



การผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราและ
ขยะฝังกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย
Manufacture and Properties of Mixed Pellets from Rubberwood
Sawdust and Refuse-derived Fuel (RDF3) for Using in The
Power Plant Industrial of Thailand

รัตติกาล เหล่าเสนา
Rattikal Laosena

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Engineering in Energy Technology
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราและ
ขยะฝังกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย
Manufacture and Properties of Mixed Pellets from Rubberwood
Sawdust and Refuse-derived Fuel (RDF3) for Using in The
Power Plant Industrial of Thailand

รัตติกาล เหล่าเสนา
Rattikal Laosena

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Engineering in Energy Technology
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา และขยะฝัองلوب (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย

ผู้เขียน นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา

สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยะ โชติจันทร์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยะ โชติจันทร์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาคม ปะหลามานิต)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เลื่องชวนนท์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เลื่องชวนนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายสุนีย์ จำรัส)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ่างสูง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเองและได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยะ โชติจันทร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาคม ปะหลามานิต)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เลื่องชวนนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....
(นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา)
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อนและ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา และขยะฝัองกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย
ผู้เขียน	นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

การศึกษาการผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา และขยะฝัองกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพจากส่วนผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 ที่อัตราส่วน 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการของเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพที่ผลิตได้ (ขยะฝัองกลบ) และ 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพ (ขยะฝัองกลบ) สำหรับอุตสาหกรรมการวิจัยครั้งนี้เป็นการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) กับขยะจากหลุมฝัองกลบขยะที่ผ่านการย่อยสลายผ่านการคัดแยก (RDF3) โดยไม่เติมตัวประสาน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยน้ำหนักของขี้เลื่อยไม้ยางพาราต่อ RDF3 เท่ากับ 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้ไปการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ สัดส่วน และสมบัติบางประการของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ความชื้น ปริมาณเถ้า คาร์บอนเสถียร ไอรระเหย ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าทั้ง 4 อัตราส่วนผสม มีความหนาแน่น 1,175 - 1,286 kg/m³ ค่าความหนาแน่นอยู่ตามเกณฑ์มาตรฐานเม็ดพลังงานมากกว่า 98% ค่าความยาวมีค่า 36 - 42 mm ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า 6.122 - 6.188 mm ความชื้นมีค่า 5.38 - 11.27 % ค่าคาร์บอนเสถียร และค่าไอรระเหย มีค่า 12.484 - 15.78 % และ 65.17 - 72.11 % ตามลำดับ ค่าความร้อนมีค่า 19.40-22.09 MJ/kg ค่าความร้อน และปริมาณเถ้าจะแปรผันไปทางเดียวกันคือ อัตราส่วนผสมที่มี RDF3 เพิ่มมากขึ้นจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นและปริมาณเถ้าก็มากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง และปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ด้วยวิธีการต้มน้ำ (water boiling test, WBT) พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 50/50 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 31.57% การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของ RDF3 จะทำให้ค่ากำมะถัน สารตะกั่ว ค่าไฮโดรเจน ค่าโพแทสเซียม ค่าโซเดียม ค่าไนโตรเจน โครเมียม คลอรีน สังกะสี ทองแดง แคลเซียม สารหนู จะมีค่าสูงขึ้น โดยเพิ่มตามปริมาณส่วนผสม RDF3 โดยที่สารปรอท(Hg) มีค่าเท่ากันทุกอัตราส่วนผสม และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3 พบว่ามีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยอยู่ที่ 1.40 บาท/กิโลกรัม

คำสำคัญ : เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล, ขี้เลื่อยไม้ยางพารา, ขยะฝัองกลบ (RDF3), อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า

Thesis Title Manufacture and properties of mixed pellets from rubberwood Sawdust and refuse-derived fuel (RDF3) for using in the power plant industrial of Thailand

Author Miss.Rattikal Laosena

Major Program Energy Technology

Academic Year 2021

ABSTRACT

The study of manufacture and properties of mixed pellets from rubberwood (*Hevea brasiliensis*) sawdust and refuse-derived fuel (RDF3) for using in the power plant industrial of Thailand was objected 1) to produce mixed pellets from a mixture of rubberwood sawdust and RDF3 at ratios of 100/0,70/30,60/40 and 50/50, 2) to study some properties of mixed pellets, and 3) to study the efficiency and economics of mixed pellets. This research was focused to produce fuel pellets from rubberwood sawdust and refuse-derived fuel (RDF) which is a by-product of municipal solid waste (MSW) using non adhesive. There are four conditions of ratio by weight of sawdust and RDF3 at 100/0 ,70/30, 60/40, and 50/50 respectively. The samples were analyzed for quantitative composition, proportion, and properties of biomass pellets, such as density, diameter, length, moisture content, ash content, fixed carbon, volatile matter, heating value, thermal efficiency, and chemical analysis. The results demonstrated the samples had 1,175 - 1,286 kg/m³ of density, ≥98% of mechanical durability, 36 - 42 mm of length, 6.122 - 6.188 mm of diameter, 5.38 - 11.27 % of moisture content, 12.484 – 15.78 % of fixed carbon, 65.17 - 72.11 % of ash content, and 19.40-22.09 MJ/kg of heating value. The value of heating value and ash content were diverse in the ratio of increasing RDF3. Thermal efficiency test using water boiling test (WBT) resulted that 50/50 mixed pellet of samples had highest value in 31.57%. Chemical analysis showed mixed pellets having RDF3 raised the content of Sulfur, Lead, Hydrogen, Sodium, Nitrogen, Chromium, Chlorine, Zinc, Copper, Cadmium, and Arsenic. On the other hand, Mercury had slightly same content. Finally, the economic analysis of mixed pellet production cost from rubberwood sawdust and RDF3 was 1.402 baht/kg.

Keywords : Mixed pellets, Rubberwood sawdust, Refuse-derived fuel (RDF3), Power plant industrial.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับเรื่อง “การผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมซีลีเนียมอย่างพาราและขยะฝังกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย” สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องอาศัยแหล่งการเรียนรู้ต่างๆ ทั้งจากคำแนะนำทั้งในภาคทฤษฎีและปฏิบัติจากบุคคลต่างๆ จึงขอขอบพระคุณท่านผู้มีพระคุณต่อไปนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยะ โชติพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี เลื่องชวนนท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาคม ปะหลามานิต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ในการทำวิจัย รวมถึงการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการทำวิจัย จนสามารถทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ญโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายสุนีย์ จำรัส ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระชา เดชชาญชัยวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ ที่เป็นกรรมการในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และสอบจบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ ทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไป

ขอขอบคุณพี่ๆนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการปฏิบัติการทดสอบของงานวิจัย

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ อุทิศทุนกำลังทรัพย์ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ งานวิจัยนี้เป็นผลมาจากบุคคลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถทำงานวิจัยไปได้อย่างราบรื่นและลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญรูปภาพ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 สถานที่ทำวิจัย	3
1.6 ระยะเวลาดำเนินการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไม้ยางพารา	4
2.2 สมบัติของไม้ยางพารา	5
2.3 องค์ประกอบทางเคมีในไม้	5
2.4 ชีลื้อยไม้ยางพารา	7
2.5 เชื้อเพลิงขยะ (RDF)	9
2.6 พลังงาน	10
2.7 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellet)	11
2.8 หลักการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	12
2.9 ประเภทและคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	12
2.9.1 ประเภททำจากไม้	13
2.9.2 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้	13
2.9.3 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด	13
2.10 การผลิตเม็ดพลังงาน	13

สารบัญ (ต่อ)

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	13
2.12.2 ค่าปริมาณเถ้า	14
2.12.3 ค่าปริมาณความชื้น	14
2.12.4 ความหนาแน่น	14
2.12.5 ค่าความร้อน	14
2.13 ตัวประสาน	14
2.14 ขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	15
2.15 มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด	16
2.15.1 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของยุโรป	16
2.15.2 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา	24
2.15.3 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของเอเชีย	26
2.16 การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	30
2.17 ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	31
2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	40
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	42
3.1.1 การเตรียมขี้เลื่อยไม้ยางพารา	42
3.1.2 การเตรียม RDF3	43
3.2 กระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า	43
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้	46
3.3.1. การหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง (Diameter,mm and Length,mm)	46
3.3.2 ค่าความชื้น (Moisture Content)	47
3.3.3 ค่าความร้อน (Heating value)	47
3.3.4 การประเมินประสิทธิภาพความร้อน	48
3.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง	51

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	52
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	52
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	52
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยวิธีละเอียด (Ultimate analysis)	65
4.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง	72
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผล	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	81
ภาคผนวกภาค ก มาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด	82
ภาคผนวก ข มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่างประเทศ	91
ภาคผนวก ค การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย	92
ประวัติผู้เขียน	103

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงการจำแนกประเภทของเชื้อเพลิงขยะตามมาตรฐานของ ASTM	9
ตารางที่ 2.2	แสดงมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด EN 14961-1:2010 ของยุโรป	17
ตารางที่ 2.3	แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสวีเดน	20
ตารางที่ 2.4	แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศเยอรมันนี	20
ตารางที่ 2.5	แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศอิตาลี	23
ตารางที่ 2.6	แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของยุโรป	24
ตารางที่ 2.7	แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสหรัฐอเมริกา	25
ตารางที่ 2.8	คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภททำจากไม้ทั้งหมด	26
ตารางที่ 2.9	คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และปะเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด	27
ตารางที่ 2.10	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผู้ผลิต ภายในประเทศไทยกับมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของอเมริกาและยุโรป (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)	28
ตารางที่ 2.11	ร่างมาตรฐานคุณลักษณะเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศไทย (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)	29
ตารางที่ 2.12	ตัวอย่างค่ามาตรฐานของอากาศที่ระบายออกจากโรงงานที่ใช้ เชื้อเพลิงชีวมวล	30
ตารางที่ 4.1	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 100:0	54
ตารางที่ 4.2	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 70:30	55
ตารางที่ 4.3	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 60:40	56
ตารางที่ 4.4	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 50:50	57
ตารางที่ 4.5	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานหุงต้มของเม็ดพลังงานด้วยวิธีการต้ม น้ำ (water boling test, WBT) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื้อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.6	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 กับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัดได้	65
ตารางที่ 4.7	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 100:0	66
ตารางที่ 4.8	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 70:30	67
ตารางที่ 4.9	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 60:40	68
ตารางที่ 4.10	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 50:50	69
ตารางที่ 4.11	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 กับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัดได้	72
ตารางที่ 4.12	ปริมาณค่าเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3	73
ตารางที่ 4.13	ปริมาณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3	74
ตารางที่ 4.14	ปริมาณค่าแรงงานที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3	74
ตารางที่ 4.15	ปริมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3	74

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)	5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)	7
รูปที่ 2.4	รูปแสดงกระบวนการที่ทำให้เกิดชี้เลี้ยง	8
รูปที่ 2.5	ระบบผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF)	9
รูปที่ 3.1	รูปตู้อบความร้อน ใช้ในการอบชี้เลี้ยงไม้ยางพารา ที่อุณหภูมิ 103 °c	42
รูปที่ 3.2	กระบวนการอบชี้เลี้ยงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 103 °c เพื่อให้มีความชื้น 12% -15%	42
รูปที่ 3.3	รูปแสดงเครื่องย่อยพลาสติก	43
รูปที่ 3.4	แสดงขนาด RDF3 ก่อนย่อย	43
รูปที่ 3.5	แสดงขนาด RDF3 หลังย่อย	43
รูปที่ 3.6	รูปเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า	44
รูปที่ 3.7	รูปแสดงวัตถุดิบที่ผสมเรียบร้อยแล้ว	44
รูปที่ 3.8	รูปแสดงการนำวัตถุดิบใส่ในเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า	45
รูปที่ 3.9	รูปแสดงการนำภาชนะมารองรับเม็ดชีวมวลที่สมบูรณ์	45
รูปที่ 3.10	รูปแสดงการนำเม็ดชีวมวลที่ได้ตั้งไว้ให้เย็น	45
รูปที่ 3.11	การนำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลบรรจุใส่ถุง เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติ	46
รูปที่ 3.12	การวัดความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	46
รูปที่ 3.13	การวัดความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	47
รูปที่ 3.14	การอบหาค่าความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	48
รูปที่ 3.15	รูปเครื่อง Bomb calorimeter	49
รูปที่ 3.16	เติมน้ำลงในหม้อสแตนเลส ปริมาณน้ำ 1,000 g	50
รูปที่ 3.17	ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ	50
รูปที่ 3.18	ใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตรงกลางของเตาแล้วจุดไฟทิ้งไว้ 5 นาที	51
รูปที่ 3.19	ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งน้ำเดือดที่ 98 °C	51
รูปที่ 3.20	ต้มน้ำจนเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหมดไฟ	51
รูปที่ 4.1	เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 100:0	53
รูปที่ 4.2	เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 70:30	53
รูปที่ 4.3	เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 60:40	53

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.4	เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 50:50	53
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงค่าความยาว (Length) ,mm ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	58
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ,mm ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	58
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่าความชื้น (Moisture) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	59
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงค่าความหนาแน่น (Density) , kg/m ³ ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	59
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงค่าความทนทาน (Durability) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	60
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่าปริมาณเถ้า (Ash) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	60
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่าความร้อน (Heating value) ,MJ/kg ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	61
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	61
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงค่าไอระเหย (VOCs) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	64
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา, (%) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	70
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง, (MJ) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50	70

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.16	กราฟแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์, (MJ) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50	62
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่าสารคาร์บอน (C), ค่าไฮโดรเจน(H), ไนโตรเจน (N), กำมะถัน (S), ค่าโพแทสเซียม (K), ค่าโซเดียม (Na) และสารคลอรีน (Cl) , (%) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50	68
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงค่าสารสังกะสี (Zn), ทองแดง (Cu), สารตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), สารหนู (As) และสารปรอท (Hg) , (mg/kg) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50	69

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Length	=	ค่าความยาว
Diameter	=	ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง
Moisture	=	ค่าความชื้น
Density	=	ค่าความหนาแน่น
Durability	=	ค่าความคงทน
Heating value	=	ค่าความร้อน
Ash	=	ค่าปริมาณเถ้า
Fixed carbon	=	ค่าคาร์บอนเสถียร
volatile matter	=	ค่าไอระเหย
C	=	คาร์บอน
H	=	ไฮโดรเจน
N	=	ไนโตรเจน
S	=	กำมะถัน
K	=	โพแทสเซียม
Na	=	โซเดียม
Zn	=	สังกะสี
Cu	=	ทองแดง
Pb	=	ตะกั่ว
Cd	=	แคดเมียม
Cr	=	โครเมียม
As	=	สารหนู
Hg	=	ปรอท
Cl	=	คลอรีน
SO ₂	=	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
mm	=	มิลลิเมตร
kg/m ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
MJ/kg	=	เมกะจูลต่อกิโลกรัม
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
°C	=	องศาเซลเซียส
g	=	กรัม
mm	=	มิลลิเมตร
%	=	เปอร์เซ็นต์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

สถานการณ์ปัจจุบันที่ทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาด้านพลังงานที่รุนแรงกว่าในอดีตมาก อันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานและราคาพลังงานเชื้อเพลิงที่มีการปรับตัวอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเป็นต้นเหตุของมลพิษและภาวะโลกร้อน ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดในการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนกันมากขึ้นโดยเฉพาะ พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตร ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น เชื้อเพลิงทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ทั่วโลกรวมถึงประเทศไทยหันมาสนใจ คณะรัฐมนตรี (รัฐบาล พลเอก ประยุทธ์ จันทร์โอชา) มีนโยบายเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2562 ในการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าใช้ในประเทศมากขึ้น (แผนการพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, PDP 2018 Revision1)

เชื้อเพลิงชีวมวลจัดเป็นพลังงานทดแทนที่ประเทศไทยสามารถผลิตได้โดยง่าย เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถผลิตได้จากการเพาะปลูก จากเศษเหลือทางการเกษตร ทำให้ประเทศไทยจึงมีแหล่งกำเนิดเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นจำนวนมาก

ไม้ยางพารา นับเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมไม้ปื้ในประเทศไทย ซึ่งได้จากการตัดหลังการทำสวนยางพาราที่มีอายุเฉลี่ย 25-30 ปีและประมาณ 69% ของพื้นที่สวนยางทั้งหมดตั้งอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย (Musikavong and Gheewala, 2017; Balsiger et al., 2000)

การแปรรูปไม้ยางพาราในประเทศไทยกำลังเติบโตอย่างรวดเร็วเนื่องจากความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม จากการแปรรูปไม้ยางพาราทำให้มีขี้เลื่อยเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถเป็นวัสดุที่ดีสำหรับการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง ถือเป็นการใช้ไม้เพื่อพลังงานให้มีประสิทธิภาพ เป็นส่วนหนึ่งของนโยบายบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงาน โดยกำหนดเป้าหมายในแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) ในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นร้อยละ 20 ซึ่งภาครัฐควรให้การสนับสนุน กรมป่าไม้ได้ให้ความสำคัญกับงานวิจัยและงานส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากไม้อย่างมีประสิทธิภาพมาตั้งแต่ช่วงวิกฤตการณ์น้ำมันขาดแคลนในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2525 โดยมีโครงการพัฒนานำไปใช้ในการหุงต้มชีวมวลที่ยังมีการใช้เตาหุงต้มกันอยู่มากในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย โครงการการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งและการทำเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงการส่งเสริมให้มีการปลูกไม้โตเร็วเป็นสวนป่าเพื่อการใช้ประโยชน์ด้านพลังงานในประเทศ (สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้, 2560)

การใช้พลังงานทดแทนนอกจากจะช่วยลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน ซึ่งการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก มีการจัดทำแผนปฏิบัติ เพื่อขับเคลื่อนแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (AEDP2015) ได้มีการส่งเสริมให้ใช้ พลังงานทดแทนพลังงานชีวภาพ เช่น ชีวมวล ขยะ และก๊าซชีวภาพ เพื่อผลิตไฟฟ้าและความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่

เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล สำหรับการใชชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนนั้นประเทศไทยมีชีวมวลหลายชนิดที่มีศักยภาพ เช่น ไม้ยางพารา อ้อย ปาล์มน้ำมัน และมันสำปะหลัง ซึ่งชีวมวลจากไม้ยางพาราและปาล์มน้ำมัน พบว่า ส่วนใหญ่อยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งทำให้มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

นอกจากชีวมวลดังกล่าวแล้วขยะชุมชนที่เป็นปัญหาใหญ่ในโลกก็เป็นอีกหนึ่งแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ จากข้อมูลสถานการณ์การเพิ่มขึ้นของขยะมูลฝอยในประเทศไทยที่ผ่านมาพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกปี ซึ่งในปี พ.ศ.2561 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอย 27.82 ล้านตัน คิดเป็นอัตราการเกิดขยะมูลฝอย 1.15 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) ด้วยปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมากทำให้ต้องมีวิธีการกำจัดที่ถูกต้องและได้มาตรฐานในกรณีของประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้วิธีการกำจัดด้วยการฝังกลบซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับบ่อฝังกลบ ดังนั้นการนำขยะมูลฝอยชุมชนมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยกำจัดขยะและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

การเปลี่ยนรูปชีวมวลและขยะมูลฝอยชุมชนเป็นพลังงานทำได้หลายวิธี เช่น (1) การเปลี่ยนรูปด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เช่น การเผาไหม้ (Combustion) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) (2) การเปลี่ยนรูปทางกล (Mechanical conversion) เช่น การอัดเป็นแท่ง และ (3) การใช้กระบวนการทางชีวเคมี เช่น การหมักก๊าซชีวภาพ การเลือกใช้วิธีดังกล่าวทำให้ได้พลังงานรูปแบบต่างกัน เช่น ความร้อน (Heat) ก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas and biogas) เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) และเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ เช่น เป้าหมายการใช้งาน ด้านเทคนิค การจัดเก็บและขนส่ง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปริมาณการใช้พลังงาน ในปัจจุบันการเปลี่ยนรูปชีวมวลและขยะชุมชน จัดเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังได้รับการยอมรับสูงสุดจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของเชื้อเพลิงชีวมวล มีความสะดวกสบายในการขนส่ง อีกทั้งยังมีความหนาแน่น พลังงานค่อนข้างสูง เชื้อเพลิงอัดแท่งยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงในหม้อน้ำ (Boiler) หรือนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าอุตสาหกรรม รวมทั้งการพัฒนาเพิ่มมูลค่าสำหรับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

เทคโนโลยีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีให้เกิดพลังงานความร้อน ได้แก่ การเผาไหม้ การแปรสภาพเป็นแก๊สและไพโรไลซิส ซึ่งการเผาไหม้ของชีวมวลเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีที่ตรงที่สุดและง่ายที่สุดด้วยเทคนิคที่สามารถทำให้ประสิทธิภาพโดยวิธีนี้สามารถสร้างพลังงานความร้อนชีวมวลอยู่ในระดับต่ำ อย่างไรก็ตามการทำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นวัตถุดิบที่เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นได้เหมาะสำหรับการใช้งานด้านอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัยรวมถึงการเผาไหม้และการแปรสภาพเป็นแก๊ส

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การผลิตและประเมินคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมขยะฝังกลบ (RDF3) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพจากส่วนผสมซีลี้อยู่อย่างพารากับ RDF3 ที่อัตราส่วน 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการของเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพที่ผลิตได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพ(ขยะฝึงกลบ) สำหรับอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 สามารถผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลผสมชีวภาพ เพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้งานร่วมกับ Boiler ได้และเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกแก่อุตสาหกรรมต่างๆได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การใช้ซีลี้อยู่อย่างพารา (*Hevea brasiliensis*) และของเสียจากหลุมฝึงกลบขยะ (RDF3) เพื่อผลิตเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพ (ขยะฝึงกลบ) ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของซีลี้อยู่อย่างพารา กับ RDF3 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

- 1.5.1 ศูนย์ปฏิบัติการเทคโนโลยีไม้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
- 1.5.2 ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

1.6 ระยะเวลาดำเนินการ

2 ปี

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราเป็นไม้เศรษฐกิจประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย ปัจจุบันมีเนื้อที่ปลูกไม้ยางพาราในประเทศไทยประมาณ 18.46 ล้านไร่ นอกจากปริมาณน้ำยางแล้วกำลังการผลิตไม้ท่อนเพื่อป้อนเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมหลังจากต้นยางแก่ ให้ผลผลิตต่ำจะต้องโค่นเนื้อที่ปลูกทดแทนปีละ 230,000 ไร่ จากต้นยางที่ถูกตัดโค่นนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ประมาณไร่ละ 22 ลูกบาศก์เมตร เมื่อคิดรวมเป็นเนื้อไม้ยางพาราที่ตัดโค่นเพื่อเปลี่ยนใหม่จะมีปริมาณไม้ถึง 5.1 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ผลการศึกษาทราบว่าสามารถคัดเลือกไม้ยางพาราที่ได้ขนาดออกมาใช้ได้ประมาณ 70-75% ของปริมาณไม้ท่อนที่ผลิตได้ต่อไร่ โดยส่วนใหญ่นำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ไม้อื่นๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ายังมีส่วนที่เหลือของไม้ยางพาราอีก 25-30% ที่ไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ (พรพรรณา เล่าประวัติชัย ,2561)

การผลิตและแปรรูปไม้ยางพาราเกิดขึ้นจากการที่เกษตรกรต้องการโค่นต้นยางพาราเพื่อปลูกทดแทน ผู้ประกอบการแปรรูปนำไม้จากสวนไปเป็นวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งการโค่นไม้ยางพาราสามารถทำได้โดยการตัดต้นยางพารายืนต้นโดยใช้เลื่อยโซ่ยนต์หรือใช้รถแทรกเตอร์ต้นต้นยางให้ล้มก่อนการใช้เลื่อยโซ่ยนต์ตัดกิ่งไม้ออกจากลำต้นซึ่งวิธีนี้ทำให้ได้รากยางพาราขึ้นมาจากดินได้ง่าย การตัดต้นไม้ยางพารามักแยกตัดตามขนาดที่โรงงานแปรรูปไม้ยางพารารับซื้อได้แก่ ไม้ท่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 8 นิ้วและ 5 - 8 นิ้วสำหรับป้อนโรงเลื่อย ไม้ท่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 5 - 3 นิ้วสำหรับป้อนโรงงานผลิตแผ่นใยไม้อัดและแผ่นขึ้นไม้อัดที่เหลือเป็นไปไม้และกิ่งไม้จะถูกขายเป็นไม้ปูพื้นหรือผลิตถ่าน ส่วนรากของไม้ยางพาราสามารถขายทำเป็นฟืนหรือขายให้กับโรงผลิตไฟฟ้าชีวมวล หรือเผาทิ้งโดยมีปริมาณของส่วนต่างๆ แสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของไม้ยางพาราเมื่อมีการตัดโค่นไม้ยางพาราจะทำให้มีส่วนของรากและขี้เลื่อยไม้ยางพาราคิดเป็นร้อยละ 7.9 ซึ่งในอดีตต่อไม้และรากไม้ยางพาราจะถูกเผาทิ้งในสวนเนื่องจากเกษตรกรไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ แต่ปัจจุบันมีการนำรากและต่อไม้มาผลิตไฟฟ้าชีวมวลเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบเหลือใช้ อย่างไรก็ตามโรงผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่รับซื้อต่อไม้และรากไม้นั้นมีข้อจำกัดทั้งจำนวนโรงงานที่รับซื้อมีน้อยและวัตถุดิบส่วนใหญ่ก็มาจากพื้นที่รอบๆ บริเวณโรงงาน ดังนั้นยังเหลือต่อไม้และรากไม้จำนวนมากที่ต้องถูกเผาทิ้งเนื่องจากไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2556)

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากชีวมวลที่เหลือจากไม้ยางพารา (เปลือกไม้ต่อไม้ รากไม้ยางพารา และขี้เลื่อยไม้ยางพารา) ในประเทศไทยเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคโนโลยีการแปลง พลังงานอื่นๆ เช่น ไพโรไลซิสและการแปรสภาพเป็นแก๊สสามารถใช้ในการสร้างพลังงานจากชีวมวล ไม้ยางพาราในประเทศมาเลเซียการใช้ชีวมวลไม้ยางพาราในการผลิตพลังงานนั้นมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลอื่นๆ ที่เหลืออยู่ เช่น ชีวมวลปาล์มน้ำมัน ชีวมวลจากโกโก้แกลบ และชานอ้อย สำหรับชีวมวลไม้ยางพารามีปริมาณค่อนข้างคงที่ในระยะยาว เนื่องจากอุตสาหกรรมจะช่วยให้

สามารถวางแผนการลงทุนในการใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้อย่างไรก็ตามเพื่อวางแผนการใช้ชีวมวลที่เหลือจากการทำสวนยางพาราจำเป็นต้องประเมินคุณภาพและปริมาณที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ (Hytönen et al., 2019; Wongsapai et al., 2020)

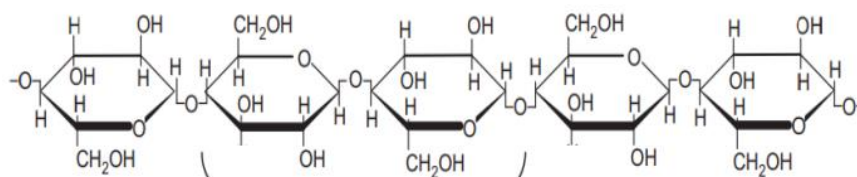
2.2 สมบัติของไม้ยางพารา

ไม้ยางพารา เป็นไม้สดจะมีเนื้อไม้สีขาวเหลืองและเมื่อเนื้อไม้แห้งจะเปลี่ยนเป็นสีขาวจาง เป็นไม้ที่ไม่มีแก่น เส้นรอบวงปีไม่ชัดเจน จัดเป็นไม้ที่อยู่ในกลุ่มไม้เนื้อแข็งปานกลาง เนื้อไม้มีลักษณะหยาบ และมีเส้นเป็นแนวเส้นตรง จากการทดสอบคุณสมบัติไม้ยางพาราที่จำแนกตามสายพันธุ์ 4 สายพันธุ์ เปรียบเทียบกับไม้สัก พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพ (physical property) ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติเชิงกล (strength property) ได้แก่ ความเค้นอัดตั้งฉาก เส้น ความแข็งแรง ความเค้นอัดขนานเส้น ความเค้นเฉือนขนานเส้น Modulus of elasticity (MOE) และ Modulus of Rupture (MOR) ทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับไม้สัก แต่ประเด็นของการใช้งานไม้สักจะมีการดูหรือคายความชื้นจากอากาศได้ดีกว่าไม้ยางพาราส่งผลให้ไม้สักมีการคงรูปที่ดีกว่าเมื่อนำไปใช้งาน (กฤษดา สังข์สิงห์, 2552)

2.3 องค์ประกอบทางเคมีในไม้

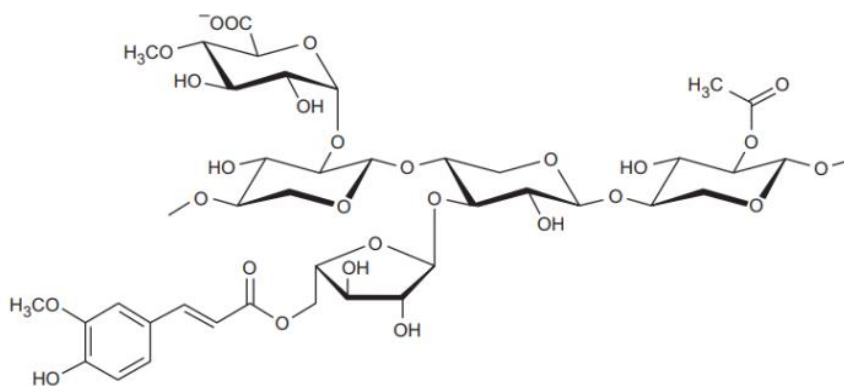
องค์ประกอบทางเคมีของไม้เป็นสมบัติพื้นฐานที่ทำให้ไม้แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและการสะสมอาหารของพืชในรูปแบบต่างๆ ไม้ยางพาราเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และยังมีองค์ประกอบรองคือ สารแทรก ซึ่งสารแทรกเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติบางประการของไม้ เช่น สีของไม้ กลิ่นของไม้ รวมไปถึงความต้านทานต่อศัตรูทำลายไม้ (จรียา สหานัตย์, 2560)

1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์มีโครงสร้างเป็น (crystalline) ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) ซึ่งเป็นน้ำตาลหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอเอทานอล (Mood et al., 2013) มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic และเชื่อมต่อยกหว่างสายเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดเป็นเส้นใยพบได้ในผนังเซลล์พืชที่อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและแพคตินช่วยให้ความแข็งแรงซึ่งเซลลูโลสละลายน้ำได้น้อย การย่อยสลายเส้นใยเซลลูโลสสามารถใช้วิธีทางเคมีโดยใช้กรดในการตัดพันธะหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (enzyme) อย่างเช่นเซลลูเลส (cellulase) ในการตัดพันธะ (Food Network Solution, 2015)



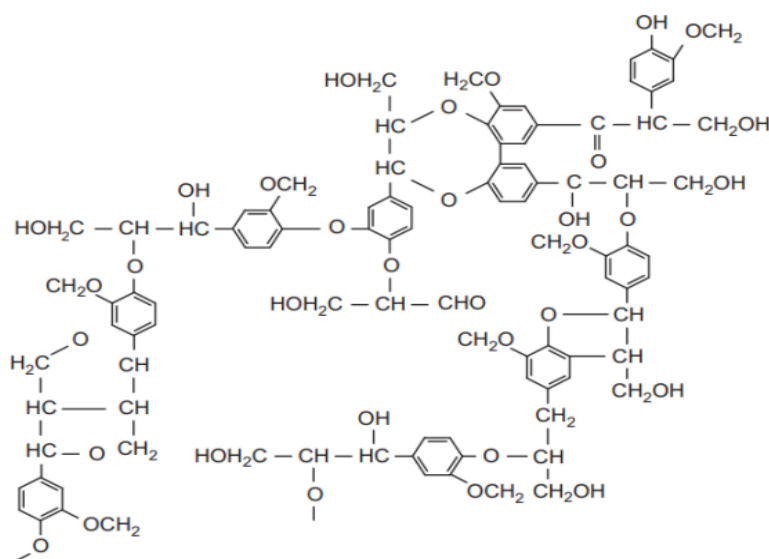
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)

