



การนำดินฟอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ กรณีศึกษา: การปรับสภาพเพื่อกลับไปใช้
ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม และการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่
ผ่านการทอรรีแฟคชัน

Utilization of Used Bleaching Clay: Reactivation for Reprocessing in
Palm Oil Refining Industry and Pellet Fuel Production with
Torrefied Oil Palm Fronds

เพ็ญศิริ ร่มเย็น

Pensiri Romyen

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master Engineering in Energy Technology

Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การนำดินฟอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ กรณีศึกษา: การปรับสภาพเพื่อกลับไปใช้
ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม และการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่
ผ่านการทอรรีแฟคชัน

Utilization of Used Bleaching Clay: Reactivation for Reprocessing in
Palm Oil Refining Industry and Pellet Fuel Production with
Torrefied Oil Palm Fronds

เพ็ญศิริ ร่มเย็น

Pensiri Romyen

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master Engineering in Energy Technology

Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การนำดินพอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ กรณีศึกษา: การปรับสภาพเพื่อกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม และการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอรีแฟคชัน
ผู้เขียน	นางสาวเพ็ญศิริ ร่มเย็น
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**คณะกรรมการสอบ**

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

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์)

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ ปันวิชัย)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ ปันวิชัย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญา ชาญนอก)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยะ โชติพันธ์)

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้สำหรับ
การศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน.

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เถกิง วงศ์ศิริโชติ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายสุนีย์ จำรัส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ ปั่นวิชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(นางสาวเพ็ญศิริ ร่มเย็น)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวเพ็ญศิริ ร่มเย็น)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การนำดินพอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ กรณีศึกษา: การปรับสภาพเพื่อกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม และการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน
ผู้เขียน	นางสาวเพ็ญศิริ รมเย็น
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อนำดินพอกสีกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมกับทางปาล์มทอร์รีไฟด์ และทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางความร้อนและทางเคมี (ไมโครเวฟไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยกรด) เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการใช้กระบวนการทอร์รีแฟคชันด้วยระบบไมโครเวฟทอร์รีแฟคชัน เพื่อเพิ่มสมบัติด้านเชื้อเพลิงของทางปาล์มน้ำมัน จากผลการศึกษา พบว่าการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 40 นาที เป็นสภาวะที่ทำให้ทางปาล์มที่ผ่านการทอร์รีไฟด์มีค่าความร้อนและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด เท่ากับ 23.01 MJ/Kg และ 46.06% ตามลำดับ เมื่อนำทางปาล์มที่ผ่านการทอร์รีไฟด์มาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมกับดินพอกสีใช้แล้ว พบว่าเมื่อปริมาณทางปาล์มมากขึ้นทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงไมทอร์รีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่าความร้อน เท่ากับ 12.24 MJ/Kg และ 18.40 MJ/Kg ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดที่มีส่วนผสมของทางปาล์มทอร์รีไฟด์กับดินพอกสีใช้แล้วในอัตราส่วน 70:30 มีค่าความร้อนสูงที่สุดและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO/TS 17225-8:2016 Solid biofuels - Fuel specifications and classes (Part 8 : Graded thermally treated and densified biomass fuels) และสำหรับการนำดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพมาพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ พบว่า ดินพอกสีใช้แล้วที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการแช่กรด เห็นได้ชัดว่ามีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าดินพอกสีใช้แล้วที่ผ่านการไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าน้อยกว่าดินพอกสีบริสุทธิ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าสีจากการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบที่ พบว่า ค่าสีของน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีบริสุทธิ์มีค่าต่ำกว่าค่าสีของน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพทั้งแบบที่ผ่านการไพโรไลซิสและผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการแช่กรด

Thesis Utilization of used bleaching clay: reactivation for reprocessing in palm oil refining industry and pellet fuel production with torrefied oil palm frond

