.V.S.L.S., Singh, M., Niju, S., Begum, K.M.S., Anantharaman, N., 2019. Biodiesel production from rubber seed oil using calcium oxide derived from eggshell as catalyst – optimization and modelling studies. *Green Process. Synth.* 8, 430–442. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0011>.
- Benicewicz, A., Roubil, H., Boubek, M.Yan, Dang, D., Phung, L.D., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Herik, D., 2020. Briquetting of sugarcane bagasse as a proper waste management technology in Vietnam. *Waste Manag. Res.* 38 (11), 1299–1250. <https://doi.org/10.1177/0734242200938438>.
- Chokcharoen, R., Sukmanan, R., 2012. Ecology of Asian elephant (*Elephas maximus*) in Phu Wua wildlife sanctuary, Bueng Kan province (in Thai). *J. Wildl. Thailand* 19 (1), 13–22. In: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes.15.3.6811_jiao. Optimization, Process, Variables Briquetting.
- Chukwuonke, J.I., Umeji, A.C., Sinebe, J.E., Fakiyesi, O.B., 2020. Optimization of composition of selected biomass for briquette production. *Univ. J. Mech. Eng.* 8 (4), 227–236. <https://doi.org/10.13189/ujme.2020.080408>.
- Esom Co., LTD., 2014. Heating value of hydrogen and fuels. https://chemeng.queensu.ca/courses/CHRE332/files/ethanol_heating_values.pdf. (Accessed 17 November 2022).
- El-Gendy, N.S., Derise, S.F., Hamdy, A., Abdallah, R.I., 2015. Statistical optimization of biodiesel production from sunflower waste cooking oil using basic heterogeneous biocatalyst prepared from eggshells. *Egypt. J. Pet.* 24 (1), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.004>.
- Granado, M.P.P., Subogsoff, Y.V.M., Santos, L.R.O., Yamaji, F.M.De, Conti, A.C., 2021. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. *Renew. Energy* 167, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.087>.
- Guo, Z., Wu, J., Zhang, Y., Wang, F., Guo, Y., Chen, K., Liu, H., 2020. Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel* 272, 117632. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>.
- Hailu, A., 2022. Development and performance analysis of top fit updraft: natural draft gasifier stoves with various feed stocks. *Heliyon* 8 (8), e10163. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10163>.
- Hartono, R., Dalimurtha, A.M., Iwanto, A.H., Herawati, E., de Surtiawan, J., Azevedo, A. R., 2022. Mechanical and physical properties of particleboard made from the Sumatran elephant (*Elephas maximus sumatranus*) dung and wood shaving. *Polymers* 14 (11), 2237. <https://doi.org/10.3390/polym14112237>.
- Ingebodion, F., Eramah, A.A., 2023. Estimation of combustion properties of briquettes produced from palm fruit shell. *Int. J. Eng. Technol.* 8 (1), 8–12. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2270347>.
- Ivashchuk, O.S., Atamanjuk, V.M., Chyzovych, R.A., Kiliaeva, S.S., Duleba, V.P., Sobochko, I.B., 2022. Research of solid fuel briquettes obtained from brewer's spent grain. *J. Chem. Technol.* 30 (2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256746>.
- Jiao, W., Tabli, L.G., Xin, M., Song, Y., Chi, E., Wu, L., Chen, T., Meng, J., Bai, X., 2020. Optimization of process variables for briquetting of biochar from corn stover. *Bioresour.* 15 (3), 6811–6825. In: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes.15.3.6811_jiao. Optimization, Process Variables Briquetting.
- Kebede, T., Berhe, D.T., Zergaw, Y., 2022. Combustion characteristics of briquette fuel produced from biomass residues and binding materials. *J. Energy* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4222205>.
- Kerduswan, S., Meenarooh, F., Chalermcharoenrat, T., 2016. The novel design and manufacturing technology of densified RDF from reclaimed landfill without a mixing binding agent using a hydraulic hot pressing machine. August. In: *MATEC Web of Conferences*, Vol. 70. EDP Sciences, p. 11003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167011003>.
- Kizito, S., Jagwe, J., Ssewaya, B., Nekosa, L., Tumutegyeize, P., Ziziwa, A., Komakech, A.J., 2022. Biofuel characteristics of non-charred briquettes from dried fecal sludge blended with food market waste: suggesting a waste-to-biofuel enterprise as a win-win strategy to solve energy and sanitation problems in slums settlements. *Waste Manag.* 140, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.029>.
- Kofman, P.D., 2016. Review of worldwide standards for solid biofuels. In: *OOPORD: Processing/Products*, 39, pp. 1–12. <https://www.biomeg.org.nz/documents/4-source/Reports/CLWEnvironmentalPlannerEJ120114.pdf>.
- Kole, A.T., Zaru, B.A., Bekede, E.A., Ramayya, A.V., 2022. Design, development, and performance evaluation of husk biomass cook stove at high altitude condition. *IJTF*, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.ijtf.2022.100242>.
- Kpalo, S.Y., Zalmuddin, M.F., Manaf, L.A., Roslan, A.M., 2020. Production and characterization of hybrid briquettes from coconuts and oil palm trunk bark under a low pressure densification technique. *Sustainability* 12 (6), 2468–2483. <https://doi.org/10.3390/su12062468>.
- Li, Z., Zou, H., 2022. Optimization of biomass fuel cold briquetting parameters based on response surface analysis. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 103 (3), 459–472. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00782-0>.
- Malnakaew, A., Jansri, S.N., 2020. Suitable process for producing the elephant dung green fuel briquette (in Thai). *J-REC* 3 (3), 52–58. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes.15.3.6811_jiao.
- Mandal, S., Kumar, G.P., Bhattacharya, T.K., Tanna, H.R., Jena, P.C., 2019. Briquetting of pine needles (*Pinus roxburghii*) and their physical, handling and combustion properties. *Waste Biomass Valorization* 10 (8), 2415–2424. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0239-4>.
- Mathew, A.E., Thadathil, S.V., 2011. Material and energy recovery from elephant dung. August. In: *Kerala Environment Congress 2011*, p. 244. <http://codindia.org/wp-content/uploads/2013/08/KEC-2011-Proceedings.pdf#page=254>.
- Mitchell, S.J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N.A., 2013. Effect of species, particle size and compacting pressure on related density and compressive strength of fuel briquettes. *LJEE* 4 (1), 1–6. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/2251-6832-430.pdf>.
- Mohd-Faizal, A.N., Mohd-Shaid, M.S.H., Ahmad-Zaini, M.A., 2022. Solid fuel briquette from biomass: recent trends. *O.U.A.C.* 33 (2), 150–155. <https://doi.org/10.2478/auoc-2022-0022>.
- Muazu, R.I., Stegemann, J.A., 2015. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and coconuts. *Fuel Process. Technol.* 133, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.022>.
- Narzary, A., Das, A.K., 2022. Study of effects of addition of charcoal and binder derived from taro on physicochemical properties of briquettes made from tree leaves. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 52, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.ata.2022.102119>.
- Nasira, A.B., Ma, A.N., Choo, Y.M., Mohamad, S., Rohaya, M.H., Azali, A., Zainal, Z., 2008. Oil palm biomass as potential substitution raw materials for commercial biomass briquettes production. *Am. J. Appl. Sci.* 5 (3), 179–183. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20090011825>.
- Nfidieng, S.A., Mbeidi, J., Mbacham, W.F., Manful, J.T., Graham-Acuquah, S., Moreira, J., Dosou, J., Futakuchi, K., 2015. Quality optimization in briquettes made