2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ประกอบด้วย น้ำตาล 5 คาร์บอนอะตอมและ 6 คาร์บอนอะตอม เชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์สายสั้นและแตกกิ่งแขนง ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาล ได้แก่ น้ำตาลเพนโตส (pentose) ต่อกันด้วยพันธะ β -D-xylose α -L-arabinose น้ำตาลเฮกโซส (hexose) ต่อกันด้วยพันธะ β -D-mannose β -D-glucose α -D-galactose ลักษณะโครงสร้างแบบออสัณฐาน (amorphous) มีความแข็งแรงต่ำกว่าเซลลูโลสเมื่อเชื่อมต่อกับเซลลูโลสทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ไม่สามารถละลายน้ำได้แต่สามารถย่อยสลายได้โดยใช้กรด เบส หรือเอนไซม์ การนำน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไบโอเอทานอลจึงต้องใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตเอทานอลโดยมีน้ำตาล 5 คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต (Mood et al., 2013)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)

3. ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานที่มีโครงสร้างวงแหวนของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) เชื่อมต่อกันเป็นลักษณะ 3 มิติกับกลุ่มของโพรเพน (Propane) และวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) โดยมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐาน (Higuchi, 1990) แม้ว่าลิกนินในพืชหรือต้นไม้จะไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนชัดเจน แต่ลิกนินจะมีโครงสร้างจากหน่วยพื้นฐานหลัก 3 ส่วนคือ คอนนิเฟอริลแอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) พารา-คูมาริลแอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) และซินาปิลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) ลิกนินจะทำหน้าที่เป็นสารยึดหรือทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมประสานระหว่างเส้นใยและให้ความแข็งแรงกับเนื้อเยื่อของไม้ จึงมักพบลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลส โดยทั่วไปลิกนินจะไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นแต่จะมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คือจะมีความอ่อนตัวเมื่อเจออุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 120-200 °C



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Machmudah et al., 2017)

4. สารแทรก (extractives) เป็นส่วนประกอบในเนื้อไม้ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvents) เช่น อะซีโตน (Acetone) แอลกอฮอล์ (Alcohol) และคลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นต้น โดยทั่วไปสารแทรกในพืชหรือต้นไม้จะประกอบด้วยสารจำพวกกรดเรซิน (Resin acid) กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) น้ำมันระเหย (Volatile oil) สารประกอบเทอร์เพนอยด์ (Terpenoid compounds) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) สารแทรกบางประเภทจะมีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการแปรรูปอุตสาหกรรมไม้ (Smook, 1986)

2.4 ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

ขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust) เป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด เป็นของเสียในโรงงานที่เป็นพืช โดยเฉพาะการทำให้เกิดอาการอักเสบ แต่ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลายประการ ขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่มีหมู่โพลีฟีนอลซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกัน (<https://th.wikipedia.org/wiki/ขี้เลื่อย>)

ขี้เลื่อยถือว่าเป็นเศษวัสดุที่เหลือใช้จากโรงเลื่อยไม้หรือโรงเฟอร์นิเจอร์ซึ่งมีจำนวนมาก เช่นขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินณรงค์ ไม้กระถินเทพา ไม้กระถินยักษ์ สะเดาเทียม มะพร้าว เป็นต้น ทางบริษัทฯ ได้ส่งเสริมให้มีผู้ผลิตขี้เลื่อยภายในประเทศทั้งรายย่อยและรายใหญ่เพิ่มมากขึ้น ขี้เลื่อยสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนและนำมาแปรรูปเป็นขี้เลื่อยอัดแท่งได้อีกด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้มากขึ้น ขี้เลื่อยจะถูกนำมาคัดขนาดให้ได้ขนาดขี้เลื่อย วัดปริมาณความชื้นในขี้เลื่อย เพื่อให้ได้ขี้เลื่อยที่มีคุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (บริษัท เอนเนอจี 789 จำกัด, 2017)

ซึ่งความต้องการเชื้อเพลิงไม้ยางพาราสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้ราคาไม้ยางพาราสูงขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงไม้ยางพาราสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่

- ใช้เพาะเห็ด
- เป็นส่วนประกอบในการทำรูป
- ใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตโดยผ่านส่วนผสมและการบีบอัดขึ้นรูป เช่น ถาด จานรอง
- ใช้ผสมดินโดยตรงเพื่อให้ดินอมน้ำ
- ใช้รองพื้นคอกสัตว์หรือสัตว์เลี้ยงในบ้าน เช่น กระจ่าย หนูตะเภา
- ใช้เป็นวัสดุประกอบในการก่อสร้าง เช่น ไม้อัด อิฐ
- ใช้เป็นวัสดุในทางปฏิกิริยากรรมทำฟืน เมื่อนำมาผสมกาวแล้ว
- ทำของเล่นเด็ก

ปัจจุบันเชื้อเพลิงไม้ยางพาราเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดหรือที่เรียกกันว่า Wood pellet เป็นการนำเศษไม้เหลือใช้จากอุตสาหกรรมไม้ยางพารา ได้แก่ กิ่งไม้ยางพารา ที่ไม่สามารถนำมาแปรรูปได้ เชื้อเพลิงไม้ยางพารา จากโรงเลื่อยแปรรูปไม้ ชักบจากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ ไม้ มาบดให้เป็นผงเล็กๆ อบแห้ง แล้วนำมาเข้าเครื่องอัดแรงดันสูงให้ลิกนินในเนื้อไม้ละลายทำให้ผงไม้เกาะติดกับเป็นแท่งเล็กๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันและก๊าซธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในบ้านเรือนใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาฟิงในเมืองหนาวโดย Wood Pellet จัดเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังได้รับการยอมรับสูงสุดจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของเชื้อเพลิงชีวมวล มีความสะดวกสบายในการขนส่ง การนำไปใช้และการจัดเก็บ ให้ค่าความร้อนสูง ความชื้นต่ำกว่า 10 % ช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดปัญหาเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงและขาดแคลนในฤดูฝน



รูปที่ 2.4 รูปแสดงกระบวนการที่ทำให้เกิดเชื้อเพลิง

2.5 เชื้อเพลิงขยะ (RDF)

เชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) หมายถึง ขยะที่เผาไหม้ได้โดยการนำขยะมูลฝอยชุมชนมาผ่านกระบวนการบำบัดทางกายภาพ เช่น การคัดแยก การลดขนาด และการลดความชื้น เป็นต้น เพื่อให้ได้วัสดุที่มีค่าความร้อน ขนาด และคุณลักษณะตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สะดวก

ต่อการขนส่ง เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักหรือเชื้อเพลิงเสริมในภาคอุตสาหกรรมชุมชน หรือโรงผลิตพลังงานจากขยะชุมชน หรือเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชน(สมาคมวิชาชีพทางด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่กำหนดและจัดทำมาตรฐาน.ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.5 ระบบผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF)

หลักการทำงานของเทคโนโลยี RDF เริ่มจากการคัดแยกขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ (โลหะ แก้ว เศษ หิน) ขยะอันตรายและขยะรีไซเคิลออกจากขยะรวม โดยการคัดแยกมูลฝอยที่มีเหล็ก อลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบออกจากขยะมูลฝอย จากนั้นป้อนขยะมูลฝอยเข้าเครื่องสับย่อยเพื่อลดขนาด และป้อนเข้าเตาอบเพื่อลดความชื้น โดยการใช้ความร้อนจากไอน้ำหรือลมร้อนเพื่ออบขยะให้แห้ง ซึ่งจะทำให้น้ำหนักลดลงเกือบ 50% (ความชื้นเหลือไม่เกิน 15%) และสุดท้ายจะส่งไปเข้าเครื่องอัดเม็ด (Pellet) เพื่อทำให้ได้เชื้อเพลิงขยะอัดเม็ดที่มีขนาดและความหนาแน่นเหมาะสมต่อการขนส่งไปจำหน่ายเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในบางกรณีจะมีการเติมปูนขาว (CaO) เข้าไป ระหว่างการอัดเป็นเม็ดเพื่อควบคุมและลดปริมาณก๊าซพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

เชื้อเพลิงขยะ สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM E-75 ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดการที่ใช้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการจำแนกประเภทของเชื้อเพลิงขยะตามมาตรฐานของ ASTM การจำแนกประเภทของเชื้อเพลิงขยะตามมาตรฐานของASTM

ประเภท	ลักษณะและวิธีการผลิตขยะเชื้อเพลิง	ระบบการเผาไหม้
RDF1 MSW	คัดแยกขยะส่วนที่เผาไหม้ได้ออกมาโดยยังมีขนาดตามสภาพเดิมของขยะ	Stoker
RDF2 Coarse RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาบด หรือตัดขยะมูลฝอยอย่างหยาบๆ	Fluidized Bed Combustor, Multi Fuel Combustor

RDF3 Fluff RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาบด หรือตัดจนทำให้ร้อยละ 95 ของขยะมูลฝอยมีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว	Stoker
RDF4 Dust RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มา ผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปผงฝุ่น	Fluidized Bed Combustor, Pulverized fuel Combustion
RDF5 Densified RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแน่นมีลักษณะ เช่น แท่ง ก้อนกลม ลูกบาศก์ Pellets เป็นต้น	Fluidized Bed Combustor, Multi Fuel Combustor
RDF6 RDF Slurry	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอยู่ในรูปของเหลวเท่านั้น	Swirl Burner
RDF7 RDF Syngas	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) เพื่อผลิต Syngas ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซได้	Burner, Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)

ทั้งนี้การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะสามารถใช้ได้ในรูปของการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน โดยการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเชื้อเพลิงขยะเอง หรือขนส่งไปใช้ในที่อื่นได้นอกจากนี้ยังสามารถใช้เผาพร้อมกับถ่านหิน (Co-firing) เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยมีรูปแบบเตาเผาที่ใช้เปลี่ยนเชื้อเพลิงขยะให้เป็นพลังงานความร้อน ประกอบด้วย เตาเผาแบบตะกรับ (Stoker) เตาเผาแบบ ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustor) หรือเตาเผาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) (สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่กำหนดและจัดทำมาตรฐาน.ม.ป.ป.)

2.6 พลังงาน

พลังงาน หมายถึง ความสามารถในการทำงานซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งทีอาจให้งานได้ ได้แก่ พลังงานสิ้นเปลือง พลังงานหมุนเวียน และให้หมายความรวมถึงสิ่งทีอาจให้งานได้ เช่น เชื้อเพลิง ความร้อนและไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) ซึ่งพลังงานนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พลังงานกล พลังงานเคมี พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า และพลังงานนิวเคลียร์ตามกฎหมายการอนุรักษ์พลังงานกล่าวไว้ว่าพลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ แต่ไม่สามารถสร้างหรือทำลายให้สูญหายไปได้ เช่น (1) การเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (2) การเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานความร้อน ในส่วนของแหล่งพลังงานโดยปกติแหล่งพลังงานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท หลักๆ คือ

(1) พลังงานฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil energy or fossil fuels) เป็นแหล่งพลังงานจากใต้พื้นผิวโลก เกิดจากการถักถมของซากพืชและซากสัตว์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเป็นเวลานาน เช่น ถ่านหิน (Coal) น้ำมันดิบ (Crude oil) และก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) ข้อดีของพลังงานฟอสซิล คือ มีปริมาณมากและมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์แต่มีข้อจำกัด คือ เป็นพลังงาน

สิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ภายในระยะเวลาอันสั้นแต่ใช้ระยะเวลาหลายล้านปีสำหรับการเกิดขึ้นใหม่ นอกจากนี้การเผาไหม้จากฟอสซิลทำให้เกิดมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจก (Emsbo-Mattingly and Litman, 2016)

(2) พลังงานทดแทน (Alternative energy) หมายถึง พลังงานที่ใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม และการผลิตไฟฟ้าด้วยชีวมวล เพื่อใช้แทนก๊าซธรรมชาติหรือถ่านหิน ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้เรียก พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และชีวมวลว่าพลังงานทดแทน แต่ในกรณีที่ผลิตไฟฟ้าหรือความร้อนอยู่แล้วโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นเปลี่ยนมาใช้พลังงานลม จะเรียกว่าพลังงานหมุนเวียน

(3) พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) หมายถึง พลังงานที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ภายในระยะเวลาสั้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล และพลังงานชีวภาพ ซึ่งพลังงานเหล่านี้เมื่อใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ภายในระยะเวลาสั้นโดยธรรมชาติหรือมนุษย์

สถานการณ์ปัจจุบันมีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่จะเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีปริมาณความต้องการที่มากขึ้นจึงทำให้ไม่เพียงพอต่อปัจจุบัน ปัญหาดังกล่าวจึงส่งผลให้เกิดความตื่นตัวในด้านการใช้พลังงานทางเลือกมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อมาทดแทนโดยพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจและ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานแบบเดิมได้อย่างไม่จำกัด คือ พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล เป็นพลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ เนื่องด้วยประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งในแต่ละปีพบว่ามีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือวัตถุดิบที่หลงเหลือจากกระบวนการผลิตและแปรรูปต่างๆ รวมถึงวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบริโภคของมนุษย์ และสัตว์มีจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง แกลบ และชานอ้อย เป็นต้น ดังนั้นสำหรับประเทศไทยที่จะนำวัสดุเหล่านี้ มาใช้ในการผลิตเป็นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ อีกทั้งยังช่วยกำจัดปัญหาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เกษตรกรอีกด้วยและที่สำคัญคือช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายต่างประเทศ เพราะจะทำให้มีการนำเข้าของเชื้อเพลิงที่น้อยลง (เกษรา รัตตะวัน, 2561)

ชีวมวล (Biomass) สารอินทรีย์ทุกรูปแบบที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานได้ โดยไม่นับการกลายเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว โดยมากมาจากกากหรือเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรหรือจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ใบและยอดอ้อย เศษไม้ เส้นใยและกะลาปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว ส่าเหล้า ขยะมูลฝอย น้ำเสียจากโรงงาน หรือแม้กระทั่งมูลสัตว์ต่างๆ

2.7 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellet)

จัดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทหนึ่งของเชื้อเพลิงที่ทำจากไม้ ซึ่งโดยทั่วไปจะผลิตจากขี้เลื่อยหรือเศษวัสดุจากการผลิตไม้แปรรูป หรือเศษไม้ที่เหลือใช้จากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ และยังรวมถึงไม้จากการโค่นต้นไม้ที่ไม่จำเป็นหรือยืนต้นตาย การตัดแต่งกิ่งไม้ เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีการ

ผลิตในหลากหลายรูปแบบและยังมีคุณภาพสินค้าที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ ทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้า, การให้ความร้อนกับที่อยู่อาศัยและการใช้งานประเภทอื่นๆ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีความหนาแน่นสูงมากจากกระบวนการผลิต และจากกระบวนการให้ความร้อนสูงทำให้มีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 10%) ซึ่งช่วยให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด สามารถที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงมาก เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น สะดวกต่อการขนส่งและเป็นการเพิ่มมูลค่าของทรัพยากรธรรมชาติ และยังผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ให้พลังงานสูง สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไม้ฟืนเพื่อเป็นเชื้อเพลิง เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการใช้พลังงานจากไม้ อย่างมีประสิทธิภาพ (สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้, 2560)

2.8 หลักการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การอัดเม็ดเชื้อเพลิงเป็นการใช้แรงกดต่ออนุภาคเล็กๆ ทำให้เกิดการอัดแน่นพอเหมาะที่จะรวมตัวกันเป็นก้อน โดยอาศัยหลักการใช้แรงดึงดูด (Attractive force) ความแข็งแรง (Strength) เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างอนุภาคของสนามของแรงนี้ล้อมรอบด้วยอะตอมโมเลกุล และสารแขวนลอย เป็นการเชื่อมติดกันแน่นของอนุภาคที่ถูกกดอัดเข้าด้วยกัน กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ประกอบด้วยการใช้แรงดันแก้มวลของอนุภาค โดยอาจมีตัวประสานหรือไม่มีตัวประสานเพื่อให้มวลสารรวมตัวกันและยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงนั้น กลไกการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงถูกสร้างขึ้นด้วยการที่ระหว่างอนุภาคเกาะติดกันและแรงที่กระทำภายในอนุภาค คือ อนุภาคของชีวมวลถูกบีบอัดภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกว่า กลไกการเชื่อมประสานของแข็ง (Solids bridges) ทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันมากขึ้นและเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันจนถึงสภาวะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) การเชื่อมต่อประสานของเส้นใย (Fiber interlocking) และสภาวะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) เซลล์ของชีวมวลที่ประกอบด้วยช่องว่างภายใน (Vacuole) ขนาดใหญ่ก็จะถูกบีบอัดทำให้องค์ประกอบของผนังเซลล์คือเฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับอนุภาครอบๆ ขณะที่ภายใต้สภาวะความร้อนและแรงบีบอัดสูงลิกนินจะอ่อนตัวและไหลเป็นผลให้การแพร่ภายในโมเลกุลเปียกทั่วถึงและความซับซ้อนของสายโซ่โพลีเมอร์ระหว่างเส้นใยที่ติดกันดีขึ้น แรงกระทำระหว่างอนุภาคของของแข็ง (Attractive forces between solid particles) เมื่อชีวมวลถูกการบีบอัดทำให้ช่องว่างภายในของอนุภาคเล็กลง แรงกระทำภายในโมเลกุลมีหน้าที่ในการประสานกันของอนุภาค แรงภายในโมเลกุลที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ แรงดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะ (Valence attraction or electron sharing) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) และ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) และกลไกการเชื่อมประสานทางกล (Mechanical interlocking) เป็นกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นขณะที่มีการบีบอัดตัวของเส้นใยทำให้มีความแข็งแรงเชิงกลอย่างเพียงพอที่จะต้านทานแรงแตกตัวที่มีสาเหตุจากการกลับคืนสู่สภาพแบบยืดหยุ่นตามการบีบอัด (เกษรา รัตตะวัน, 2561)

2.9 ประเภทและคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชีวมวลที่ใช้ทำ ดังนี้

2.9.1 ประเภททำจากไม้

2.9.2 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้

2.9.3 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

เชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือชั้นคุณภาพ 1 และชั้นคุณภาพ 2

2.10 การผลิตเม็ดพลังงาน

เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบโดยการนำวัตถุดิบที่ได้นำไปตากแดดให้แห้งจนมีความชื้นสม่ำเสมอ (ความชื้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ของน้ำหนักแห้ง) เพราะอุณหภูมิที่สูงและแรงอัดในกระบวนการผลิตความชื้นส่วนเกินอาจทำให้เกิดปัญหาแต่ความชื้นต่ำยังเป็นหนึ่งในเหตุผลที่เม็ดพลังงานเผาผลาญได้ดี จากนั้นนำผงขี้เลื่อยที่แห้งแล้วใส่ลงในเครื่องอัดเม็ดพลังงานโดยการอัดหรือขึ้นรูปใช้แม่พิมพ์พิเศษแรงอัดสูง (45,000 PSI) เนื่องจากทำให้สารประกอบในไม้ (ลิกนิน) อ่อนตัวและจับตัวกันเป็นเม็ด เนื่องจากในกระบวนการอัดเม็ดจะไม่มี การเติมกาวเมื่ออัดเสร็จนำมาวางให้เย็นและนำไปเก็บในถุงเพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปในเม็ดพลังงาน (www.pelletheat.org)

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลคือ ขนาดรูตะแกรงสำหรับสับย่อยชีวมวล พบว่าถ้ารูตะแกรงมีขนาดเล็กจะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีความความทนทานเชิงกล (Mechanical durability) มากกว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปจากรูตะแกรงที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลต่อขนาดอนุภาคของชีวมวล เนื่องจากขนาดอนุภาคของชีวมวลที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดความแตกและหักได้ง่ายกว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กเพราะเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะมีการยึดเกาะกันน้อยกว่าชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคเล็กอีก ทั้งปริมาณความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นก้อนมวลและความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง กล่าวคือถ้าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความชื้นมากจะทำให้ความหนาแน่นและความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าต่ำ อุณหภูมิการขึ้นรูปแห้งเชื้อเพลิงเป็นค่าความร้อนที่ต้องเตรียมสำหรับเครื่องอัดชีวมวลก่อนการอัด โดยจะอุ่นเครื่องก่อนการอัดที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C และอัดเชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิ 75-85 °C เพราะเป็นช่วงที่ลิกนินของชีวมวลเริ่มมีการละลายและอ่อนตัวไหลออกจากเส้นใยผนังเซลล์มาผสมกับอนุภาคอื่นๆ ของชีวมวลขณะทำการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้ชีวมวลอัดรวมกันแล้วออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปลักษณะแท่งกลมได้ (เกษรา รัตตะวัน, 2561)

2.12 คุณสมบัติเฉพาะของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

เป็นหนึ่งในปัจจัยในการพิจารณาทั้งด้านการประยุกต์นำไปใช้งานจริงและด้านการค้าในเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีมาตรฐานกำหนดที่ใช้พิจารณาหลายมาตรฐานด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเฉพาะของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่สำคัญมี ดังต่อไปนี้

2.12.1. ความยาวและขนาดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นค่าที่บ่งบอกสัญญาณของเม็ดเชื้อเพลิง ชีวมวลซึ่งสามารถคาดเดาปริมาณของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ นอกจากนี้ขนาดและความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลยังช่วยป้องกันการเปื่อยค้อนบรรจุเคลื่อนย้าย

2.12.2 ค่าปริมาณเถ้า เป็นส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่ภายหลังจากการนำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เนื่องจากเถ้าถ่านที่ได้จากการเผาไหม้มีส่วนประกอบของโพแทสเซียม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และคลอรีน (Cl₂) โดยสารนี้จะไปติดอยู่ที่ผนังของท่อและห้องเผาไหม้ทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาอีกด้วย

2.12.3 ค่าปริมาณความชื้น เป็นปัจจัยที่สำคัญที่บ่งบอกปริมาณของน้ำที่แทรกอยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งปริมาณความชื้นนี้จะมีผลสำหรับการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถ้าปริมาณความชื้นมากความร้อนขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงจะสูญเสียไปกับระเหยน้ำออกไปจากเชื้อเพลิง นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อการเก็บรักษาเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปแล้ว ถ้าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดเชื้อราและการเปื่อยยุ่ยและมีการเสื่อมสภาพต่อการนำไปใช้งาน

2.12.4 ความหนาแน่น เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความอัดแน่นและปริมาณพลังงาน (Energy content) รวมไปถึงความแข็ง (Hardness) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้ใช้พื้นที่ในการเก็บมากและจะเกิดปัญหาในการนำไปใช้งานเพราะต้องใช้ในปริมาณมากเพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่เพียงพอต่อการใช้งาน ตรงกันข้ามกับเม็ดชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูง เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้ลดพื้นที่ในการจัดเก็บและการขนส่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.12.5 ค่าความร้อน เป็นค่าของพลังงานที่ถูกผลิตขึ้นต่อหน่วยมวลแสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล กล่าวคือชีวมวลดิบนั้นจะต้องมีค่าความร้อนต่ำส่งผลให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องใช้ปริมาณชีวมวลจำนวนมากในการเผาไหม้ แต่เมื่อชีวมวลดิบผ่านกระบวนการอัดแน่นของเครื่องอัดเม็ดได้เป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ส่งผลให้มีค่าความชื้นต่ำกว่า 10 % และทำให้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น (เกษรา รัตตะวัน,2561)

2.13 ตัวประสาน

ตัวประสานจะทำหน้าที่ในการยึดเกาะชีวมวลที่นำมาผลิตทำเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีลักษณะ เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ และตัวประสานยังทำหน้าที่ประสานระหว่างอนุภาคของชีวมวลสองชนิดให้ยึดติดกัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ความหนาแน่นระหว่างอนุภาคภายในของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ความต้านทานต่อการเค้นอัด ความต้านทานแรงกระแทกเพื่อลดการแตกหักของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงสมบัติการต้านทานน้ำเนื่องจากการยึดติดระหว่างผิวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่กล่าวมานั้นสามารถบอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

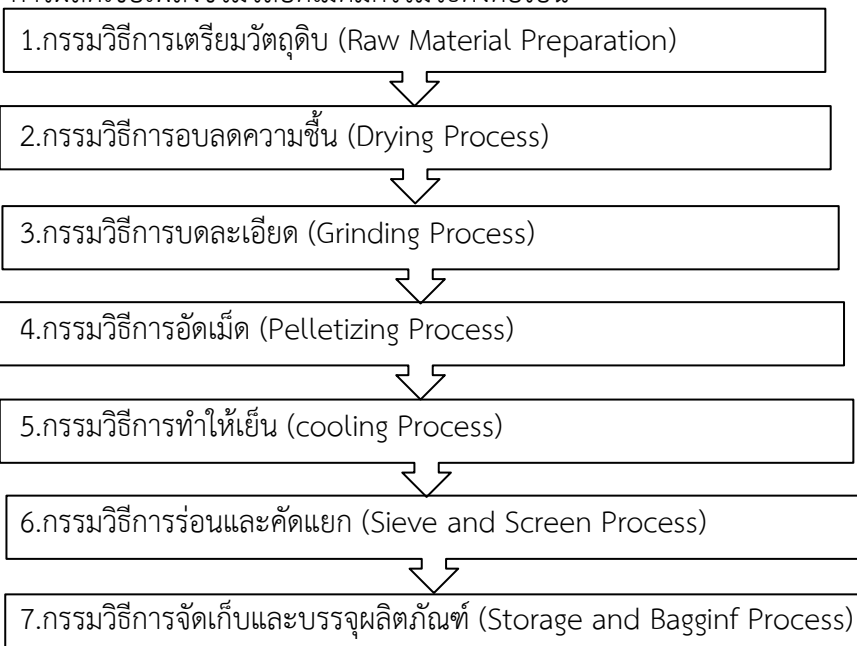
ตัวประสานที่ดี ควรจะมีลักษณะและคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ มีแรงยึดเกาะที่ดี ไม่ดูดความชื้น ไม่สึกกร่อนง่าย ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นหรือสารมลพิษขณะเผาไหม้ ราคาถูก หาได้ง่าย และเมื่อผ่านการเผาแล้วควรจะมีปริมาณขี้เถ้าที่น้อยที่สุด มิฉะนั้นจะทำให้ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง

ซีววมวลมีแนวโน้มลดลง ตัวประสานสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ สามารถเผาไหม้ได้ เช่น แป้ง, ทาร์, สาหร่าย, มูลสัตว์, เรซินตามธรรมชาติ และเรซินสังเคราะห์ และเผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ ดินเหนียว, โคลน, และซีเมนต์ เป็นต้น

การทำเม็ดเชื้อเพลิงซีววมวล โดยใช้ตัวประสานเป็นสารเติมแต่งเข้าไปในกระบวนการอัด เพื่อที่จะทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงยึดติดกันได้ดีขึ้น เมื่อมีการใช้ตัวประสาน จะทำให้ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดก็จะลดลงด้วย ซึ่งตัวประสานจะทำหน้าเสมือนกาวที่ใช้ยึดเกาะซีววมวลที่นำมาใช้ทำเชื้อเพลิงอัดแท่งและเพิ่มสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงซีววมวล เช่น ความต้านทานแรงกระแทก ความเค้นอัดรวมถึงสมบัติความต้านทานน้ำโดยส่วนใหญ่ตัวประสาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกที่ผลิตจากธรรมชาติ เช่น Corn starch, Gelatin เป็นต้น และพวกที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น เช่น Methyl cellulose (MC), Carboxyl methyl cellulose (CMC) เป็นต้น (เกษรา รัตตะวัน,2561)

กรรมวิธีการผลิตเชื้อเพลิงซีววมวลอัดเม็ด

การผลิตเชื้อเพลิงซีววมวลอัดเม็ดมีกรรมวิธีดังต่อไปนี้



2.14 ขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1. การเตรียมวัตถุดิบ เป็นการเตรียมวัตถุดิบให้มีขนาดเหมาะสมที่จะเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดด้วยกระบวนการสับหยาบและสับละเอียด การสับหยาบเป็นการตัด ลดขนาดซีววมวลให้มีขนาดเล็กลงจากเดิม โดยการสับหยาบทำให้ซีววมวลมีขนาดอยู่ในช่วง 1 – 5 เซนติเมตร การสับละเอียดเป็นการนำซีววมวลที่ผ่านการสับหยาบแล้วมาสับอีกครั้งเพื่อให้มีขนาดเล็กลง โดยจะนำซีววมวลป้อนใส่

เครื่องสับละเอียดและคัดแยกขนาดแยกตามขนาดของรูตะแกรงที่ใช้คัดขนาด ได้แก่ 2, 5 และ 9 มิลลิเมตร

2. การขึ้นรูป การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงเป็นการนำชีวมวลที่ผ่านกระบวนการสับละเอียดเข้าเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง (pelletizer) โดยมีการควบคุมความชื้นให้มีค่าประมาณ 10-15% ก่อนเข้าเครื่องขึ้นรูปอัดแท่งเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1) เครื่องขึ้นรูปชนิดแม่พิมพ์หมุน (Rotary die) 2) เครื่องขึ้นรูปชนิดลูกกลิ้ง หมุน (Rotary drum) และ 3) เครื่องขึ้นรูปชนิดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring die) โดย Rotary die และ Rotary drum เหมาะสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระดับชุมชน ใช้วัตถุดิบเป็นชีวมวลทางการเกษตร ไม่เหมาะที่จะใช้กับไม้ เนื้อแข็ง ชี้ได้ง่าย เนื่องจากมีกำลังอัดน้อยกว่าแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วน Rotary die เหมาะสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระดับอุตสาหกรรม (คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2557)

2.15 มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมีดังต่อไปนี้

1. เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (solid biofuels – biomass pellet) หมายถึง เชื้อเพลิงที่แปรสภาพมาจากการอัดชีวมวลให้มีลักษณะเป็นแท่งกลม รูปทรงกระบอก

2. ชีวมวลประเภททำจากไม้ (woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่ได้จากเนื้อไม้หรือเศษไม้ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้หรือไม้ที่เหลือใช้จากการใช้งานอื่นๆ ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมี

3. ชีวมวลประเภทไม้ไม่ได้ทำจากไม้ (non – woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่ไม่ได้จากเนื้อไม้หรือเศษไม้ อาจเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม

4. ชีวมวลประเภทไม้ไม่ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (blends woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่มีการผสมระหว่างชีวมวลจากไม้กับชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ เนื้อไม้ และเศษไม้

5. สารตัวเชื่อม (binder) หมายถึง สารที่ช่วยให้ในการจับตัวกันของเชื้อเพลิงชีวมวล

6. สารเติมแต่ง (additive) หมายถึง สารที่เติมลงในวัตถุดิบเพื่อเพิ่มหรือลดคุณสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น เพิ่มการ เผาไหม้ลดไอเสีย หรือ ช่วยในกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ (มอก. 2772–2560)

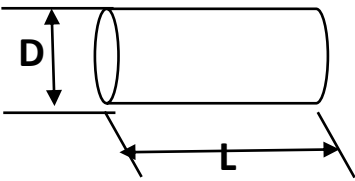
มาตรฐานสากลที่มีการใช้งานโดยทั่วไป จากการศึกษามาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของต่างประเทศพบว่ามาตรฐานที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.15.1 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของยุโรป ประเทศในยุโรปส่วนใหญ่ไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของตนเองไว้ ในปัจจุบันมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของบางประเทศในยุโรปจะมีรายละเอียดแตกต่างกันบางประการโดยเนื้อหาหลักส่วนใหญ่จะอ้างอิงกับมาตรฐานล่าสุดคือ EN 14961-2:2011 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Wood pellets for non-industrial use และ EN 14961-1:2010 Solid biofuels. Fuel specifications and classes.General ซึ่งมาตรฐานนี้เป็นการปรับปรุงจากมาตรฐาน CEN/TS 14961 "Annex A" Examples of specifications for high quality classes of solid biofuels

recommended for household usage โดยมาตรฐาน EN 14961-1: 2010 จะมีการกล่าวถึงความ ต้องการทั่วไปของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็ง และ EN 14961- 2:2011 จะกล่าวถึงเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดเม็ดที่ไม่ได้ใช้ในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการรับรองคุณภาพผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ENplus ซึ่งผู้ผลิตในด้านการค้าเชิงพาณิชย์หลายประเทศได้นำการรับรองคุณภาพนี้ไปใช้ กับผลิตภัณฑ์ของตนเอง รายละเอียดมาตรฐานของประเทศต่างๆ ในยุโรปมีดังนี้

1. ประเทศสหราชอาณาจักร กำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดตามมาตรฐาน ยุโรป ใช้ชื่อ BS EN 14961-1:2010 โดยเป็นการปรับปรุงจากมาตรฐาน DD CEN/TS 14961:2005 Fuel specifications and classes สำหรับมาตรฐาน EN 14961-1:2010 แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด EN 14961-1:2010 ของยุโรป

	Master table	
	Origin:	According Tables 1,2 or 3 Woody biomass (1): Herbaceous biomass (2): Fruit biomass (3): Blends and mixtures (4).
	Traded Form	Pellets
	L Length D Diameter Dimensions (mm)	
Normative	Dimensions (mm)	
	Diameter (D) and Length (L) ^a	
	D 06	6 mm ± 1.0 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm
	D 08	8 mm ± 1.0 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm
	D 10	10 mm ± 1.0 mm and 3.15 ≤ L ≤ 40 mm
	D 12	12 mm ± 1.0 mm and 3.15 ≤ L ≤ 50 mm
	D 25	25 mm ± 1.0 mm and 10 ≤ L ≤ 50 mm
	Moisture, M (w-% as received) prEN 14774-1. prEN14774-2	
	M 10	≤ 10 %
	M 15	≤ 15 %
Ash, A (w-% as dry basis) EN 14775		
A 0.5	≤ 0.5 %	

A 0.7	≤ 0.7 %	
A 1.0	≤ 1.0 %	
A 1.5	≤ 1.5 %	
A 2.0	≤ 2.0 %	
A 3.0	≤ 3.0 %	
A 5.0	≤ 5.0 %	
A 7.0	≤ 7.0 %	
A 10.0	≤ 10.0 %	
A 10.0+	≤ 10.0 %	
Mechanical durability, DU (w-% of pellets after testing) prEn 15210-1		
DU97.5	≤ 97.5 %	
DU96.5	≤ 96.5 %	
DU95.0	≤ 95.0 %	
DU95.0-	≤ 95.0 % (minimum value to be stated)	
Amount of fines, F (w-%. <3.15 mm) after production when loaded or packed. prEN 15149-1		
F 1.0	≤ 1.0 %	
F 2.0	≤ 2.0 %	
F 3.0	≤ 3.0 %	
F 5.0	≤ 5.0 %	
F 5.0+	≤ 5.0 % (maximum value to be stated)	
Additive (w-% of pressing mass)		Type and content of pressing aids,siagging inhibitors or any other additives have to be stated
Bulk density (BD) as received (kg/m ³) EN 15103		
BD 550	≥ 550 kg/m ³	
BD 600	≥ 600 kg/m ³	
BD 650	≥ 650 kg/m ³	
BD 700	≥ 700 kg/m ³	
BD 700+	≥ 700 kg/ (minimum value to be stated)	
Net calorific value as recelved, Q (MJ/kg or kWh/kg) EN 14981		minimum value to be stated
Sulphur,S (w-% of dry basis) prEN 15289		
S 0.02	≤ 0.02 %	Normative:

Normative/ informative	S 0.05	≤ 0.05 %	Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2) or If sulphur containing additives have been used.
	S 0.08	≤ 0.08 %	
	S 0.10	≤ 0.10 %	
	S 0.20	≤ 0.20 %	
	S 0.20+	> 0.20 % (maximum value to be stated)	
	Nitrogen,N (w-% of dry basis) prEN 15104		
	N 0.3	≤ 0.3 %	Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2)
	N 0.5	≤ 0.5 %	
	N 1.0	≤ 1.0 %	Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)
	N 2.0	≤ 2.0 %	
N 3.0	≤ 3.0 %		
N 3.0+	> 3.0 % (maximum value to be stated)		
Chlorine,Cl (w-% of dry basis) prEN 15289			
Cl 0.02	≤ 0.02 %	Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2)	
Cl 0.03	≤ 0.03 %		
Cl 0.07	≤ 0.07 %	Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)	
Cl 0.10	≤ 0.10 %		
Cl 0.10+	> 0.10 % (maximum value to be stated)		
Informative : Ash melting behaviour (°C) prEN 15370-1		Deformation temperature.DT should be stated	
<p>^a Amount of pellets longer than 40 mm (or 50 mm) can be 5 w-%. Maximum length for classes D06, D08 and D10 shall be < 45 mm.</p> <p>^b Fines shall be determined by using method prEN 15149-1.</p> <p>^c The maximum amount of additive is 20 w-% of pressing mass.Type stated (e.g.starch). If amount is greater than raw material for pellet is blend.</p>			

NOTE 5 Special attention should be paid to the ash melting behaviour for some biomass fuels, for example eucalyptus, poplar, short rotation coppice, straw, miscanthus and olive stone.