Author Miss Pensiri Romyen

Major Program Energy Technology

ABSTRACT

The purpose of this work is to reuse bleached clay. It is used to produce pellet fuel with oil palm fronds and reactivation (microwave pyrolysis and acid activation) to be re-bleaching in the crude palm oil refining industry. In the production of pellet fuel, a torrefaction process is used to increase the fuel properties of oil palm fronds by using a microwave torrefactor result, torrefaction at 300oC for 20 minutes is the most suitable torrefaction condition due to its highest reliability and increased carbon stability. net calorific value and fixed carbon were 23.01 MJ/Kg and 46.06% respectively when used to produce pellet fuel together with used bleaching clay, it was found that the greater the amount of palm passage, the higher the calorific value of the pellet fuel both non- torrefied pellet fuel and torrefied pellet fuel have calorific values of 12.24 MJ/Kg and 18.40 MJ/Kg. respectively The calorific value of torrefied pellet fuel between oil palm fronds torrefied and used bleaching soil in the ratio of 70:30 is the highest and meets the benchmark ISO/TS 17225-8:2016 Solid biofuels — Fuel specifications and classes (Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels). In terms of reactivation, used bleaching clay. When analyzing the surface area and pore volume of pyrolysis used bleaching clay and pyrolysis used bleaching clay followed by acid activation. It becomes clear that pyrolysis used bleaching clay followed by acid activation has increased surface area and pore volume from pyrolysis used bleaching clay. But in comparison with pure bleaching clay. It was found that the surface area and pore volume of reactivated bleaching clay were found

to be both pyrolysis treated used bleaching clay and pyrolysis used bleaching clay followed by acid activation. It is less valuable than pure bleached clay. This is consistent with the effect of crude palm oil bleaching color values that showed lower pigmentation values of oil bleached with pure bleaching clay. The color value of the oil bleached with reactivated bleached clay, both pyrolysis and pyrolysis followed by acid activation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายสุนีย์ จำรัส ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธพงศ์ เพ็ญโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ ปั่นวิชัย ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำการทดลอง ตลอดไปถึงการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และนอกจากนี้ที่ยังมีความกรุณาให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ อีกด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัฉริยะ โชติพันธ์ ที่คอยชี้แนะแนวทาง และให้ข้อมูลทางการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเมตตา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนา (RDO) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่สนับสนุนโครงการนี้ภายใต้ ศูนย์วิจัยบูรณาการโพลีโอมัลคูล่าสูง (IH-VO) ข้าพเจ้า นางสาวเพ็ญศิริ ร่มเย็น ขอขอบคุณทุนวิจัย วิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์/พัฒนาเครื่องมือ/พัฒนานวัตกรรมที่ต้องใช้วัสดุ ทุน บัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์ และขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่สนับสนุนทางด้านสถานที่ทำการทดลอง ตลอดไปจนถึงเครื่องมือ เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท นิวไปโอดีเซล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ดินฟอกสีใช้แล้ว ดินฟอกสีบริสุทธิ์ และน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ของทางบริษัท นิวไปโอดีเซล จำกัด ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับดินฟอกสีใช้แล้วและขั้นตอน วิธีการฟอกสี น้ำมันปาล์มดิบให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณกัลยาณมิตรที่ดีที่คอยเป็นกำลังและแรงใจให้แก่ผู้วิจัย อันได้แก่ อาทิตญา บุญทรา วริยา สุวรรณมณี รติมา วายทองคำ เอ็นอาร์ม พรหมโนนศรี กนกวรรณ จันท์สุวรรณ สุนิสา ช่วยจำนงค์ และคนอื่น ๆ ที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ขอขอบคุณที่คอยช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจทั้งที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและด้านอื่นๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่รักยิ่งทั้งสองท่าน รวมไปถึงญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้การอบรม สั่งสอน เลี้ยงดู และให้โอกาสทางด้านการศึกษาจนข้าพเจ้าสามารถทำงานวิจัยนี้ได้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูทเวทิตาแด่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เพ็ญศิริ ร่มเย็น

สารบัญ

รายการ	หน้า
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ	18
1.1 บทนำ	19
1.2 วัตถุประสงค์	21
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	21
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	22
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ	23
2.1.1 การกำจัดกัม.....	23
2.1.2 การฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ.....	23
2.1.3 การกำจัดกลิ่น	24
2.2 ดินฟอกสี (Bleaching clay).....	24
2.3 ดินฟอกสีใช้แล้ว (used bleaching clay).....	26
2.4 กลไกการดูดซับ	28
2.5 ทางปาล์มน้ำมัน (Oil palm fronds; OPF).....	28
2.5.1 ลักษณะทางกายภาพของทางปาล์มน้ำมัน	29
2.5.2 ส่วนประกอบทางเคมีของทางปาล์มน้ำมัน.....	29
2.6 เทคโนโลยีทอรรีแฟคชัน	31
2.6.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลในกระบวนการ ทอรรีแฟคชัน	31
2.6.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	33
2.7 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	34
2.7.1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	35