- from rice milling by-products. *EnergySustain. Dev.* 29, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.003>.
- Nikiema, J., Asamoah, B., Eglewogbe, M.N., Akomea-Agyin, J., Coffe, O.O., Hughes, A. F., Geberyes, G., Asiedu, K.Z., Njenga, M., 2022. Impact of material composition and food waste decomposition on characteristics of fuel briquettes. *RCR Adv.* 15, 200095 <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200095>.
- Nurhayati, A.Y., Nasufi, A.Z.N., Harjadi, Y.C., 2022. Energy yield of the carbonized plant leaf, petiole and branch biomass briquettes for sustainable production of future fuels. *CERIMRE 5* (1). <https://doi.org/10.19184/cerimre.v5i1.31509>.
- Obi, O.F., Pecenka, R., Clifford, M.J., 2022. A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Emerging 15* (7), 2426. <https://doi.org/10.3390/em15072426>.
- Okot, D.K., Bilborrow, P.E., Phan, A.N., 2019. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. *Biomass Bioenergy* 126, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.009>.
- Olowara, W., Nyanga, D., Kabok, P., Nyanga, J., 2022. Effect of process techniques on three feedstocks mix on briquette performance properties. *J. Energy Environ. Chem. Eng.* 7 (1), 1–8. <https://doi.org/10.11648/j.jeece.20220701.11>.
- Onukak, I.E., Mohammed-Dabo, L.A., Ameh, A.O., Okoduwa, S.I., Fasanya, O.O., 2017. Production and characterization of biomass briquettes from tannery solid waste. *Recycling 2* (4), 17–33. <https://doi.org/10.3390/recycling2040017>.
- Orisaleye, J.I., Jekayinfa, S.O., Braimah, O.M., Edhere, V.O., 2022. Empirical models for physical properties of abura (*Mitragyna ciliata*) sawdust briquettes using response surface methodology. *Clean. Eng. Technol.* 7, 100447 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100447>.
- Oseno, A.O., Hones, F.G., Raude, J.M., Marunga, S.I., Gachanja, A., 2022. Heating and emission characteristics from combustion of charcoal and co-combustion of charcoal with faecal char-sawdust char briquettes in a ceramic cook stove. *Heliyon* 8 (8), e10272. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10272>.
- Patil, R.A., Deshanavar, U.B., Ramasamy, M., Emani, S., Isakhov, A., Khalilpoor, N., 2021. Briquetting of dry sugarcane leaves by using press mud, cow dung, and buffalo dung as binders. *Int. J. Chem. Eng.* 2021 <https://doi.org/10.1155/2021/8608215>.
- Punin, W., Maneewan, S., Punlek, C., 2014. The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5 via mechanical biological treatment process. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 16 (4), 753–762. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0215-9>.
- Ramirez-Ramirez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruiz-Aquino, F., Hernandez-Solis, J.J., Plator-Barra, L.F., Gonzalez-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Avila, N., Rutilaga-Quiliones, J.G., 2022. Evaluation of selected physical and chemical properties of briquette hardwood biomass biofuel. *Bioenergy Res.* 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>.
- Ranajata, D.M.G.O., Mbyuranga, K.A.V., Weerasakara, N.A., Arachige, U.S.P.R., 2022. Palm oil sludge as a binding agent for briquette production. *Int. J. Eng. Sci.* 6 (9), 39–42. <http://ijes.com/>.
- Rattanaburi, N., Cheenaphet, S., Sinpho, S., 2022. Value added for elephant dung to create new environmentally friendly products in Ayothaya community, Phra Nakhon Si Ayutthaya province. *JPSF 6* (3), 9651–9657. <https://www.journalppw.com/index.php/jpp/article/view/5389/3559>.
- Roy, M.M., Corcadden, K.W., 2012. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove. *Appl. Energy* 99, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.003>.
- Sabo, M.N., Aji, M.M., Yaumi, A.I., Mustafa, R.G., 2022. Preparation and characterization of biomass briquettes produced from coconut shell and corncobs. *AJBAR 1* (1), 47–54. <https://ajournalbar.com/wp-content/uploads/2022/02/47-54-Preparation-and-Characterization-of-Biomass-Briquettes-Produced-from-Coconut-Shell-and-Corncobs.pdf>.
- Samonosa, I., Nono, Y.J., Clarke, G., Guriku, G., Dinić, M.R., Kangra, R., 2021. Optimization of fuel briquette production from cassava peels, plantain peels and corncobs. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01260-1>.
- Saripan, A.F., Reungsang, A., 2014. Simultaneous saccharification and fermentation of cellulose for bio-hydrogen production by anaerobic mixed cultures in elephant dung. *Int. J. Hydrog. Energy* 39 (17), 9028–9035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.066>.
- Sathiyabarathi, M., Kumar, S.V., Thirumeganam, D., 2022. Efficiency of cow dung briquettes as a source of fuel for rural kitchen. *J. Pharm. Innov.* 11 (3), 1453–1456. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue35/Part7/S-11-3-201331.pdf>.
- Sawadeenarunat, C., Saipa, S., Suaisom, P., 2021. Anaerobic digestion of elephant camp-derived wastes methane potential, kinetic study, and biorefinery platform. *Biomass Convers. Biorefinery* 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01576-w>.
- Sellia, N., Tri, F.D.R., Sapellini, C., Alves, J.L.F., Souza, O., Marangoni, C., 2022. Effect of compacting conditions on the viscoelastic properties of banana leaf waste and briquette quality. *ESPR 29* (17), 25970–25979. <https://doi.org/10.1007/s1356-022-19266-z>.
- Sharma, M.K., Priyank, G., Sharma, N., 2015. Biomass briquette production: a propagation of non-convention technology and future of pollution free thermal energy sources. *Am. J. Eng. Res.* 4 (02), 44–50. https://www.academia.edu/27361209/Biomass_Briquette_Production_A_Propagation_of_Non_Convention_Technology_and_Future_of_Pollution_Free_Thermal_Energy_Sources.
- Shelke, G.N., Mahanta, P., 2016. Feasibility study on utilization of biomass briquette in a conventional downdraft gasifier. *Int. Energy J.* 15 (4). <https://www.thaiscience.in.th/journals/Article/IDN3/10991353.pdf>.
- Stuama, R., Madyira, D.M., 2019. Emissions comparison of loose biomass briquettes with cow dung and cactus binders. *Procedia Manuf.* 35, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.015>.
- Song, A., Zha, F., Tang, X., Chang, Y., 2019. Effect of the additives on combustion characteristics and desulfurization performance of cow dung briquette. *Chem. Eng. Process.* 143, 107585 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.107585>.
- de Souza, E.C., Gomes, J.P.S., de Pimenta, A.S., Azevedo, T.K.B., Pereira, A.K.S., Gomes, R.M., Brito, J.O.Dias, Júnior, A.P., 2022. Briquette production as a sustainable alternative for waste management in the tannin extraction industry. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23490-y>.
- Stanbrook, R.A., 2018. Assessing the nutrient status of elephant dung in the Aberdare National Park, Kenya. *Pachyderm* 59, 86–90. <https://pachydermjournal.org/index.php/pachyderm/article/view/84/45>.
- Stepień, P., Świerchowski, K., Hnat, M., Kugler, S., Stegenta-Dąbrowska, S., Kotziel, J.A., Manczarski, P., Białowiec, A., 2019. Waste to carbon: biocoal from elephant dung as new cooking fuel. *Energies* 12 (22), 4344. <https://doi.org/10.3390/en12224344>.
- Sukasen, M., Prayogakham, S., 2017. Biomethane recovery from fresh and dry waste hyacinth anaerobic co-digestion with pig dung, elephant dung and bat dung with different alkali pretreatments. *Energy Procedia* 138, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.094>.
- Tamir, J.K., Kioni, P.N., Kariuki, P.N., Ngugi, J.M., 2018. Influence of processing conditions on the quality of briquettes produced by recycling charcoal dust. *UEEE 9*, 341–350. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0275-7>.
- Tesfaye, A., Workie, F., Kumar, V.S., 2022. Production and characterization of coffee husk fuel briquettes as an alternative energy source. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022 <https://doi.org/10.1155/2022/9139766>.
- Vauleesrwe, H., Probert, J., 2014. Decay rate of elephant dung in Conkouati-Douli national park, Republic of Congo. *Pachyderm* 55, 89–91. <https://pachydermjournal.org/index.php/pachyderm/article/download/357/343>.
- Varians, V.I., 2021. Calorific value predicting based on moisture and volatile matter contents using fuzzy inference system. February. *Int. Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1825. IOP Publishing, p. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012006>. No. 1.
- Velusamy, S., Subbaiyan, A., Kandasamy, S., Shanmugamoorthi, M., Thirumoorthy, P., 2022. Combustion characteristics of biomass fuel briquettes from onion peels and tamarind shells. *Arch. Environ. Occup. Health* 77 (3), 251–262. <https://doi.org/10.1080/1938244.2021.1936437>.
- Vershinina, K., Dorokhov, V., Romanov, D., Strizhak, P., 2022. Ignition, combustion, and mechanical properties of briquettes from coal slime and oil waste, biomass, peat and starch. *Waste Biomass Valorization* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12640-022-01883-x>.
- Vitthumakhan, N., Manatirong, S., Supachocksakul, W., Charoenphan, P., 2018. Genetic diversity of the domestic elephant populations in north and northeast of Thailand (in Thai). *VESTSU 5* (2), 32–45. <https://ph01.icthaijo.org/index.php/VESTSU/article/view/124827>.
- Wahyuni, H., Aladin, A., Kalla, R., Nourman, M., Ardiansa, A., Chowdhury, M.S., 2022. Utilization of industrial flour waste as briquette adhesive: application on pyrolysis bio-briquette sawdust red oak wood. *HES 1* (2), 54–69. <https://www.journalfoundae.com/index.php/ijhes>.
- Wang, Z., Lei, T., Chang, X., Shi, X., Xiao, J., Li, Z., He, X., Zhu, J., Yang, S., 2015. Optimization of a biomass briquette fuel system based on grey relational analysis and analytic hierarchy process: a study using cornstalks in China. *Appl. Energy* 157, 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.079>.
- Wang, T., Li, Y., Zhi, D., Lin, Y., He, K., Liu, B., Mao, H., 2019. Assessment of combustion and emission behavior of corn straw biochar briquette fuels under different temperatures. *J. Environ. Manag.* 250, 109399 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109399>.
- Wilaipon, P., 2009. The effects of briquetting pressure on banana-peel briquette and the banana waste in Northern Thailand. *Am. J. Appl. Sci.* 6 (1), 167. <https://core.ac.uk/download/pdf/25824108.pdf>.
- Zhang, B., Shen, Z., Sun, J., He, K., Zou, H., Zhang, Q., Li, J., Xu, H., Ho, K.F., Cao, J., 2022. County-level of particle and gases emission inventory for animal dung burning in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *J. Clean. Prod.* 367, 133051 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133051>.

7. งานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติชื่อ International Journal of Renewable Energy Development ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลสากล Scopus โดยใช้ชื่อเรื่อง Characteristics and Emissions of Low-Pressure Densified Torrefied Elephant Dung Fuel Briquette



The characteristics and emissions of low-pressure densified torrefied elephant dung fuel briquette

Artidaya Mainkaew¹, Sommas Kaewluan², Adisak Pattiya³, Surachai Narrat Jansri^{1*}

¹Asian Development College for Community Economy and Technology (adCET), Chiang Mai Rajabhat University, Khlok, Mae Rim, Chiang Mai 50180, Thailand

²Biofuel and Bioenergy Technology Research and Development Laboratory (BBT R&D) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 83 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Ongkharak, Nakhon-Nayok, 26120, Thailand

³Biomass Pyrolysis Frontier Research Group, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand

Abstract. Elephant dung is the camp's undigested fiber waste. For more effective waste management, the conversion of dung to torrefied solid and the formation of solid torrefied into fuel briquettes, as well as their properties, were investigated. The dung was improved through torrefaction at 280°C for 150 sec in a pilot-scale reactor with a feeding rate of 600 g/h. The torrefied elephant dung had 17 MJ/kg of HHV, a solid yield of 79%, and a fixed carbon content of 20%. A mixture of torrefied dung, binder, and water was compressed at 40 bars to a density of 860 kg/m³, or 12 GJ/m³. Their H/C and O/C atomic ratios were in the range of typical biomass. However, due to their moisture content of over 7%, the HHV of the fuel briquettes was below 17 MJ/kg. Moreover, their thermal efficiency was less than 7% due to durability issues, despite having a great fuel ratio and thermal stability. The combustion of these briquettes resulted in less than 850 ppm of CO. To improve the combustibility of this solid biofuel, it is recommended to develop a production process and a suitable stove specifically for these briquettes.

Keywords: Elephant dung; torrefaction; torrefied elephant dung; fuel briquette; undigested fiber waste, nature fiber



© The author(s). Published by CBIJORE. This is an open access article under the CC BY-SA license (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Received: 29th April 2023; Revised: 25th June 2023; Accepted: 18th July 2023; Available online: 21st July 2023

1. Introduction

In Thailand, 3,500 domestic elephants (*Elephas maximus*) reside in elephant camps (Vitthumalchun *et al.* 2018), excreting about 60% of their daily food intake (Stepień *et al.* 2019; Sandhage-Hofmann *et al.* 2021; Abeyasinghe *et al.* 2022) which amounts to 360 tons of wet dung each day. The issue of disposing of elephant dung has been addressed by proprietors through careless piling or burying near natural water sources (Mainkaew, Pattiya & Jansri 2023) posing a risk of water pollution and the release of unpleasant odors and hazardous gases (Abeyasinghe *et al.* 2022; Mathews & Thadathil 2011). Elephant dung (ED) contains a considerable number of undigested fibers, such as 35-47% cellulose, 28-30% hemicellulose, and 15-18% lignin (Abeyasinghe *et al.* 2022). As a result of this high fiber content, a significant portion of ED takes a long time to decompose naturally, with a rate of 6.4×10^{-2} kg/day (Vanleuwe & Probert 2014). Thus, it is routinely burned throughout the dry season, generating air pollution (Mathews & Thadathil 2011; Zhang *et al.* 2022). Ineffective waste management in elephant camps has led to growing concerns among people living nearby. To address this issue, ED has been suggested as a feedstock for energy production, including biochar (Stepień *et al.* 2019), biogas (Kumer *et al.* 2022), biohydrogen (Saripan *et al.* 2022), and fuel briquettes (Mainkaew, Pattiya & Jansri 2023). These approaches can

transform waste into a valuable resource, minimizing environmental impact.

A fascinating solution to the problem of managing the copious amounts of elephant dung generated in camps involves converting it into fuel briquettes, boosting their energy density (Hwangdee *et al.* 2022) and potentially increasing their value, thus replacing traditional fuels like wood and charcoal. In 2011, Mathews & Thadathil studied the use of elephant dung as solid fuel and produced fuel briquettes using shorter fibers obtained from washed elephant dung with a high heating value (HHV) of over 17 MJ/kg. Fuel briquettes had to be produced using this process over a long period of time, and much water was wasted in the process overall. However, the long production time and water wastage in this method led Mainkaew & Jansri (2020) to employ unwashed elephant dung as raw material, resulting in fuel briquettes with densities ranging from 496 kg/m³ to 798 kg/m³. Mainkaew, Pattiya & Jansri (2023) conducted additional optimization studies using a weight ratio of 7:3:1 for elephant dung, binder, and water, and compressing the mixture at 40 bars. The resulting fuel briquettes had a density and energy density surpassing 800 kg/m³ and 9 GJ/m³, respectively. However, the heating value of the briquettes was marginally lower than the results obtained by Mathews and Thadathil (2011). Therefore, improvements are still necessary to enhance the HHV of fuel briquettes produced from elephant dung.