2. ประเทศสวีเดน กำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 คือ มาตรฐาน SS 18 71 20 มาตรฐานนี้ได้ทำการกำหนดคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไว้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1 เป็นมาตรฐานคุณภาพสูง กลุ่ม 2 และกลุ่ม 3 เป็นมาตรฐานคุณภาพรองลงมาตามลำดับ ดังแสดง ในตารางที่ 3 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดกลุ่ม 1 ใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาดเล็กที่ใช้ ภายใน คริวเรือน กลุ่ม 2 และกลุ่ม 3 ใช้งานทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพสูงมาก ผลิตรถยนต์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ในประเทศสวีเดนประมาณ 3 ใน 4 ผ่านมาตรฐานนี้ ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นโรงงานผลิตขนาดเล็กผลิต เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศสวีเดนที่ไม่ได้ตามมาตรฐานนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสวีเดน

Property	Test method	Unit	Group1	Group2	Group3
Length	Measure 10 pellets	Mm	Max 4x ϕ	Max 5x ϕ	Max 5x ϕ
Bulk density	ss 187178	Kg/m ³	>600	>500	>500
Durability	ss 187180	Fines	0.8 % <3 mm	1.5 % < 3 mm	1.5 % < 3 mm
Lower H _u	ss -ISO 1928	MJ/kg	>16.9	>16.9	>15.1
Ash	ss 187171	% w/w of DM	<0.7	<1.5	<1.5
Moisture	ss 187170	% w/w	<10	<10	<12
Sulphur	ss 187177	% w/w of DM	<0.08	<0.08	To be stated
Chlorides	ss 187185	% w/w of DM	< 0.03	< 0.03	To be stated
Ash melting	ss 187165/ISO540	°C	Initial temp.	Initial temp.	Initial temp.

ตารางที่ 2.4 แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศเยอรมันนี

Property class	Unit	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B	Analy SIS according to
Diameter	mm	6 (± 1) oder 8 (± 1) ²			°)
Length	mm	3.15 \leq L \leq 40 ³			°)

Bulk density	Kg/m ³	≥ 600			EN 15103
Net calorific value	MJ/kg	16.5≤Q≤19	16.3≤Q≤19	16.0≤Q≤19	EN 14918
Moisture content	w-%	≤ 10			EN 14774— 1
Fines (< 3.15 mm)	w-%	≤ 1			EN 15149-2
Mechanical durability	w-%	≥ 97.5 ⁴		≥96.5	EN 14775
Ash content	w-% ¹	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0	EN 15370-1
Ash melting behaviour	(DT) °C	≥ 1200	≥ 1100		EN 15289
Chlorine content	w-% ¹	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.03	EN 15289
Sulfur content	w-% ¹	≤ 0.03		≤ 0.04	EN 15104
Nitrogen content	w-% ¹	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	EN 15297
Copper content	mg/kg ¹	≤ 10			EN 15297
Chromium content	mg/kg ¹	≤ 10			EN 15297
Arsenic content	mg/kg ¹	≤ 1			EN 15297
Cadmium content	mg/kg ¹	≤ 0.5			EN 15297

Mercury content	mg/kg ¹	≤ 0.1	EN 15297
Lead content	mg/kg ¹	≤ 10	EN 15297
Nickel content	mg/kg ¹	≤ 10	EN 15297
Zinc content	mg/kg ¹	≤ 100	EN 15297
<p>¹) In water-free condition (wf).</p> <p>²) Dianctor must bc indicatcd.</p> <p>³) Maximum 1% of the pelletts longer than 40 mm.length 45 mm.</p> <p>⁴) If measured by the Lignotester.the threshold vaiue is ≥ 97.7 w-%.</p> <p>⁵) The corresponding CEN standard is currentiy being finalized.</p>			

4. ประเทศออสเตรีย มีการกำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไว้ คือ ÖNORM M1735 (briquettes and pellets) ประเทศออสเตรียก็เช่นเดียวกับประเทศเยอรมันนี่คือจะนำมาตรฐาน ยุโรป EN 14961-2 ไปใช้แทนมาตรฐานเดิมและจากการร่วมมือกับประเทศเยอรมันนี่ในการกำหนดระบบรับรองมาตรฐานที่เรียกว่า ENplus ดังนั้นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศออสเตรียจึงใช้มาตรฐานนี้เป็นตัวรับรองคุณภาพเช่นเดียวกับคุณภาพผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศเยอรมันนี่

5. ประเทศเดนมาร์ก ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มาตรฐานที่เกี่ยวข้องตามกฎหมายที่ใช้ คือ ข้อกำหนดสำหรับชีวมวล Biomass regulation (BEK nr 638 af 03/07/1997) ซึ่งมีกำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต้องผลิตจากไม้ที่สะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนใดๆ มีปริมาณกาวหลงเหลือได้ไม่เกิน 1% ไม่มีการกำหนดความชื้นหรือปริมาณเถ้าถ่านที่เป็นคุณสมบัติสำคัญของ เชื้อเพลิง และก็ยังไม่ได้กำหนดใช้มาตรฐานคุณลักษณะของเชื้อเพลิง (CEN/TS 14961: Fuel Specifications and Classes) ดังนั้นผู้ผลิตจึงใช้มาตรฐานหรือฉลากของตนเอง และเนื่องจากไม่มี มาตรฐานของประเทศจึงทำให้เกิดฉลากรับรองคุณภาพขึ้นในตลาด คือ FORCE Technology, Teknologisk Institut และ The Danish environment label "Svanemærket" (the Swan Mark)

6. ประเทศฟินแลนด์ในตลาดชีวมวลอัดเม็ดของประเทศฟินแลนด์นำมาตรฐานยุโรป EN 14961-2 มาใช้โดย เรียกว่าเป็นมาตรฐานสำหรับการใช้ชีวมวลอัดเม็ดที่ไม่ใช่ภาคอุตสาหกรรม

7. ประเทศอิตาลี ใช้ชีวมวลอัดเม็ดเฉพาะในการให้ความร้อนกับห้องขนาดเล็ก คุณภาพผลิตภัณฑ์จึงกลายเป็นส่วนสำคัญต่อการแข่งขันในตลาดภายในประเทศ มาตรฐานและการรับรอง

ผลิตภัณฑ์จึงเป็นตัวชี้ถึงคุณภาพให้ผู้บริโภคเข้าใจได้โดยตรง ระบบประกันคุณภาพที่เป็นที่รู้จักที่สุดคือ ชีว มวลอัดเม็ดฉลากทอง (Pellet Gold label) โดยระบบฉลากนี้อยู่บนพื้นฐานของมาตรฐาน CEN/TS 14961 ของยุโรป, DIN Plus ของประเทศเยอรมันนี, ÖNORM M 7135 norms ของประเทศออสเตรีย และ America Pellet Fuel Institut (PFI) คุณภาพที่กำหนดเป็นชีวมวลอัดเม็ดฉลากทองแสดงดัง ตารางที่ 5 ในปีค.ศ. 2011 สมาคม AIEL (The Italian Association for Wood Energy) ได้รับใบ อนุญาตให้ใช้ระบบมาตรฐาน EN 14961, ENplus และ EN 15234-1 สำหรับระบบ การบดแหล่งของห้วงโซ่อุปทาน

ตารางที่ 2.5 แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศอิตาลี

Parameter	Measure unit	Limit	Tolerance
Moisture content	%Fresh matter	<10	-
Ashes	%Dry matter	<=1	+0.05
LHV	MJ/kg	>=16.9	-0.2
Nitrogen (N)	%d.m.	<=0.3	-
Chlorine (Cl)	%d.m.	<0.03	-
Sulphur (S)	%d.m.	<0.05	-
Lead (Pb)	Mg/kg	<10	Maximum total Concentration of the 4 metals <= 20 mg/kg f.m.
Mercury (Hg)	Mg/kg	<0.05	
Cadmium (Cd)	Mg/kg	<0.5	
Chromium (Cr)	Mg/kg	<8	
Steric mass	Kg/m ³	>600	-
Mechanical durability	%	>97.7	-
Formaldehyde	mg/100g	<01.5	+0.5
Radioactivity	Bq/kg	<6	-
Binding agents	<2%		-

8. ประเทศเบลเยียม กำลังพัฒนามาตรฐานของตนเองและจะนำไปประกาศใช้เป็นพระราช กฤษฎีกาในเร็วๆนี้ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศเบลเยียมในปัจจุบันจะผ่านมาตรฐาน ของ ต่างประเทศเช่นของประเทศเยอรมันนี

9. ประเทศฝรั่งเศส ในอดีตคุณภาพของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศฝรั่งเศสมีความ หลากหลายและไม่แน่นอน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2009 ประเทศฝรั่งเศสได้ใช้การรับรองคุณภาพจาก NF Granulé Biocombustible QHP (Norme Française) และ DINplus ของประเทศเยอรมันนี และจากสมาคม ผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศฝรั่งเศส (Syndicat National des Producteurs de Granulés de Bois) โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจะสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้ ก) ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการรับรองคุณภาพจำนวน 34% ข) ผลิตภัณฑ์ที่มีผ่านการรับรองคุณภาพ DIN Plus จำนวน 32% ค) ผลิตภัณฑ์ที่มีผ่านการรับรองคุณภาพ NF Granulé Biocombustible QHP จำนวน 35% ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 การรับรอง ENplus ได้เริ่มใช้ขึ้น และประเทศฝรั่งเศสได้รับการจัดการตามมาตรฐานนี้โดย Propellets France

10. ประเทศนอร์เวย์ มีมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง 2 มาตรฐาน คือ NS 3166 Edition 1, 1999, Biofuel - Determination of mechanical strength of pellets. และ NS 3165 Edition 1, 1999, Biofuel โดยมีข้อกำหนดเช่นเดียวกับมาตรฐานของประเทศสวีเดน

11. ประเทศรัสเซีย ปัจจุบันประเทศรัสเซียยังไม่มีมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ผลิตขึ้นส่งออกไปยังประเทศในยุโรป ดังนั้นประเทศรัสเซียจึงใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ของประเทศที่ส่งออกไปเป็นหลัก เช่น ส่งออกไปยังประเทศเยอรมันนีก็ใช้มาตรฐานของประเทศเยอรมันนี เป็นต้น

12. ประเทศสเปน ได้ใช้การรับรอง ENplus ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากประเทศสเปนจะมีส่วนประกอบทางเคมีและพลังงานความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกายภาพยังต้องได้รับการปรับปรุง จากการทดสอบโดย CEDER ในปี ค.ศ. 2010 พบว่าผลิตภัณฑ์ 4 จาก 21 ตัวอย่างจากผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสเปนผ่านมาตรฐาน DIN plus และ ผลิตภัณฑ์ 3 จาก 21 ตัวอย่างผ่านมาตรฐาน EN 14961-2 ระดับ A1 และ A2 โดย 95.5% ไม่ผ่าน มาตรฐานด้านความทนทาน มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของยุโรปสามารถแสดงเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของยุโรป

Specifications	Unit	Austria	Sweden	Germany		Italy	EU
		ÖNORM M1735	SS187120	DIN 51731	DIN plus	CTI	EN14961- 1
Diameter	Mm	4 to 10		4 to 10	4 to 10	6	6 to 8
Length	Mm	≤ 5*D	≤ 4*D	≤ 50	≤ 5*D	D-4*D	3.15 -40
Bulk density	Kg/m ³	-	≥ 600	-	-	620- 720	3.15 -40
Fines	%wt.	≤ 1	-	-	-	≤ 1	≤ 1

Moisture content	%wt.	≤ 10	≤ 10	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Ash content	%wt.	≤ 0.5	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 0.7	≤ 0.7
Net calorific value	MJ/kg	≥ 1.8	≥ 16.9	17.5-19.5	≥ 18	≥ 16.9	16.5-19
Sulfur content	%wt.	≤ 0.04	≤ 0.08	≤ 0.08	≤ 0.04	≤ 0.05	≤ 0.03
Nitrogen content	%wt.	≤ 0.3	-	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.3
Cholorine content	%wt.	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.02
Arsenic	mg/kg	-	-	≤ 0.8			≤ 1
Cadmium	mg/kg	-	-	≤ 0.5			≤ 0.5
Chromium	mg/kg	-	-	≤ 8			≤ 10
Copper	mg/kg	-	-	≤ 5			≤ 10
Mercury	mg/kg	-	-	≤ 0.05			≤ 0.1
Lead	mg/kg	-	-	≤ 10			≤ 10
Zinc	mg/kg	-	-	≤ 100			≤ 100
Nickel	mg/kg	-	-	-	-	-	≤ 10
Additives	%	≤ 2		-	≤ 2		≤ 2

2.15.2 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา

1. ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดโดยสถาบัน Pellet Fuels Institute (PFI) ดังแสดงในตารางที่ 2.7 โดยมาตรฐานได้แบ่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไว้ 3 เกรด คือ เกรดพรีเมียม เกรดมาตรฐาน และเกรดใช้งานทั่วไป คุณสมบัติที่แตกต่างของแต่ละเกรดคือ ช่วงของค่าความหนาแน่น เเปอร์เซ็นต์เถ้า และความชื้นที่มีในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ตารางที่ 2.7 แสดงการกำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสหรัฐอเมริกา

Fuel property	Premium grade	Standard grade	Utility grade
Bulk density	40.0 -46.0	38.0 -46.0	38.0 -46.0
Diameter (inches)	0.230 -0.285	0.230 -0.285	0.230 -0.285
Diameter (mm)	5.84 -7.25	5.84 -7.25	5.84 -7.25

Pellet durability index	≥96.5	≥95.0	≥95.0
Fines (percent at mill gate)	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Inorganic ash percentage	≤1.0	≤2.0	≤6.0
Length (percentage >1.5inches)	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Moisture percentage (wet basis)	≤6.0	≤10.0	≤10.0
Choloride (parts per million)	≤300	≤300	≤300

2. ประเทศแคนาดา ยังไม่มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของตนเอง มาตรฐานที่ใช้ปัจจุบัน คือ มาตรฐานอเมริกา (PFI) และมาตรฐานยุโรป (ENplus)

2.15.3 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของเอเชีย ประเทศในเอเชียยังไม่มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด การนำเข้าและส่งออกจะ ใช้มาตรฐานของต่างประเทศหรือประเทศคู่ค้าเป็นหลัก คือ มาตรฐานยุโรป (EN 14961 และ ENplus) และมาตรฐานอเมริกา (PFI) (สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,2555)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560)

เชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชีวมวลที่ใช้ทำ ดังนี้

1). ประเภททำจากไม้ ,2). ประเภทไม้ได้ทำจากไม้ ,3). ประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

เชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ ดังนี้ 1). ชั้นคุณภาพ 1 และ 2). ชั้นคุณภาพ 2

ตารางที่ 2.8 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภททำจากไม้

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	(6 ± 1) mm (8 ± 1) mm (10 ± 1) mm (12 ± 1) mm	(6 ± 1) mm (8 ± 1) mm (10 ± 1) mm (12 ± 1) mm
ความคงทน	ตั้งแต่ 96.5 % w/w ถึง 99.0 % w/w	ตั้งแต่ 96.5 % w/w ถึง 99.0 % w/w
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 6 % w/w	ไม่เกิน 6 % w/w
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40.0 mm	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40.0 mm
ความยาวต่ำสุด	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm
ความยาวสูงสุด	ไม่เกิน 45.0 mm	ไม่เกิน 45.0 mm

ความยาวที่เกินกว่า	40 mm ไม่เกิน 1 % w/w	40 mm ไม่เกิน 1 % w/w
ความชื้น	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 10 % w/w
การกระจายตัวเมื่อร้อนผ่าน แรง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู ตะแกรง)	ไม่น้อยกว่า 97 % w/w (3.15 mm) ไม่น้อยกว่า 85 % w/w (2.0 mm) ไม่น้อยกว่า 40 % w/w (1.0 mm)	ไม่กำหนด
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 16.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 16.5 MJ/kg
เถ้า	ไม่เกิน 3 % w/w	ไม่เกิน 5 % w/w
สารเติมแต่ง	ไม่เกิน 3 % w/w	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของคลอรีน (Cl)	ไม่เกิน 0.1 % w/w	ไม่เกิน 0.1 % w/w
ส่วนประกอบของกำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.05 % w/w	ไม่เกิน 0.05 % w/w
ส่วนประกอบของไนโตรเจน (N)	ไม่เกิน 0.6 % w/w	ไม่เกิน 0.6 % w/w
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 2 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 1.0 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr)	ไม่เกิน 15 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.1 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของสังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 200 mg/kg	ไม่กำหนด

หมายเหตุ: *ชั้นคุณภาพ 1 อ้างอิงจากชั้นคุณภาพ B ของ ISO 17225-2*

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ±1 mm ของ ค่าระบุ)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ±1 mm ของ ค่าระบุ)
ความคงทน	ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w	ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 3 % w/w	ไม่เกิน 6 % w/w
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm สำหรับ D ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40.0 mm

	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 50 mm สำหรับ D ตั้งแต่ 12 mm ถึง 25 mm	
ความยาวต่ำสุด	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm
ความยาวสูงสุด (เฉพาะขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm) ไม่ เกิน 45.0 mm	ไม่เกิน 45.0 mm
ความยาวที่เกินกว่า 40 mm	ไม่เกิน 1 % w/w	ไม่เกิน 1 % w/w
ความชื้น	ไม่เกิน 15 % w/w	ไม่เกิน 15 % w/w
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg
เถ้า	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 18 % w/w
สารเติมแต่ง	ไม่เกิน 5 % w/w	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของคลอรีน (Cl)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w
ส่วนประกอบของกำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w
ส่วนประกอบของไนโตรเจน (N)	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ไม่เกิน 2.0 % w/w
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 1 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.5 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr)	ไม่เกิน 50 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 10 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.1 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของนิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 10 mg/kg	ไม่กำหนด
ส่วนประกอบของสังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 100 mg/kg	ไม่กำหนด

หมายเหตุ ^{ชั้นคุณภาพ 1} อ้างอิงจาก^{ชั้นคุณภาพ B} ของ ISO 17225-6

ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผู้ผลิต ภายในประเทศไทยกับ
มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของอเมริกาและยุโรป (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

คุณสมบัติเชื้อเพลิง	มาตรฐาน PFI Standard	มาตรฐาน EN 14961-1	Pellet ไม้ และ เปลือกไม้ ยูคา	ขี้เลื่อย
Bulk Density (kg/m ³)	609 – 737	≥600	664.87	654.54
Diameter (mm)	5.84 - 7.25	6 – 12	8.27	8.45

Pellet Durability Index	≥ 95.0	≥ 95.0	98.80	96.65
Fines, %	≤ 1.0	≤ 1.0	0.23	3.28
Inorganic Ash, %	≤ 2.0	≤ 0.7	4.70	2.5
Length, % greater than 1.50 inches	≤ 1.0	≤ 5	43.24	30.58
Moisture, %	≤ 10.0	≤ 10	10.40	9.1
Chloride	≤ 300 (ppm)	≤ 0.02 (% wt.)	0.06	<0.01
Heating Value (MJ/kg)	As-Rec. ± 2SD	Minimum value	16.38	17.23

ตารางที่ 2.11 ร่างมาตรฐานคุณลักษณะเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศไทย (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

คุณสมบัติ	เกรดธรรมดา	เกรดคุณภาพสูง
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 กก./ลบ.ม.	ไม่น้อยกว่า 600 กก./ลบ.ม.
เส้นผ่านศูนย์กลาง	ไม่น้อยกว่า 6 มม.และไม่เกินกว่า 12 มม.	ไม่น้อยกว่า 6 มม.และไม่เกินกว่า 12 มม.
ดัชนีความคงทน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของน้ำหนัก	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของน้ำหนัก
ฝุ่น	ไม่เกินกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก
ความยาว	ไม่น้อยกว่า 3.15 มม.และไม่เกินกว่า 40 มม.	ไม่น้อยกว่า 3.15 มม.และไม่เกินกว่า 40 มม.
ความยาวที่เกินกว่า 40 มม.	ไม่เกินกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก
ความชื้น	ไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (3,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	ไม่น้อยกว่า 16.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
ซีเถ้า	ไม่เกินกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก
ส่วนประกอบของสารคลอรีน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.02 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.02 ของน้ำหนัก

ส่วนประกอบของสารกำมะถัน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.08 ของ น้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.08 ของ น้ำหนัก
ส่วนประกอบของสาร ไนโตรเจน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.3 ของ น้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.3 ของ น้ำหนัก

มาตรฐานที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมด้านอากาศสำหรับกลุ่มผู้ใช้งานด้านอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทยนั้นยังไม่มีข้อกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดโดยเฉพาะ แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทหนึ่งจึงสามารถใช้ค่ามาตรฐานเช่นเดียวกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป โดยในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะต้องมีค่ามาตรฐานของอากาศที่ระบายออกจากโรงงานไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนดไว้ ดังตัวอย่าง ค่ามาตรฐานของอากาศที่ระบายออกจากโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างค่ามาตรฐานของอากาศที่ระบายออกจากโรงงานที่ใช้ เชื้อเพลิงชีวมวล

ดัชนี	หน่วย	มาตรฐาน
ฝุ่นละออง	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m ³)	ไม่เกินกว่า 320 ^{1/}
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ส่วนในล้านส่วน(ppm)	ไม่เกินกว่า 60 ^{1/}
ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนใน รูปไนโตรเจนออกไซด์	ส่วนในล้านส่วน(ppm)	ไม่เกินกว่า 200 ^{1/}
ก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์	ส่วนในล้านส่วน(ppm)	ไม่เกินกว่า 690 ^{1/}
ค่าความทึบแสง	%	ไม่เกินร้อยละ 10 ^{2/,3/}

หมายเหตุ

^{1/} มาตรฐานปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (4 ธันวาคม 2549)

^{2/} มาตรฐานค่าความทึบแสงของเขม่าควันจากสถานประกอบการที่ใช้หม้อไอน้ำ ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (9 ธันวาคม 2549)

^{3/} มาตรฐานค่าปริมาณเขม่าควันที่เจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของ หม้อน้ำของโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (4 ธันวาคม 2549)

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตได้ในประเทศไทย ร้อยละ 80 ส่งออก ขายไปยังต่างประเทศ ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น และเกาหลี เนื่องจากเป็นประเทศที่ให้ความสำคัญกับมาตรการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ มีนโยบายของประเทศที่ชัดเจนในการลดการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญ เพราะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน แต่เป็นพลังงานที่สะอาดกว่าพลังงาน ที่มาจากฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ สามารถปลูกทดแทนได้ในเวลาอันสั้นและมีต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดเม็ดน้อยกว่าถ่านหินและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า สมควรที่ภาครัฐควรให้การ

สนับสนุนการผลิตและการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้, 2560)

2.16 การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแบบอัดเม็ด โดยใช้ชีวมวลตัวอย่างสี่อัตราส่วน จากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดดำเนินการทดสอบคุณสมบัติตามที่สถาบันเชื้อเพลิงอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกา (Pellet Fuel Institute ; PFI) กำหนดมาตรฐานและวิธีการทดสอบของเม็ดเชื้อเพลิงไม้และเนื่องจากมาตรฐานและวิธีการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศสหรัฐอเมริกาได้อ้างอิงระเบียบวิธีทดสอบจากมาตรฐานอุตสาหกรรมของสหรัฐอเมริกา (ASTM) การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้มีวิธีการทดสอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณ สัดส่วน และคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

- ค่าความหนาแน่น (Density, kg/m³)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Diameter and Length ,mm.)
- ความชื้น (moisture, %)
- ปริมาณเถ้า (ash,%)
- ไอรระเหย (volatile matter,%)
- คาร์บอนเสถียร (fixed carbon,%)
- ค่าความร้อน (heating value, kg/kcal)

1.การหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Bulk Density)

สำหรับการหาค่าความหนาแน่น จะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของสหรัฐอเมริกา ASTM E 873

โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

- o คัดขนาดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงเดียวกัน
 - o บรรจุสารตัวอย่างลงในกล่องขนาดความกว้าง 305 มิลลิเมตร ความยาว 305 มิลลิเมตร และความสูง 305 มิลลิเมตร โดยปล่อยเชื้อเพลิงอัดเม็ดลงในกล่องด้วยความสูงจากปากด้านบนกล่องถึงจุดปล่อยเชื้อเพลิงอัดเม็ด 610 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อทำการเคาะกล่องที่บรรจุเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการปล่อยกล่องกระแทกพื้นจากความสูง 150 มิลลิเมตร จำนวน 5 ครั้ง พร้อมกับเติมแต่งเชื้อเพลิงจนกว่าจะเต็มกล่องพอดีปากกล่องด้านบน
 - o ชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักของกล่องที่บรรจุเชื้อเพลิงอัดเม็ด
 - o ทำการคำนวณความหนาแน่น (หน่วย กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- จากสมการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล} = (\text{น้ำหนักของกล่องและเชื้อเพลิง}-\text{น้ำหนักกล่องเปล่า})/\text{ปริมาตรกล่อง}$$

2. การหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Diameter and Length ,mm)

สำหรับการหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะหาค่าตามที่มาตราฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดไว้ดังนี้

o การหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทำการเลือกเชื้อเพลิงอัดเม็ดมา 5 ชิ้น อย่างสุ่มจากตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด เริ่มต้นประเมินและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิงอัดเม็ดแต่ละอันด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิงแต่ละชิ้นจะบันทึกด้วยค่าความละเอียด 0.001 นิ้ว ซึ่ง

ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะนำไปพิจารณากับความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกา คือ 1.5 นิ้ว ว่ามีส่วนต่างมากกว่าเท่าใด โดยค่าความต่างจะต้องไม่มากกว่าร้อยละ 1 เมื่อเทียบกับความยาวที่กำหนด

o การหาค่าความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เริ่มจากการสุ่มเลือกเชื้อเพลิงอัดเม็ดจำนวน 2.5 ปอนด์ (1.13 กิโลกรัม) จากตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด คัดแยกเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว (ความยาวเฉพาะ) โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ หรือ บล็อกสำหรับการวัดที่ผ่านการรับรองความถูกต้องเพื่อตรวจสอบความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถ้าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกวัดมีความยาวมากกว่าความยาวเฉพาะจะได้รับการคัดแยกไว้จากนั้นค่าความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะแสดงเป็นค่าร้อยละของมวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่าความยาวเฉพาะจาก ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่นำมาทดสอบค่าความยาวทั้งหมด

ค่าความยาว (>1.5 นิ้ว) = (น้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว/น้ำหนักตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ทดสอบค่าความยาวทั้งหมด) × 100

3. ความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นในเนื้อไม้ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำไม้ไปใช้ประโยชน์ความชื้นในเนื้อไม้มีด้วยกัน 2 ส่วนคือ น้ำภายในผนังเซลล์ที่เรียกว่า Bound Water และน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในเซลล์ที่เรียกว่า Free Water

ปริมาณความชื้นในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเป็นอย่างมากดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในชีวมวลจึงมีความจำเป็นและสำคัญมาก

เมื่อไม้แห้งน้ำในช่องว่างภายในเซลล์จะออกมาก่อน ปริมาณความชื้นของเนื้อไม้ ขณะที่ผนังเซลล์มีน้ำอย่างอิมมิตัวแต่น้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในเซลล์ไม่มีนั้น เรียกว่า จุดหมาด (Fiber Saturation Point , FSP) ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่สำคัญ เพราะน้ำในช่องว่างภายในเซลล์จะมีผลต่อน้ำหนักของไม้เท่านั้น แต่น้ำภายในผนังเซลล์จะมีผลต่อการหดตัว และพองตัวของเนื้อไม้ ซึ่งจุดหมาดของไม้จะมีค่าระหว่าง 20-30 %

สำหรับการหาค่าปริมาณความชื้นจะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ของสหรัฐอเมริกา ASTM E 871-72 โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

- นำถั่วชนไฟพร้อมฝาปิดอบที่อุณหภูมิ 103±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักด้วยค่า ความละเอียด 0.02 กรัม
- ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ในถั่วชนไฟพร้อมฝาปิดที่เตรียมไว้ จากนั้นชั่งน้ำหนักทั้ง ตัวอย่างและถั่วชนไฟด้วยค่าความละเอียด 0.01 กรัม
- นำไปอบที่อุณหภูมิ 103±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- นำถั่วชนไฟพร้อมตัวอย่างออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักด้วยค่าความละเอียด 0.01 กรัม
- นำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 103±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ จากนั้นนำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น 15-20 นาที แล้วนำออกมาชั่งและคำนวณหาค่าความชื้น จากสมการดังนี้

$$\% \text{ ความชื้น} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้} - \text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากอบแห้ง}) / (\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้}) \times 100$$

4. เถ้า (ash)

สำหรับการหาค่าปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ASTM D 1102 โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

- นำถั่วชนไฟไปอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเครื่องดูดความชื้นเป็นเวลา 15-20 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิง 2 กรัม ใส่ในถั่วชนไฟที่ชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบแห้งที่ อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- นำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปเผาให้ความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง
- นำมาชั่งน้ำหนักของถั่วชนไฟและตัวอย่างที่เหลือพร้อมฝา และคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการคำนวณดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเถ้า} = (\text{น้ำหนักถั่วชนไฟและเถ้า} - \text{น้ำหนักของถั่วชนไฟเปล่า}) / \text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้}$$