2.7.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง.....	36
2.8 มาตรฐานเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ด.....	36
2.9 การปรับสภาพของดินฟอสฟอรัสที่ใช้แล้ว.....	42
2.9.1 การปรับสภาพด้วยความร้อน.....	42
2.9.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	42
2.9.3 การปรับสภาพทางเคมี.....	43
2.9.4 การผสมผสานวิธีการต่าง ๆ.....	43
2.10 พื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	45
2.10.1 คุณสมบัติที่แตกต่างกันในการเดินทางผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ.....	46
2.10.2 หลักการของไมโครเวฟโรไลซิส.....	47
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 การผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ด.....	48
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.1.3 กระบวนการเตรียมดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว และทางปาล์มน้ำมัน.....	52
3.1.4 กระบวนการทอร์รีแฟคชันและการวิเคราะห์สมบัติของทางปาล์มน้ำมัน.....	53
3.1.5 กระบวนการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	55
3.1.6 การวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	57
3.2 การปรับสภาพดินฟอสฟอรัสใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ในการฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มซ้ำอีกครั้ง.....	58
3.2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	59
3.2.3 ขั้นตอนและกระบวนการทดลองปรับสภาพดินฟอสฟอรัสใช้แล้วเพื่อฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มดิบ..	62
3.2.4 กระบวนการฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มดิบ.....	66

3.2.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างจากกระบวนการปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้วและกระบวนการพอกสีน้ำมันปาล์ม.....	69
3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับการทดลอง	69
3.3.1 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	69
3.3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนในการปรับสภาพเพื่อใช้ในการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ	69
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	71
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ.....	71
4.1.1 สมบัติของดินพอกสีใช้แล้ว (UBC) ทางปาล์มน้ำมัน (OPF) ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอรีไฟด์ (TOPF).....	71
4.1.2 อัตราส่วนเชื้อเพลิง	75
4.1.3 ผลผลิตเชิงมวล.....	76
4.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA).....	78
4.2 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	79
4.2.1 สมบัติของเชื้อเพลิงไม่ทอรีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรีไฟด์อัดเม็ด.....	79
4.2.2 สมบัติที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนสูงสุด	84
4.3 ผลการปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้ว	87
4.3.1 ผลการไพโรไลซิสดินพอกสีใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ	88
4.3.2 ผลการไพโรไลซิสดินพอกสีใช้แล้วด้วยไมโครเวฟตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด	90
4.4 ผลการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ.....	95
4.5 ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการปรับสภาพเพื่อนำมาพอกสีซ้ำ	98
4.5.1 การต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	98
4.5.2 ต้นทุนในการปรับสภาพเพื่อนำมาพอกสีซ้ำ	99
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	Error! Bookmark not defined.
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม	103
ภาคผนวก ก	109
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสี	7
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางกายภาพของดินฟอกสี	8
ตารางที่ 2.3 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสี	8
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีใช้แล้วสกัดน้ำมันออก	9
ตารางที่ 2.5 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้ว	9
ตารางที่ 2.6 สมบัติด้านเชื้อเพลิงของดินฟอกสีใช้แล้ว	9
ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ Proximate และ Ultimate ของทางปาล์มน้ำมัน	12
ตารางที่ 2.8 คุณค่าทางโภชนาการของทางปาล์มน้ำมัน	12
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของทางปาล์มน้ำมันภายหลังการทอรีรีแฟคชัน	16
ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด	19
ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อน แบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้	21
ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ	26
ตารางที่ 2.13 องค์ประกอบทางกายภาพของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ	26
ตารางที่ 2.14 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ	27
ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	56
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของ UBC, OPF และ TOPF	59
ตารางที่ 4.3 ผลได้เชิงมวลของทางปาล์มทอรีรีไฟด์	60
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVO) ของทางปาล์มทอรีรีไฟด์	61
ตารางที่ 4.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงไม้ทอรีรีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับ เชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์อัดเม็ด	64
ตารางที่ 4.6 ประกอบแบบประมาณ (Proximate) เชื้อเพลิงไม้ทอรีรีไฟด์อัดเม็ด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์อัดเม็ด	66
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate) เชื้อเพลิงไม้ทอรีรีไฟด์อัดเม็ด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอรีรีไฟด์อัดเม็ด	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.8 ธาตุองค์ประกอบของดินฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ ดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว (สกัดน้ำมันออก) และดินฟอสฟอรัสหลังการปรับสภาพ	70
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ ดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว และดินฟอสฟอรัสใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส	72
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ ดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว ดินฟอสฟอรัสใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส และดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว ที่ผ่านปรับสภาพการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด	74
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าสีฟ้าของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มที่ผ่าน การฟอสฟอรัสด้วยดินฟอสฟอรัสดินฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ และน้ำมันปาล์มที่ผ่าน การฟอสฟอรัสด้วยดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับสภาพ	80
ตารางที่ 4.12 การลงทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	81
ตารางที่ 4.13 การลงทุนในกระบวนการปรับสภาพเพื่อนำมาฟอสฟอรัสซ้ำ	81