* Corresponding author
Email: surachai_nar@cg.cmu.ac.th (S.N. Jansri)

Thermally treating the biomass prior to briquetting is a technique that can improve the heating value of biomass fuel briquettes. It was discovered that transforming the raw material biochar was discovered to produce fuel briquettes with a higher heating value (Deshannavar *et al.* 2018). Most of the time, carbonization (Ibitoye *et al.* 2022) and torrefaction (Fuad *et al.* 2020) are used to turn biomass into biochar. Carbonization produced more HHV-containing biochar than torrefaction, which converted biomass to biochar at 300-500°C in an inert atmosphere (Ibitoye *et al.* 2022). Torrefaction, on the other hand, provided higher energy yields and increased process energy efficiency (Nobre *et al.* 2019). Torrefaction was intended to enhance the heating value of biomass, possibly to an even greater extent than coal (Fuad *et al.* 2020). Stepień *et al.* (2019) improved the properties of ED through torrefaction in a mild reaction. Torrefied elephant dung (TED) was produced from a small amount of ED in a muffle furnace at temperatures of 200°C to 300°C for 20 to 60 min. The process yielded 6 to 9 g of TED, which increased the HHV from raw material to TED by 13

MJ/kg. However, the batch process took more than 20 min due to the equipment's limited size, leading to a low mass yield that was inadequate for efficient implementation. Moreover, due to limited research on fuel briquette production and emissions caused by TED, this study aims to bridge the gap by investigating them. The study utilized TED obtained from the continuous process (Sonsupap & Pattiya 2019), which could produce TED within 5 min, and a low-pressure densification technique to produce fuel briquettes. Additionally, the study evaluated the characteristics and emissions of both TED and the fuel briquettes produced.

2. Material and methods

The investigation of torrefied elephant dung fuel briquettes (TEDB) followed the process shown in Figure 1. The procedure commenced with the preparation of ED, which was then subjected to torrefaction for improvement. Subsequently, TED

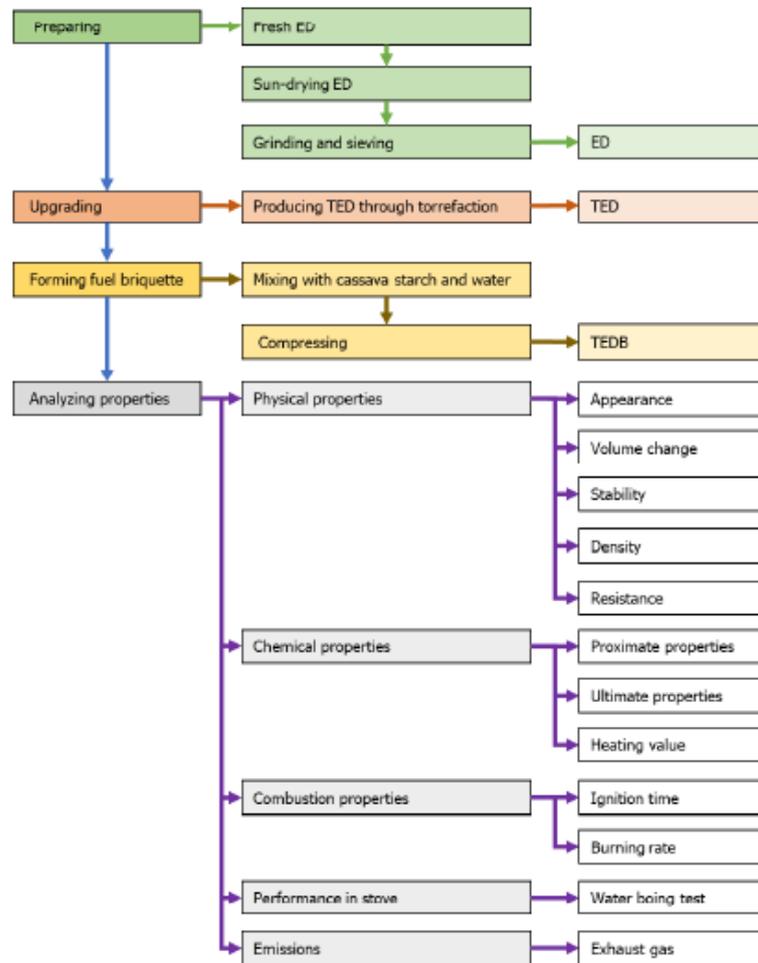


Fig 1. Schematic diagram of experiment

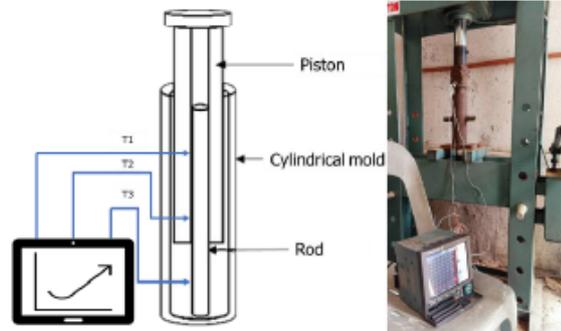


Fig 2. Temperature of fuel briquette formation monitoring

was transformed into fuel briquettes. Finally, their properties, including physical properties, chemical properties, combustion properties, performance in the stove, and emissions, were investigated.

2.1 Torrefied elephant dung

Fresh ED was sourced from an elephant camp in Kued Chang Subdistrict, Mae Tang District, Chiang Mai Province, Thailand. It was sorted manually for contaminants and sun-dried naturally for 3-5 days to reduce moisture content to below 15 ± 1.5 wt%. The dried material was then ground and sieved to 0.841 mm (Mainkaew, Pattiya & Janzri 2023; Mainkaew & Janzri 2020). Torrefaction was performed in a vibrating continuous flow reactor (Sonsupap & Pattiya 2019) at 280°C for 150 sec with a feeding rate of 600 g/h, and TED yield (solid phase) was evaluated using Eq. 1 (Egbochiuba 2022).

$$Y = (W_{ED}/W_{TED}) \times 100 \quad (1)$$

where Y is yield of TED (%), W_{ED} is weight of dried ED dung (g), and W_{TED} is weight of TED (g).

2.2 Torrefied elephant dung fuel briquette formation

To produce TEDB, 40 g of TED were mixed with 18.87 g of locally sourced cassava starch and 6 g of ambient temperature water. The mixture was then triple-sieved through a 0.841-mm net sieve for uniformity. The fuel briquettes were compressed to 40 bar pressure for 5 min using a cylindrical mold and a manual hydraulic press machine. During the formation of the briquette, its temperature was monitored, as shown in Figure 2. The resulting TEDBs were measured and air-dried for 5 days at room temperature in the shade (Mainkaew, Pattiya & Janzri 2023).

2.3 Characteristics and emissions of raw materials and fuel briquettes

2.3.1 Physical properties

Raw materials and fuel briquette were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM) for determining surface morphology using JBOLE model JSM-5410 LV SEM instrument. Once the briquette was extracted from the mold and allowed to settle for a duration of 10 min, the percentage of volume change of the briquette was calculated (Aransiola *et al.* 2019). During the drying process, the dimensional stability (Jiao *et al.* 2020) and the relaxed density (Mandal *et al.* 2019) of the briquettes were evaluated while maintaining their diameter and height

constant. The durability of the dried fuel briquettes was evaluated based on shatter (Adu-Poku *et al.* 2022; Ranaraja *et al.* 2022) and water resistance (Adu-Poku *et al.* 2022; Samomssa *et al.*, 2020). The physical properties were determined using Eqs. (2) – (6).

$$\eta_v = [(V_m - V_b)/V_m] \times 100 \quad (2)$$

where η_v is percentage of volume change (%), V_m is the volume of the cylindrical mold (cm^3) and V_b is the volume of briquette after compressing (cm^3)

$$DS = 100 - [(V_i - V_o)/V_o] \times 100 \quad (3)$$

where DS is dimensional stability (%), V_i is the volume of the briquette after release (cm^3) and V_o is the volume of the briquette after production (cm^3)

$$\rho = M/[\pi \times H \times (r_o^2 - r_i^2)] \quad (4)$$

where ρ is briquette density (kg/m^3), M is briquette mass (kg), π is mathematical constant, H is briquette height (m) and r_o and r_i are inner and outer radius of briquette (m)

$$SR = 100 - [(W_1 - W_2)/W_1] \times 100 \quad (5)$$

where SR is shatter resistance (%) and W_1 and W_2 are weight of briquette before and after shattering (cm), respectively.

$$WR = 100 - [(W_w - W_d)/W_d] \times 100 \quad (6)$$

where WR is water resistance (%), W_d is dry weight of briquette (g) and W_w is wet weight of briquette after being immersed in water (g)

2.3.2 Chemical properties

The Joint Graduate School of Energy and Environment - Central Analytical Laboratory (JGSEE - CAL), certified by the Thai Industrial Standard Institute (TISI) in accordance with TIS No.17025:2548: ISO17025:2017, analyzed the chemical properties of raw materials and fuel briquettes, including proximate and ultimate properties (Chukwunke *et al.*; 2020). Moreover, raw materials and fuel briquettes were subjected to thermogravimetric analysis (TGA, Perkin Elmer-pyris 1, Waltham, MA, USA) under a dry nitrogen atmosphere with a scan rate $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ in the temperature range $60-850^\circ\text{C}$ to determine their thermal properties and weight loss. Based on the studies of Stepien *et al.* (2019) and Egbochiuba (2022), the fuel ratio, thermal stability, energy densification ratio, and energy yield were determined using Eqs. (7) - (10). Energy density was then calculated using Eqs. (11) - (13) according to the research

of de Souza *et al.* (2022). Additionally, the H/C and O/C atomic ratios and heat capacities were evaluated (Bello *et al.*, 2021).

$$FR = FC/VM \quad (7)$$

Where FR is fuel ratio.

$$TS = FC/(FC + VM) \quad (8)$$

Where TS is thermal stability.

$$EDr = HHV_b/HHV_d \quad (9)$$

Where EDr is energy densification ratio, HHV_b is HHV of dried elephant dung (MJ/kg), and HHV_d is HHV of torrefied elephant dung (MJ/kg).

$$EY = MY \times EDr \quad (10)$$

where EY is energy yield (%) and MY is mass yield (%).

$$LHV = HHV - (0.23 \times H) \quad (11)$$

where LHV is low heating value (MJ/kg).

$$NHV = (((LHV \times 238.85) \times (1 - (0.01 \times MC))) - (6 \times MC))/238.85 \quad (12)$$

where NHV is net heating value (MJ/kg).

$$ED = NHV \times \rho \quad (13)$$

where ED is energy density (MJ/m³).