5. ไอรระเหย (volatile matter)

สำหรับค่าไอรระเหย ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดลอง ลงในถั่วชนไฟที่ทราบน้ำหนัก
 - นำถั่วชนไฟพร้อมตัวอย่างเข้าเตาเผา โดยเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที แล้วจึงนำออกมาจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
 - ชั่งน้ำหนักของถั่วชนไฟและตัวอย่างที่เหลืออยู่
- สูตรคำนวณน้ำหนักที่หายไป

$$\text{Weight Loss (\%)} = (A-B)/A \times 100\%$$

A = น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (กรัม)

สูตรคำนวณปริมาณไอระเหย

$$\text{Volatile Matter} = C-D$$

C = Weight Loss (%)

D = ความชื้น (%) ของตัวอย่าง

6. คาร์บอนเสถียร (fixed carbon)

ปริมาณคาร์บอนเสถียร เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวลหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิ 900 °C ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ซึ่งปริมาณคาร์บอนเสถียรคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

สูตรคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{ปริมาณของเถ้า} + \% \text{ปริมาณสารระเหย})$$

7. การหาค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

สำหรับการหาค่าความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นไปตามที่มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดไว้ดังนี้

- ชั่งตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 1,100 กรัม
- นำตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลร้อนด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว เพื่อแยกสิ่งปนออกจากตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยเก็บเฉพาะเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ค้างอยู่บน ตะแกรงร้อน
- ชั่งตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500±10 กรัม ด้วยค่าความ ละเอียด 0.1 กรัม (IW)
- นำตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500±10 กรัม ใส่ลงในเครื่องทดสอบความ ทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลโดยหมุนด้วยอัตรา 50±2 รอบ/นาที ทั้งหมด 500 รอบ (เป็นเวลา 10 นาที)
- นำตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลออกจากเครื่องทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล แบบตะเกียบ แล้วนำมา ร้อนด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว เพื่อแยก ส่วนที่แตกหักออกและชั่งน้ำหนักด้วยความละเอียด 0.1 กรัม (WPW)
- คำนวณค่าความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet Durability Index : PDI) ด้วยสมการ

$$\text{ค่าความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด} = (WPW/IW) \times 100$$

8. ค่าความร้อน (Heating value)

สำหรับการหาค่าความร้อน จะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ของสหรัฐอเมริกา ASTM E 711 โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

- ตัดลวดทองแดงยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งเหล็ก ด้านล่างของฝาบอมบ์
- ใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 1 กรัมลงไปในตัว
- วางถ้วยบนช่วงปลายเหล็กด้านฝาบอมบ์ จัดลวดให้สัมผัสกับตัวอย่าง เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ลงไปในตัวบอมบ์
- ประกอบฝาบอมบ์กับตัวบอมบ์ นำไปอัดออกซิเจนให้ได้ความดันประมาณ 30 บรรยากาศ นำไปวางในถังบรรจุบอมบ์
- ใส่ น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ปริมาตร 2 ลิตร ลงในถัง (Bucker) เสียบสายไฟสำหรับการจุดระเบิด 2 เส้น เข้ากับตัวบอมบ์ แล้วปิดฝาเครื่อง
- เปิดสวิทช์ อ่านอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์กับน้ำที่อยู่ในตัวหุ้ม (Jacket) เมื่ออุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน กดปุ่มจุดระเบิด จุดบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ จึงยุติการทดลอง
- นำตัวบอมบ์ออก ปลดสายออกจากตัวบอมบ์อย่างช้า ๆ
- ล้างฝาตัวบอมบ์และถ้วยที่บรรจุเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยน้ำกลั่น
- วัดความยาวลวดที่เหลือ แล้วป้อนเข้าสู่เครื่อง เครื่องจะทำการคำนวณแล้วพิมพ์ค่า ความร้อนของตัวอย่างออกมาทางเครื่องพิมพ์

2.17 ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

1. สะดวกและประหยัดค่าขนส่ง เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล ชนิดอื่น เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง
2. ควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเพราะมีขนาดเท่าๆกัน มีน้ำหนัก ค่อนข้างแน่นอน และเผาไหม้ได้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพของอัตรา การเผาไหม้ของเตาเผาสูงกว่าร้อยละ 80 ทำให้มีอัตราการเผาไหม้ที่สม่ำเสมอและสามารถนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติโดยการตั้ง เวลาล่วงหน้ามาใช้ทำให้สะดวก ไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงบ่อย เป็นการใช้ เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ
3. สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ ที่รู้จักในนาม The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) ยอมรับว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเป็นพลังงานการเผาไหม้ ที่สะอาด และเป็นพลังงานที่น่ากลับมาใช้ใหม่ได้โดยการปลูกไม้ ทดแทนเพื่อนำมาใช้ในการผลิต
4. การลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดปริมาณเถ้าที่เกิดจากการกระบวนการเผาไหม้เนื่องจาก มีปริมาณเฝ้าน้อยกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น
5. ให้พลังงานความร้อนที่มากกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่นๆ เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่ให้ค่าพลังงานสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซิน เนื่องจากมีค่าความชื้นที่ต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 2 กิโลกรัม ให้พลังงานเท่ากับน้ำมันเบนซิน 1 ลิตร

6. ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกพืชนำกลับไปใช้ในการสังเคราะห์แสง

2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุธีระ ประเสริฐสรพรพ์ ได้ศึกษาศักยภาพเชิงพื้นที่ของชีวมวลไม้ยางพาราในภาคใต้เพื่อการผลิตพลังงานชีวมวลจากสวนยางพาราเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ปัจจุบันใช้ชีวมวลไม้ยางพารามีขีดจำกัดเพียงแต่อุตสาหกรรมท้องถิ่น อาทิเช่น เผาอิฐ เผา ปูนขาว การลงทุนผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลต้องการการวางแผนที่รอบคอบโดยเฉพาะการรับซื้อเชื้อเพลิงและสภาพที่ตั้งที่เหมาะสม โครงการศึกษานี้ได้แปลงภาพถ่ายทางอากาศที่แสดงพื้นที่เพาะปลูกยางพาราของสถาบันวิจัยยางให้เป็นไฟล์ดิจิทัล แล้วนำภาพทั้งหมดจำนวน 110 ภาพ มาต่อเป็นภาพใหญ่แสดงพื้นที่ปลูกยางพาราของภาคใต้ จากนั้นใช้โปรแกรม AutoCAD ร่วมกับ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาปริมาณชีวมวลที่มีในพื้นที่ต่างๆ และคำนวณราคาซื้อเชื้อเพลิงชีวมวลที่โรงไฟฟ้าควรรับซื้อ ถ้าหากต้องการให้ธุรกิจผลิตพลังงานมีผลตอบแทนที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าราคาซื้อเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นกับความชื้นของเชื้อเพลิง ปริมาณที่มีอยู่รายปีตามพื้นที่ต่างๆ (area-base annual availability) ผลการตอบแทนการลงทุน (IRR) ที่ต้องการขนาดโรงไฟฟ้าและชนิดของโรงไฟฟ้าว่าจะเป็นแบบผลิตพลังงานร่วมความร้อนและไฟฟ้าหรือแบบผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าโรงไฟฟ้าแบบผลิตพลังงานร่วมจะสามารถรับซื้อเชื้อเพลิงชีวมวลได้ในราคาที่สูงกว่าโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียว ขนาดโรงไฟฟ้าขึ้นกับความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นอย่างมาก โรงไฟฟ้าจำเป็นต้องมีสวอยางล้อมรอบ ในรัศมี 25-35 กม. เพื่อให้มีแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มั่นคงสำหรับกำลังการผลิตไฟฟ้าในระดับ 20 เมกกะวัตต์ การศึกษาเพื่อ กำหนดตำแหน่งโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นได้อาศัยทางหลวงหมายเลข 41, 409 และ 404 เป็นหลัก โดยเลื่อนตำแหน่งโรงไฟฟ้าจากจังหวัดสุราษฎร์ธานีถึงจังหวัดนราธิวาสทุก ๆ ระยะทาง 50 กม. เพื่อหาตำแหน่งของโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่การลงทุน การศึกษาพบว่าตลอดระยะทางกว่า 700 กม. นั้น มีตำแหน่งที่เหมาะสมแก่การตั้งโรงไฟฟ้า 8 แห่ง มีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวม ทั้งสิ้นประมาณ 186.5 เมกกะวัตต์ โดยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 27 เมกกะวัตต์ ที่จังหวัดสงขลา และต่ำสุด 19.1 เมกกะวัตต์ ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี การศึกษานี้ได้สรุปว่าโรงไฟฟ้าชีวมวลไม้ยางพาราควรตั้งกระจาย (decentralized) ตามตำแหน่งที่มีพื้นที่ เพาะปลูกยางที่เหมาะสม

Magnus Stahl และ Jonas Berghel (2011) ในปัจจุบันเม็ดเงินเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ทำจากขี้เลื่อยหรือขี้กบ ในสวีเดนวัสดุเหล่านี้จะใช้ในระดับสูงสุด เมื่อความต้องการเม็ดเงินเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้น ปริมาณของขี้เลื่อยจะไม่เพียงพอและจะใช้วัสดุดิบหรือส่วนผสมอื่นๆ ในการผสม งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณขี้เลื่อยผสมกับขี้เค้กหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตน้ำมันที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีที่กลั่นจากน้ำมันสกัดเย็น ที่ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงานสิ่งแวดล้อมและการก่อสร้างที่มหาวิทยาลัย Karlstad ซึ่งเป็นหน่วยการผลิตเม็ดเงินเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ มีการผลิตเม็ดเงินเชื้อเพลิงชีวมวลและทดสอบความทนทานเชิงกล ความยาว ความหนาแน่นและความชื้นตามมาตรฐานเม็ดเงินเชื้อเพลิงชีวมวลของสวีเดน งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบว่าส่วนผสมของขี้เลื่อยสนและขี้เค้กส่งผลต่อการใช้พลังงานของเครื่องอัดเม็ดและความทนทานเชิงกลของเม็ดเชื้อเพลิงแบบผสมอย่างไร

ผลการวิจัยเห็นว่าการใช้พลังงานลดลงและปริมาณฝุ่นเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มของซีเค้กในเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

บัญญัติร์น โจลานันท์และคณะ (2011) ได้ศึกษานี้มุ่งพัฒนาเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งและรูปแบบการจัดการไมยราบยักษ์ด้านพลังงานทดแทนของชุมชน พบว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชันให้ปริมาณถ่านไมยราบยักษ์ประมาณร้อยละ 20 โดยมวลและการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 15-36 ค่ากำมะถัน เถ้า ความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ที่ทดสอบอยู่ในช่วงร้อยละ 0.17-0.20±0.01, 6.8-20.1±0.61-1.01, 7.0-8.6±0.52-0.84, 27.3-32.8±0.71-1.21 และ 44.5-53.5±0.82-1.27 ตามลำดับ เชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ผสมแป้งมันที่ร้อยละ 6 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมของการศึกษานี้โดยให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด (5,432±101.5 cal/g) และประสิทธิภาพการใช้งานเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (มผช.238/2547) การศึกษาพบว่าอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์เท่ากับ 5.5 และ 1.2 ปี

วรกร อธิรินทอง และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมน้ำและน้ำมันพืชต่อคุณสมบัติความหนาแน่น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความทนทานทางกล โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ ฟางข้าวและใบอ้อย พบว่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดแปรผกผันกับปริมาณน้ำมันพืชที่เติมใส่ไปในกระบวนการผลิต การเติมน้ำมันพืชปริมาณ 0.83 % ส่งผลให้เม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าวมีความหนาแน่น 493 kg/m³ และมีความทนทานทางกล 99.30 % เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากอ้อยมีความหนาแน่น 579 kg/m³ ความทนทานทางกล 99.47 % ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าวและใบอ้อยมีค่า 13.97 และ 15.93 MJ/kg ตามลำดับ

Mário et al. (2018) ได้ศึกษาศักยภาพของของเสียลิกโนเซลลูโลส เช่น กากถั่วเหลือง ชานอ้อย และซีเลื่อยยูคาลิปตัส สำหรับการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่เน้นการผลิตพลังงานความร้อน และจำแนกตามมาตรฐานการค้าโดยมีการประเมินคุณสมบัติค่าความร้อน ความหนาแน่น ความหนาแน่นของพลังงาน และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ โดยผลิตเม็ดเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ในเครื่องอัดเม็ดแบบระนาบแนวนอน วัสดุดิบที่ใช้ ซีเลื่อยยูคาลิปตัสและกากถั่วเหลืองผสมในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 50% ซีเลื่อยยูคาลิปตัส/50% กากถั่วเหลือง, 20% ซีเลื่อยยูคาลิปตัส/80% กากถั่วเหลือง, 50% ชานอ้อย/50% กากถั่วเหลือง และ 20% ชานอ้อย/80% กากถั่วเหลือง นำมาเปรียบเทียบกับเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากถั่วเหลือง 100% ชานอ้อย 100% และเม็ดเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากไม้สน ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (ความชื้น มวล ความหนาแน่น) คุณสมบัติทางพลังงาน (ความร้อนค่าและความหนาแน่นของพลังงาน) คุณสมบัติทางเคมี (สารระเหย คาร์บอนคงที่และเถ้า) และคุณสมบัติทางกล (ความแข็งและความทนทานทางกล) ผลการทดสอบพบว่า ชานอ้อย 100% มีค่าที่สูงได้แก่ ความทนทานทางกล (96.64%) ความแข็ง (39.46 kgf) และค่าปริมาณฝุ่นที่ต่ำ (0.18%) เม็ดเชื้อเพลิงผสม มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ความทนทานเชิงกล ส่วนค่าความแข็ง ปริมาณฝุ่นและซีเลื่อยมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดเชื้อเพลิงกากถั่วเหลือง 100% ซีเลื่อยยูคาลิปตัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณซีเลื่อยลดลงเมื่อเทียบกับกากถั่วเหลือง 100% (จาก 26.72 เป็น 14.03%) เม็ดเชื้อเพลิงชานอ้อยที่ผลิตมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเม็ดเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์

จุฑาภรณ์ ชนะถาวรและ กนกวรรณ ภูมิวนิชกิจ (2019) ได้ทำการศึกษาหาปริมาณแป้งที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ทำการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่มีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด 5 สัดส่วน (100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 และ 0 : 100) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบและสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดการทดลองพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 กับกากกาแฟ ในสัดส่วน 100 : 0 จะมีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดีที่สุด ชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตจากกากกาแฟมีคุณภาพสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ เพียงอย่างเดียว ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟมีค่าสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงสูงสุด คือ มีค่าความหนาแน่น $0.9699 \pm 0.0045 \text{ g/cm}^3$ ค่าดัชนีการแตก ร่วนร้อยละ 92.6510 ± 0.2102 ค่าสมบัติทางความร้อน $17.2772 \pm 0.0319 \text{ MJ/kg}$ และประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร้อยละ 16.59 ± 0.02 ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาการผสมระหว่างเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด พบว่าสัดส่วนการผสมที่ดีที่สุดคือ 25 : 75 ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ ทำให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงสุด คือให้ค่าสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน $17.1544 \pm 0.017 \text{ MJ/kg}$ และ ร้อยละ 16.48 ± 0.01 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความชื้น พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชีวมวลที่กำหนด จากการศึกษาสรุปได้ว่าเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟมีสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน สามารถนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้

นภาดา วิเชียรพงษ์และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยใช้วัตถุดิบหลักที่นำมาผลิต คือ ชูยมะพร้าว ซึ่งเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรที่พบมากในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกและเป็นการนำเอาของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำเอาชูยมะพร้าวผสมกับวัสดุเหลือใช้ชนิดอื่นๆ ที่ทำได้ง่ายในพื้นที่ชุมชน ได้แก่ มูลไก่ มูลวัว มูลเป็ด แกลบ ชี้เลื่อย และใบชะมวง ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 60 : 40 มาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดให้เป็นแท่งกลมมีขนาดความยาว 1 – 2 mm. และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 mm. รวมทั้งศึกษาส่วนผสมของตัวประสานที่นำมาใช้ ได้แก่ น้ำแป้งเปียกจากมันสำปะหลังเหลืองซึ่งคุณภาพต่ำจากอุตสาหกรรมแป้งและกากน้ำตาลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้ ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าความร้อน ค่าเถ้า ค่าสารระเหย และค่าคาร์บอนคงตัวจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3,583–4,225 kcal/kg โดยเมื่อนำชูยมะพร้าวมาใช้ร่วมกับชี้เลื่อยที่อัตราส่วน 60:40 และใช้น้ำแป้งเปียกเป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียวจะทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 4,225 kcal/kg นอกจากนี้พบว่าค่าความชื้นและค่าเถ้าของ เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง และถ่านไม้หุงต้ม

ณพัชร บัวฉุน (2020) ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากขยะย่อยสลายได้ผสมกับกากไขมัน ด้วยวิธีการอัดแท่งที่ไม่ผ่านความร้อนให้เป็นแท่งเชื้อเพลิง ทำการศึกษาระยะเวลาในการอบแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 20 40 และ 60 นาที และทำการศึกษาอัตราส่วนของกากไขมัน และ ขยะ ย่อยสลาย ได้แก่ เศษผักและเศษผลไม้ เศษอาหาร

และเศษหญ้าและเศษใบไม้ และทำการศึกษาคุนสมบัติของ แท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน ความชื้น สารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และเถ้า พบว่า อัตราส่วนที่ เหมาะสมที่มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงโดยรวมเหมาะสมที่สุดเมื่อทำการพิจารณา ร่วมด้วย คือ กากไขมัน : เศษหญ้า และเศษใบไม้ (75:25) ที่ให้ค่าความร้อน 6,892 kcal/kg ความชื้นร้อยละ 3.39 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 14.47 สารระเหยร้อยละ 70.42 และเถ้าร้อยละ 3.21 โดยแท่งเชื้อเพลิงที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงประเภทฟืน ถ่านไม้ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่เป็นวัสดุเชื้อเพลิง เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับวัสดุ เหล่านั้น และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน (มผช. 238/254) และมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

วัฒนณรงค์ มากพันธ์และคณะ (2021) ได้ศึกษาคุนสมบัติทางด้านพลังงานและประเมินมูลค่าทางด้านเศรษฐกิจของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุดและไม้ยางพารา โดยมีอัตราส่วนผสมดังนี้ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 และ 0:100(ร้อยละโดยน้ำหนัก) ซึ่งให้ปริมาณความร้อนเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 7,361.55 แคลอรีต่อกรัม คือ อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก, ปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 96.67 คือ อัตราส่วน 100:0 โดยน้ำหนัก, ปริมาณสารระเหยได้เฉลี่ยมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 95.73 คือ อัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก, ปริมาณเถ้าเฉลี่ยน้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 10.68 คือ อัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนักและปริมาณความชื้นเฉลี่ยน้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 5.32 คือ อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก การวิเคราะห์ห้มูลค่า ทางด้านเศรษฐกิจของการผลิตถ่านอัดแท่ง เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิต โดยต้นทุน น้อยที่สุดต่อการผลิตถ่านอัดแท่ง 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 9.22 บาทต่อกิโลกรัม คือ อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก

ฐิติพร เจาะจงและคณะ (2021) ได้ผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากเศษใบกาสะลองเหลือทิ้งจากการตัดแต่งกิ่งภายใน มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม โดยทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง ตามมาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุ อเมริกัน (American Society for Testing and Materials; ASTM) ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความชื้น ค่าปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และทดสอบค่าคาร์บอน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ของสารอินทรีย์ จากผลการทดสอบ พบว่า ใบกาสะลองมีค่าความร้อนเฉลี่ย 4,467.41 แคลอรีต่อกรัม มีค่าความชื้นเฉลี่ย ร้อยละ 1.51 มีค่าปริมาณเถ้าเฉลี่ยร้อยละ 4.01 มีค่าปริมาณสารระเหยเฉลี่ยร้อยละ 94.59 และมีร้อยละของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนเท่ากับ 44.80 6.05 และ 2.31 ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่า ใบกาสะลอง มีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีและยังเป็นการนำเศษใบไม้ที่เหลือจากการตัดแต่งกิ่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งทดแทนถ่าน จากไม้ฟืนที่ใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปัญหาขยะและมลพิษที่เกิดจากใบไม้เหลือทิ้งจากการตัดแต่งกิ่งอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

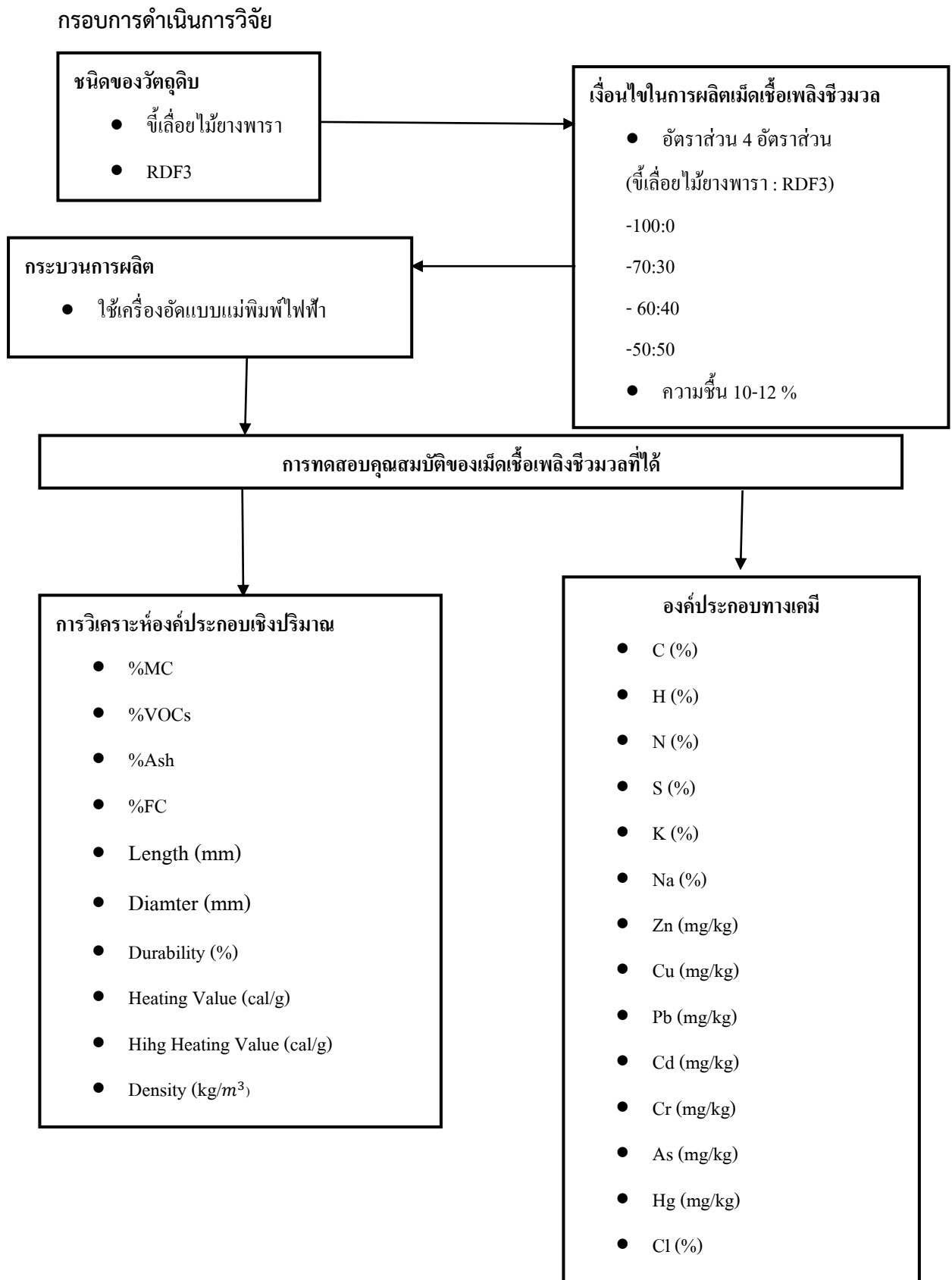
งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงผสมชีวภาพมีการใช้ชีลื้อยไม้่างพาราและของเสียจากหลุมฝังกลบขยะ(RDF3) ที่อัตราส่วนในการผสม 4 อัตราส่วนดังนี้ 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์ระบบไฟฟ้าซึ่งรายละเอียดการดำเนินงาน มีดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.2 กระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีว

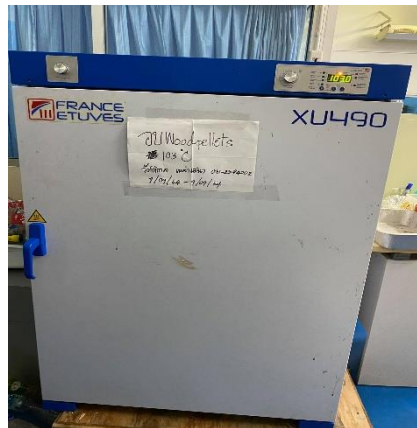
มวลที่ได้



3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.1.1 การเตรียมขี้เลื่อยไม้ยางพารา

นำขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการอบน้ำยาจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ บริษัท พี เอ็น เอส จังหวัดสุราษฎร์ธานี เข้าตู้อบ อุณหภูมิ 103 °c เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้น 12% -15% ดังแสดงในรูป 7



รูปที่ 3.1 รูปตู้อบความร้อน ใช้ในการอบขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่อุณหภูมิ 103 °c



รูปที่ 3.2 กระบวนการอบขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 103 °c เพื่อให้มีความชื้น 12% -15%

3.1.2 การเตรียม RDF3

นำขยะ RDF3 จากบริษัท SCG จังหวัดนครศรีธรรมราช ทำการย่อยด้วยเครื่องย่อยพลาสติกให้มีขนาดเล็กเท่ากับขี้เลื่อยไม้ยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแสดงเครื่องย่อยพลาสติก



รูปที่ 3.4 แสดงขนาด RDF3 ก่อนย่อย
หลังย่อย



รูปที่ 3.5 แสดงขนาด RDF3

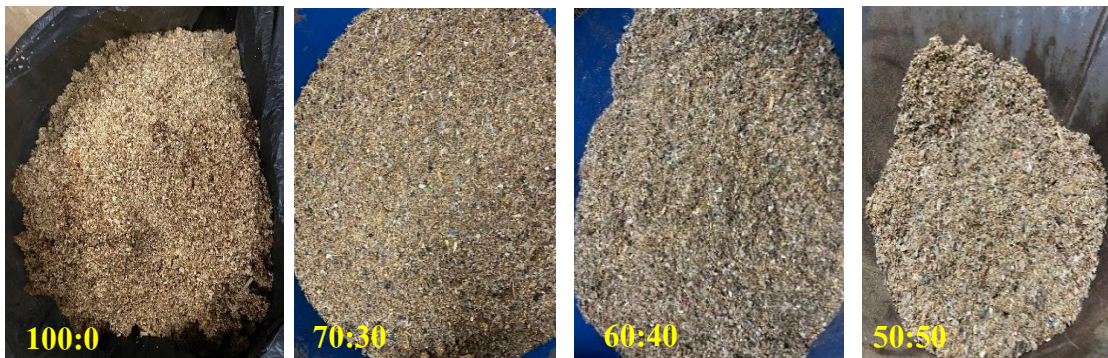
3.2 กระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดอัตราส่วนในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล 4 อัตราส่วน (100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50) การอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจะอัดโดยเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า ซึ่งก่อนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจะต้องทำการเดินเครื่องเพื่อให้แผ่นรังผึ้งสำหรับการอัดขึ้นรูปมีความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 - 80 °C เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะมีผลทำให้ลิกนินในชีวมวลละลายมาเชื่อม ประสานอนุภาคของชีวมวลเข้าด้วยกัน และทำให้สามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ จึงนำวัตถุดิบที่ผสมแล้ว แสดงดังรูปที่ 11 เทลงไปในเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์ระบบไฟฟ้าเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงดังรูปที่ 12 เมื่อได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่

มีรูปร่างสมบูรณ์ จึงนำภาชนะไปรองรับ แสดงดังรูปที่ 13 หลังจากที่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลออกจากเครื่องอัดแล้ว จะต้องนำมาผึ่งให้เย็นเพื่อให้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งขึ้นและไม่แตกหักง่ายขณะบรรจุหรือเคลื่อนย้าย ซึ่งการผึ่งเย็นจะผึ่งด้วย การวางตากลม หรืออาจใช้พัดลมเป่าให้เย็นก็ได้ตามความเหมาะสมแสดงดังรูป 14 เมื่อทำการผึ่งเย็นแล้ว จะทำการบรรจุถุงเพื่อป้องกันความชื้นและนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้ต่อไป แสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 3.6 รูปเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 รูปแสดงวัตถุดิบที่ผสมเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.8 รูปแสดงการนำวัตถุดิบใส่ในเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 รูปแสดงการนำภาชนะมารองรับเม็ดชีวมวลที่สมบูรณ์



รูปที่ 3.10 รูปแสดงการนำเม็ดชีวมวลที่ได้ตั้งไว้ให้เย็น



รูปที่ 3.11 การนำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลบรรจุใส่ถุง เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติ

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้

3.3.1. การหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง (Diameter,mm and Length,mm)

สำหรับการหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง จะหาค่าตามมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดไว้ มีวิธีดังนี้

- 1) ทำการสุ่มเลือกเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมา 5 ชิ้น
- 2) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละอันด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่มีค่าความละเอียด 0.001 นิ้ว แล้วจดบันทึกค่าของแต่ละอัน



รูปที่ 3.12 การวัดความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 3.13 การวัดความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

3.3.2 ค่าความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นในเนื้อไม้ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยความชื้นในเนื้อไม้แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ น้ำภายในผนังเซลล์ (Bound Water) และน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในเซลล์ (Free Water)

สำหรับการหาค่าปริมาณความชื้นจะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของสหรัฐอเมริกา ASTM E871-72 ที่ได้กำหนดไว้ มีวิธีดังนี้

- 1) นำถ้วยทนไฟไปอบที่อุณหภูมิ 103 ± 1 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำออกจากตู้อบตั้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักด้วยค่าความละเอียด 0.02 g
- 2) ชั่งเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลน้ำหนัก 50 g ใส่ในถ้วยทนไฟที่เตรียมไว้ จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างและถ้วยทนไฟด้วยค่าความละเอียด 0.01 g
- 3) นำไปอบที่อุณหภูมิ 103 ± 1 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 4) นำถ้วยทนไฟพร้อมตัวอย่างออกจากตู้อบมาตั้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก ด้วยค่าความละเอียด 0.01 g
- 5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 103 ± 1 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงคงที่ จากนั้นตั้งไว้ให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น 15 - 20 นาที แล้วชั่งน้ำหนักหลังอบและคำนวณหาค่าความชื้นดังสมการต่อไปนี้

$\% \text{ ความชื้น} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้} - \text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากอบแห้ง} / \text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้}) \times 100$



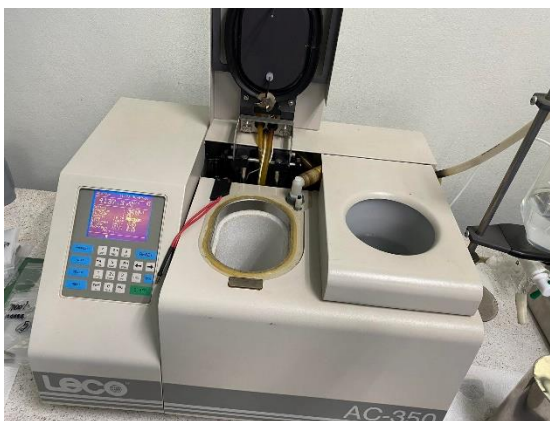
รูปที่ 3.14 การอบหาค่าความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

3.3.3 ค่าความร้อน (Heating value)

สำหรับการหาค่าความร้อนจะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของสหรัฐอเมริกา ASTM 711 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ตัดหลอดทองแดงที่มีความยาวประมาณ 10 cm ผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งเหล็กด้านล่างของฝาบอมบ์
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 1 g แล้วใส่ลงไปถ้วย
- 3) นำถ้วยวางช่วงปลายเหล็กด้านฝาบอมบ์ ให้ลวดสัมผัสกับตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลเติมน้ำกลั่นลงไปในตัวบอมบ์ 1 ml