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบทางกายภาพ	6
รูปที่ 2.2 ดินฟอกสี	7
รูปที่ 2.3 ดินฟอกสีใช้แล้ว	9
รูปที่ 2.4 ทางปาล์มน้ำมัน	11
รูปที่ 2.5 กระบวนการก่อนและหลังที่ใช้สำหรับการผลิตชีวมวลทอรรีแฟคชัน	13
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลในกระบวนการทอรรีแฟคชัน	14
รูปที่ 2.7 เชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ดที่ใช้อุณหภูมิต่างกันในการผลิตต่างกัน	17
รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด	17
รูปที่ 2.9 การกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธีทั่วไป	21
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่าง ๆ	29
รูปที่ 3.1 ดินฟอกสีใช้แล้ว	31
รูปที่ 3.2 ทางปาล์มน้ำมัน	32
รูปที่ 3.3 เครื่องบดชีวมวลขนาดใหญ่	33
รูปที่ 3.4 เครื่องบดชีวมวลขนาดเล็ก	33
รูปที่ 3.5 เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟทอรรีแฟคชัน	34
รูปที่ 3.6 ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	34
รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมความร้อนเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟทอรรีแฟคชัน	35
รูปที่ 3.8 เครื่องอัดเม็ด	35
รูปที่ 3.9 ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการเตรียม	36
รูปที่ 3.10 กระบวนการทอรรีแฟคชันทางปาล์มน้ำมัน	37
รูปที่ 3.11 กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง	39
รูปที่ 3.12 ถ่านกัมมันต์	41
รูปที่ 3.13 กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄) เข้มข้น 85%	41
รูปที่ 3.14 น้ำมันปาล์มดิบ	42
รูปที่ 3.15 เตาไมโครเวฟไพโรไลซิส	43
รูปที่ 3.16 ระบบควบคุมความร้อนเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิส	44
รูปที่ 3.17 ระบบคอนเดนเซอร์	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.18 กระบวนการไพโรไลซิสดินฟอกสีใช้แล้ว	46
รูปที่ 3.19 กระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	48
รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบ	49
รูปที่ 3.21 กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ	50
รูปที่ 3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง	53
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ	54
รูปที่ 4.2 ค่าความร้อนของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	57
รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	58
รูปที่ 4.4 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงไม่ทอรรีไฟด์อัดเม็ด	59
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงไม่ทอรรีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับ เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ด	63
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงไม่ทอรรีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับ เชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ด	64
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) เชื้อเพลิงไม่ทอรรีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ด	66
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ Ultimate ของเชื้อเพลิงไม่ทอรรีไฟด์อัดเม็ด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ดในอัตราส่วน OPF:UBC 70:30	68
รูปที่ 4.9 ดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 20 30 และ 40 นาที	71
รูปที่ 4.10 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส	72
รูปที่ 4.11 ดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด	73
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนในสภาวะต่าง ๆ	75
รูปที่ 4.13 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพ ด้วยการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด	76
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนในสภาวะต่าง ๆ	77
รูปที่ 4.15 น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีชนิดต่าง ๆ	78
รูปที่ 4.16 ค่าสีฟ้าของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสี	80