2.3.3 Combustion properties

The method proposed by Orukak *et al.* (2017) was employed to ascertain both the ignition time and burning rate of fuel briquettes. The procedure entailed placing the fuel briquette onto a wire mesh grid and then burning it using a liquefied petroleum gas (LPG) stove. After the ignition of the stove, the duration required for the briquettes to ignite was measured and evaluated using Eq. (14). The weight of the combusted fuel briquette was recorded repeatedly until its weight stabilized. The extent of weight reduction of the briquette during a specific period was assessed using Eq. (15).

$$IT = t_1 - t_0 \quad (14)$$

where IT is ignition time (min), t₁ is time the briquette ignited (min) and t₀ is time the LPG gas stove was lit (min).

$$B_b = (Q_1 - Q_2)/t \quad (15)$$

where B_b is burning rate (g/min), Q₁ is initial weight of briquette before burning (g), Q₂ is final weight of briquette after burning (g) and t is total burning time (min).

2.3.4 Fuel briquette performance in the stove

The fuel briquettes underwent the water boiling test (WBT) through the process of boiling 500 mL of tap water on a household updraft biomass gas stove (Mainkaew, Pattiya, & Janri 2023; Kole *et al.* 2022). Two piles of longan branches, each weighing 100 g, were used to ignite the stove, which was then left to burn for 2 min. Subsequently, 100 g of fuel briquettes were added to the stove every 5 min until the water evaporated entirely. The remaining briquettes and charcoal were then quantified, and the overall thermal efficiency and fuel consumption were computed using Eqs. (16) - (19).

$$\eta_p = \frac{((M_w C_w) \times (T_f - T_i) + M_v L_v)}{((M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 M_c)) \times LHV)} \times 100 \quad (16)$$

where C_w is specific heat capacity of water (kJ/kg-°C), L_v is latent heat of water vaporization (kJ/kg), LHV is low heating value (kJ/kg), M_c, M_f, M_v and M_w are the weights of remained charcoal, initial fuel, initial water, and water evaporated (kg), respectively; T_i and T_f are initial and final water temperatures (°C), respectively, and x is moisture content.

$$FCR = \frac{((M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c))}{t} \quad (17)$$

where FCR is fuel consumption rate (kg/min).

$$SFC = \frac{((M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c))}{M_w} \quad (18)$$

where SFC is specific fuel consumption (kg/kg water).

$$PC = \frac{((M_f \times (1 - (1.12 \times x)) - (1.5 \times M_c)) \times LHV)}{60t} \quad (19)$$

where PC is power consumption (kg/kg water).

2.3.5 Emission test

Like the WBT process, the exhaust gas released during the test was analyzed using a flue gas analyzer (Tecto 350 XL - fuel gas analyzer) with a pump flow rate of around 0.87 L/min. The exhaust gas was found to comprise carbon dioxide (CO₂),

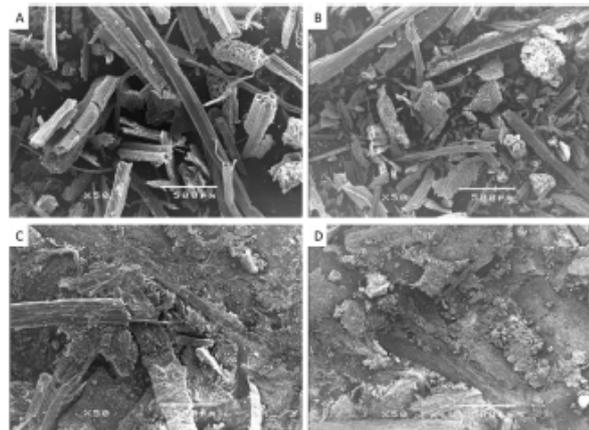


Fig 3. SEM images of ED (A), TED (B), EDB (C) and TEDB (D)

carbon monoxide (CO), nitrogen oxide (NO, and NO₂), and sulfur dioxide (SO₂).

3. Results and discussion

3.1 Torrefied elephant dung

The SEM images, shown in Figure 3, indicated that the sizes and shapes of the two dung samples differ, which could be attributed to sample preparation techniques such as grinding and sieving. ED (Figure 3A) was characterized by irregularly shaped particles with a relatively flat surface. However, the torrefaction-induced deformation of the structure led to the formation of fine particles and product porosity as shown in Figure 3B.

TED, as shown in Figure 4B, was produced with a 79% mass yield in the torrefaction process. The moisture content (MC), volatile matter (VM), and ash content (AC) of TED (Table 1) were 2.4%, 60.3%, and 19.5%, respectively, all of which were lower than the dried ED (Figure 4A). On the other hand, the fixed carbon (FC) of TED was higher than that of the raw material, at 20.2%.

The TGA results, as shown in Figure 5, revealed three distinct zones corresponding to the weight loss mechanisms of ED and TED. During the devolatilization process of the raw materials, the initial interval between 60 and 260°C at the appropriate heating rates facilitates the dehydration of moisture and the release of some volatile compounds. ED and TED weight losses were, respectively, 11 and 7 wt%. Subsequently, temperature ranges between 260 and 315°C denote zone 2. The

zone is a consequence of ED and TED's initial combustion. Raw materials contained highly reactive VM (Table 1) which rapidly degraded. The effects of the heating rate on raw material weight losses were limited, with weight losses of 32 wt% for ED and 27 wt% for TED. In the final zone (315-850°C), weight loss decreased slightly. The remaining charcoal from zone 2 was further oxidized. ED and TED lost 18 and 25 wt% of their weight, respectively. Although ED and TED exhibited the same pattern of weight loss, TED's decomposition was discovered to be less than that of ED. During the process of converting ED to solid-torrefied, some of the ED compound underwent thermal decomposition, resulting in an increase in the amount of FC in TED.

TED possessed a fuel ratio of 0.33, a thermal stability of 0.25, an energy densification ratio of 1.18, and an energy yield of 93.22%. These results indicated that TED had a superior fuel ratio and thermal stability compared to ED. Although TED was more challenging to ignite and burned more slowly than ED, it maintained higher combustion temperatures and contained more unburned carbon (Egbochuba, 2022).

TED exhibited lower levels of hydrogen (H), oxygen (O), and sulfur (S), but a higher amount of contained carbon (C) at 45.1% and nitrogen (N) at 1.4%, as shown in Table 1. TED had lower H/C and O/C atomic ratios than ED, which 1.41 and 0.80, respectively, converging more strongly towards the biomass zone, as shown in Figure 6. TED's HHV, which was 17.0 MJ/kg, exceeded that of ED. In comparison to the study by Stepien *et al.* (2019), it is evident that our study produced more TED with

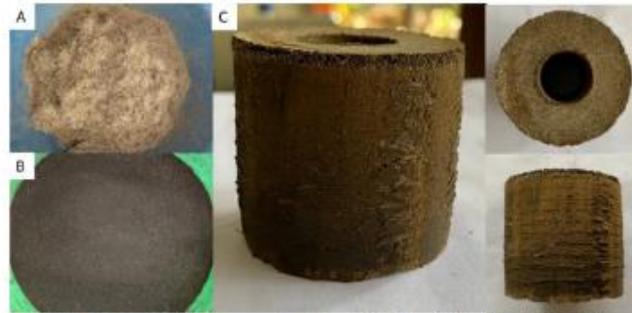


Fig 4. Raw materials [dried, ground, and sieved ED (A) and TED (B)] and TEDB (C)

Table 1

Proximate and ultimate properties of raw materials, fuel briquettes, and firewood

Properties	Unit	ED	TED	EDB	TEDB	Longan branch
Proximate properties						
MC	%	5.6	2.4	4.0	7.1	7.0
FC	%	11.6	20.2	17.8	19.2	21.9
VM	%	61.7	60.3	73.3	67.6	75.5
AC	%	26.7	19.5	8.9	13.2	2.6
HHV	MJ/kg	14.1	17.0	17.0	16.7	18.9
LHV	MJ/kg	12.6	15.7	15.6	15.1	17.4
Ultimate properties						
H	%	5.6	5.3	6.3	6.4	6.6
C	%	37.9	45.1	42.7	45.1	47.9
O	%	54.9	48	50.1	45.3	44.7
N	%	1.3	1.4	0.7	3.0	0.6
S	%	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Reference		(Mainkaew <i>et al.</i> 2023)	This study	(Mainkaew <i>et al.</i> 2023)	This study	(Mainkaew <i>et al.</i> 2023)

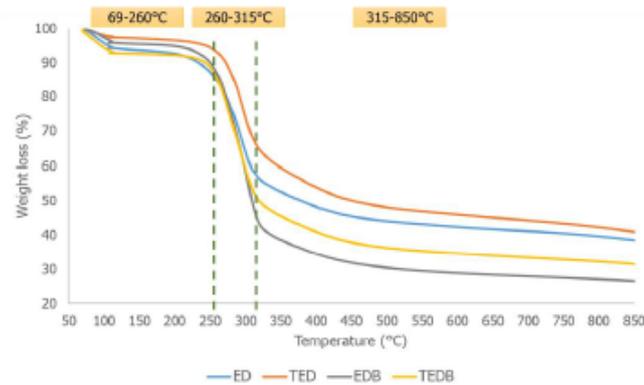


Fig 5. Thermogravimetric analysis curves of ED, TED, EDB, and TEDB

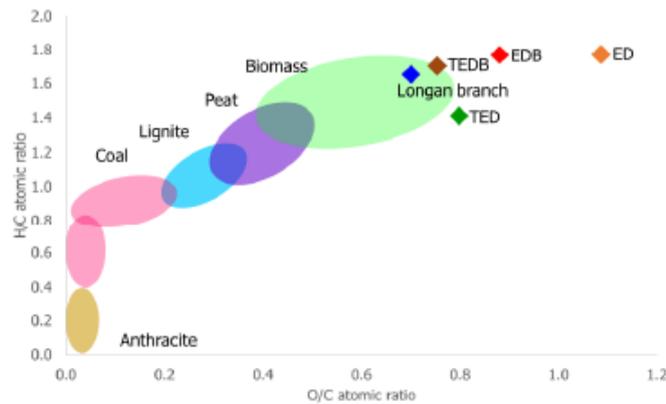


Fig 6. Van-Krevelen diagram for considered raw materials, fuel briquettes, and firewood

the lower AC but the larger MC at the same reaction temperature, albeit with a different reaction period. Although this study's processed ED had a higher MC than that reported by Stepień *et al.* (2019), its lower AC resulted in a better energy densification ratio and yield.

3.2 Torrefied elephant dung fuel briquette

The temperature variation during TEDB formation was observed to be within a limited range of 34.5-36.3°C, as shown in Figure 7. The temperature changes during the fuel briquette formation process were analyzed. In the initial period, it was noted that T1 had higher temperature than T2 and T3, primarily due to an exothermic reaction resulting from an increase in pressure. As the pressure continued to rise to meet the requirement, the temperature of T3 initially decreased and then returned to its original position. This behavior indicated that the formation of fuel briquette relied on external heat for an endothermic reaction.

After a certain period, the temperature trends of T1 and T2 became similar to that of T3, suggesting that the heat supply in T3 was insufficient for the formation process. Consequently, the formation of the fuel briquette required heat from both T1

and T2 sources. Once the required pressure was reached, the fuel briquette was compressed and held at that pressure. During this stage, it was observed that T3 exhibited heat accumulation without any significant thermal change.

Subsequently, the pressure was reduced by withdrawing the hydraulic punch. Initially, the heat in T3 remained constant, but over time, the heat transferred to T1 and T2. As a result, the temperature of T3 decreased, leading to shrinkage of the steel rod. Finally, the fuel briquette could be removed from the rod. Due to insufficiency heat applied to the fuel briquette formation, some properties were adversely affected. Therefore, the efficiency of fuel briquette formation could be improved by increasing the heat during the pressure increasing stage.