- 4) ประกอบฝาบอมบ์กับตัวบอมบ์ นำไปอัดออกซิเจนให้ได้ความดันประมาณ 30 บรรยากาศ นำไปวางในถังบรรจุบอมบ์
- 5) ใส่น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 24 °C ปริมาตร 2 L ลงในถัง (Bucker) เสียบสายประจุไฟฟ้าที่ใช้สำหรับจุดระเบิด 2 เส้น เข้ากับตัวบอมบ์ แล้วปิดฝาเครื่อง
- 6) เปิดสวิตช์ อ่านอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์กับน้ำที่อยู่ในตัวหุ้ม (Jacket) เมื่ออุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียง กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิขึ้นจนกระทั่งคงที่
- 7) นำตัวบอมบ์ออก ปลดปล่อยก๊าซออกจากตัวบอมบ์อย่างช้าๆ แล้วล้างฝาบอมบ์และถ้วยที่บรรจุเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยน้ำกลั่น
- 8) เครื่องจะทำการคำนวณแล้วพิมพ์ค่าความร้อนของตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลออกมาทางเครื่องพิมพ์



รูปที่ 3.15 รูปเครื่อง Bomb calorimeter

3.3.4 การประเมินประสิทธิภาพความร้อน

การทดลองแบบวิธีการต้มน้ำ (water boiling test, WBT) เป็นการทดสอบที่วัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทำน้ำให้เดือดตามเงื่อนไขที่กำหนด

- 1) เติมน้ำลงในภาชนะ ซึ่งเป็นหม้อสแตนเลส ปริมาณน้ำ 1,000 g
- 2) ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ให้สูงจากก้นภาชนะ ประมาณ 5 cm เพื่อวัดอุณหภูมิขิงน้ำก่อนการทดสอบ
- 3) นำเม็ดเชื้อเพลิงบรรจุบริเวณตรงกลางของเตา พร้อมจุดเตาทิ้งไว้ 5 นาที
- 4) นำภาชนะที่เตรียมไว้แล้ววางบนเตาและบันทึกอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่ที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนอุณหภูมิของน้ำมีค่าประมาณ 98 °C จากนั้นทำการบันทึกเวลาขณะนั้นไว้ แล้วทำการต้มน้ำต่อไปจนเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหมด จึงทำการหยุดเวลา
- 5) ชั่งน้ำหนักของน้ำในภาชนะที่เหลือ จดบันทึกข้อมูล

การทดสอบประสิทธิภาพเตาจะใช้วิธีการทดสอบแบบ Boiling test จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ n คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา , %

Q_u คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง , MJ

Q_{fuel} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ , MJ

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หาได้จากความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ หาได้จากดังสมการต่อไปนี้

$$Q_u = [m_{w,1} C_{p,w} (T_{w,b} - T_{w,i})] + [m_{w,2} h_{fg}]$$

เมื่อ $m_{w,1}$ คือ มวลน้ำเริ่มต้น , kg

$m_{w,2}$ คือ มวลน้ำที่ระเหย , kg

$C_{p,w}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 KJ/kg°C

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 KJ/kg

$T_{w,b}$ คือ อุณหภูมิที่น้ำเดือด °C

$T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น °C

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง หาได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ m_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด , kg

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ด KJ/kg



รูปที่ 3.16 เติมน้ำลงในหม้อสแตนเลส ปริมาณน้ำ 1,000 g



รูปที่ 3.17 ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ



รูปที่ 3.18 ใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตรงกลางของเตาแล้วจุดไฟทิ้งไว้ 5 นาที



รูปที่ 3.19 ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งน้ำเดือดที่ 98 °C



รูปที่ 3.20 ต้มน้ำจมนเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหมดไฟ

3.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง

จากการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3 พบว่าเมื่อใส่วัตถุดิบในเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 1,000 kg จะได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จำนวน 500 kg การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3 ในการผลิตต่อหน่วย (Cost of Production) จะประกอบไปด้วยวัตถุดิบ+ค่าแรงงาน + ค่าใช้จ่ายในการผลิต ซึ่งทั้งสามรายการนี้เป็นเพียงส่วนของการผลิตเท่านั้น โดยคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ต้นทุนต่อหน่วย} = (\text{วัตถุดิบ} + \text{ค่าแรง} + \text{ค่าใช้จ่ายในการผลิต}) / \text{จำนวนหน่วยที่ผลิตได้}$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากเศษไม้ยางพาราผสมขยะฝักรถเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยชี้ให้เห็นไม้ยางพาราผสมกับRDF3 ใน 4 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 โดยมีการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล สำหรับผลการวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถอัดขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ทุกอัตราส่วนผสม จากการตรวจสอบด้วยสายตา (visual inspection) พบว่า เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มีความแน่น ความเหนียว และสามารถงอรูปอยู่ได้ เมื่อทดลองบีบด้วยมือไม่กระเทาะแตกออกจากกัน สำหรับอัตราส่วนผสม 100:0 มีลักษณะแท่งตรง สีน้ำตาล และอัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 / 50:50 มีลักษณะแท่งตรง มีบางแท่งโค้งงอ มีสีน้ำตาลดำ



รูปที่ 4.1 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล 100:0



รูปที่ 4.2 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล 70:30



รูปที่ 4.3 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล 60:40



รูปที่ 4.4 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล 50:50

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 100:0 มาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าความคงทน ค่าความร้อนและคุณสมบัติอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความยาว (Length) mm ,ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) mm, ค่าความชื้น (Moisture) % และค่าความหนาแน่น (Density) kg/m^3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.48 ± 0.44

mm, 6.122 ± 0.09 mm, 9.572 ± 0.26 % และ $1,286.04 \pm 8.02$ kg/m³ตามลำดับ ค่าความคงทน (Durability) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.48 ± 0.30 % ค่าความร้อนจะแบ่งเป็นค่าความร้อน (Heating value) MJ/kg และค่าความร้อนสูง (High Heating value) MJ/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.318 ± 0.14 MJ/kg , 19.40 ± 0.07 MJ/kg ตามลำดับ และคุณสมบัติอื่นๆได้แก่ ค่าปริมาณเถ้า (Ash) %, ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) % และค่าไอระเหย (volatile matter) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.544 ± 0.09 % , 15.78 ± 0.56 % และ 72.108 ± 0.31 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 100:0

Simple Analysis	100:0 (1)	100:0 (2)	100:0 (3)	100:0 (4)	100:0 (5)	AVG. \pm S.D.
Length (mm)	36.66	36.08	36.08	36.32	37.26	36.48 ± 0.44
Diameter (mm)	6.12	6.12	6.09	6.28	6	6.122 ± 0.09
Moisture (%)	9.69	9.38	9.77	9.15	9.87	9.572 ± 0.26
Density (kg/m ³)	1,275.5	1,293.90	1,294.80	1,277.8	1,288.20	1,286.04 ± 8.02
Durability (%)	98.76	98.24	98.18	98.94	98.29	98.48 ± 0.30
Ash (%)	2.36	2.52	2.62	2.6	2.62	2.544 ± 0.09
High Heating value(MJ/kg)	19.43	19.29	19.51	19.45	19.35	19.40 ± 0.07
Heating value (MJ/kg)	17.31	17.26	17.20	17.22	17.6	17.318 ± 0.14
Fixed carbon(%)	15.89	16.06	15.62	16.52	14.81	15.78 ± 0.56
Volatile matter (%)	72.06	72.04	72.00	71.74	72.70	72.108 ± 0.31

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 70:30 มาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าความคงทน ค่าความร้อนและคุณสมบัติอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความยาว (Length) mm ,ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) mm , ค่าความชื้น (Moisture) % และค่าความหนาแน่น (Density) kg/m³ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.808

± 0.77 mm, 6.184 ± 0.0089 mm, 11.274 ± 0.31 % และ $1,122.62 \pm 3.705$ kg/m³ ตามลำดับ ค่าความคงทน(Durability) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $98.26 \pm 0.06\%$ ค่าความร้อนจะแบ่งเป็นค่าความร้อน (Heating value) MJ/kg และค่าความร้อนสูง (High Heating value) MJ/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.778 ± 0.16 MJ/kg , 21.192 ± 0.09 MJ/kg ตามลำดับ และคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าปริมาณเถ้า (Ash) % ,ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) % และค่าไอระเหย (volatile matter) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.854 ± 0.11 % , 13.006 ± 0.45 % และ 65.866 ± 0.36 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 70:30

Simple Analysis	70:30 (1)	70:30 (2)	70:30 (3)	70:30 (4)	70:30 (5)	AVG. ±S.D.
Length (mm)	43.00	43.72	43.34	42.50	41.45	42.808 ±0.77
Diameter (mm)	6.18	6.20	6.18	6.18	6.18	6.184 ±0.008
Moisture (%)	11.25	11.56	10.70	11.58	11.28	11.274 ±0.31
Density (kg/m ³)	1,123.50	1,120.50	1,117.60	1,128.80	1,122.70	1,122.62 ±3.705
Durability (%)	98.24	98.37	98.19	98.22	98.27	98.26 ±0.06
Ash (%)	9.91	9.81	9.98	9.92	9.65	9.854 ±0.11
High Heating value(MJ/kg)	21.24	21.35	21.18	21.08	21.11	21.192 ±0.09
Heating value (MJ/kg)	18.96	19.00	18.58	18.69	18.66	18.778 ±0.16
Fixed carbon (%)	13.63	12.72	13.35	12.57	12.76	13.006 ±0.45
Volatile matter (%)	65.2	65.92	65.97	65.93	66.31	65.866 ±0.36

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตใน 60:40 มาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าความคงทน ค่าความร้อนและคุณสมบัติอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความยาว (Length) mm ,ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) mm ,ค่าความชื้น (Moisture) % และค่าความหนาแน่น (Density) kg/m³ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40.812 ± 1.12 mm,

6.148 ±0.04 mm, 10.476 ±0.06 % และ 1,175.96 ±15.31 kg/m³ ตามลำดับ ค่าความคงทน (Durability) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.87 ±0.04% ค่าความร้อนจะแบ่งเป็นค่าความร้อน (Heating value) MJ/kg และค่าความร้อนสูง (High Heating value) MJ/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.412 ±0.08 MJ/kg , 21.83 ±0.14 MJ/kg ตามลำดับ และคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าปริมาณเถ้า (Ash) % ,ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) % และค่าไอระเหย (volatile matter) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.862 ±0.15 % ,12.484 ±0.40 % และ 65.174 ±0.36 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 60:40

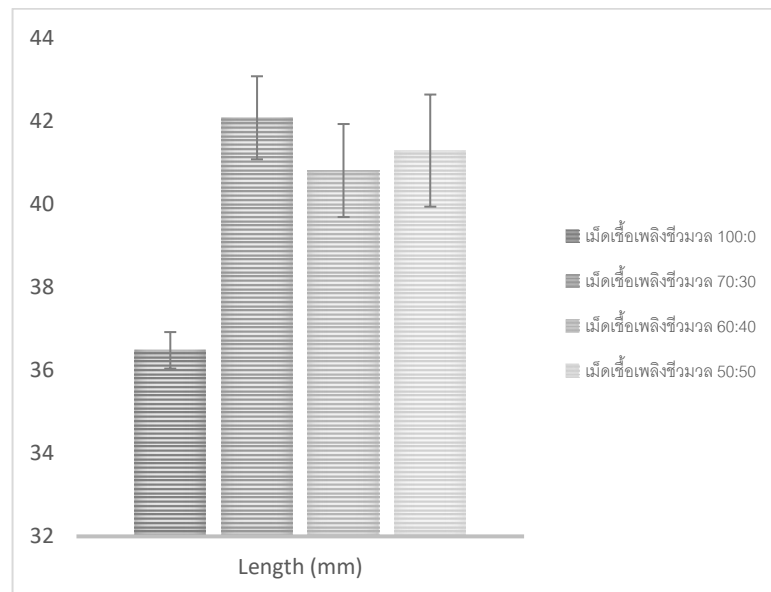
Simple Analysis	60:40 (1)	60:40 (2)	60:40 (3)	60:40 (4)	60:40 (5)	AVG. ±S.D.
Length (mm)	42.00	40.28	42.08	40.60	39.10	40.812 ±1.12
Diameter (mm)	6.12	6.18	6.08	6.18	6.18	6.148 ±0.04
Moisture (%)	10.44	10.60	10.41	10.46	10.47	10.476 ±0.06
Density (kg/m ³)	1,171.60	1,154.60	1,197.60	1,188.50	1,167.50	1,175.96 ±15.31
Durability (%)	98.92	98.84	98.79	98.87	98.91	98.87 ±0.04
Ash (%)	11.71	12.14	11.76	11.90	11.80	11.862 ±0.15
High Heating value(MJ/kg)	21.56	21.91	22.00	21.82	21.82	21.83 ±0.14
Heating value (MJ/kg)	19.36	19.53	19.44	19.45	19.28	19.412 ±0.08
Fixed carbon (%)	12.35	11.90	12.52	13.17	12.48	12.484 ±0.40
Volatile matter (%)	65.49	65.36	65.30	64.46	65.26	65.174 ±0.36

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 50:50 มาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าความคงทน ค่าความร้อนและคุณสมบัติอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความยาว (Length) mm ,ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) mm , ค่าความชื้น (Moisture) % และค่าความหนาแน่น (Density) kg/m³ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.292

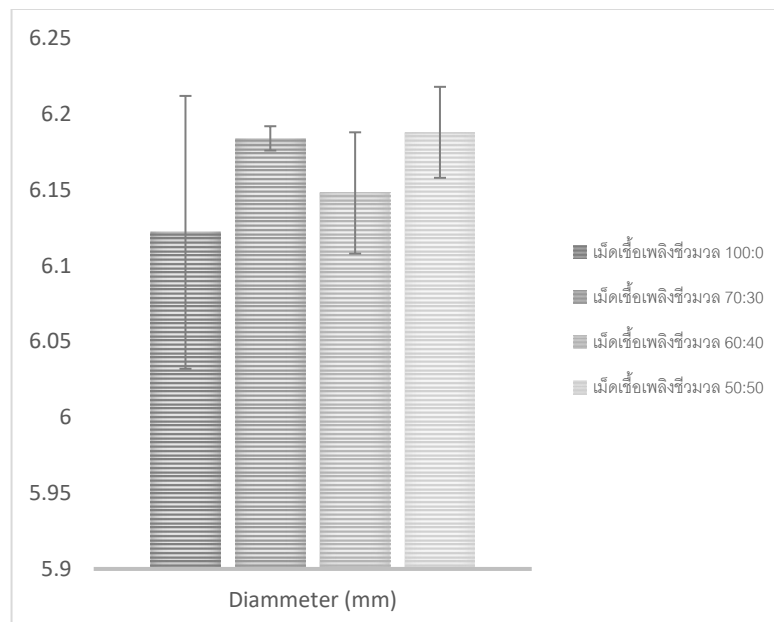
± 1.35 mm, 6.188 ± 0.03 mm, 5.38 ± 0.35 % และ $1,235.90 \pm 12.13$ kg/m³ ตามลำดับ ค่าความคงทน (Durability) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 99.06 ± 0.10 % ค่าความร้อนจะแบ่งเป็นค่าความร้อน (Heating value) MJ/kg และค่าความร้อนสูง (High Heating value) MJ/kg มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.166 ± 0.45 MJ/kg , 22.092 ± 0.08 MJ/kg ตามลำดับ และคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ค่าปริมาณเถ้า (Ash) % ,ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) % และค่าไอระเหย (volatile matter) % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.858 ± 0.16 % , 12.592 ± 0.55 % และ 68.172 ± 0.49 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 50:50

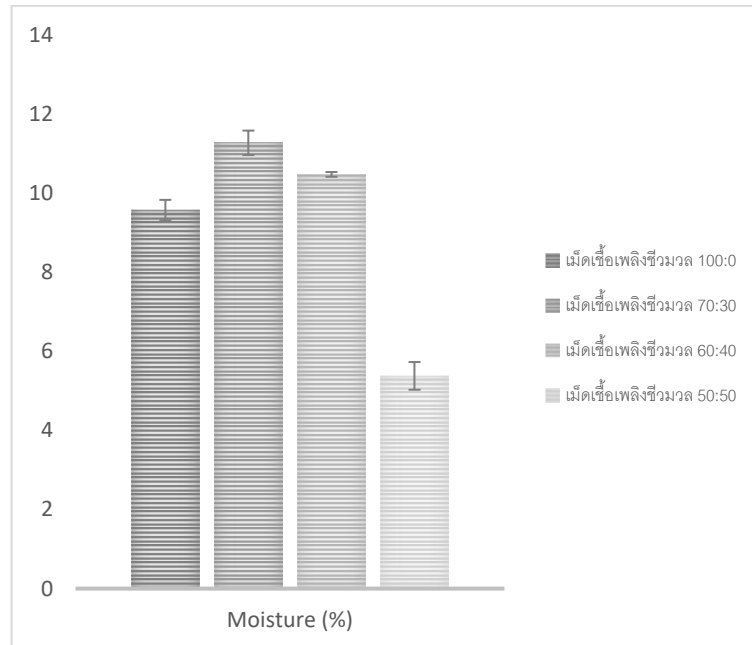
Simple Analysis	50:50 (1)	50:50 (2)	50:50 (3)	50:50 (4)	50:50 (5)	AVG. \pm S.D
Length (mm)	43.00	39.00	41.00	41.18	42.28	41.292 ± 1.35
Diameter (mm)	6.20	6.18	6.24	6.20	6.12	6.188 ± 0.03
Moisture (%)	5.07	5.54	5.88	5.52	4.89	5.38 ± 0.35
Density (kg/m ³)	1,245.50	1,242.50	1,213.20	1,233.50	1,244.80	1,235.90 ± 12.13
Durability (%)	99.15	98.98	99.08	99.18	98.91	99.06 ± 0.10
Ash (%)	13.92	13.85	13.58	13.84	14.10	13.858 ± 0.16
High Heating value(MJ/kg)	21.95	22.13	22.21	22.05	22.12	22.092 ± 0.08
Heating value (MJ/kg)	20.80	20.75	21.67	20.83	21.78	21.166 ± 0.45
Fixed carbon (%)	13.01	11.51	12.92	12.60	12.92	12.592 ± 0.55
VOCs (%)	68.00	69.10	67.63	68.04	68.09	68.172 ± 0.49



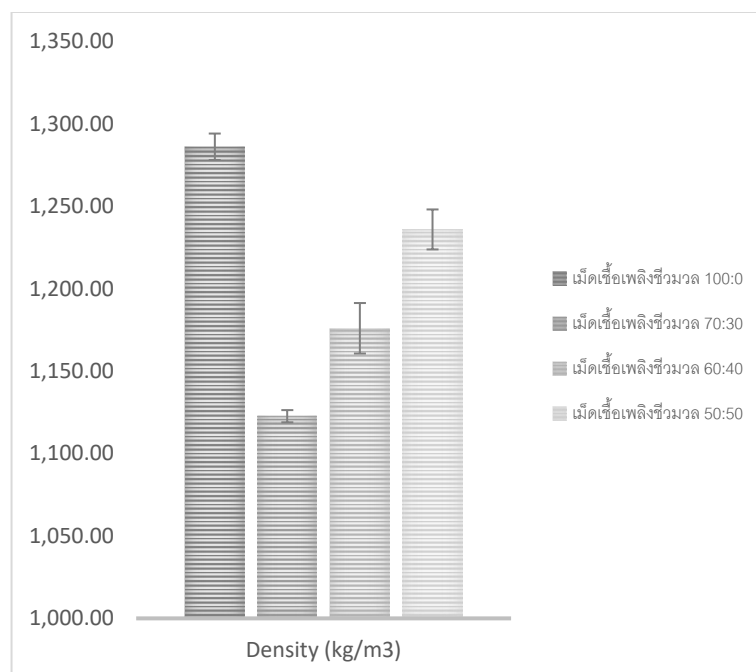
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความยาว (Length) ,mm ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ ไม้ยางพารา กับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50



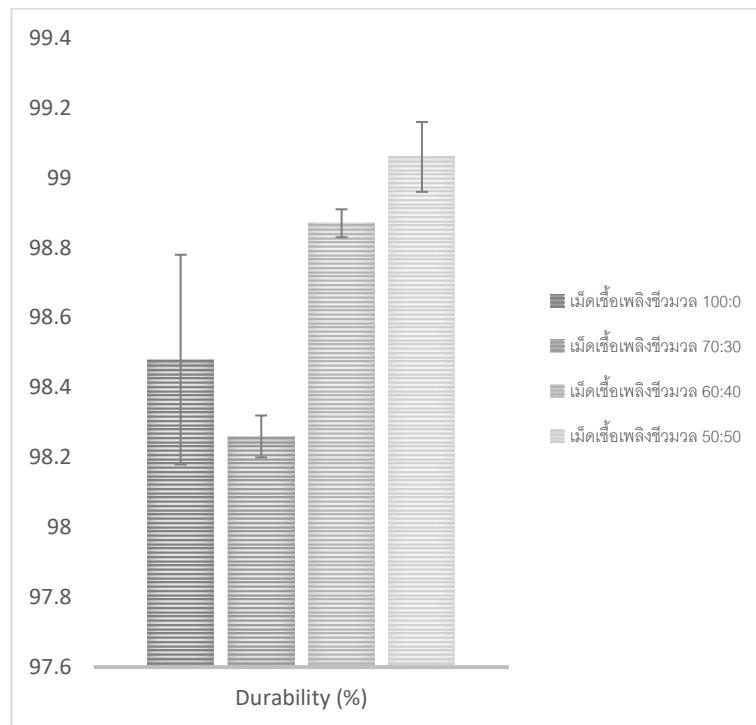
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ,mm ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ ไม้ยางพารา กับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50



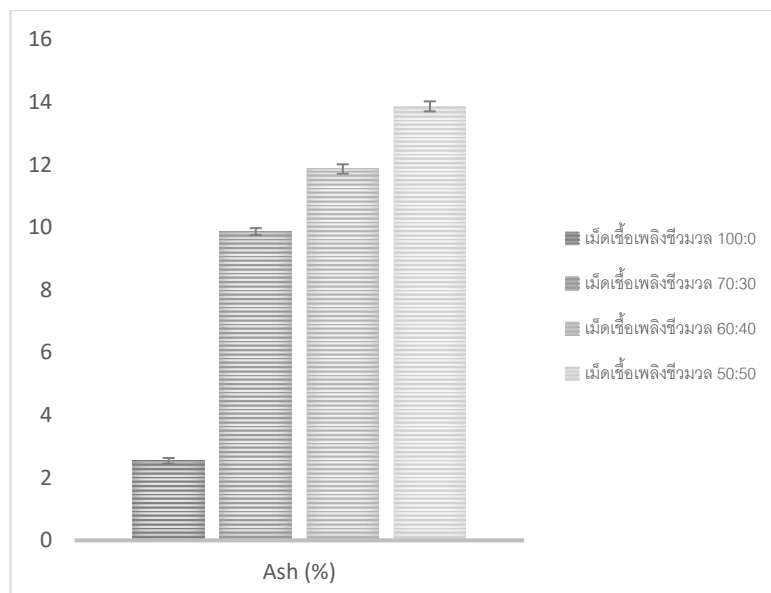
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความชื้น (Moisture) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ไม่ียงพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



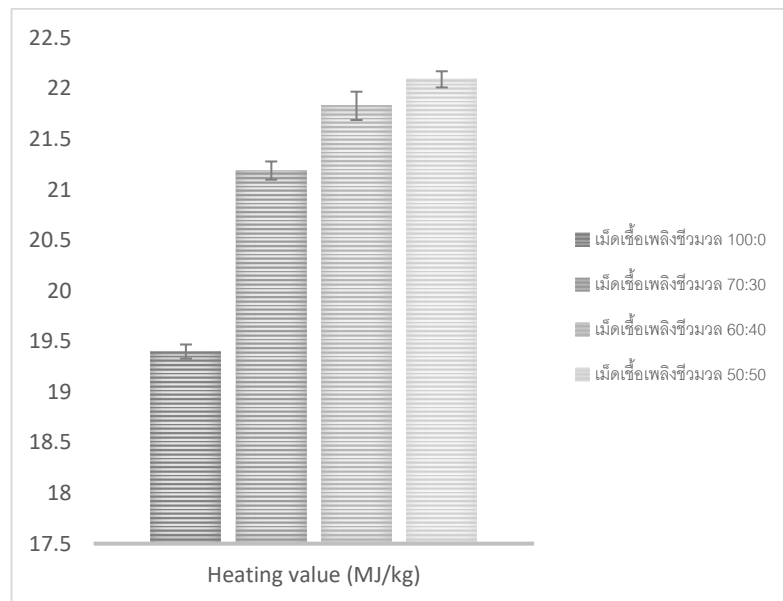
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความหนาแน่น (Density) , kg/m³ ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ไม่ียงพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



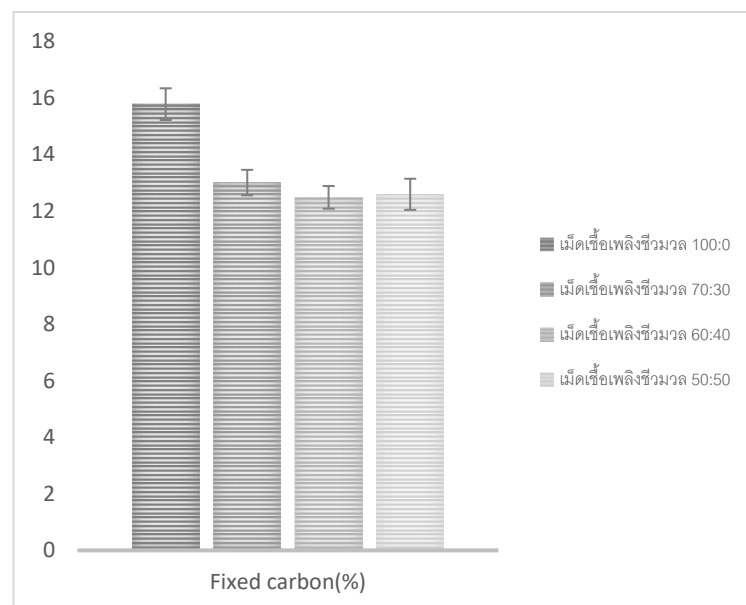
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความทนทาน (Durability) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ไม่ยงพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



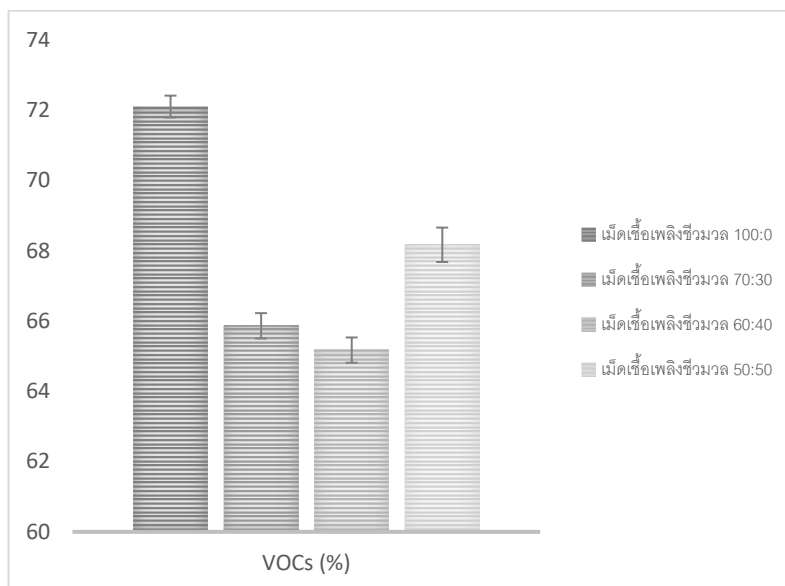
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าปริมาณเถ้า (Ash) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อยู่ไม่ยงพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความร้อน (Heating value) ,MJ/kg ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื่อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื่อยไม้่างพารากับ RDF3 100/0. 70/30, 60/40 และ 50/50



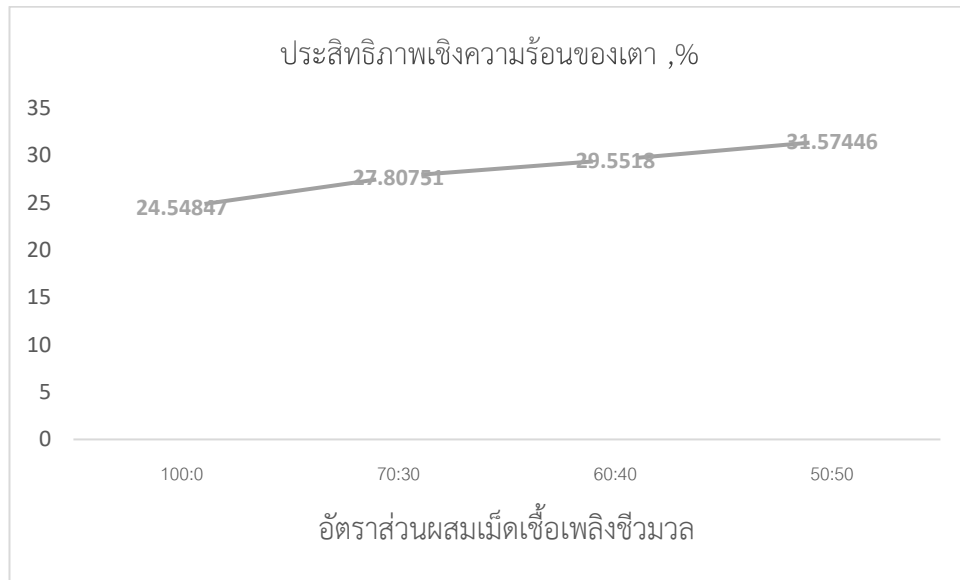
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าไอระเหย (VOCs) ,% ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50

จากการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานหุงต้มของเม็ดพลังงานด้วยวิธีการต้มน้ำ (water boling test, WBT) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอัตราส่วนผสมของซีเลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 ที่อัตราส่วน 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50 จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา อยู่ที่ 24.54 ± 0.32 , 27.80 ± 0.18 , 29.55 ± 0.11 และ 31.57 ± 0.22 % ตามลำดับ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง อยู่ที่ $1,200.17 \pm 22.57$, $1,473.10 \pm 9.57$, $1,645 \pm 04$ และ $1,757 \pm 64$ MJ ตามลำดับ และปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ $1,200.17 \pm 22.57$, $1,473.10 \pm 9.57$, $1,645 \pm 045$ และ $566/68$ MJ ตามลำดับ

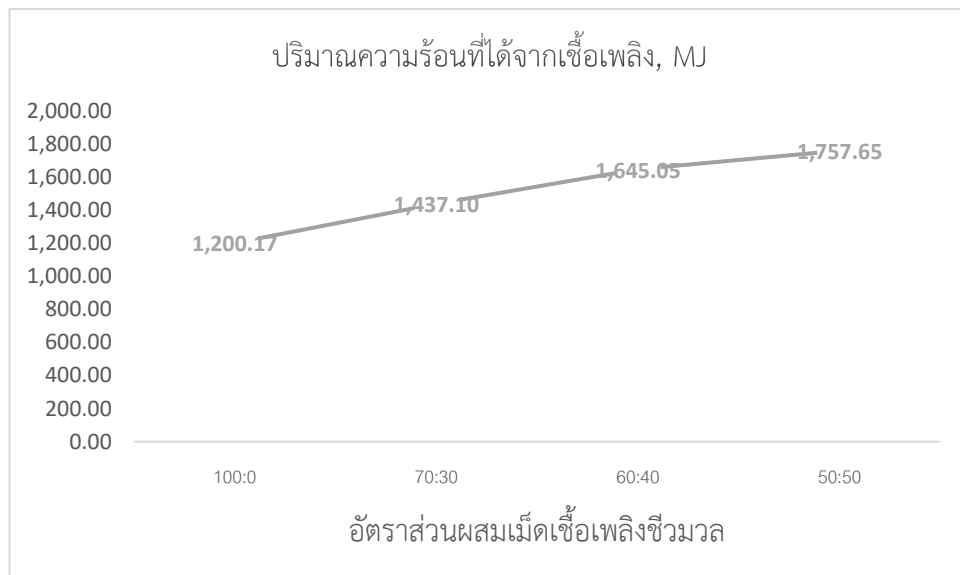
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานหุงต้มของเม็ดพลังงานด้วยวิธีการต้มน้ำ (water boling test, WBT) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน	เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล			
	100:0	70:30	60:40	50:50
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา (η),%	24.54 ± 0.32	27.80 ± 0.18	29.55 ± 0.11	31.57 ± 0.22
ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (Q_u), MJ	$1,200.17 \pm 22.57$	$1,473.10 \pm 9.57$	$1,645 \pm 04$	$1,757 \pm 64$