3.2.1 Physical properties

TEDB, as shown in Figure 4C, had a sturdy, durable, compact, and rough exterior composition. The SEM image of TEDB (Figure 3D) revealed that the cassava starch clumped and did not disperse on the surface of TED, in contrast to the unprocessed ED, as shown in Figure 3C. These factors resulted in TEDB having inferior physical properties compared to the elephant dung fuel briquettes (EDB), as shown in Table 2.

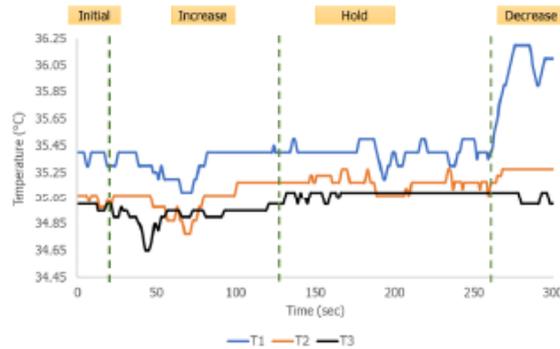


Fig 7. Temperature characteristic during fuel briquette formation

Table 2
Physical properties of fuel briquette

Physical properties	Unit	EDB	TEDB
Volume change	%	78	79
Dimensional stability	%	98	95
Relaxing density	kg/m ³	613	860
Energy density	GJ/m ³	9.1	11.9
Shatter resistance	%	79	53
Water resistance	%	39	31
Reference		(Mankaw <i>et al.</i> 2023)	This study

Therefore, the technique for transforming TED into fuel briquettes should be modified to enhance the properties of the fuel briquettes, such as increasing the temperature during the pressure increase stage.

The percentage of volume change of TEDB following compression, as shown in Table 2, was 79%, equivalent to that of EDB. However, the dried TEDB exhibited marginally lesser dimensional stability than EDB at 95%. A significant amount of pressure was required to attain the noteworthy percentage change in fuel briquette volume and uphold dimensional stability, which constrained the raw material's adaptability (Guo *et al.* 2020). Despite this constraint, the relaxed density of TEDB was 860 kg/m³, surpassing EDB's density of 613 kg/m³. This density fell within the acceptable range of 800 kg/m³ to 1,300 kg/m³ for fuel briquette (Ramirez-Ramirez *et al.* 2022).

The shatter resistance of TEDB was found to be 53%, lower than that of EDB, and within the range considered acceptable for poor durability (defined as shatter resistance < 70%) according to ASABE Standard S269.4 (2003) (Mohd-Faizal, Mohd-Shaid, & Ahmad-Zaini 2022). The inferior shatter resistance of TEDB may be attributed to the thermal elimination of specific elements in ED that improve the bond between the raw material and binder during torrefaction. Moreover, the high moisture content of TEDB compared to EDB (Ramirez-Ramirez *et al.* 2022) may have impacted the durability of the fuel briquettes. TEDB exhibited a water resistance of less than 30% in 9 sec, indicating slower water absorption compared to EDB due to the torrefaction process. However, TEDB's water resistance was still insufficient. Therefore, improvements in the production process may be necessary to enhance both shatter and water resistance in the future.

3.2.2 Chemical properties

3.2.2.1 The proximate properties

According to Table 1, TEDB had a higher MC than the raw materials, EDB, and longan branch, but it still remained within the acceptable range for fuel briquettes, which is between 8% and 12% (Kebede, Berhe & Zergaw 2022). This finding complied with the German standard DIN 51731 (Ivashchuk *et al.* 2022), the European standard EN ISO 17225 (Kofman 2016), and the Thai Community Product Standard (Thai Industrial Standards Institute 2004). The FC of TEDB was greater than that of EDB due to the torrefaction process prior to fuel briquette production. However, TEDB had a lower FC than TED because of its higher MC. TEDB also had a higher VM than the raw materials, but lower than that of EDB and longan branch. The use of cassava starch as a binder may have contributed to the higher VM of fuel briquettes. This could result in increased smoke emissions during combustion (Wahyuni *et al.* 2022). The AC of the TEDB was found to be greater than that of EDB and longan branch, but less than that of raw materials. However, its AC of 13.2% was significantly higher than the recommendation of Kebede, Berhe & Zergaw (2022). Moreover, it failed to meet the requirements of both the German standard DIN 51731 (Ivashchuk *et al.* 2022) and the European standard EN ISO 17225 (Kofman 2016), resulting in more inorganic waste during combustion (Ramirez-Ramirez *et al.* 2022).

The weight-to-temperature loss of EDB and TEDB, as shown in Figure 5, follows the same pattern as the weight loss of ED and TED. The TGA results indicated that the initial zone had a 10 wt% weight loss for both EDB and TEDB, which were comparable to that of the ED. In zone 2, EDB and TEDB lost 45 and 39 wt% of their weight, respectively, which was greater than the ED and TED. The reason for this difference was the use of

cassava starch as the binder. Not only did the reaction in zone 2 result in a rapid decrease in raw material weight, but the binder also had a significant effect on VM of the fuel briquettes (Table 1). In the final zone, EDB and TEDB lost 19 and 20 wt% of their weight, respectively. The combustion reaction in zone 2 was rapid and resulted in a greater weight loss, leaving a smaller quantity of charcoal available for the reaction in zone 3 compared to ED and TED. However, their decompositions were comparable to that of ED but inferior to that of TED.

TEDB exhibited a fuel ratio of 0.28 and a thermal stability of 0.22. Its fuel ratio and thermal stability were lower than those of TED, as cassava starch was used as a binder. However, its fuel ratio and thermal stability were better than EDB and comparable to longan branch. The combustion efficiency of TEDB might be superior to EDB and equivalent to that of the longan branch (Egbosotuba 2022).

3.2.2.2 Ultimate properties

The ultimate properties of TEDB, as shown in Table 1, revealed that it had a higher concentration of H than EDB and raw materials, with the exception of the longan branch. However, its O concentration was lower than the others. While TEDB's C concentration was similar to that of TED, it was greater than that of ED and EDB and lower than that of the longan branch. TEDB exhibited the highest N concentration, and its S concentration was 0.2%, the same as all others except for ED. However, TEDB failed to meet the European standard EN ISO 17225 (Kofman 2016) for N and S concentrations.

TEDB had H/C and O/C atomic ratios of 1.70 and 0.75, respectively. The fuel briquette had a higher H/C atomic ratio than TED and the longan branch but a lower ratio than ED and EDB. It also had a lower O/C ratio, except for the longan branch. Only TEDB reached the boundary of the biomass zone on the Van-Krevelen diagram (Jenkins, 1998), as shown in Figure 6, indicating that densification and ED processing had an impact on the relationship between H/C and O/C atomic ratios. TED and EDB split from ED and converged into the biomass zone. Despite TEDB's H/C and O/C atomic ratios being in the biomass zone, its HHV was lower than that of the longan branch. Additionally, while EDB's H/C and O/C atomic ratio relationships were outside of the biomass zone, TEDB's HHV was still lower despite being derived from TED and employing the cassava starch equivalent binder. Furthermore, the HHV of TEDB was lower than that of TED, possibly due to its higher MC and the use of cassava starch as a binder.

3.2.2.3 Heating value properties

Torrefaction enhanced the properties of the raw material used for fuel briquettes, resulting in a remarkable energy density of 11.9 GJ/m³ (Table 2), surpassing that of EDB. However, TEDB had a lower HHV of 16.7 MJ/kg than TED, EDB, and longan branch, as shown in Table 1, due to its higher moisture content. This value was lower than the 17.5 MJ/kg HHV reported by Mathews & Thadathil (2011). Moreover, this value was below the minimum energy content of 20.9 MJ/kg specified by the

Thai Community Product Standard (Thai Industrial Standards Institute 2004). Combusting TEDB necessitated more energy to evaporate the excess moisture, which lowered the heating value and ignition of the fuel briquettes (Kofman 2016), even though the MC met the requirements. Drying the TEDB as much as possible could raise the HHV, despite torrefaction improving the ED. Additionally, the quantity of binder used had an impact on the HHV of fuel briquettes (Dehannavar *et al.* 2018; Mohd-Faizal, Mohd-Shaid, & Ahmad-Zaini 2022).

Based on a comparison, 1 kg of TEDB was able to replace 0.98 kg of EDB (Mainkaew, Pattiya, & Janzri 2023), 0.89 kg of longan branch (Mainkaew, Pattiya, & Janzri 2023), 0.65 kg of charcoal (25.70 MJ/kg) (Otiemo *et al.* 2022), and 0.33 kg of LPG (50.15 MJ/kg) (Essom Co., LTD. 2014). In order to enhance the substitution ratio, it is recommended to explore options such as producing fuel briquettes without a binder or replacing water with alternative liquids or volatile solvents (Mohd-Faizal, Mohd-Shaid, & Ahmad-Zaini 2022).

3.2.3 Combustion properties

According to the studies conducted by Nurhayati, Naufal & Hariadi (2022), Verchinina *et al.* (2022), Nikiema *et al.* (2022), and Inegbedion & Erameh (2023), the ignition time and combustion rate of TEDB should be reduced due to the high density and abundance of AC raw material. In practice, TEDB ignited in 90 sec, which was faster than EDB's approximate ignition time of 120 sec (Mainkaew, Pattiya, & Janzri 2023). Moreover, TEDB's combustion rate was 1 g/min, lower than the 0.6 g/min achieved with EDB (Mainkaew, Pattiya, & Janzri 2023). The TEDB ignition time and combustion rate were inconsistent with the fuel ratio and thermal stability, likely due to inadequate chatter resistance and water resistance. Poor combustion properties may result from weak bonds between TED and the binder, as observed in the physical properties of TEDB.

3.2.4 Performance of the fuel briquette in the stove

Compared to EDB and longan branch (Mainkaew, Pattiya, & Janzri 2023), 1.56 of TEDB required 47 min to boil 500 mL of water, which was 22 min longer and consumed 0.69 kg and 0.36 kg more fuel, respectively. TEDB improved the overall thermal efficiency of the household updraft biomass gas stove by 6.1%, as shown in Table 3. It was significantly lower than the efficiency improvements achieved by other fuels. Moreover, TEDB showed significantly greater FCR, SFC, and PC values than the EDB and longan branch at 0.029 kg/min, 2.7 kg/kg, and 7.4 kW, respectively. These findings supported the previously discussed issue of combustion properties. Improvements in TEDB production for enhancing fuel briquette performance in stoves, as well as the use of TEDB in conjunction with suitable stoves, may be beneficial.

3.2.4 Emission properties

Table 3

Thermal properties of fuel briquette and firewood

Properties	Unit	EDB	TEDB	longan branch
Overall thermal efficiency	%	21.8	6.1	17.1
FCR	kg/min	0.015	0.029	0.017
SFC	kg/kg	0.8	2.7	0.9
PC	kW	3.9	7.4	5.0
Reference		(Mainkaew <i>et al.</i> 2023)	This study	(Mainkaew <i>et al.</i> 2023)

Table 4
Emissions of fuel briquette and firewood

Properties	Unit	EDB	TEDB	longan branch	Thai general ambient air quality standard (1 h)	Thai polluted air from industrial factory standard
CO ₂	ppm	5.5×10 ⁴	3.5×10 ⁴	5.2 × 10 ⁴	N/A	N/A
CO	ppm	2.1×10 ³	8.4×10 ²	4.9 × 10 ²	30	690
NO ₂	ppm	1.0 × 10 ²	82.9	94.2	0.17	200
NO _x	ppm	1.1 × 10 ²	87.1	98.9	N/A	N/A
SO ₂	ppm	0.0	0.0	0.0	0.30	60
Reference		(Mainkaew et al. 2023)	This study	(Mainkaew et al. 2023)	(Announcement of the National Environment Board 1995; 2001)	(Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment 2006)

During combustion, TEDB emitted lower levels of CO₂ (3.5×10⁴ ppm) than EDB and longan branch (Mainkaew, Pattiya, & Jansri 2023), as shown in Table 4. While its CO concentration was 8.4×10² ppm, higher than longan branch but lower than EDB. The carbon content of the fuel briquettes, the temperature generated by the stove, and oxidizing agent quantity all caused the CO₂ concentration to be over 40 times higher than the CO concentration (Verzhinina et al. 2022). Although TEDB had a higher N concentration than EDB and longan branch (Table 1), its NO₂ and NO_x emissions were lower, as shown in Table 4. TEDB did not meet the European standard EN ISO 17225 for S content (Kofman 2016), but SO₂ emission (Table 4) was undetectable.

The CO emission from TEDB combustion did not meet the general ambient air quality standard defined by the National Environment Board Notification, Thailand (Announcement of the National Environment Board 1995; 2001), and the polluted air from industrial factory standard defined by the Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand (Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment 2006). However, the SO₂ emission complied with both standards. Additionally, the NO₂ emission from TEDB was significantly lower than that required by the later standard.

Although fuel briquette emissions only meet a few standard parameters, a comparison between TEDB and EDB revealed that the former had lower emissions. This is because more FC was obtained during the conversion of ED to TED through the torrefaction process, as shown in Table 1. The use of cassava starch as the binder in the fuel briquette formation led to a decrease in FC and an increase in VM. Nonetheless, TEDB's FC and VM were still inferior to EDB. When TEDB was utilized in household biomass gas stove, the modest quantity of producer gas generated by the first stage of the stove could be combusted more efficiently in the second stage than EDB. As a result, the emissions induced by the combustion of TEDB were substantially less than those of EDB. However, TEDB should be used in a well-ventilated area for indoor applications.

4. Conclusion

Through torrefaction, the proximal properties, ultimate properties, and heating value of ED can be improved. TED achieved a yield of 79%, with FC exceeding 20%. It had an HHV of 17 MJ/kg, compared to 14 MJ/kg in dried ED. TED, binder, and water were then compressed at 40 bars in a 7:3:1 weight ratio to form fuel briquettes, resulting in TEDB with a density greater than 850 kg/m³ and an energy density greater than 11 GJ/m³. However, TEDB's moisture content was over 7%, leading to an HHV of less than 17 MJ/kg. Despite having a

higher fuel ratio and greater thermal stability than EDB, at 0.28 and 0.22, respectively, TEDB had limited durability due to poor bonding strength between TED and the binder, resulting in shatter resistance and water resistance less than 55% and 40%, respectively. TED exhibited greater physical and thermal properties. When TED was formed into fuel briquettes using the same approach as EDB, its properties were diminished. It was found that the process was not suitable for producing TEDB because raw materials for fuel briquettes had different characteristics. If the goal was to continue as before, increasing the temperature during the formation of fuel briquettes could be helpful since the endothermic reaction occurred during compression. Additionally, to upgrade ED to a fuel that could replace coal, its chemical properties must be altered by increasing the C content or decreasing the H and O content through appropriate thermal treatment and its density must be increased.

The briquette properties led to an overall thermal efficiency of less than 7%, with FCR, SFC, and PC exceeding 0.025 kg/min, 2.5 kg/kg, and 7 kW, respectively. When used as a cooking fuel, TEDB emitted a greater CO₂/CO mass ratio (> 40 times) than EDB, but less NO₂ (82.9 ppm) and NO_x (87.1 ppm), with all emissions being comparable to SO₂ (0 ppm). Using TEDB as a fuel increased the efficiency of combustion. Nonetheless, it is essential to use a suitable stove to enhance its performance.

Acknowledgements

The authors would like to gratefully acknowledge the Asian Development College for Community Economy and Technology (adCET), Chiang Mai Rajabhat University, Thailand, the Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, Thailand, and the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand, for their contributions to this study. We also would like thank Pang Chang Mae Taeng Limited Partnership in Chiang Mai, Thailand, for providing us samples of elephant dung.

Funding

This work was supported by Plant Genetic Conservation Project Under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn - Chiang Mai Rajabhat University (RSPG-CMRU), Thailand [Grant number 24/64].

Competing interest

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

CRedit authorship contribution statement

Artitaya Mainkaew: Writing – original draft & review, Methodology; Sommas Kaewtuan: Methodology; Adisak Pattiya: Conceptualization, Writing – editing, Research summaries and recommendation; Surachai Narat Jansri: Conceptualization, Writing – original draft & review, Methodology, Writing – editing, Research summaries and recommendation

References

- Abeyasinghe, N., Jetsriarparb, K., Karunaratna, K.H.T., Chandana, E.P.S., Suwanree, S., Kasemsrit, P., Chindaprasit, P., & Kruijnenburg, J.T.N. (2022). Synthesis and phosphate adsorption performance of elephant dung biochar modified with magnesium and iron. *J Met Mater Mine*, 32(1), 124-133. <https://doi.org/10.55713/jrnm.v32i1.1243>
- Adu-Poku, K.A., Appiah, D., Asosega, K.A., Derkyi, N.S.A., Uba, F., Kumi, E.N., Akowuah, E., Akolgo, G.A., & Gyamfi, D. (2022). Characterization of fuel and mechanical properties of charred agricultural wastes: Experimental and statistical studies. *Energy Rep*, 8, 4319-4331. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.015>
- Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment. Subject: Setting emission standard for polluted air from industrial factory (in Thai). (2006, 18 May). Gazette No. 123. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2549/00189175.PDF> [Accessed 15 January 2023].
- Announcement of the National Environment Board No. 10 (B.E. 2538) issued under the Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act B.E. 2535. Subject: Determination of general atmospheric air quality standards (in Thai). (1995, May 25). Gazette No. 112. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2538/D/042/89.PDF> [Accessed 15 January 2023].
- Announcement of the National Environment Board No. 21 (B.E. 2544) issued under the Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act B.E. 2535. Subject: Sulfur dioxide concentration standardization in the general atmosphere for 1 hour (in Thai). (2001, April 30). Gazette No. 118. <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2544/E/039/38.PDF> [Accessed 15 January 2023].
- Arnsiola, E.F., Oyewusi, T.F., Osunbitan, J.A., & Ogunjimi, L.A.O. (2019). Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized cocorb briquette. *Energy Rep*, 5, 909-918. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.07.011>
- Bello, R.S., Olorunisola, A.O., Omoniyi, T.E., & Onilude, M.A. (2021). Effects of binder concentrations and soaking time on combustion characteristics of briquettes produced from fermented *Gmelina arborea* (Roab) sawdust and used print paper. *Bioenergy Studies*, 2(1), 31-34. <http://doi.org/10.51606/bes.2022.9>
- Chukwunke, J.L., Umeji, A.C., Sinebe, J.E., & Fakiyisi, O.B. (2020). Optimization of composition of selected biomass for briquette production. *Univers J Mech Eng*, 8(4), 227-236. <https://www.doi.org/10.13189/ujme.2020.080408>
- Deshannavar, U.B., Hegde, P.G., Dhaleyat, Z., Patil, V., & Gavas, S. (2018). Production and characterization of agro-based briquettes and estimation of calorific value by regression analysis: An energy application. *Materials Science for Energy Technologies*, 1(2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.msct.2018.07.003>
- de Souza, E.C., Gomes, J.P.S., Pimenta, A.S., de Azevedo, T.K.B., Pereira, A.K.S., Gomes, R.M., Brito, J.O., & Dias Júnior, A.F. (2022). Briquette production as a sustainable alternative for waste management in the tannin extraction industry. *Environ Sci Pollut Res*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23490-y>
- Eghosubi, T.C. (2022). Biochar and bio-oil fuel properties from nickel nanoparticles assisted pyrolysis of cassava peel. *Heliyon*, 8(8), e10114. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10114>
- Essom Co., LTD. (2014). Heating value of hydrogen and fuels. https://chemeng.queensu.ca/courses/CHEE332/files/ethanol_heating-values.pdf [Accessed 16 December 2022].
- Fuad, M.A.H.M., Razali, M.M., Izal, Z.N.M., Faizal, H.M., Ahmad, N., Rahman, M.R.A., & Rahman, M.M. (2020). Torrefaction of briquettes made of palm kernel shell with mixture of starch and water as binder. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci*, 70(2), 21-36. www.akademibaru.com/urfnst.html
- Guo, Z., Wu, J., Zhang, Y., Wang, F., Guo, Y., Chen, K., & Liu, H. (2020). Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion. *Fuel*, 272, 117632. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>
- Hwangdee, P., Charee, S., Kheowkrai, W., Junsiri, C., & Laloon, K. (2022). Application of the simplex-centroid mixture design to biomass charcoal powder formulation ratio for biomass charcoal briquettes. *Sustainability*, 14(7), 3940. <https://doi.org/10.3390/su14073940>
- Ibitoye, S.E., Mahmood, R.M., Jen, T.C., & Aldinabi, E.T. (2022). Combustion, physical and mechanical characterization of composites fuel briquettes from carbonized banana stalk and cocorb. *Int J Renew En Dev*, 11(2), 435-447. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41290>
- Inegbedion, F., & Eramah, A.A. (2023). Estimation of combustion properties of briquettes produced from palm fruit shell. *Int J Eng Technol*, 8(1), 8-12. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2270347>
- Ivashchuk, O.S., Atamsnyuk, V.M., Chyzhovych, R.A., Kiliaeva, S.S., Duleba, V.P., Sobechko, I.B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *J Chem Technol*, 30(2), 216-221. <http://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>
- Jenkins, B., Baxter, L.L., Miles Jr, T.R., & Miles, T.R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Process Technol*, 54(1-3), 17-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3)
- Jiao, W., Tabil, L.G., Xin, M., Song, Y., Chi, B., Wu, L., Chen, T., Meng, J., & Bai, X. (2020). Optimization of process variables for briquetting of biochar from corn stover. *Bioresources*, 15(3), 6911-6925. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_15_3_6811
- Jiao, W., Tabil, L.G., Xin, M., Song, Y., Chi, B., Wu, L., Chen, T., Meng, J., & Bai, X. (2020). Optimization of process variables for briquetting of biochar from corn stover. *Bioresources*, 15(3), 6911-6925. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_15_3_6811
- Jiao, W., Tabil, L.G., Xin, M., Song, Y., Chi, B., Wu, L., Chen, T., Meng, J., & Bai, X. (2020). Optimization of process variables for briquetting of biochar from corn stover. *Bioresources*, 15(3), 6911-6925. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_15_3_6811
- Kebede, T., Berhe, D.T., & Zergaw, Y. (2022). Combustion characteristics of briquette fuel produced from biomass residues and binding materials. *J Energy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4222205>
- Kofman, P.D. (2016). Review of worldwide standards for solid biofuels. *COPORD: Processing/Products*, 39, 1-12. <https://www.bioenergy.org.nz/documents/resource/Reports/CLWEEnvironmentalPlannersLtd120114.pdf>
- Kole, A.T., Zeru, B.A., Bekele, E.A., & Rasmayya, A.V. (2022). Design, development, and performance evaluation of husk biomass cook stove at high altitude condition. *IJTF*, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.ijtf.2022.100242>
- Kumar, V.K., Mahendiran, R., Subramanian, P., Karthikeyan, S., & Surendrakumar, A. (2022). Optimization of inoculum to substrate ratio for enhanced methane yield from leather fleshings in a batch study. *J Indian Chem Soc*, 99(3), 100384. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100384>
- Mainkaew, A., & Jansri, S.N. (2020). Suitable process for producing the elephant dung green fuel briquette (in Thai). *J.REC*, 3(3), 52-58. http://rec.or.th/wp-content/uploads/2021/01/J-REC%8E2%80%9B_Vol3_2563_07.pdf
- Mainkaew, A., Pattiya, A., & Jansri, S.N. (2023). Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions. *Bioresour Technol Rep*, 21, 101328. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101328>
- Mandal, S., Kumar, G.P., Bhattacharya, T.K., Tanna, H.R., & Jena, P.C. (2019). Briquetting of pine needles (*Pinus roxburghii*) and their physical, handling and combustion properties. *Waste Biomass Valor*, 10(8), 2415-2424. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0239-4>
- Mathews, A.E., & Thadathil S.V. (2011, August). *Material and Energy Recovery from Elephant Dung*. In Kerala Environment Congress (p. 244). http://cedindia.org/wp-content/uploads/2013/08/KEC-2011_Proceedings.pdf#page=254
- Mohd-Faizal, A.N., Mohd-Shaid, M.S.H., & Ahmad-Zaini, M.A. (2022). Solid fuel briquette from biomass: recent trends. *OJAC*, 33(2), 150-155. <https://doi.org/10.2478/auoc-2022-0022>
- Nikdema, J., Asamoah, B., Egblewogbe, M.N., Akomea-Agyin, J., Cofie, O.O., Hughes, A.F., Gebreyesus, G., Asiedu, K.Z., & Njenga, M. (2022). Impact of material composition and food waste decomposition on characteristics of fuel briquettes. *RCR Advances*, 15, 200095. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200095>
- Nobre, C., Vilarinho, C., Alves, O., Mendes, B., & Gonçalves, M. (2019). Upgrading of refuse derived fuel through torrefaction and carbonization: Evaluation of RDF char fuel properties. *Energy*, 181, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.105>