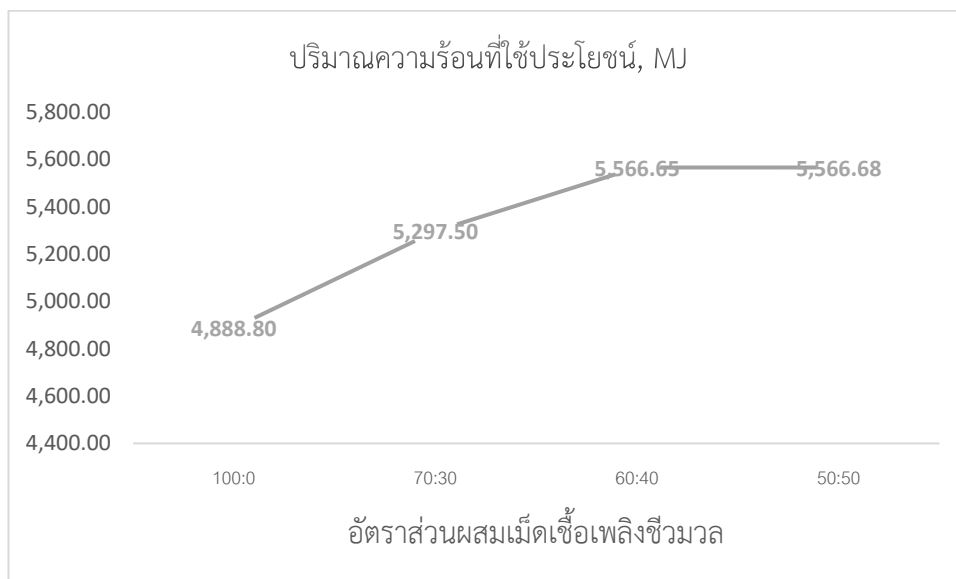
ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (Q_{fuel}), MJ	4,888.8±27.43	5,297±0	5,566.65±0	5,566/68±0
--	---------------	---------	------------	------------



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา, (%) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อย่างพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง, (MJ) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีลี้อย่างพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์, (MJ) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50

นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยนี้กับมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีเกณฑ์ที่กำหนดไว้ใช้กับธุรกิจการผลิตและส่งออกของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 17 จากผลการเปรียบเทียบ พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีความยาว (Length) เฉลี่ยเท่ากับ 36.48 ± 0.44 , 42.08 ± 0.77 , 40.81 ± 1.12 และ 41.29 ± 1.35 mm ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความยาวต้องยาว 3.15 -40 mm มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) เฉลี่ยเท่ากับ 6.122 ± 0.09 , 6.184 ± 0.008 , 6.148 ± 0.04 และ 6.188 ± 0.03 mm ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความยาวต้องยาว 5.84 – 25 mm มีค่าความหนาแน่น(Density) เฉลี่ยเท่ากับ $1,286.04 \pm 8.02$, $1,122.62 \pm 3.705$, $1,175.96 \pm 15.31$ และ $1,235.90 \pm 12.13$ kg/m³ ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 600 kg/m³ มีค่าความคงทน(Durability) เฉลี่ยเท่ากับ 98.48 ± 0.30 , 98.26 ± 0.06 , 98.87 ± 0.04 และ 99.06 ± 0.10 % ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความคงทนไม่น้อยกว่า 95.0 - 96.0 % มีค่าความร้อน(Heating Value)เฉลี่ยเท่ากับ 19.40 ± 0.07 , 21.19 ± 0.09 , 21.83 ± 0.14 และ 21.83 ± 0.14 MJ/kg ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-

2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg ปริมาณความชื้น (Moisture) อัตราส่วนผสม 100:0 / 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.572 ± 0.26 และ 5.38 ± 0.35 ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณความชื้นต้องไม่เกิน 10 และ 15 % ตามลำดับ อัตราส่วนผสม 70:30 / 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.274 ± 0.31 และ 10.476 ± 0.06 ตามลำดับ มาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณความชื้นต้องไม่เกิน 15 % ตามลำดับ ปริมาณเถ้า (Ash) อัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.54 ± 0.09 , 9.86 ± 0.11 , 11.86 ± 0.15 และ 13.86 ± 0.16 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณเถ้าต้องไม่เกิน 2.0, 0.7 % อัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.54 ± 0.09 , 9.86 ± 0.11 , 11.86 ± 0.15 และ 13.86 ± 0.16 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 2) ซึ่งกำหนดไว้ว่าปริมาณเถ้าต้องไม่เกิน 18 % ส่วนค่าปริมาณสารระเหย (volatile matter) ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.78 ± 0.56 , 72.108 ± 0.31 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ไม่ได้มีกำหนดไว้

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 กับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัดได้
หมายเหตุ : มอก. 2772-2560 อ้างอิงจากมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

คุณสมบัติ ของ เชื้อเพลิง	มาตรฐาน				ผลการทดสอบ			
	PFI Standard	EN 14961-1	มอก. 2772-2560		100:0 AVG. ±S.D	70:30 AVG. ±S.D	60:40 AVG. ±S.D	50:50 AVG. ±S.D
			คุณภาพ 1	คุณภาพ 2				
Density (kg/m ³)	609 - 737	≥600	ไม่น้อย กว่า 600	ไม่น้อย กว่า 600	1,286. 04 ±8.02	1,122.6 2 ±3.705	1,175.96 ±15.31	1,235.9 0 ±12.13
Diameter (mm)	5.84 - 7.25	6 - 12	6 - 25 (±1)	6 - 25 (±1)	6.122 ±0.09	6.184 ±0.008	6.148 ±0.04	6.188 ±0.03
Durability (%)	≥ 95.0	≥ 95.0	ไม่น้อย กว่า 96.0	ไม่น้อย กว่า 96.0	98.48 ±0.30	98.26 ±0.06	98.87 ±0.04	99.06 ±0.10

Inorganic Ash (%)	≤ 2.0	≤ 0.7	ไม่เกิน 10	ไม่เกิน 18	2.54 ±0.09	9.86 ±0.11	11.86 ±0.15	13.86 ±0.16
Length (mm)	≤ 3.15-40	≤ 3.15-40	3.15 - 40	3.15 - 40	36.48 ±0.44	42.08 ±0.77	40.81±1.12	41.29 ±1.35
Moisture (%)	≤ 10.0	≤ 10	ไม่เกิน 15	ไม่เกิน 15	9.572 ±0.26	11.274 ±0.31	10.476 ±0.06	5.38 ±0.35
Heating Value (MJ/kg)	As-Rec. ± 2SD	Minimum value	ไม่น้อยกว่า 14.5	ไม่น้อยกว่า 14.5	19.40 ±0.07	21.19 ±0.09	21.83 ±0.14	22.092 ±0.08
Fixed carbon(%)	-	-	-	-	15.78 ±0.56	13.006 ±0.45	12.484 ±0.40	12.592 ±0.55
Volatile matter (%)	-	-	-	-	72.10 ±0.31	65.866 ±0.36	65.174 ±0.36	68.172 ±0.49

4.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยวิธีละเอียด

(Ultimate analysis)

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 100:0 มาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน(C),ไฮโดรเจน(H),ไนโตรเจน(N),กำมะถัน(S),โพแทสเซียม (K),โซเดียม(Na) ,สังกะสี(Zn) ,ทองแดง(Cu), ตะกั่ว(Pb) ,แคดเมียม(Cd) ,โครเมียม (Cr) , สารหนู(As),ปรอท(Hg), คลอรีน(Cl) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.196 ±7.24 ,8.008 ±1.13 ,0.27 ±0.03, 0.598 ±0.03 ,0.2282 ±0.01 ,0.0156 ±0.0012 ,10.1898 ±1.78 ,5.4748 ±0.94 ,27.163 ±3.05 ,0.00066 ±0 ,19.014 ±1.79 ,0.1796 ±0.008 ,0.0001 ±0 และ 0.017 ±0.001 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 100:0

Simple Analysis	100:0 (1)	100:0 (2)	100:0 (3)	100:0 (4)	100:0 (5)	AVG. ±S.D.
C ,%	47.22	65.66	48.29	46.88	47.93	51.196 ±7.24
H ,%	6.81	9.19	7.21	9.57	7.26	8.008 ±1.13
N ,%	0.24	0.33	0.26	0.26	0.26	0.27 ±0.03
S ,%	0.59	0.58	0.55	0.65	0.62	0.598 ±0.03
K ,%	0.223	0.212	0.239	0.220	0.247	0.2282 ±0.01

Na ,%	0.017	0.015	0.014	0.017	0.015	0.0156 ±0.0012
Zn ,mg/kg	13.023	11.280	8.378	8.342	9.926	10.1898 ±1.78
Cu ,mg/kg	6.772	6.204	4.713	4.171	5.514	5.4748 ±0.94
Pb ,mg/kg	26.567	23.123	26.181	27.410	32.534	27.163 ±3.05
Cd ,mg/kg	0.00066	0.00066	0.00066	0.00066	0.00066	0.00066
Cr ,mg/kg	17.190	20.867	19.374	16.685	20.954	19.014 ±1.79
As ,mg/kg	0.190	0.180	0.178	0.185	0.165	0.1796 ±0.008
Hg ,mg/kg	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001 ±0
Cl ,%	0.017	0.015	0.019	0.017	0.017	0.017 ±0.001

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 70:30 มาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน(C) ,ไฮโดรเจน(H) ,ไนโตรเจน (N) ,กำมะถัน(S) , โพแทสเซียม (K) ,โซเดียม(Na) ,สังกะสี(Zn) ,ทองแดง(Cu) ,ตะกั่ว(Pb) ,แคดเมียม(Cd) ,โครเมียม (Cr) ,สารหนู(As) ,ปรอท(Hg) ,คลอรีน(Cl) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.462 ±0.27 ,10.206 ±1.10 ,0.468 ±0.03 ,0.912 ±0.02 ,0.237 ±0.09 ,0.1014 ±0.003 ,328.4924 ±16.90 ,61.763 ±5.67 ,57.4494 ±7.82 ,1.517388 ±0.20 ,44.0128 ±2.22 ,2.3058 ±0.16 ,0.0001 ±0 และ 0.092 ±0.004 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 70:30

Simple Analysis	70:30	70:30	70:30	70:30	70:30 (5)	AVG.±S.D.
	(1)	(2)	(3)	(4)		
C ,%	47.17	47.80	47.80	47.26	47.28	47.462 ±0.27
H ,%	11.10	11.47	9.25	8.59	10.62	10.206 ±1.10
N ,%	0.51	0.42	0.49	0.48	0.44	0.468 ±0.03
S ,%	0.90	0.92	0.88	0.96	0.90	0.912 ±0.02
K ,%	0.247	0.218	0.242	0.245	0.243	0.237 ±0.09
Na ,%	0.097	0.098	0.103	0.103	0.106	0.1014 ±0.003
Zn ,mg/kg	351.722	315.222	325.030	306.813	343.675	328.4924 ±16.90
Cu ,mg/kg	57.204	56.620	64.431	71.690	58.870	61.763 ±5.67
Pb ,mg/kg	42.478	60.976	60.404	58.154	65.235	57.4494 ±7.82
Cd ,mg/kg	1.13276	1.63328	1.72582	1.50399	1.59109	1.517388 ±0.20
Cr ,mg/kg	45.310	41.921	47.173	41.109	44.551	44.0128 ±2.22

As ,mg/kg	2.552	2.227	2.353	2.334	2.063	2.3058 ±0.16
Hg ,mg/kg	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Cl ,%	0.097	0.087	0.095	0.085	0.096	0.092 ±0.004

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 60:40 มาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน(C) ,ไฮโดรเจน(H) ,ไนโตรเจน (N) ,กำมะถัน(S) , โพแทสเซียม (K) ,โซเดียม(Na) ,สังกะสี(Zn) ,ทองแดง(Cu) ,ตะกั่ว(Pb) ,แคดเมียม(Cd) ,โครเมียม (Cr) ,สารหนู(As),ปรอท(Hg) ,คลอรีน(Cl) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.67 ± 0.34 , 11.45 ± 0.69 , 0.502 ± 0.13 , 1.376 ± 0.15 , 0.234 ± 0.008 , 0.1224 ± 0.002 , 380.5988 ± 7.74 , 70.076 ± 11.09 , 48.275 ± 7.51 , 2.28678 ± 0.14 , 64.274 ± 3.45 , 2.9274 ± 0.19 , 0.0001 ± 0 และ 0.1158 ± 0.003 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 60:40

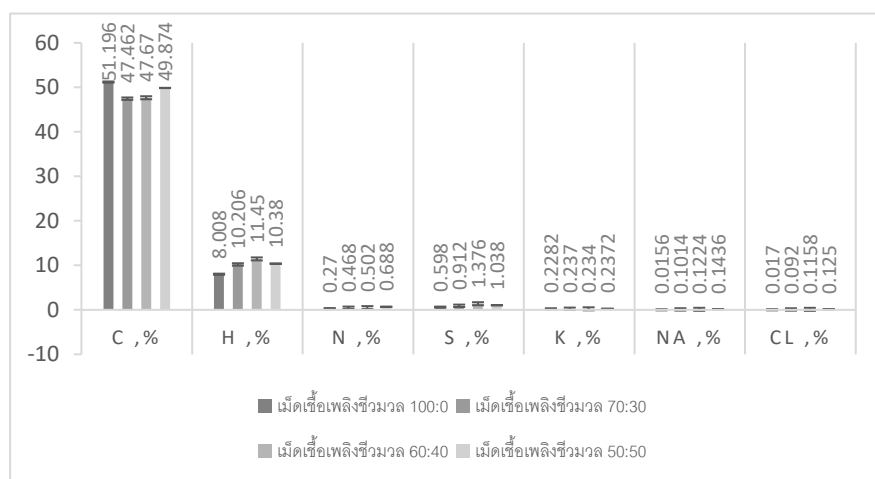
Simple Analysis	60:40	60:40	60:40	60:40	60:40 (5)	AVG.±S.D.
	(1)	(2)	(3)	(4)		
C ,%	47.94	48.05	47.62	47.68	47.06	47.67 ± 0.34
H ,%	11.04	12.58	11.65	10.47	11.51	11.45 ± 0.69
N ,%	0.64	0.25	0.53	0.53	0.56	0.502 ± 0.13
S ,%	1.35	1.59	1.40	1.12	1.42	1.376 ± 0.15
K ,%	0.234	0.221	0.231	0.246	0.238	0.234 ± 0.008
Na ,%	0.125	0.125	0.121	0.123	0.118	0.1224 ± 0.002
Zn ,mg/kg	392.875	380.985	368.520	379.007	381.607	380.5988 ± 7.74
Cu ,mg/kg	63.931	68.323	57.088	90.213	70.825	70.076 ± 11.09
Pb ,mg/kg	54.642	52.689	51.990	48.227	33.827	48.275 ± 7.51
Cd ,mg/kg	2.18567	2.31602	2.54855	2.26950	2.11416	2.28678 ± 0.14
Cr ,mg/kg	60.106	69.481	65.753	65.248	60.782	64.274 ± 3.45
As ,mg/kg	3.164	3.028	3.061	2.715	2.669	2.9274 ± 0.19
Hg ,mg/kg	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Cl ,%	0.115	0.121	0.119	0.112	0.112	0.1158 ± 0.003

จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตในอัตราส่วนผสม 50:50 มาวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน(C) ,ไฮโดรเจน(H) ,ไนโตรเจน (N) ,กำมะถัน(S) , โพแทสเซียม (K) ,โซเดียม(Na) ,สังกะสี(Zn) ,ทองแดง(Cu) ,ตะกั่ว(Pb) ,แคดเมียม(Cd) ,โครเมียม (Cr)

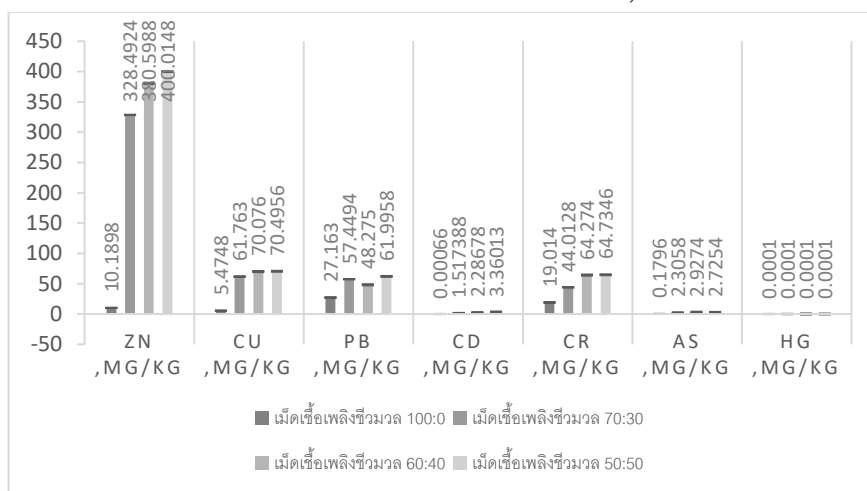
,สารหนู(As),ปรอท(Hg),คลอรีน(Cl) มีค่าเฉลี่ย 49.874 ± 1.58 , 10.38 ± 1.00 , 0.688 ± 0.04 , 1.038 ± 0.08 , 0.2372 ± 0.006 , 0.1436 ± 0.004 , 400.0148 ± 12.27 , 70.4956 ± 3.43 , 61.9958 ± 5.34 , 3.36013 ± 0.34 , 64.7346 ± 5.34 , 2.7254 ± 0.34 , 0.0001 ± 0 และ 0.125 ± 0.002 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อัตราส่วนผสม 50:50

Simple Analysis	50:50 (1)	50:50 (2)	50:50 (3)	50:50 (4)	50:50 (5)	AVG.±S.D.
C, %	50.20	49.42	52.71	47.99	49.05	49.874 ± 1.58
H, %	9.94	11.25	9.87	11.80	9.04	10.38 ± 1.00
N, %	0.72	0.66	0.69	0.62	0.75	0.688 ± 0.04
S, %	1.08	1.13	0.98	1.10	0.90	1.038 ± 0.08
K, %	0.229	0.235	0.243	0.246	0.233	0.2372 ± 0.006
Na, %	0.138	0.141	0.150	0.147	0.142	0.1436 ± 0.004
Zn, mg/kg	377.882	414.996	398.605	403.663	404.928	400.0148 ± 12.27
Cu, mg/kg	69.119	67.721	70.771	76.999	67.868	70.4956 ± 3.43
Pb, mg/kg	63.569	57.969	55.680	71.166	61.595	61.9958 ± 5.34
Cd, mg/kg	3.02709	3.79239	3.64261	2.91664	3.42192	3.36013 ± 0.34
Cr, mg/kg	64.578	67.721	64.006	59.500	67.868	64.7346 ± 5.34
As, mg/kg	2.144	3.064	3.281	2.552	2.586	2.7254 ± 0.34
Hg, mg/kg	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Cl, %	0.126	0.124	0.121	0.125	0.129	0.125 ± 0.002



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าสารคาร์บอน (C), ค่าไฮโดรเจน(H), ไนโตรเจน (N), กำมะถัน (S), ค่าโพแทสเซียม (K), ค่าโซเดียม (Na) และสารคลอรีน (Cl) , (%) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื้อยไม่ย่างพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าสารสังกะสี (Zn), ทองแดง (Cu), สารตะกั่ว (Pb), แคสเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), สารหนู (As) และสารปรอท (Hg) , (mg/kg) ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนผสมซีเลื้อยไม่ย่างพารากับ RDF3 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50

นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยนี้กับมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีเกณฑ์ที่กำหนดไว้ใช้กับธุรกิจการผลิตและส่งออกของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 22 จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าองค์ประกอบเคมีของไนโตรเจน (N) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27 ± 0.03 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าไนโตรเจน(N) ต้องไม่เกิน 0.3 และ 2.0 % ตามลำดับ อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.468 ± 0.03 , 0.502 ± 0.13 และ 0.688 ± 0.04 ตามลำดับ ผ่านเฉพาะมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าไนโตรเจน (N) ต้องไม่เกิน 2.0 % ค่าองค์ประกอบเคมีของกำมะถัน(S) อัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.598 ± 0.03 , 0.912 ± 0.02 , 1.376 ± 0.15 และ 1.038 ± 0.08 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าไนโตรเจน (N) ต้องไม่เกิน 0.03 และ 0.3 % ตามลำดับ ค่าองค์ประกอบเคมีของสังกะสี(Zn) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.1898 ± 1.78 mg/kg ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสังกะสี(Zn) ต้องไม่เกิน 100 mg/kg อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 328.4924 ± 16.90 , 380.5988 ± 7.74 และ 400.0148 ± 12.27 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560

ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสังกะสี(Zn) ต้องไม่เกิน 100 mg/kg ค่าองค์ประกอบเคมีของทองแดง(Cu) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.4748 ± 0.94 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 1) ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าทองแดง(Cu) ต้องไม่เกิน 10 และ 20 mg/kg ตามลำดับ อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61.763 ± 5.67 , 70.076 ± 11.09 และ 70.4956 ± 3.43 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าทองแดง(Cu) ต้องไม่เกิน 10 และ 20 mg/kg ตามลำดับ ค่าองค์ประกอบเคมีของตะกั่ว(Pb) ในอัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.163 ± 3.05 , 57.4494 ± 7.82 , 48.275 ± 7.51 และ 61.9958 ± 5.34 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าตะกั่ว(Pb) ต้องไม่เกิน 10 mg/kg ค่าองค์ประกอบเคมีของแคดเมียม(Cd) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.00066 ± 0 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าแคดเมียม(Cd) ต้องไม่เกิน 0.5 mg/kg อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.517388 ± 0.20 , 2.28678 ± 0.14 และ 3.36013 ± 0.34 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าแคดเมียม(Cd) ต้องไม่เกิน 0.5 mg/kg ค่าองค์ประกอบโครเมียม (Cr) ในอัตราส่วนผสม 100:0 และ 70:30 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.014 ± 1.79 และ 44.0128 ± 2.22 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 1) ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าโครเมียม (Cr) ต้องไม่เกิน 50 mg/kg อัตราส่วน 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 64.274 ± 3.45 และ 64.7346 ± 5.34 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 1) ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าโครเมียม (Cr) ต้องไม่เกิน 10 และ 50 mg/kg ตามลำดับ ค่าองค์ประกอบสารหนู(As) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1796 ± 0.008 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารหนู(As) ต้องไม่เกิน 1 mg/kg อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.3058 ± 0.16 , 2.9274 ± 0.19 และ 2.7254 ± 0.34 ตามลำดับ ไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารหนู(As) ต้องไม่เกิน 1 mg/kg ค่าองค์ประกอบสารปรอท(Hg) ในอัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0001 ± 0 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารปรอท(Hg) ต้องไม่เกิน 0.1 mg/kg ค่าองค์ประกอบสารคลอรีน(Cl) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 ± 0.001 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารคลอรีน(Cl) ต้องไม่เกิน 0.03 ,0.02 ,0.30 ตามลำดับ ในอัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.092 ± 0.004 , 0.1158 ± 0.003 และ 0.125 ± 0.002 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารคลอรีน(Cl) ต้องไม่เกิน 0.30 % ส่วนค่าคาร์บอน(C) ในอัตราส่วนผสม 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.196 ± 7.24 , 47.462 ± 0.27 , 47.67 ± 0.34 และ 49.874 ± 1.58 ตามลำดับ ค่าไฮโดรเจน(H) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.008 ± 1.13 , 10.206 ± 1.10 , 11.45

± 0.69 และ 10.38 ± 1.00 ตามลำดับ ค่าโพแทสเซียม (K) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2282 ± 0.01 , 0.237 ± 0.09 , 0.234 ± 0.008 และ 0.2372 ± 0.006 ตามลำดับ ค่าโซเดียม (Na) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0156 ± 0.0012 , 0.1014 ± 0.003 , 0.1224 ± 0.002 และ 0.1436 ± 0.004 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ไม่ได้มีกำหนดไว้

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 กับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัดได้ (มอก. 2772–2560 อ้างอิงจากมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด)

Analysis	มาตรฐาน				ผลการทดสอบ			
	PFI Standard	EN 14961-1	มอก. 2772–2560		100:0 AVG. \pm S.D.	70:30 AVG. \pm S.D.	60:40 AVG. \pm S.D.	50:50 AVG. \pm S.D.
			ชั้น คุณภาพ 1	ชั้น คุณภาพ 2				
C ,%	-	-	-	-	51.196 ± 7.24	47.462 ± 0.27	47.67 ± 0.34	49.874 ± 1.58
H ,%	-	-	-	-	8.008 ± 1.13	10.206 ± 1.10	11.45 ± 0.69	10.38 ± 1.00
N ,%	-	≤ 0.3	ไม่เกิน 2.0	ไม่เกิน 2.0	0.27 ± 0.03	0.468 ± 0.03	0.502 ± 0.13	0.688 ± 0.04
S ,%	-	≤ 0.03	ไม่เกิน 0.30	ไม่เกิน 0.30	0.598 ± 0.03	0.912 ± 0.02	1.376 ± 0.15	1.038 ± 0.08
K ,%	-	-	-	-	0.2282 ± 0.01	0.237 ± 0.09	0.234 ± 0.008	0.2372 ± 0.006
Na ,%	-	-	-	-	0.0156 ± 0.0012	0.1014 ± 0.003	0.1224 ± 0.002	0.1436 ± 0.004
Zn ,mg/kg	-	≤ 100	ไม่เกิน 100	-	10.1898 ± 1.78	328.4924 ± 16.90	380.5988 ± 7.74	400.0148 ± 12.27
Cu ,mg/kg	-	≤ 10	ไม่เกิน 20	-	5.4748 ± 0.94	61.763 ± 5.67	70.076 ± 11.09	70.4956 ± 3.43
Pb ,mg/kg	-	≤ 10	ไม่เกิน 10	-	27.163 ± 3.05	57.4494 ± 7.82	48.275 ± 7.51	61.9958 ± 5.34
Cd ,mg/kg	-	≤ 0.5	ไม่เกิน 0.5	-	0.00066 ± 0	1.517388 ± 0.20	2.28678 ± 0.14	3.36013 ± 0.34

Cr	-	≤10	ไม่เกิน	-	19.014	44.0128	64.274	64.7346
,mg/kg			50		±1.79	±2.22	±3.45	±5.34
As	-	≤1	ไม่เกิน	-	0.1796	2.3058	2.9274	2.7254
,mg/kg			1		±0.008	±0.16	±0.19	±0.34
Hg	-	≤0.1	ไม่เกิน	-	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
,mg/kg			0.1		±0	±0	±0	±0
Cl ,%	≤0.03	≤0.02	ไม่เกิน	ไม่เกิน	0.017	0.092	0.1158	0.125
			0.30	0.30	±0.001	±0.004	±0.003	±0.002

4.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยจะพิจารณาจาก ต้นทุนค่าวัตถุดิบ ต้นทุนค่าแรงงาน ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตและต้นทุนค่าไฟฟ้า นำมาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วย จากการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3 เมื่อใช้วัตถุดิบ 1,000 kg จะได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500 kg/วัน ใน 1 สัปดาห์ทำการผลิต 5 วัน

ตารางที่ 4.12 ปริมาณค่าเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3

รายการ	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าเครื่องจักร			
เครื่องอัดเม็ดชีวมวล	1 เครื่อง	185,000	185,000
มอเตอร์ 7.5 (380 v) 50HZ 10A			
กำลังการผลิต 100-150 kg/h			
รวมค่าเครื่องจักร			185,000

ตารางที่ 4.13 ปริมาณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3

รายการ	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าวัตถุดิบ			
ขี้เลื่อยไม้ยางพารา	1 ตัน	3,200	3,200
RDF3	1 ตัน	1,400	1,400
รวมค่าวัตถุดิบ			4,600

ราคาขี้เลื่อยไม้ยางพารา 3,200 บาท/ตัน (<https://www.nanagarden.com>)

ราคาขาย RDF3 จะอยู่ที่ 1,000 -1,400 บาท/ตัน (บมจ.สากล เอนเนอร์ยี (SKE) ,2564)

ตารางที่ 4.14 ปริมาณค่าแรงงานที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3

รายการ	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าแรงงาน			
ค่าแรงขั้นต่ำ	20 วัน	300	6,000
รวมค่าแรงงาน			6,000

ตารางที่ 4.15 ปริมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3

รายการ	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าใช้จ่ายในการผลิต			
ถุงซิปล	10 ใบ	5	50
ถุงดำ	1 แพ็ค	70	70
ค่าไฟฟ้า	5.5 kW	6	3,300
ใช้ไฟวันละ 27.5 หน่วย หน่วยละ 6 บาท ทำงาน 20 วัน/เดือน			
รวมค่าใช้จ่ายในการผลิต			3,420

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยจะพิจารณาจาก ต้นทุนค่าวัตถุดิบ ต้นทุนค่าแรงงาน ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตและต้นทุนค่าไฟฟ้า โดยคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนต่อหน่วย} &= (\text{วัตถุดิบ} + \text{ค่าแรง} + \text{ค่าใช้จ่ายในการผลิต}) / \text{จำนวนหน่วยที่ผลิตได้} \\ &= (4,600 + 6,000 + 3,420) / (500 \text{ kg} \times 20 \text{ วัน}) \\ &= 1.402 \text{ บาท/kg} \end{aligned}$$

ผลจากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับ RDF3 เมื่อใช้วัตถุดิบ 1,000 kg จะได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500 kg/วัน ทำงาน 20 วัน/เดือน และพบว่ามีค่าวัตถุดิบรวมทั้ง 4,600 บาท ค่าแรงรวม 6,000 บาท และค่าใช้จ่ายในการผลิต 3,420 บาท ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยอยู่ที่ 1.402 บาท/kg

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากเศษไม้ยางพาราผสมขยะฝัากลบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ชี้อ้อยไม้ยางพารา (Rubber Wood Sawduts) ที่มีความชื้น 12-15 % เชื้อเพลิงขยะฝัากลบ (Refuse derived fuel: RDF3) ที่ผ่านการย่อยขนาดให้เล็กลง ชี้อ้อยไม้ยางพาราผสมกับRDF3 ใน 4 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0 / 70:30 / 60:40 และ 50:50 โดยมีการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดัง รายละเอียดต่อไปนี้

การตรวจสอบด้วยสายตา (visual inspection) พบว่าทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีความแน่น ความแข็ง สามารถคงรูปอยู่ได้ เมื่อทดลองบีบด้วยมือไม่กระเทาะแตกออกจากกัน การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราส่วนผสม 100:0 มีสีน้ำตาล แท่งตรง อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 / 50:50 มีสีดำนอ่อน แท่งตรง มีบางแท่งโค้งงอ เนื่องจากส่วนผสมของRDF3 มีขยะที่เป็นชนิดพลาสติก ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์ไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อน พลาสติกจึงเกิดการหลอมละลายจับกับชี้อ้อยไม้ยางพาราแล้วออกมาเป็นเม็ดตามแบบแม่พิมพ์

จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยนี้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างประเทศ(PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 การทดสอบ คุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีค่าความยาว (Length) มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560

ค่าความหนาแน่น(Density) ทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 อัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด เฉลี่ยเท่ากับ $1,286.04 \pm 8.02 \text{ kg/m}^3$ เนื่องจากวัตถุดิบเป็นชี้อ้อยไม้ยางพารา 100% จึงทำให้มีช่องว่างของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลน้อยกว่าอัตราส่วนผสมที่มี RDF3 ผสมอยู่

ค่าความคงทน(Durability) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ค่าความคงทนของอัตราส่วนผสม 50:50 มีค่าความคงทนสูงที่สุด เนื่องจากส่วนผสมของชี้อ้อยไม้ยางพารากับRDF3 มีปริมาณเท่ากันทำให้ลิกนินกับพลาสติกที่ละลายไปจับตัวกับชี้อ้อยทำให้มีความแข็งและเหนียว จึงมีความทนต่อการแตกหักได้มาก

ค่าความร้อน(Heating Value)) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.40 ± 0.07 , 21.19 ± 0.09 , 21.83 ± 0.14 และ $21.83 \pm 0.14 \text{ MJ/kg}$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มส่วนผสมของRDF3 ทำให้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเป็นขยะหลายชนิดโดยเฉพาะพลาสติก

ปริมาณเถ้า (Ash) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสม ผ่านมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 2) แต่มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และผ่านมาตรฐาน มอก. 2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 1) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.54 ± 0.09 , 9.86 ± 0.11 , 11.86 ± 0.15 และ 13.86 ± 0.16 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าปริมาณเถ้ามีการแปรผันไปทางเดียวกับค่าความร้อน เมื่อมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณเถ้ามากขึ้นด้วย

ปริมาณความชื้น (Moisture) อัตราส่วนผสม 100:0 / 50:50 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 อัตราส่วนผสม 70:30 / 50:50 ผ่านเพียงแค่มาตรฐาน มอก.2772-2560 เนื่องจากมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) กำหนดไว้ว่าปริมาณความชื้นต้องไม่เกิน 10 %

ค่าปริมาณสารระเหย (volatile matter) ค่าคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.78 ± 0.56 , 72.108 ± 0.31 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ไม่ได้มีกำหนดไว้

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานหุงต้มด้วยวิธีการต้มน้ำ (water boiling test, WBT) เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอัตราส่วนผสมของขี้เลื่อยไม้ยางพารากับ RDF3 พบว่าเมื่อมีส่วนผสมของ RDF3 เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง และปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ที่สูงขึ้น โดยเรียงลำดับจากอัตราส่วนผสม 50/50, 60/40, 70/30 และ 100/0 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าเมื่อใช้วัตถุดิบ 1,000 kg จะได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500 kg/วัน ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยอยู่ที่ 1.402 บาท/kg

การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงของในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแล้วนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างประเทศ(PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 พบว่า ค่าคาร์บอน(C) ค่าไฮโดรเจน(H) ค่าโพแทสเซียม (K) ค่าโซเดียม(Na) มาตรฐานข้างต้นไม่ได้มีกำหนดไว้ มาตรฐานต่างประเทศ(PFI Standard) มีเกณฑ์กำหนดไว้เพียงค่าองค์ประกอบสารคลอรีน(Cl) พบว่าในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 ± 0.001 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (PFI Standard, EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 ที่มีส่วนผสมของRDF3 ผ่านเพียงมาตรฐาน มอก.2772-2560

องค์ประกอบเคมีของไนโตรเจน (N) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27 ± 0.03 % ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดและค่าไม่เกิน 0.3 และ 2.0 % ทำให้ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 ที่มีส่วนผสมของRDF3 มีค่าระหว่าง 0.468 - 0.688% ซึ่งมากกว่า 0.3 แต่ไม่เกิน 2.0 % ทำให้ผ่านเฉพาะมาตรฐาน มอก. 2772-2560

องค์ประกอบเคมีของกำมะถัน(S) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่า 0.30 % ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ได้กำหนดไว้

องค์ประกอบเคมีของสังกะสี(Zn) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 10.1898 ± 1.78 mg/kg ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสังกะสี(Zn) ต้องไม่เกิน 100 mg/kg อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 ที่มีส่วนผสมของRDF3 ทำให้มีค่าสังกะสี(Zn) สูงขึ้นมาก ซึ่งอยู่ในระหว่าง 328.4924 - 400.0148 mg/kg อาจเนื่องมาจากชนิดของขยะที่นำมาเป็นส่วนผสมในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงในครั้งนี้

องค์ประกอบเคมีของทองแดง(Cu) แคสซีเมียม(Cd) และสารหนู(As) ในอัตราส่วนผสม 100:0 มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 5.4748 ± 0.94 , 0.00066 ± 0 และ 0.1796 ± 0.008 mg/kg ตามลำดับ ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 อัตราส่วนผสม 70:30 / 60:40 และ 50:50 ที่มีส่วนผสม RDF3 ทำให้มีค่าค่าทองแดง(Cu)สูงขึ้นมาก อยู่ในระหว่าง 61.763 - 70.4956, 1.517388 - 3.36013 และ 2.3058 - 2.9274 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานข้างต้นได้กำหนดไว้ อาจเนื่องมาจากชนิดของขยะที่นำมาเป็นส่วนผสมในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงในครั้งนี้

องค์ประกอบโครเมียม (Cr) ในอัตราส่วนผสม 100:0 และ 70:30 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.014 ± 1.79 และ 44.0128 ± 2.22 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ 1) ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าโครเมียม (Cr) ต้องไม่เกิน 50 mg/kg อัตราส่วนผสม 60:40 และ 50:50 ที่มีส่วนผสม RDF3 เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 40-50ของน้ำหนัก จึงมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระหว่าง 64.274 ± 3.45 - 64.7346 mg/kg จึงไม่ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 (เฉพาะชั้นคุณภาพ1)

องค์ประกอบสารปรอท(Hg) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0001 ผ่านมาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าสารปรอท(Hg) ต้องไม่เกิน 0.1 mg/kg

องค์ประกอบเคมีของตะกั่ว(Pb) ทั้ง 4 อัตราส่วนผสม มีค่าระหว่าง 27.163 - 61.9958 mg/kg ซึ่งมากกว่า 10 mg/kg จึงไม่ผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานต่างประเทศ (EN 14961-1) และมาตรฐาน มอก.2772-2560 ได้กำหนดไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในอัตราส่วนผสม Rubber wood sawdust : RDF3 ดังนี้ 0:100, 30:70, 40:60
2. ควรมีการศึกษาต่อในการนำไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เม็ดเชื้อชีวมวลอยู่แล้ว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานจริง
3. ควรมีการศึกษาต่อเกี่ยวกับกำลังการผลิตของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยคำนวณจากน้ำหนักวัตถุดิบสู่น้ำหนักของผลผลิตที่ได้
4. ควรมีการพัฒนานำไปใช้กับอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทย เพื่อการผลิตพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก

จากผลการศึกษาระณีศึกษาการผลิตและสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากการผสมขี้
เลื่อยไม้ยางพาราและขยะฝัองกลบ (RDF3) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าในประเทศไทยทำให้ทราบ
ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้และ
หวังเป็นอย่างยิ่งว่าทางรัฐบาลควรสนับสนุนให้เกิดโรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้าชีวมวลด้วยขี้เลื่อยไม้
ยางพาราและขยะฝัองกลบของชุมชน ทรัพยากรที่เรามีอยู่โดยไม่ทิ้งให้เสียประโยชน์ เพื่อเพิ่มความ
มั่นคงทางพลังงานมากขึ้น สนับสนุนให้ประชาชนตระหนักถึงความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทน
หรือพลังงานทางเลือก เพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ลดปัญหามลพิษและสิ่งแวดล้อมของโลก รวมทั้ง
ช่วยประหยัดพลังงาน ลดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ ภูมิวิณิชกิจ, จุฑาภรณ์ ชนะถาวร. (2562). ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*.
- กรมการพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน (พพ.).(2559). *เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด Biomass Pellets*. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- เกษรา รัตตะวัน. (2561). ผลของตัวประสานทางธรรมชาติที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและต้นทุนพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดแท่งตะเกียบจากเศษไม้กระถิน. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เกียรติชัย สุทธระและคณะ. (2021). คุณสมบัติทางด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุด และไม้ยางพารา. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปี ที่ 26 (ฉบับที่ 3)*, 1371-1389.
- จุฑาภรณ์ คชสารทักษิณ.(2558). *Wood Pellet : อนาคตใหม่ของเศษไม้ยางพารา?* กรุงเทพมหานคร: ธนาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคใต้.
- ชูรัช ธารารัตน์ และคณะ. (2560). การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง. *การประชุมวิชาการเครื่องช่วยพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13* (หน้า 251-256). เชียงใหม่: วิทยาลัยพลังงาน.
- ณพัชร บัวฉวน. (2020). การพัฒนารูปแบบการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากขยะย่อยสลายได้ผสมกับกากไขมัน. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 53-61.
- ทวีทรัพย์ เจือพานิช, พรณทิพา เมียงแก นภาดา วิเชียรพงษ์. (2022). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขยะมะพร้าวผสมชีวมวลเหลือทิ้ง. *PSRU Journal of Science and Technology* 5(3), 112-126.
- ทองทิพย์ พลูเกษม.(2542). *การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนเพื่อทดแทนฟืนและถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร: ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.
- เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากเศษไม้.ม.ป.ป. *เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด*. กรุงเทพมหานคร: สถาบันพลาสติก Piasties institute of Thailand.
- ธนวัฒน์ ศรีรักษา พงศกรณ์ เทพชร. (2561). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องผลิตชีวมวลอัดแท่งระหว่างแบบ D-type กับ R-type. *มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 177-183.
- นฤมล ภาณุนำภา และคณะ.(2560). *เชื้อเพลิงอัดเม็ด...พลังงานทดแทนที่สะอาด*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้.

- บริษัท เอนเนอจี 789 จำกัด. (26 June 2017). *ขี้เลื่อย (Wood Sawdust)*. เข้าถึงได้จาก <https://energy789.com/th/articles/90848>
- ปัญจรัตน์ โจลานันท์, อาทิตย์ พุทธิรักษาติ และ จันสุดา คำต๋อย.(2554). "พลังงานทดแทนชุมชนจาก เชื้อเพลิงแข็งอัด แท่งไมยราบยักษ์." *วิศวกรรมสาร มข*16(1): 20-31.
- ผศ.ดร.กอบศักดิ์ วันธงไชย.(2557). *เอกสารการเสวนา เรื่องอนาคตไทยกับวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิง Wood Pellet*. กรุงเทพมหานคร: คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรพรรณ เล่าประวัติชัย. (2561). *กรณีศึกษาพลังงานชีวมวลด้วยเศษไม้ยางพาราจังหวัดระนอง*. นครปฐม: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- มหาวิทยาลัยศิลปากร.(2555).*โครงการศึกษาการกำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนา เป็นเชื้อเพลิงในอนาคต*. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน.
- เมธี ไฉ้สุวรรณ,กษมะ ดรงค์ศักดิ์ และสุกัญญา สมุทรเขตร์ ฐิติพร เจาะจง. (2021). การผลิตเชื้อเพลิง แข็งจากเศษใบกาสะลองเหลือทิ้งจากการตัดแต่งกิ่ง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ Print ISSN: 2586-8101 Online ISSN, 2697-6447*.
- วรกร ชิริทอง นิรมล ด้วงฟูและภิญโญ ชุมมณี. (2556). การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากฟางข้าว และใบอ้อย. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 518-521.
- วัชร คตินนทกุล.ม.ป.ป. "เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดพลังงานจากธรรมชาติ." *วารสารกรมวิทยาศาสตร์ บริการ*: 25-26.
- สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่กำหนดและจัดทำมาตรฐาน.ม.ป.ป. "American Society for Testing and Materials." *American Society for Testing and Materials*. https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=48935.
- อภิรักษ์ สวัสดิ์ภูิกิจ. (2551). *การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมขังข้าวโพดและ กะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แอมป์เปกเป็นตัวประสาน*.
- อภิสิทธิ์ ทองอ่อน.(2560). *การศึกษาเครื่องอัดเม็ดพลังงานเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงความร้อนของไม้ ปาล์มน้ำมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อราในเชิง ปริมาณที่เท่ากัน*. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี.
- David N.S. Hon, Nobuo Shiraishi.(2001). *Wood and Cellulosic Chemistry, Revised, and Expanded*. New York: CRC Press.
- J. Peng, X.T. Bi, C.J. Lim, H. Peng, C.S. Kim, D. Jia, H. Zuo. (2015). Sawdust as an effective binder for making torrefied pellets. *Applied Energy*157: 491-498.

- Lázaro Ferreira Cabral Neto et al. (2018). Options for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combinations Between Lignocellulosic Biomasses. *Waste Biomass Valor.*
- Ngah, W.S., and Hanafiah, M.A.K.M.(2018). "Removal of heavy metal from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents." *review. Bioresource Technology. 99:* 3935 – 3948.
<https://th.wikipedia.org/wiki/ชี้เสื่อย>.
- Stahl, M. and J, Berghel.(2011). "Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets." *Biomass and Bioenergy*35: 4849-4854.
- Yu-FongHuang et al.(2016). "Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics." *Energy 08:* 137-144.

ภาคผนวก

ภาคผนวกภาค ก มาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด

มอก. 2772-2560

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งที่ได้จากเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรม หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อาจนำมาผสมกับสารตัวเชื่อมอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า "เชื้อเพลิงชีวมวล"

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 2.1 เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (solid biofuels – biomass pellet) หมายถึง เชื้อเพลิงที่แปรสภาพมาจากการอัดชีวมวลให้มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก
- 2.2 ชีวมวลประเภททำจากไม้ (woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่ได้จากเนื้อไม้ เศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ หรือไม้ที่เหลือใช้จากงานอื่นๆ ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมี
- 2.3 ชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (non – woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่ไม่ได้จากเนื้อไม้ อาจเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม
- 2.4 ชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (blends woody biomass) หมายถึง ชีวมวลที่ผสมระหว่างชีวมวลประเภททำจากไม้กับชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้
- 2.5 สารตัวเชื่อม (binder) หมายถึง สารที่ช่วยให้เชื้อเพลิงชีวมวลจับตัวกัน
- 2.6 สารเติมแต่ง (additive) หมายถึง สารที่เติมลงในวัตถุดิบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น เพิ่มการเผาไหม้ ลดไอเสีย หรือ ช่วยในกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ

3. ประเภท

- 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชีวมวลที่ใช้ทำ ดังนี้
- 3.1.1 ประเภททำจากไม้
- 3.1.2 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้
- 3.1.3 ประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด
- 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ ดังนี้
- 3.2.1 ชั้นคุณภาพ 1
- 3.2.2 ชั้นคุณภาพ 2

มอก. 2772-2560

4. คุณสมบัติที่ต้องการ

4.1 คุณสมบัติที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภททำจากไม้ ต้องเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภททำจากไม้

(ข้อ 4.1)

คุณสมบัติที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ASTM E273
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	(6 ± 1) mm (8 ± 1) mm (10 ± 1) mm (12 ± 1) mm	(6 ± 1) mm (8 ± 1) mm (10 ± 1) mm (12 ± 1) mm	ข้อ 8.3
ความคงทน	ตั้งแต่ 96.5 % w/w ถึง 99.0 % w/w	ตั้งแต่ 96.5 % w/w ถึง 99.0 % w/w	ข้อ 8.4
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 6 % w/w	ไม่เกิน 6 % w/w	ข้อ 8.5
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40.0 mm	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40.0 mm	ข้อ 8.6
ความยาวต่ำสุด	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm	ข้อ 8.6
ความยาวสูงสุด	ไม่เกิน 45.0 mm	ไม่เกิน 45.0 mm	ข้อ 8.6
ความยาวที่เกินกว่า 40 mm	ไม่เกิน 1 % w/w	ไม่เกิน 1 % w/w	ข้อ 8.6
ความชื้น	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 10 % w/w	ASTM E871
การกระจายตัวเมื่อร่อนผ่านร่ง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง)	ไม่น้อยกว่า 97 % w/w (3.15 mm) ไม่น้อยกว่า 85 % w/w (2.0 mm) ไม่น้อยกว่า 10 % w/w (1.0 mm)	ไม่กำหนด	ISO 17830
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 16.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 16.5 MJ/kg	ASTM E711
เถ้า	ไม่เกิน 3 % w/w	ไม่เกิน 5 % w/w	ASTM D1102
สารเคมีคัล	ไม่เกิน 3 % w/w	ไม่กำหนด	ผู้ทำต้องพิสูจน์
ส่วนประกอบของคลอรีน (Cl)	ไม่เกิน 0.1 % w/w	ไม่เกิน 0.1 % w/w	ISO 16994
ส่วนประกอบของกำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.05 % w/w	ไม่เกิน 0.05 % w/w	ISO 16994
ส่วนประกอบของไนโตรเจน (N)	ไม่เกิน 0.6 % w/w	ไม่เกิน 0.6 % w/w	ISO 16948
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 2 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 1.0 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr)	ไม่เกิน 15 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.1 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของสังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 200 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968

หมายเหตุ ชั้นคุณภาพ 1 อ้างอิงจากชั้นคุณภาพ B ของ ISO 17225-2

มอก. 2772-2560

4.2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด ต้องเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (ข้อ 4.2)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ASTM E873
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	ตั้งแต่ 6 มม ถึง 25 มม ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 มม ของค่าระบุ)	ตั้งแต่ 6 มม ถึง 25 มม ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 มม ของค่าระบุ)	ข้อ 8.3
ความคงทน	ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w	ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w	ข้อ 8.4
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 3.0 % w/w	ไม่เกิน 6 % w/w	ข้อ 8.5
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 มม ถึง 40 มม สำหรับ D ตั้งแต่ 6 มม ถึง 10 มม ตั้งแต่ 3.15 มม ถึง 50 มม สำหรับ D ตั้งแต่ 12 มม ถึง 25 มม	ตั้งแต่ 3.15 มม ถึง 40 มม	ข้อ 8.6
ความยาวต่ำสุด	ไม่น้อยกว่า 3.15 มม	ไม่น้อยกว่า 3.15 มม	ข้อ 8.6
ความยาวสูงสุด (เฉพาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 6 มม ถึง 10 มม)	ไม่เกิน 45.0 มม	ไม่เกิน 45.0 มม	ข้อ 8.6
ความยาวที่เกินกว่า 40 มม	ไม่เกิน 1 % w/w	ไม่เกิน 1 % w/w	ข้อ 8.6
ความชื้น	ไม่เกิน 15 % w/w	ไม่เกิน 15 % w/w	ASTM E871
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ASTM E711
เถ้า	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 18 % w/w	ASTM D1102
สารเติมแต่ง	ไม่เกิน 5 % w/w	ไม่กำหนด	ผู้ทำต้องพิสูจน์
ส่วนประกอบของคลอรีน (Cl)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ISO 16994
ส่วนประกอบของกำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ISO 16994
ส่วนประกอบของโบโรเจน (B)	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ISO 16948
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 1 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.5 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr)	ไม่เกิน 50 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 10 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.1 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของนิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 10 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของสังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 100 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968

หมายเหตุ ชั้นคุณภาพ 1 อ้างอิงจากชั้นคุณภาพ B ของ ISO 17225-6

มอก. 2772-2560

5. การบรรจุ

- 5.1 ในกรณีที่มีการบรรจุหุ้มท่อ วัสดุที่ใช้ในการนั้นต้องไม่ขาด ไม่รั่ว และอยู่ในสภาพที่แข็งแรง ทนทาน เรียบร้อย

6. เครื่องหมายและฉลาก

- 6.1 ที่ภาชนะบรรจุหรือใบกำกับสินค้าเชื้อเพลิงชีวมวลทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแสดงข้อความต่อไปนี้ ให้เห็นได้ง่ายและชัดเจน

- (1) คำว่า “เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงอัดเม็ด”
- (2) ประเภท
- (3) ชั้นคุณภาพ
- (4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นมิลลิเมตร (mm)
- (5) ปริมาณสุทธิ เป็นกิโลกรัม (kg)
- (6) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้

7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- 7.1 การชักตัวอย่าง

ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีการสุ่มตามมาตรฐาน ASTM C708

- 7.2 เกณฑ์ตัดสิน

- 7.2.1 การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก

ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามที่กำหนดในข้อ 5.1 และข้อ 6.1 ทุกรายการ จึงจะถือว่าเชื้อเพลิงชีวมวลรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

- 7.2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวล

ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 4.1 สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ หรือ ข้อ 4.2 สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ไผ่และเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด ทุกรายการ จึงจะถือว่าเชื้อเพลิงชีวมวลรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

8. การทดสอบ

- 8.1 ข้อกำหนดทั่วไป

- 8.1.1 ให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้

- 8.1.2 หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ให้ทดสอบที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

- 8.2 การเตรียมตัวอย่างที่ได้จากข้อ 7.1 เพื่อนำมาทดสอบให้แบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามภาคผนวก ก.

มอก. 2772-2560

8.3 การทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

8.3.1 เครื่องมือ

เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.1 mm

8.3.2 วิธีทดสอบ

8.3.2.1 ใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัวอย่างที่แบ่งตามภาคผนวก ก. จำนวน 5 ชิ้น

8.3.2.2 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างแต่ละชิ้นโดยใช้เครื่องวัดตามข้อ 8.3.1 และบันทึกเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้

8.3.3 การรายงานผล

รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้

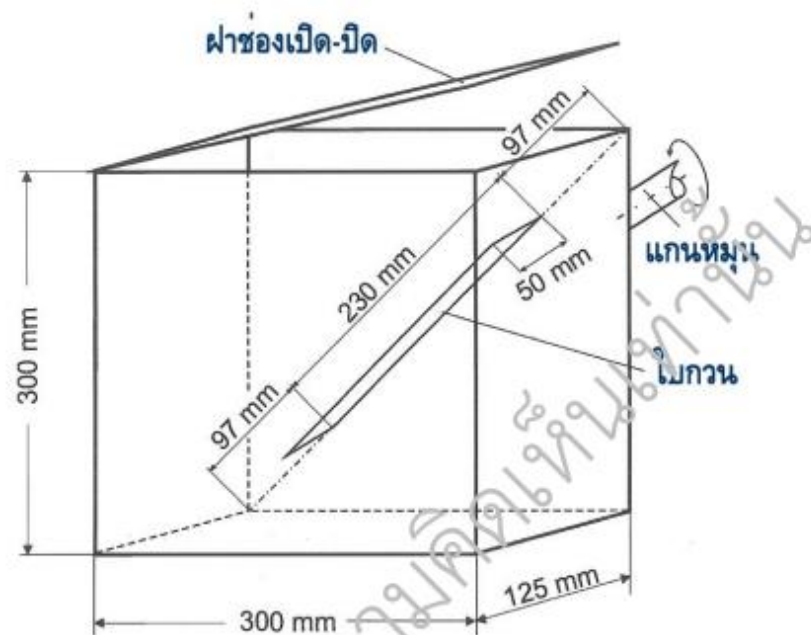
8.4 การทดสอบความคงทน

8.4.1 เครื่องมือ

8.4.1.1 เครื่องมือทดสอบความคงทน

มีลักษณะเป็นกล่องโลหะมีผิวเรียบมีขนาดภายในกว้าง (125 ± 1.3) mm ยาว (300 ± 3) mm และความลึก (300 ± 3) mm ภายในมีใบกวนขนาดกว้าง (50 ± 1) mm ความยาว (230 ± 2.3) mm และมีการลบมุมที่ขอบใบกวน เพื่อหลีกเลี่ยงผลที่อาจเกิดขึ้นจากใบกวนไปตัดตัวอย่างโดยมีแกนหมุนอยู่กึ่งกลางของเส้นทแยงมุมของผิวด้านข้าง ด้านบนมีช่องเปิด-ปิดสำหรับใส่ตัวอย่าง โดยฝาช่องเปิด-ปิดดังกล่าวที่ยึดกับกล่องโลหะต้องมีอุปกรณ์ยึดไคยีนเข้าไปภายในที่จะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของตัวอย่างภายใน

มอก. 2772-2560



รูปที่ 1 ตัวอย่างเครื่องทดสอบหาความคงทน
(ข้อ 8.4.1.1)

- 8.4.1.2 เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 g
- 8.4.1.3 แรงที่มีขนาดครึ่งแรงแรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm
- 8.4.2 วิธีทดสอบ
- 8.4.2.1 ใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัวอย่างที่แบ่งตามภาคผนวก ก. จำนวน 1 000 g
- 8.4.2.2 นำตัวอย่างไปร่อนด้วยแรงจลน์
- 8.4.2.3 ชั่งตัวอย่างที่ร่อนแล้ว (500 ± 10) g และบันทึกมวลแน่นอนที่ชั่งได้
- 8.4.2.4 นำตัวอย่างบรรจุลงในเครื่องมือทดสอบความคงทน เริ่มการทดสอบโดยการหมุนไมกานด้วยความเร็ว (50 ± 2) รอบต่อนาที จำนวน 500 รอบ
- 8.4.2.5 จากนั้นนำตัวอย่างออกจากเครื่องมือทดสอบความคงทน แล้วนำไปร่อนด้วยแรงจลน์ ชั่งมวลตัวอย่างที่ค้างบนแรง

มอก. 2772-2560

8.4.3 วิธีคำนวณ

$$D_U = 100 \times \frac{WPW}{IW}$$

เมื่อ	D_U	คือ	ความคงทน
	WPW	คือ	มวลตัวอย่างที่ค้างบนแรงหลังการทดสอบ เป็นกรัม
	IW	คือ	มวลตัวอย่างที่ร่อนแล้วก่อนเริ่มการทดสอบ เป็นกรัม

8.5 การทดสอบปริมาณผงฝุ่น

8.5.1 เครื่องมือ

- 8.5.1.1 เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 g
- 8.5.1.2 แรงที่มีขนาดรูตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm

8.5.2 วิธีทดสอบ

- 8.5.2.1 ใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัวอย่างที่แบ่งตามภาคผนวก ก. จำนวน 3 000 g
- 8.5.2.2 แบ่งตัวอย่างมา (500 ± 10) g แล้วชั่งและบันทึกมวลแน่นอนที่ชั่งได้
- 8.5.2.3 จากนั้นนำไปร่อนด้วยแรงจนหมดฝุ่น แล้วชั่งมวลอีกครั้งและบันทึกมวลแน่นอนที่ชั่งได้
- 8.5.2.4 ทำเช่นเดียวกันนี้กับตัวอย่างที่เหลืออีก 2 ครั้ง

8.5.3 วิธีคำนวณ

$$F = 100 \times \frac{(W - W_1)}{W}$$

เมื่อ	F	คือ	ปริมาณฝุ่น เป็นร้อยละโดยมวล
	W	คือ	มวลตัวอย่างก่อนร่อน เป็นกรัม
	W_1	คือ	มวลตัวอย่างหลังร่อน เป็นกรัม

8.5.4 รายงานผล

รายงานเป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น

8.6 การทดสอบความยาว

8.6.1 เครื่องมือ

- 8.6.1.1 เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 g

มอก. 2772-2560

8.6.1.2 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.1 mm

8.6.2 วิธีทดสอบ

8.6.2.1 ใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัวอย่างที่แบ่งตามภาคผนวก ก. จำนวน 1 000 g

8.6.2.2 ชั่งมวลของตัวอย่างทั้งหมดที่ได้ให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.1 g ด้วยเครื่องชั่งตามข้อ 8.6.1.1

8.6.2.3 วัดความยาวของตัวอย่างแต่ละชิ้นโดยใช้เครื่องวัดตามข้อ 8.6.1.2 และบันทึกความยาวที่วัดได้

8.6.2.4 แยกตัวอย่างเม็ดที่มีความยาวเกิน 40 mm ออกมา จากนั้นนำทั้งหมดที่ได้มารวมกัน แล้วชั่งมวลให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.1 g

8.6.3 วิธีคำนวณ

8.6.3.1 ความยาวเฉลี่ย

$$L_{AV} = \frac{\sum_{i=0}^n L}{n}$$

เมื่อ L_{AV} คือ ความยาวเฉลี่ย เป็นมิลลิเมตร

$\sum_{i=0}^n L$ คือ ความยาวรวมของตัวอย่างแต่ละชิ้น เป็นมิลลิเมตร

n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด เป็นชิ้น

8.6.3.2 ร้อยละความยาวที่เกินกว่า 40 mm

$$L_{40} = 100 \times \frac{W_{40}}{W}$$

เมื่อ L_{40} คือ ตัวอย่างที่มีความยาวเกินกว่า 40 mm เป็นร้อยละโดยมวล

W คือ มวลตัวอย่างทั้งหมด เป็นกรัม

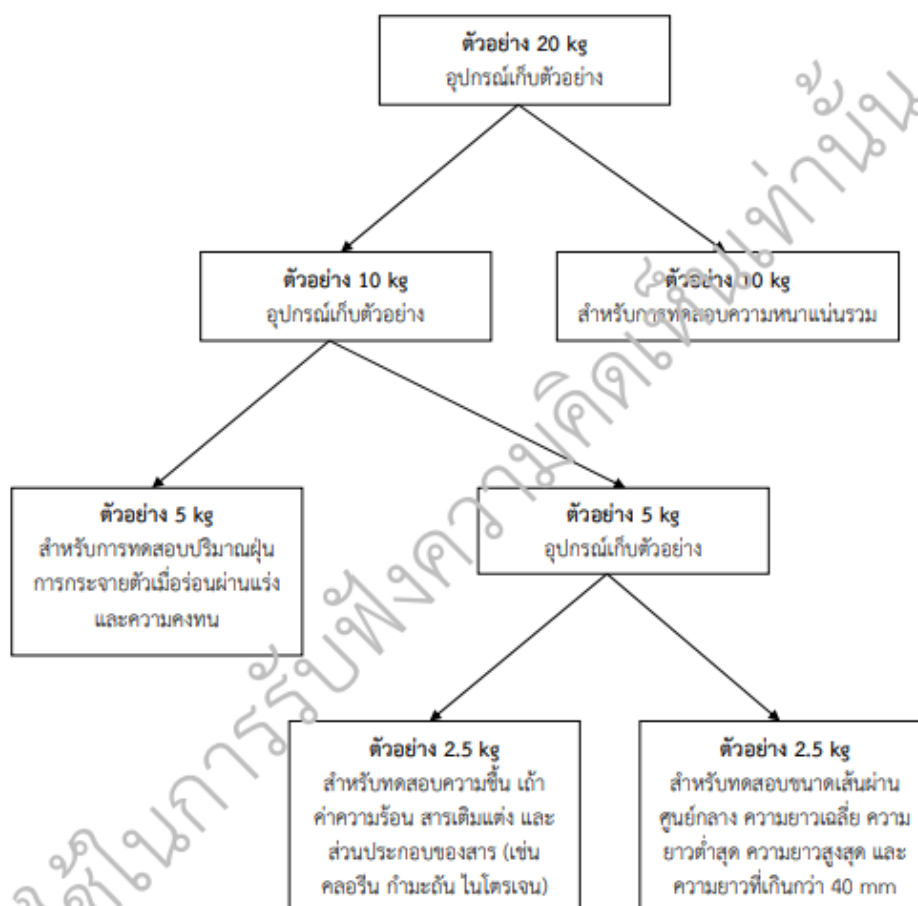
W_{40} คือ มวลตัวอย่างที่มีความยาวเกินกว่า 40 mm เป็นกรัม

8.6.4 รายงานผล

รายงานเป็นค่าความยาวเฉลี่ย ความยาวต่ำสุด ความยาวสูงสุด และร้อยละความยาวที่เกินกว่า 40 mm

มอก. 2772-2560

ภาคผนวก ก.
การเตรียมตัวอย่างที่นำมาทดสอบ
(ข้อ 8.2)



- หมายเหตุ 1) อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (sample splitter) ต้องมีช่องเก็บตัวอย่างกว้าง 89 mm
2) หากจำเป็นต้องใช้ตัวอย่างเพิ่มเติมในการทดสอบอาจต้องเพิ่มอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

ภาคผนวก ข มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่างประเทศ

Mechanical Engineering

Silpakorn University



คุณสมบัติ	มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด					ชีวมวล ดิบ
	ออสเตรีย (ONORM M7135)	สวีเดน (SS 187120)	อิตาลี (CTI-R 04/5)	ยุโรป (CEN/TS 14961)	อเมริกา (PFI)	
ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	4-10	-	6	6-8	5.84-7.25	40
ค่าความยาวของแท่งเชื้อเพลิง (มิลลิเมตร)	5 x Ø	4 x Ø	6-24	8 x Ø	≤38.10	-
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	18	≤16.90	>16.96	16.90	-	10.50
ความหนาแน่นก้อนมวล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	>1,120	≥600	620-720	≥600	596.6- 722.2	300- 500
ปริมาณเถ้าถ่าน (เปอร์เซ็นต์)	≤2.3	≤0.8	≤1	≤1	≤1	0.6-20
ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	<0.30	-	≤0.30	≤0.03	-	0.02
ซัลเฟอร์ (เปอร์เซ็นต์)	<0.04	<0.08	≤0.50	≤0.05	-	0.30
คลอไรด์ (เปอร์เซ็นต์)	<0.02	<0.03	≤0.03	≤0.03	300 ppm	0.05



Article

Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel

Rattikal Laosena ¹, Arkom Palamanit ², Montri Luengchavanon ³, Jitralada Kittijaruwattana ⁴, Charoen Nakason ⁴, Seng Hua Lee ⁵ and Aujchariya Chotikhun ^{4,*}

¹ Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai 90110, Songkhla, Thailand; 5840310525@psu.ac.th

² Energy Technology Program, Department of Specialized Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai 90110, Songkhla, Thailand; arkom.p@psu.ac.th

³ Center of Excellence in Metal and Materials Engineering (CEMME), Sustainable Energy Management Program, Wind Energy and Energy Storage Centre (WEESYC), Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Hat Yai 90110, Songkhla, Thailand; montri.su@psu.ac.th

⁴ Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Mueang, Surat Thani 84000, Surat Thani, Thailand; jitralada.k@psu.ac.th (J.K.); charoen.na@psu.ac.th (C.N.)

⁵ Institute of Tropical Forestry and Forest Products, Universiti Putra Malaysia, Serdang 43400, Selangor, Malaysia; lee_seng@upm.edu.my

* Correspondence: aujchariya.c@psu.ac.th



Citation: Laosena, R.; Palamanit, A.; Luengchavanon, M.; Kittijaruwattana, J.; Nakason, C.; Lee, S.H.; Chotikhun, A. Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel. *Materials* **2022**, *15*, 3093. <https://doi.org/10.3390/ma15093093>

Academic Editors: Dagmar Merinska and Milena Kubitová

Received: 22 March 2022

Accepted: 23 April 2022

Published: 25 April 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The objective of this study was to investigate the production and properties of mixed pellets made from rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) and refuse-derived fuel (RDF) waste with no added binder. Three different conditions of mixed pellets were developed to compare their chemical and physical properties to rubberwood pellets. The produced samples were subjected to both ultimate and proximate analyses. The contents of C, H, N, S, and Cl significantly increased with the increasing amount of refuse-derived fuel in the samples, resulting in reduction of the volatile matter. The mechanical durability of the pellet samples ranged between an average value of 98 and 99%. Mixed pellets containing 50% of rubberwood and 50% of refuse-derived fuel have improved heating values by 22.21% compared to rubberwood pellets. Moreover, mixed pellets having 50% of wood and 50% of refuse-derived fuel had the highest density and the highest energy compared to the other samples. Based on the findings of this study, it appears that the manufactured mixed pellets have the potential to be used as high-energy fuel.