- Nurhayati, A.Y., Naufal, A.Z.N., & Hariadi, Y.C. (2022). Energy yield of the carbonized plant leaf, petiole and branch biomass briquettes for sustainable production of future fuels. *CERIMRE*, 5(1). <https://doi.org/10.19184/cerimre.v5i1.31509>
- Omikak, I.E., Mohammed-Dabo, I.A., Ameh, A.O., Okoduwa, S.I., & Fasanya, O.O. (2017). Production and characterization of biomass briquettes from tannery solid waste. *Recycling*, 2(4), 17-33. <https://doi.org/10.3390/recycling2040017>
- Otieno, A.O., Home, P.G., Raude, J.M., Murunga, S.I., & Gachanja, A. (2022). Heating and emission characteristics from combustion of charcoal and co-combustion of charcoal with faecal char-sawdust char briquettes in a ceramic cook stove. *Heliyon*, 8(8), e10272. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10272>
- Ranaraja, D.M.C.O., Miyuranga, K.A.V., Weerasekara, N.A., & Arachchige, U.S.P.R. (2022). Palm oil sludge as a binding agent for briquette production. *Int J Eng Sci*, 6(9), 39-42. <http://ijes.com/>
- Ramírez-Ramírez, M.A., Carrillo-Parra, A., Ruiz-Aquino, F., Hernández-Solís, J.J., Pintor-Ibarra, L.F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., & Rutiaga-Quifones, J.G. (2022). Evaluation of selected physical and thermal properties of briquette hardwood biomass biofuel. *Bioenergy Res*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>
- Sandhage-Hofmann, A., Linetšidter, A., Kindermann, L., Angombe, S., & Amelung, W. (2021). Conservation with elevated elephant densities sequesters carbon in soils despite losses of woody biomass. *Glob Change Biol*, 27(19), 4601-4614. <https://doi.org/10.1111/gcb.15779>
- Samonasa, I., Nono, Y.J., Člář, G., Gurš, G., Dirič, M.R., & Kamga, R. (2020). Optimization of fuel briquette production from cassava peels, plantain peels and corn cobs. *J Mater Cycles Waste Manag*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01260-1>
- Saripan, K., Maminin, C., Imai, T., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2022). q-PCR Methodology for Monitoring the Thermophilic Hydrogen Producers Enriched from Elephant Dung. *Fermentation*, 8(10), 506. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100506>
- Sonsupap, S., & Pattiya, A. (2019). Improvement of sugarcane leaves property by torrefaction in a continuous flow reactor (in Thai). *SEJ*, 14(1), 106-115. <https://ph02.tcithaijo.org/index.php/sej/article/download/151320/152929/720904>
- Stepień, P., Świechowski, K., Hnat, M., Kugler, S., Stegents-Dąbrowska, S., Kozieł, J.A., Manczarski, P., & Białowiec, A. (2019). Waste to carbon: biochar from elephant dung as new cooking fuel. *Energies*, 12(22), 4344. <https://doi.org/10.3390/en12224344>
- Thai Industrial Standards Institute. (2004). 238/2547 Charcoal bar (in Thai). Thai Community Product Standard, Bangkok, Thailand. https://tcps.tsi.go.th/pub/tcps238_47.pdf. [Accessed 15 January 2023].
- Vanleeuwe, H., & Probert, J. (2014). Decay rate of elephant dung in Conkouati-Douli national park, Republic of Congo. *Pachyderm*, 55, 89-91. <https://pachydermjournal.org/index.php/pachyderm/article/download/357/343>
- Vershinina, K., Dorokhov, V., Romanov, D., & Strizhak, P. (2022). Ignition, combustion, and mechanical properties of briquettes from coal slime and oil waste, biomass, peat and starch. *Waste Biomass Valor*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01883-x>
- Vitthumakun, N., Manatrinon, S., Supachocksahakul, W., & Charoenphan, P. (2018). Genetic diversity of the domestic elephant populations in north and northeast of Thailand (in Thai). *VESTSU*, 5(2), 32 - 45. <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/VESTSU/article/view/124827>
- Wahyuni, H., Aladin, A., Kalla, R., Nouman, M., Ardilas, A., & Chowdhury, M.S. (2022). Utilization of Industrial Flour Waste as Biobriquette Adhesive: Application on Pyrolysis Biobriquette Sawdust Red Teak Wood. *IJHES*, 1(2), 54-69. <https://www.journal.foundee.com/index.php/ijhes>
- Zhang, B., Shen, Z., Sun, J., He, K., Zou, H., Zhang, Q., Li, J., Xu, H., Ho, K.F., & Cao, J. (2022). County-level of particle and gases emission inventory for animal dung burning in the Qinghai-Tibetan Plateau. *China J Clean Prod*, 367, 133051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133051>



© 2023, The Author(s). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 (CC BY-SA) International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

8. งานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่ในวารสารระดับชาติชื่อ วารสารวิชาการพลังงานทดแทน ชุมชน ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 2 โดยใช้ชื่อเรื่องว่า รูปแบบที่เหมาะสมต่อการอัดแท่ง เชื้อเพลิงเขียวจากมูลช้าง

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนชุมชน
JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY
FOR COMMUNITY (J-REC)

รูปแบบการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้าง
Suitable process for producing the elephant dung green fuel briquette

อภิตตยามาธิ์แก้ว¹ และสุรชัย ณรัฐ จันทร์ศรี*

¹สาขาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้าง เริ่มจากการนำ มูลช้างตากแห้งซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งบดและร่อนด้วยตะแกรงจนมูลช้างมีขนาดอนุภาค เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh แล้วนำมูลช้างแต่ละขนาดมาผสมกับตัวประสาน 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การผสมมูลช้างกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำอุนหมุมิห้อง ในการกำหนดอัตราส่วน 4 : 1 : 0.25 รูปแบบที่ 2 ดำเนินการ เช่นเดียวกับรูปแบบที่ทั้งชนิดวัตถุดิบ และอัตราส่วนการผลิต แต่เปลี่ยนจากน้ำอุนหมุมิห้องเป็นน้ำร้อน และรูปแบบที่ 3 การนำมูลช้างผสมแป้งเปียกในอัตราส่วน 4 : 1 ส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบถูกผสมให้เข้ากัน ใส่ลงในกระบอบอกสูบที่มีความยาว 25 cm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm อัดด้วยไฮดรอลิกที่แรงดัน 70 kg/cm² ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้างนั้นต้องใช้แป้งมันและน้ำอุนหมุมิห้องเป็นตัวประสาน เนื่องจากตัวประสานนี้ สามารถใช้กับมูลช้างที่มีขนาดตั้งแต่ 10-50 Mesh เชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้างที่ได้มีลักษณะเป็นแท่ง ส่วนผสม ประสานกันดี ไม่มีรอยร้าว แท่งเชื้อเพลิงมีระยะยึดตามแนวยาวต่ำสุดประมาณ 0.1 cm และมีความหนาแน่นสูงสุด ประมาณ 7.98 x 10⁻⁴ kg/cm³

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงเขียวอัดแท่ง มูลช้าง แป้งมันสำปะหลัง

เชื้อเพลิงและพลังงานชุมชน
(Fuel and Heat for Communities)

FC

* Corresponding author: Tel.: 082-5351987. E-mail address: jansrisnar@gmail.com

บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำมูลช้างส่วนใหญ่ได้นำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของการผลิตเป็นกระดาศมูลช้าง [1] และการทำปุ๋ยหมัก [2] ดังแสดงในภาพที่ 1 นอกจากนี้ยังได้มีการนำมูลช้างเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) เช่น โครงการการพัฒนาแก๊สชีวภาพจากมูลช้างเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในชุมชนพื้นที่ดินน้ำเป็นการประเมินศักยภาพโดยศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย จังหวัดลำปาง [3] พบว่า มูลช้างเมื่อนำมูลช้างมาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยสามารถผลิตแก๊สได้ 0.06 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมมูลสด แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพของมูลช้างจึงไม่สามารถดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างได้อย่างเป็นรูปธรรม การทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบงานวิจัยใดศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (Solid biofuel) จากมูลช้างในรูปแบบ Refuse-Derived Fuel 5 (RDF-5) เป็นการนำเชื้อเพลิงขยะส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแห้ง [4] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะดำเนินการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้าง (Elephant dung green fuel briquette)



ภาพที่ 1 การผลิตกระดาศจากมูลช้างและการการทำปุ๋ยหมัก

วิธีการวิจัย

1. การผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้าง

การผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างมีกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 2 เริ่มต้นจากการนำมูลช้างสดตากแดดตามธรรมชาติเป็นเวลา 5-7 วันเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำมูลช้างแห้งบดด้วยเครื่องบดชนิดโม่ชนิดที่จำหน่ายตามท้องตลาดและร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาด 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh ผงมูลช้างที่ได้ถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเขียวอัดแห้งโดยใช้ส่วนผสม 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 นำผงมูลช้างแต่ละขนาดผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำอุณหภูมิห้อง ในอัตราส่วน 4 : 1 : 0.25 และรูปแบบที่ 2 ดำเนินการเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 แต่เปลี่ยนจากน้ำอุณหภูมิห้องเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 - 85°C ส่วนรูปแบบที่ 3 นำผงมูลช้างแต่ละขนาดผสมกับแป้งเปียก ส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบถูกบรรจุในกระบอกอัดขนาดความยาว 25 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ดังแสดงในภาพที่ 3 แล้วอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่แรงดัน 70 kg/cm² เชื้อเพลิงเขียวอัดแห้งที่ได้นำไปฝั่งลงจนแห้งและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

2. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

2.1 ลักษณะภายนอก

ลักษณะภายนอกของเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างหลังอัดต้องมีการจับตัวเป็นก้อน เนื้อประสานกันดีมีความแข็งแรง ไม่เปราะ และไม่แตกหักง่าย [5]

2.2 การยืดและหดตัว

ความชื้นมีผลต่อการยืดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง ถ้าหากมีความชื้นมากเกินไปเมื่อแท่งเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกร่วน แต่ถ้าหากว่าความชื้นน้อยเกินไปทำให้ส่วนผสมร่วนเกาะกันเป็นแท่งได้ยาก [6] การยืดและหดตัวตามแนวยาวตรวจสอบโดยเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์ทุก 7 วันเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์



ภาพที่ 2 ขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง



ภาพที่ 3 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกและกระบอกอัด

2.3 ความหนาแน่น

เชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลได้รับการทดสอบความหนาแน่น (Density) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงอัดแห้งต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแห้ง มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) [7] ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นความหนาแน่นของถ่านอัดแห้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/cm^3)
 m คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดแห้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)
 v คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแห้ง มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร (cm^3)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ลักษณะภายนอก

เชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลช้างที่ผลิตจากส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบ มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4 เชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลช้างที่ผลิตจากมูลช้างขนาด 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh โดยใช้แบริ่งมันสำปะหลังและน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสาน มีลักษณะเนื้อประสานกันดี ผิวด้านนอกไม่มีรอยร้าว แต่พบรอยแตกร้าวเล็กน้อยในแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อลูมิเนียมขนาด 30 40 และ 50 Mesh ซึ่งการใช้แบริ่งมันสำปะหลังอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสานนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของกิตติพงษ์ ลาอุณ [8] ที่ศึกษาการผลิตถ่านอัดแห้งจากเห่ามันสำปะหลังเมื่อใช้น้ำและแบริ่งมันเป็นตัวประสาน เมื่อปรับเปลี่ยนตัวประสานเป็นแบริ่งมันสำปะหลังและน้ำร้อน แท่งเชื้อเพลิงชีวที่ได้เกิดรอยแตกร้าวมากขึ้นและบางแท่งแตกร่วน ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของอภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ [9] ที่ผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งจากซีเฝ้า แกลบผสมกับซังข้าวโพดและขลามาพร้าวโดยใช้แบริ่งมันและน้ำร้อนเป็นตัวประสาน สำหรับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แบริ่งเปียกเป็นตัวประสานนั้นแตกร่วน การผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลช้างที่ใช้แบริ่งเปียกเป็นตัวประสานได้ผลแตกต่างจากงานวิจัยการผลิตถ่านอัดแห้งโดยใช้ผงถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟผสมกับแบริ่งเปียกของนฤภัทร์ ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปริตาสุริยะชัย [10]

ขนาดมูลขี้้าง : แป้งมันสำปะหลัง : น้ำอุณภูมิห้อง				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh
ขนาดมูลขี้้าง : แป้งมันสำปะหลัง : น้ำร้อน				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh
ขนาดมูลขี้้าง : แป้งเปียก				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลขี้้าง

การศึกษาลักษณะภายนอกของแท่งเชื้อเพลิงพบว่าการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลขี้้างโดยใช้ตัวแป้งมันสำปะหลัง และน้ำอุณภูมิห้องเป็นตัวประสานทำให้เกิดความเสียหายในการผลิตน้อยที่สุด การศึกษาการยึดและหดตัว และความหนาแน่นจึงศึกษาเฉพาะแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำอุณภูมิห้องเป็นตัวประสานเท่านั้น

2. การยึดและหดตัว

การศึกษาการยึดและหดตัวตามแนวยาวของเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากมูลขี้้างที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน ผลจากการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เชื้อเพลิงอัดแห้งที่ใช้มูลขี้้างขนาด 10-50 Mesh ใช้ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและน้ำอุณภูมิห้อง หลังจากครบ 3 สัปดาห์ยึดตัวตามแนวยาวเพิ่มขึ้น 1.5, 0.6, 0.4, 0.1 และ 0.2 cm คิดเป็นร้อยละ 26.79, 10.91, 6.67, 2.04 และ 4.35 ตามลำดับ อัตราส่วนของมูลขี้้างที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสานเชื้อเพลิงอัดแห้งที่ใช้มูลขี้้างขนาด 40 Mesh คิดเป็นร้อยละ 2.04 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัณณณี แสงสุข [11] การผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งจากเศษเยื่อไม้ ซีลี้อย และต้าย เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 14 วัน แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละการขยายตัวด้านความยาว อยู่ระหว่างร้อยละ 0.77 – 3.79 เนื่องจากความชื้นมีผลต่อการยึดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง [6]

ตารางที่ 1 การยึดและหดตัวของเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน

ขนาดของมูลช้าง	ระยะยึดและหดตัวตามแนวยาว (cm)			
	เริ่มต้น	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3
10 Mesh	5.6	6.8	7.1	7.1
20 Mesh	5.5	5.7	6.1	6.1
30 Mesh	6.0	6.1	6.4	6.4
40 Mesh	4.9	4.9	5.0	5.0
50 Mesh	4.6	4.7	4.8	4.8

3. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างที่คงรูป ผลจากการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า อัตราส่วนมูลช้างต่อแป้งมันสำปะหลังและน้ำที่อุณหภูมิห้อง ขนาดมูลช้าง 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh มีความหนาแน่น 4.96×10^{-4} , 7.04×10^{-4} , 6.50×10^{-4} , 7.98×10^{-4} , 7.40×10^{-4} kg/cm³ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งตามมาตรฐาน DIN EN 51731 เชือกเพลิงเขียวอัดแห้งที่ผลิตได้ต้องมีค่าความหนาแน่นมากกว่า 1×10^{-4} kg/cm³ [12] แสดงว่า เชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างที่ผลิตได้มีความหนาแน่นเป็นไปตามมาตรฐาน DIN EN 51731 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของอนุวัตร ศรีนวล และอัมพวัลย์ ชัยนาวา ที่ผลิตเชือกเพลิงอัดแห้งจากใบสนประดิษฐ์ผสมถ่านลิกไนต์ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 7.80×10^{-4} ซึ่งมีการอัดแห้งของเชือกเพลิงได้ดีและเป็นไปตามมาตรฐาน [13]

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน

อัตราส่วนและขนาดของมูลช้าง	ความหนาแน่น (kg/cm ³)
10 Mesh	4.96×10^{-4}
20 Mesh	7.04×10^{-4}
30 Mesh	6.50×10^{-4}
40 Mesh	7.98×10^{-4}
50 Mesh	7.40×10^{-4}

สรุปผลการวิจัย

การผลิตเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างโดยใช้ตัวประสานเป็นแป้งมันและน้ำอุณหภูมิห้องที่อัตราส่วน 4:1:0.25 อัดด้วยแรงดันที่ 70 kg/cm^2 ด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก เป็นรูปแบบที่เหมาะสมต่อการผลิตเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งจากมูลช้างที่มีขนาด 10 - 50 Mesh เนื่องจากเชือกเพลิงเขียวอัดแห้งที่ผลิตได้มีลักษณะทางกายภาพที่ได้รับความเสียหายน้อยที่สุด การยึดและหดตัวระหว่าง 0.1–1.5 cm และมีความหนาแน่นระหว่าง 4.96×10^{-4} – 7.98×10^{-4} kg/cm³

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่สนับสนุนพื้นที่ และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และปางช้างในตำบลก๊าดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ที่สนับสนุนมูลช้างในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มยุรี เรื่องสมบัติ. (2549). การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระดาษมูลช้าง สำหรับศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [2] อีซพงศ์ บุญเรือง และชมชื่น ศิริวัฒน์แก้ว. (2558). ปุยหมักจากมูลช้างเอเชีย. หลักสูตรชีววิทยาเชิงอนุรักษ์ มหาลัษณ์มหิตลวิทยาเขตกาญจนบุรี.
- [3] พงษ์ศักดิ์ อยู่มัน. (2559). การพัฒนาเครื่องอัดแห้งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล จากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชน และการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแห้ง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. 9(1), 34-48.
- [4] รุ่งนภา จุลศักดิ์ และวราพรณ์ โพรธาเจริญ. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากเศษใบไม้ (อาร์ตีเอฟ 5) เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- [5] วัชรภรณ์ ยูลเขต, ตาวิวรรณ เศรษฐธรรม. (2560). เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแห้งจากขยะเศษใบไม้ที่ได้จากการอัดด้วยเครื่องอัดและอัดด้วยมือ. สารานุกรมสุขศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [6] กานต์ วิรุณพันธ์, ธนาธิภย์ สายเปลี่ยน และ ภาคภูมิ ไชยมพู่. (2560). การผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแห้งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลาม. สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก.
- [7] กฤษฎา นามวงศ์ และมงคล คราพันธ์. (2560). การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแห้งเชื้อเพลิงจากใบเสเดาแห้งร่วมกับขี้เลื่อยเผา. หน่วยวิจัยพลังงานทดแทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมรินทร์.
- [8] กิตติพงษ์ ลาลูน. (2554). การศึกษาและพัฒนาเครื่องผลิตถ่านอัดแห้งจากหญ้าแห้งสำหรับอัดแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตรและอาหาร). บัณฑิตวิทยาลัย : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [9] อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ, ทัปกร คุณาพรวิวัฒน์, พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์, จักรพันธ์ กัณหา และวราพรณ์ พันธุ์. (2551). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งจากขี้เถ้าถ่านผสมขี้เถ้าขี้ไก่และกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ.
- [10] นฤภัทร์ ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปริดาสุริยะชัย. (2558). การศึกษาการกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแห้ง. สำนักนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [11] กัณณณี แสงสุข. (2559). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งจากเศษเยื่อไม้ ขี้เลื่อย และด้าย. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] อนินท์ มีมนต์, ศุภเอก ประมูลมาก และจิราวัฒน์ ใจอยู่. (2558). อิทธิพลของขนาดผลอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [13] อนุวัตร ศรีนวล และอัมวัลย์ ชัยนาวา. (2561). การศึกษาเชื้อเพลิงอัดแห้งจากใบสนประดิพัทธ์ผสมถ่านหินลิกไนต์. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวอาทิตยา มาอินแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	8 มกราคม 2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 40 หมู่ 5 ตำบลเวียงกาหลง อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย รหัสไปรษณีย์ 57260
อีเมลล์แอดเดรส	artidtaya.ma@gmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 – 2561 หลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา พลังงานทดแทน สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2553 – 2556 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์ สถาบันการศึกษา แม่เจดีย์วิทยาคม จ.เชียงราย
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2567 – ปัจจุบัน ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ สังกัด/หน่วยงาน อุทยานหลวงราชพฤกษ์ พ.ศ. 2565 – 2566 ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่โครงการ สังกัด/หน่วยงาน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2562 – 2565 ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย สังกัด/หน่วยงาน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและ เทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย จังหวัดเชียงใหม่