Keywords: wood pellet; rubberwood; refuse-derived fuel; energy potential; pellet fuel

1. Introduction

Wood pellets are typically made from compacted sawdust or other woody materials, meaning that they are related to biowaste utilization [1]. Pellets produced by the compression process are uniform in size and shape, have a high density, and contain little moisture and ash [2]. Wood pellets have the advantage of being easier to store and transport over long distances than wood chips. Furthermore, fresh wood has a calorific value of 9–12 GJ/ton, whereas wood pellets have a calorific value of around 16–18 GJ/ton [3]. Currently, the demand for wood pellets in the European Union, which produces roughly half of the world's wood pellets, is expected to grow by more than 22.5 million tons [4].

Rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) is the most vital raw material for the wood-based industries in both Thailand and Malaysia [5]. Rubberwood is primarily used in the home furniture industry as a raw material. Following primary processing of the wood, the remainder of the raw material becomes wood residues, such as shavings, slabs, and sawdust [6]. According to Ratnasingam et al. [7], for 3.1 million m³ input of rubberwood

logs to sawmills, 3944 m³ sawdust could be generated during the sawmilling process. It was noted that this sawdust was used by the sawmills for fuel generation. Rubberwood waste is abundant in Thailand's southern provinces, and it has great potential for biofuel applications [8]. Rubberwood is a plentiful, renewable, and long-lasting resource that is used to make furniture and wood-based panels. In Thailand, the wood residues from these products have a lot of potential for bioenergy applications [9]. Biomass pellets could be made from logging waste and industrial waste from rubberwood-based products [10,11]. Thailand also increased wood pellet production in 2019 for both export and domestic use, exporting 172,441 tons of wood pellets [1].

Rubberwood is known for its great potential as a source of energy. In comparison to other types of biomasses, rubberwood displayed higher potential energy production compared to that of empty fruit bunches and palm kernel shells [12]. Comparing to pellets made from oil palm biomass, which is widely available in both Malaysia and Thailand, rubberwood exhibited higher potential in pellet production, owing to its higher calorific value than palm kernel shell and fiber. In addition, pellets made from rubberwood also offer several advantages: (i) they have better and more uniform heating properties per unit volume; (ii) they generate fewer particulate emissions during burning; and (iii) they have a lower transportation fee, due to their increased bulk density [12].

Refuse-derived fuel (RDF), on the other hand, is a by-product of municipal solid waste (MSW), which is expected to reach 2.6 billion metric tons by 2030 [13]. MSW landfills are usually made up of 50–60% soil-type material, 20–30% combustible components, 10% inorganic components, and a small amount of metals [14]. Open dumping was the most common MSW disposal method in developing countries over the previous decade, with solid wastes at dumpsites being used as refuse-derived fuel (RDF) [15]. RDF is mostly made up of carbon-based derivatives, such as organics, plastic, paper, wood, and textiles, with plastic and paper accounting for 50–80% of RDF composition [16]. Pelletization could be used to give RDF a uniform shape and density, allowing it to be used as a fuel. However, one of the drawbacks of RDF pelletization is the low lignin content. Several woody biomasses could be mixed with RDF for pellet production as a viable solution in this case.

Several types of vegetal biomass materials have been co-pelletized with MSW for pellet production. Wood and energy crop residues with different mix compositions has been used to improve the quality of wood pellets while lowering their cost [17]. As a result, many researchers have concentrated on using co-energy from wood and non-wood as a sustainable alternative fuel [18]. Adding 5% binder concentration to RDF pellets made from MSW and rice husk, for example, increased the calorific value of pellet samples [19]. The use of durian waste (shell and seed) as a feedstock in fast pyrolysis to produce RDF pellets was investigated [20]. Furthermore, Cui et al. [21] discovered that co-pelletizing of biomass and waste appears to be a promising way to improve the competitiveness of biomass pellet fuel manufacturing at scale in the future. In previous research studies, it was found that co-pyrolysis of wood pellet and polyethylene increases gas yield, due to oxygenates and moisture in the wood pellet [22]. In the last decade, researchers have also investigated the pyrolysis mechanisms of biomass and plastics [22–25]. Kumagai et al. [26] investigated the co-pyrolysis interactions of beech wood and polyethylene (PE). The findings revealed an understanding of the operative mechanism in the co-pyrolysis of wood materials and synthetic polymers, and this could be useful in the future for pyrolysis reaction control and recovering desirable products from difficult-to-separate initial mixtures.

To the best of the authors' knowledge, there have been few studies on the co-pelletization of rubberwood and RDF. As a result, knowledge of the effects of co-pelletization of rubberwood and RDF on the performance of pellets produced is limited. Therefore, the objective of this research was to investigate the energy potential and some properties of mixed pellets made from rubberwood and RDF. Furthermore, the results of this research could provide evidence that mixed pellet fuel can be used as a feed stock in thermal waste-to-energy technologies.

2. Materials and Methods

2.1. Pelletization and Sample Preparation

Commercially produced rubberwood sawdust, a waste product supplied by BNS Wood Industry Co., Ltd., a sawmill located at Mueang, Surat Thani, Thailand, was dried in a hot-air oven at a temperature of 103 ± 2 °C for 48 h to reach a moisture content of 0%. Before being used to make pellet samples, dried sawdust was screened on a sieve with 18 mesh to remove any oversize particles. Municipal solid waste (MSW) samples that had been landfilled for 1.5–2 years were collected from a landfill area in Pattalung Province, Thailand. The collected MSW samples were separated into combustible and incombustible materials, using a separating machine and manual selection by workers. After separation, the combustible materials were converted into refuse-derived fuel (RDF) by a machine operated by a private company in Thailand's Mueang, Nakhon Si Thammarat.

RDF wastes that have been processed to separate glass, metal, and inorganic materials were shredded to the point where 95% of the weight passes through a 2 in. square mesh screen and was denoted as RDF-3 [27]. Finally, raw RDF-3 was shredded to a size suitable for pelletization, as illustrated in Figure 1.



Figure 1. The preparation of the RDF sample.

Table 1 displays the percentage composition of materials by weight for four different types of pellets. Rubberwood sawdust and shredded RDF-3 were thoroughly mixed in a mixing drum for 5 min. The moisture content of the mixtures was around 14–16%. Following that, the mixed materials were pelleted in an electric flat die wood pellet mill, KN-D-200, with 7.5 hp (380v), 50 Hz (Figure 2), and a pellet mill die in 6 mm to produce 5 kg of each condition. The pellets were air-dried and cooled before being stored in a conditioned room with a temperature of 25 °C and a relative humidity of 65%.

Table 1. The composition of pellet samples.

Sample Type	Rubberwood (%w/w)	RDF (%w/w)
W100	100	-
W7R3	70	30
W6R4	60	40
W5R5	50	50



Figure 2. A flat die wood pellet machine for the experiment.

2.2. Properties Evaluation of Pellets

Physical Properties of the Samples

The dimension, density, and color of the samples were determined. Three replications of each pellet type were completely randomized and used for sample testing.

The samples' dimensions and weights were measured and weighed with precisions of 0.01 mm and 0.0001 g, respectively. The density of the pellet was calculated by using the following equation:

$$D = M/V \quad (1)$$

where D is the density of pellet (g/cm^3), M is the mass of the pellet (g), and V is the volume of pellet (cm^3).

2.3. Mechanical Durability of the Samples

Mechanical durability testing of the samples was carried out in accordance with the procedure outlined in EN 15210-1. It is a 10 min tumbling box test that determines the resistance of densified fuels to shocks and/or abrasion caused by handling and transportation processes (EN 15210-1: 2009). The broken pellet pieces and dust were separated and weighed by using a 3.15 mm sieve. The mechanical durability was calculated by using the following equation:

$$DU = (M_A/M_B) \times 100 \quad (2)$$

where DU is the mechanical durability (%), M_A is the mass of the pellet pieces after tumbling (g), and M_B is the mass of the pellet pieces before tumbling (g).

2.4. Calorific Value of the Samples

The heating value or gross calorific value of pellet samples was determined by using an automatic bomb calorimeter, Leco A-350, St. Joseph, MI, USA. The measurements were made in triplicate, and the results are given as means with standard deviations in MJ/kg (ASTM D 3286-96). The samples were also subjected to proximate analysis in order to determine the impact of moisture content (MC), volatile matter (VM), ash content (AC), and fixed carbon (FC) on the gross calorific value. The VM, AC, and FC quantities were determined by measuring the mass loss that a sample undergoes at a temperature of 900 °C, under a nitrogen atmosphere, and then held at 900 °C, under atmospheric air [28].

2.5. Ultimate Analysis of the Samples

The samples were finally analyzed by using the ASTM D5373-93 (1997) procedure, ASTM, West Conshohocken, PA, USA. In an ultimate analysis, the contents of elemental carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N), and sulfur (S) in pellets were determined by using a Perkin Elmer, 2400 Series II CHNS/O analyzer, USA. The chlorine (Cl) content was determined by using a 785 DMP Titrino from Metrohm in Switzerland.

2.6. Microstructure Evaluation of the Samples

A scanning electron microscope (SEM), FEI Quanta 250, Waltham, MA, USA was also employed to examine the microstructure samples. The images were captured by using a SEM set to 15 kV, and all of the specimens were coated with a thin gold layer prior to analysis. The images were taken from cross-sections of pellets with a diameter of 6 mm.

2.7. Data Analysis

For data analysis, a completely randomized design of sample types was used. Using XLSTAT in Microsoft Excel 365[®], Microsoft, Redmond, WA, USA, analysis of variance (ANOVA) was used to determine the significant differences between the four types of pellet specimens. Duncan's multiple range tests, as well as SPSS Statistics version 22, were used for additional analysis. A *p*-value of 0.05 was used as the level of confidence.

3. Results and Discussion

Table 2 summarizes the physical properties of the pellet samples, such as the diameter, length, density, and color appearance.

Table 2. Diameter, length, density, and color appearance of the pellet samples.

Sample Type	Diameter (mm)		Length (mm)		Density (g/cm ³)		Color
	Mean	±(0.02)	Mean	±(0.33)	Mean	±(0.011)	
W100	6.11 ^b	±(0.02)	36.27 ^c	±(0.33)	1.288 ^a	±(0.011)	brown
W7R3	6.19 ^a	±(0.01)	43.40 ^a	±(0.29)	1.121 ^d	±(0.003)	black
W6R4	6.13 ^b	±(0.05)	41.49 ^b	±(1.05)	1.175 ^c	±(0.022)	black
W5R5	6.21 ^a	±(0.03)	41.64 ^b	±(0.57)	1.234 ^b	±(0.018)	black

Numbers in parentheses are standard deviation values. Mean values with the different letters are significantly different at *p* < 0.05.

Figure 3 depicts two types of pellets that revealed the color comparison between pure and mixed wood pellets. Rubberwood pellets are brown in color, but they turned black when RDF-3 was mixed with rubberwood during pellet production. It was confirmed that the color of the wood pellets could be altered based on their material composition. The diameter of the pellets ranged from 6.11 to 6.21 mm. As the pellets were produced by using a flat die mill of 6 mm, the diameters did not differ much within different types of pellet formulations. Generally, the pellets made by mixing rubberwood and RDF-3 have slightly larger diameters compared to those of the pellets made from pure rubberwood. In terms of length, the pellets made from mixing 70% rubberwood and 30% RDF-3 (W7R3) have the longest length, of 43.40 mm. The length decreased when higher loading of RDF-3 was added, but they were still longer than the pellets made with pure rubberwood (36.27 mm). Meanwhile, the density of the pellets made with pure rubberwood was the highest (1.288 g/cm³) when compared to the pellets with the addition of RDF-3.



Figure 3. Visual appearance of (a) rubberwood pellets and (b) mixed pellets, i.e., 50% rubberwood and 50% RDF.

Table 3 displays the mechanical durability and heating value of pellets of various pellet formulations. The mechanical durability of the pellets manufactured in this study ranged from 98.27 to 99.07%. The results of this study indicate excellent mechanical durability, which is consistent with the findings of Ungureanu et al. [29], who reported values of 96–97%. All samples with a durability greater than 96% were considered to be of high quality, according to biomass pellets standards [30]. This result demonstrated that both materials can be successfully blended to produce pellets without the addition of any adhesive. The addition of 40% RDF-3 and higher appears to improve the mechanical durability of the pellets. Pellets made with 40% and 50% RDF-3 loadings have significantly higher mechanical durability than pellets made with pure rubberwood. The improvement could be related to the density of the pellets, as higher specific densities are generally associated with greater durability [30]. Pellets with a 50:50 rubberwood:RDF-3 ratio have the highest density, and, thus, better mechanical durability is anticipated.

Table 3. Mechanical durability and heating values of samples.

Sample Type	Mechanical Durability (%) Mean		Calorific Value (MJ/kg) Mean	
W100	98.39 ^b	±(0.32)	17,277 ^d	±(60)
W7R3	98.27 ^b	±(0.09)	18,866 ^c	±(230)
W6R4	98.85 ^a	±(0.07)	19,461 ^b	±(83)
W5R5	99.07 ^a	±(0.09)	21,445 ^a	±(520)

Numbers in parentheses are standard deviation values. Mean values with the different letters are significantly different, $p < 0.05$.

As shown in Figure 4, pure rubberwood sawdust pellets had an average calorific value of 17,277 MJ/kg, while mixed pellets of W7R3, W6R4, and W5R5 had 18,866, 19,461, and 21,445 MJ/kg, respectively. Previous research discovered that the calorific value of RDF in Latvia and Lithuania was 18,310–22,521 MJ/kg [31]. The heating value result showed that mixing RDF-3 can increase the energy of pellet ($p < 0.01$). Furthermore, when the RDF-3 ratio is increased, the calorific value improves in a linear fashion. It is a fact that this value is dependent on the MSW source, which contains a variety of waste compositions.

Rezaei et al. [32] investigated the heating value of pellets made from various plastic, paper, organic, and wood compositions. Pellets with the highest plastic and lowest paper content were found to have the highest heating value. It was reported that pellets with the highest plastic and minimum paper contents generated the highest heating value.

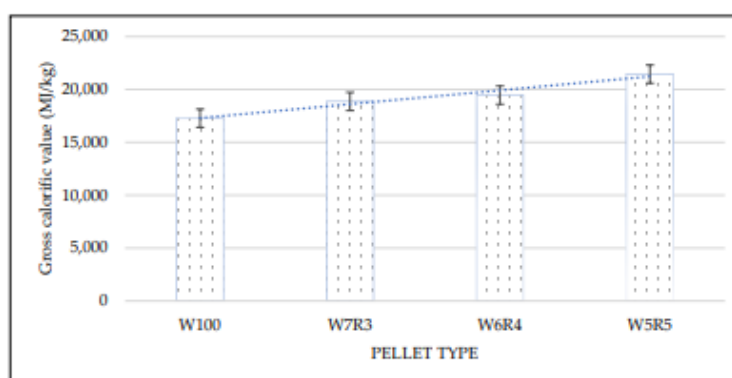


Figure 4. Gross calorific values of pellets made from rubberwood and RDF.

An ultimate analysis was carried out to investigate the carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and chloride content of the pellets. The results are listed in Table 4. Generally, increased contents of carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and chloride were observed when higher ratios of RDF-3 were added. Pellets made with 50% RDF-3 addition have the highest carbon (50.78%), nitrogen (0.69%), and chloride (0.124%) contents. Meanwhile, pellets made with 40% RDF-3 have the highest hydrogen (11.76%) and sulfur (1.45%) contents. According to Garcia et al. [33], RDF has a significantly higher content of ash, N, S, and Cl. As a result, it is understandable that pellets made from mixed rubberwood and RDF contain a higher concentration of these constituents.

Table 4. Ultimate analysis of rubberwood and RDF pellets.

Sample Type	Ultimate Analysis									
	C		H		N		S		Cl	
	Mean (%)	±(SD)	Mean (%)	±(SD)	Mean (%)	±(SD)	Mean (%)	±(SD)	Mean (%)	±(SD)
W100	47.81 ^b	±(0.54)	7.74 ^b	±(1.27)	0.28 ^b	±(0.05)	0.57 ^d	±(0.02)	0.017 ^c	±(0.002)
W7R3	47.59 ^b	±(0.36)	10.61 ^a	±(1.19)	0.47 ^b	±(0.05)	0.90 ^c	±(0.02)	0.093 ^b	±(0.005)
W6R4	47.87 ^b	±(0.22)	11.76 ^a	±(0.78)	0.47 ^b	±(0.20)	1.45 ^a	±(0.13)	0.118 ^a	±(0.003)
W5R5	50.78 ^a	±(1.72)	10.35 ^a	±(0.78)	0.69 ^a	±(0.03)	1.06 ^b	±(0.08)	0.124 ^a	±(0.002)

Numbers in parentheses are standard deviation values. Mean values with the different letters are significantly different, $p < 0.05$.

Table 5 shows the results of the proximate analysis of samples for moisture content (MC), volatile matter (VM), ash content, and fixed carbon (FC). For woody raw materials, moisture content in the range of 5–10% is usually optimal [29]. W5R5 pellets has an excellent moisture content. However, it is recommended that a moisture content of 5–12% be required to produce a high-quality product, because pellets with less than 4% moisture content can absorb moisture from the environment [34]. The average MC content of the samples was 5.50%, compared to 9.61% for wood pellets. It can be concluded that they have the ability to withstand water absorption. Meanwhile, the addition of RDF-3 decreased the volatile matter levels in the pellet samples (Figure 5). The volatile matter content of

pure rubberwood pellets is 72.03%. The volatile matter content was reduced to 65.38% and 68.24% after mixing with RDF-3. When RDF-3 was mixed during the pellet production process, however, an increase in ash content was also observed. The increase in ash content was statistically significant and increased with the increasing RDF-3 ratio. On the contrary, as the RDF-3 ratio increased, the fixed carbon content decreased. Garcia et al. [33] made a similar observation, stating that pine pellets have less ash but more fixed carbon than RDF pellets.

Table 5. Proximate analysis of rubberwood and RDF pellets.

Sample Type	Proximate Analysis							
	MC Mean (%)		VM Mean (%)		Ash Mean (%)		FC Mean (%)	
W100	9.61 ^c	±(0.21)	72.03 ^a	±(0.03)	2.50 ^d	±(0.13)	15.85 ^a	±(0.22)
W7R3	11.17 ^a	±(0.44)	65.69 ^c	±(0.43)	9.90 ^c	±(0.09)	13.24 ^b	±(0.47)
W6R4	10.49 ^b	±(0.10)	65.38 ^c	±(0.10)	11.87 ^b	±(0.23)	12.26 ^b	±(0.32)
W5R5	5.50 ^d	±(0.41)	68.24 ^b	±(0.76)	13.78 ^a	±(0.18)	12.48 ^b	±(0.84)

Numbers in parentheses are standard deviation values. Mean values with the different letters are significantly different $p < 0.05$.

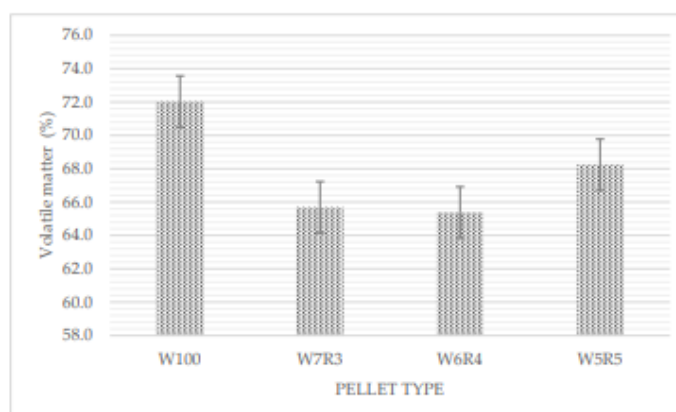


Figure 5. Volatile matter (VM) values of rubberwood and RDF pellets.

Figure 6 depicts the SEM images of the rubberwood pellet and mixed pellet samples. The images show the homogeneous mixing of pellets. Figure 6a exhibits the fiber and texture of rubberwood [35]. Meanwhile, Figure 6b exhibits the texture of rubber wood mixed with RDF-3 compositions via a heating process. The SEM image revealed a smooth surface when compared to that of a rubberwood pellet. Generally, RDF compositions include cardboard, plastic, textile, and organic matter, depending on the weight of the waste [29]. Therefore, the surface of the mixed pellet could form a smooth surface area, and the RDF fabricated the gum to be combined with the wood texture that made stronger RDF-wood pellets on their mechanical durability. Both figures had almost identical surface features, indicating that mixed pellets have the same commercial potential as rubberwood pellets. However, it seems that the RDF-3 samples have a more compacted structure based on their smoother surface, and this characteristic could be a reason for the improved mechanical durability of RDF pellets.

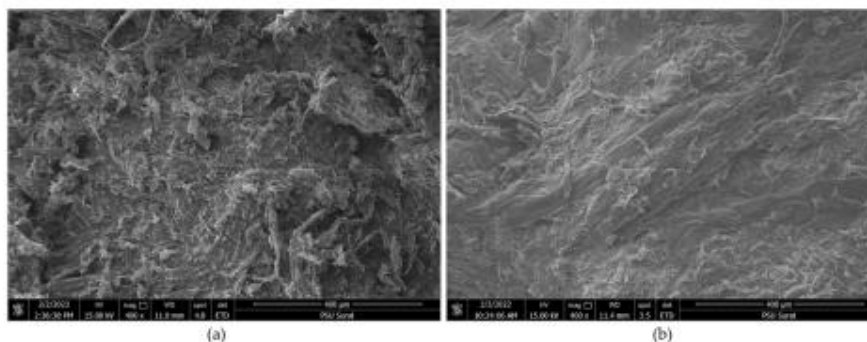


Figure 6. SEM images of (a) wood pellet and (b) mixed pellet.

4. Conclusions

This study demonstrated that RDF-3, a product of municipal solid-waste transformation, can be mixed with rubberwood to produce a pellet fuel. Pellets with a mixture of 50% rubberwood sawdust and 50% RDF-3 demonstrated the capability of a fuel material with the highest density and energy. The increased RDF ratio had a significant impact on the heating value of mixed pellets, while the volatile matter values were also significantly reduced. Meanwhile, the mechanical durability of the W5R5 sample was 99.07%. Combining both feedstock types appears to have the potential to yield value-added blend pellets for use in biomass power plants and other applications. Other properties, such as the elemental compositions of mixed pellets, would be interesting to investigate in future research to gain a better understanding of how this type of product behaves.

Author Contributions: Conceptualization, R.L. and A.C.; Data curation, A.P.; Formal analysis, R.L., M.L. and J.K.; Investigation, R.L., J.K. and A.C.; Methodology, A.C.; Project administration, A.C.; Resources, A.P. and M.L.; Supervision, C.N., S.H.L. and A.C.; Writing—original draft, R.L. and J.K.; Writing—review & editing, C.N., S.H.L. and A.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the government budget allocated to Prince of Songkla University, Grant Number SIT6405018S and Interdisciplinary Graduate School of Energy Systems (IGS-Energy) Grant Number 1-2019/06.

Conflicts of Interest: The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

References

1. Saosee, P.; Sajjakulnukit, B.; Gheewala, S. Life Cycle Assessment of Wood Pellet Production in Thailand. *Sustainability* **2020**, *12*, 6996. [\[CrossRef\]](#)
2. Boukherroub, T.; LeBel, L.; Lemieux, S. An Integrated Wood Pellet Supply Chain Development: Selecting among Feedstock Sources and a Range of Operating Scales. *Appl. Energy* **2017**, *198*, 385–400. [\[CrossRef\]](#)
3. Thrän, D.; Peetz, D.; Schaubach, K.; Mai-Moulin, T.; Junginger, H.M.; Lamers, P.; Visser, L. *Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017*; IEA Bioenergy Task 40-06-15; IEA Bioenergy: Dublin, Ireland, 2017.
4. Macko, M.; Mroziński, A. Computer Aided Design of Wood Pellet Machines. *Lect. Notes Mech. Eng.* **2017**, 454–461. [\[CrossRef\]](#)
5. Shigematsu, A.; Mizoue, N.; Kajisa, T.; Yoshida, S. Importance of rubberwood in wood export of Malaysia and Thailand. *New For.* **2011**, *41*, 179–189. [\[CrossRef\]](#)
6. Thongpat, W.; Taweekun, J.; Maliwan, K. Synthesis and Characterization of Microporous Activated Carbon from Rubberwood by Chemical Activation with KOH. *Carbon Lett.* **2021**, *31*, 1079–1088. [\[CrossRef\]](#)
7. Ratnasingam, J.; Ramasamy, G.; Ioras, F.; Parasuraman, N. Assessment of the carbon footprint of rubberwood sawmilling in peninsular Malaysia: Challenging the green label of the material. *BioResources* **2017**, *12*, 3490–3503. [\[CrossRef\]](#)

8. Kongto, P.; Palamanit, A.; Chaiprapat, S.; Tippayawong, N. Enhancing the Fuel Properties of Rubberwood Biomass by Moving Bed Torrefaction Process for Further Applications. *Renew. Energy* **2021**, *170*, 703–713. [\[CrossRef\]](#)
9. Chotikhun, A.; Kittijarawattana, J.; Salca, E.-A.; Hiziroglu, S. Selected Physical and Mechanical Properties of Microwave Heat Treated Rubberwood (*Hevea Brasiliensis*). *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 6273. [\[CrossRef\]](#)
10. Rubiyanti, T.; Hidayat, W.; Febryano, I.G.; Bakri, S. Characterization of Rubberwood (*Hevea Brasiliensis*) Pellets Torrefied with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor. *J. Sylva Lestari* **2019**, *7*, 321. [\[CrossRef\]](#)
11. Hidayat, W.; Rubiyanti, T.; Sulistio, Y.; Iryani, D.A.; Haryanto, A.; Amrul, A.; Yoo, J.; Kim, S.; Lee, S.; Hasanudin, U. Effects of Torrefaction Using COMB Dryer/Pyrolizer on the Properties of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Jabon (*Anthocephalus cadamba*) Pellets. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019), Lampung, Malaysia, 15–17 October 2021. [\[CrossRef\]](#)
12. Ratnasingam, J.; Ramasamy, G.; Wai, L.T.; Senin, A.L.; Muttiah, N. The prospects of rubberwood biomass energy production in Malaysia. *BioResources* **2015**, *10*, 2526–2548. [\[CrossRef\]](#)
13. Yang, Y.; Liew, R.K.; Tamothran, A.M.; Foong, S.Y.; Yek, P.N.; Chia, P.W.; Van Tran, T.; Peng, W.; Lam, S.S. Gasification of Refuse-derived Fuel from Municipal Solid Waste for Energy Production: A review. *Environ. Chem. Lett.* **2021**, *19*, 2127–2140. [\[CrossRef\]](#)
14. Cheela, V.R.S.; John, M.; Dubey, B. Quantitative Determination of Energy Potential of Refuse Derived Fuel from the Waste Recovered from Indian Landfill. *Sustain. Environ. Res.* **2021**, *31*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
15. Chiemchaisri, C.; Charnnok, B.; Visvanathan, C. Recovery of Plastic Wastes from Dumpsite as Refuse-Derived Fuel and Its Utilization in Small Gasification System. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 1522–1527. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Ramos Casado, R.; Arenales Rivera, J.; Borjabad Garcia, E.; Escalada Cuadrado, R.; Fernández Llorente, M.; Bados Sevillano, R.; Pascual Delgado, A. Classification and Characterisation of SRF Produced from Different Flows of Processed MSW in the Navarra Region and Its Co-Combustion Performance with Olive Tree Pruning Residues. *Waste Manag.* **2016**, *47*, 206–216. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Kamperidou, V.; Lykidis, C.; Barmpoutis, P. Assessment of the Thermal Characteristics of Pellets Made of Agricultural Crop Residues Mixed with Wood. *BioResources* **2017**, *12*, 9263–9272. [\[CrossRef\]](#)
18. Lombardi, L.; Carnevale, E.; Corti, A. A Review of Technologies and Performances of Thermal Treatment Systems for Energy Recovery from Waste. *Waste Manag.* **2015**, *37*, 26–44. [\[CrossRef\]](#)
19. Iqbal, M.; Nadeem, A.; Butt, M. Refused Derived Fuel Pellets from Municipal Solid Waste and Rice Husk. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* **2019**, *54*, 329–338. [\[CrossRef\]](#)
20. Saputro, H.; Liana, D.N.; Firdaus, A.; Mahmudin, M.; Evan, B.; Karsa, B.S.; Perdana, V.L.; Wijayanto, D.S.; Bugis, H.; Fitriana, L. Preliminary Study of Pellets Refuse Derived Fuel (RDF-5) Based on Durian Waste for Feedstock in Fast Pyrolysis. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *434*, 012184. [\[CrossRef\]](#)
21. Cui, X.; Yang, J.; Wang, Z.; Shi, X. Better Use of Bioenergy: A Critical Review of Co-Pelletizing for Biofuel Manufacturing. *Carbon Capture Sci. Technol.* **2021**, *1*, 100005. [\[CrossRef\]](#)
22. Win, M.M.; Asari, M.; Hayakawa, R.; Hosoda, H.; Yano, J.; Sakai, S.-I. Gas and Tar Generation Behavior during Flash Pyrolysis of Wood Pellet and Plastic. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2019**, *22*, 547–555. [\[CrossRef\]](#)
23. Al-Salem, S.M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste (PSW). *J. Environ. Manag.* **2017**, *197*, 177–198. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Zhang, X.; Lei, H.; Chen, S.; Wu, J. Catalytic Co-Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass with Polymers: A Critical Review. *Green Chem.* **2016**, *18*, 4145–4169. [\[CrossRef\]](#)
25. Grieco, E.M.; Baldi, G. Pyrolysis of Polyethylene Mixed with Paper and Wood: Interaction Effects on Tar, Char and Gas Yields. *Waste Manag.* **2012**, *32*, 833–839. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Kumagai, S.; Fujita, K.; Kameda, T.; Yoshioka, T. Interactions of Beech Wood–Polyethylene Mixtures during Co-Pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2016**, *122*, 531–540. [\[CrossRef\]](#)
27. Kerdsuwan, S.; Meenaroach, P.; Chalermcharoenrat, T. The Novel Design and Manufacturing Technology of Densified RDF from Reclaimed Landfill without a Mixing Binding Agent Using a Hydraulic Hot Pressing Machine. *MATEC Web Conf.* **2016**, *70*, 11003. [\[CrossRef\]](#)
28. Donahue, C.J.; Rais, E.A. Proximate Analysis of Coal. *J. Chem. Educ.* **2009**, *86*, 222. [\[CrossRef\]](#)
29. Ungureanu, N.; Vladut, V.; Voicu, G.; Dinca, M.-N.; Zabava, B.-S. Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties-Review. *Eng. Rural Dev.* **2018**, *17*, 1876–1883. [\[CrossRef\]](#)
30. Jewiarz, M.; Mudryk, K.; Wróbel, M.; Frączek, J.; Dziędzic, K. Parameters Affecting RDF-Based Pellet Quality. *Energies* **2020**, *13*, 910. [\[CrossRef\]](#)
31. Alhindawi, I.; Jimenez-Bescos, C. Assessing the Performance Gap of Climate Change on Buildings Design Analytical Stages Using Future Weather Projections. *Environ. Clim. Technol.* **2020**, *24*, 119–134. [\[CrossRef\]](#)
32. Rezaei, H.; Yazdan Panah, F.; Lim, C.J.; Sokhansanj, S. Pelletization of Refuse-Derived Fuel with Varying Compositions of Plastic, Paper, Organic and Wood. *Sustainability* **2020**, *12*, 4645. [\[CrossRef\]](#)
33. García, R.; González-Vázquez, M.P.; Rubiera, F.; Pevida, C.; Gil, M.V. Co-Pelletization of Pine Sawdust and Refused Derived Fuel (RDF) to High-Quality Waste-Derived Pellets. *J. Clean. Prod.* **2021**, *328*, 129635. [\[CrossRef\]](#)

-
34. Junfeng, L.; Runqing, H. Sustainable Biomass Production for Energy in China. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25*, 483–499. [[CrossRef](#)]
 35. Halim, S.A.; Swithenbank, J. Characterisation of Malaysian Wood Pellets and Rubberwood Using Slow Pyrolysis and Microwave Technology. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2016**, *122*, 64–75. [[CrossRef](#)]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวรัตติกาล เหล่าเสนา
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6210120015
 วุฒิการศึกษา
 วุฒิ ชื่อสถาบัน การศึกษาที่สำเร็จ
 วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2561
 (สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมยางพารา) วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนบัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Laosena, R.; Palamanit, A.; Luengchavanon, M.; Kittijaruwattana, J.; Nakason, C.; Lee, S.H.; Chotikhun, A. Characterization of Mixed Pellets Made from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and RefuseDerived Fuel (RDF) Waste as Pellet Fuel. *Materials* 2022, 15, 3093.