บทที่ 1

ที่มาและความสำคัญ

1.1 บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่ให้ผลผลิตสูง ซึ่งมีการนำปาล์มน้ำมันไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ทางด้านอาหารและเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง ในปี 2562 พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของประเทศไทยมีเนื้อที่ 6,102,852 ไร่ ให้ผลผลิต 16,408,440 ตัน (Office of Agricultural Economics, 2019) ซึ่งความต้องการน้ำมันปาล์มเพื่อการบริโภคและใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนในประเทศตั้งแต่ปี 2558 จนถึงปี 2569 เพิ่มขึ้นจาก 102 ล้านตัน เป็น 1.35 ล้านตัน (เพิ่มขึ้น 3% ต่อปี) และเพิ่มขึ้นจาก 1.32 ล้านตัน เป็น 2.60 ล้านตัน (เพิ่มขึ้น 7% ต่อปี) ตามลำดับ (Office of Agricultural Economics, 2019) ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มต้องผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งกระบวนการกลั่นแบบดั้งเดิมมี 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การกำจัดยาง การฟอกสี การทำให้เป็นกลาง และการกำจัดกลิ่น (Saputro et al., 2020) ขั้นตอนการฟอกสีเป็นกระบวนการสำคัญในการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ โดยจุดประสงค์หลักของกระบวนการฟอกสี คือ การดูดซับสี รงควัตถุ และสิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์มดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (Nursulihatimarsyila et al., 2010)

ในขั้นตอนการฟอกสีทำให้เกิดของเสียจำนวนมากที่เรียกว่า "ดินฟอกสีใช้แล้ว" เกิดขึ้นประมาณ 4,000 ตันต่อเดือน (ข้อมูลจากโรงงานนิวไบโอดีเซล) ดินฟอกสีใช้แล้วโดยปกติมีน้ำมันตกค้างอยู่ 20 – 40% โดยน้ำหนัก และอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ ที่สำคัญ คือ ดินฟอกสีใช้แล้วสามารถออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่เกิดเพลิงไหม้ได้เองตามธรรมชาติเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาอัตโนมัติของแร่ธาตุดินเหนียว ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นของเสียอันตราย (Mu et al., 2019) ที่ต้องกำจัดทิ้งแบบขยะอุตสาหกรรมและต้องได้รับการจัดการให้เป็นไปตามกฎหมาย เช่น ส่งไปกำจัดยังหลุมฝังกลบ ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับเตาเผาความร้อนสูง และใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือเป็นส่วนผสมของสารปรับสภาพดิน แต่ยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากในกระบวนการกำจัดมีค่าใช้จ่ายทั้งในแง่ของการดำเนินงาน ค่าขนส่ง และค่าใช้จ่ายในการกำจัด (Kittithammavong et al., 2016) จากปัญหาเหล่านี้ได้มีการศึกษาวิจัยจำนวนมากที่พยายามนำเอาดินฟอกสีใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง รวมถึงการสกัดน้ำมันที่ตกค้างออกและการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้ว (Mahramanlioglu et al., 2010)

ดินฟอกสีใช้แล้วมีสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่โดดเด่นเหมาะสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิงเม็ด เพราะในปัจจุบันหลายประเทศส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาด ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาเป็นจำนวนมาก ในปี พ.ศ. 2558

ประเทศไทยมีการใช้พลังงานหมุนเวียน 10,077,000 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ส่งผลให้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30.91 ล้านตัน โดยใช้ในรูปแบบของความร้อนสูงสุดเท่ากับ 6,579,000 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และคาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2579 ความต้องการพลังงานหมุนเวียนจะเพิ่มขึ้นเป็น 39,389,000 ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และใช้ในรูปแบบของความร้อนสูงถึง 25,088,000 ตัน (Pongsa et al, 2017) คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงที่ และปริมาณเถ้า ฯลฯ โดยค่าความร้อนของดินฟอกสีใช้แล้วมีค่าประมาณ 12.4 MJ/kg ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเม็ด แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ดินฟอกสีใช้แล้วเพียงอย่างเดียวในการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดให้ผลผลิตเป็นเชื้อเพลิงเม็ดที่ได้มีคุณสมบัติไม่ตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อค้นหาชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับดินฟอกสีที่ใช้แล้ว

ทางปาล์มน้ำมันถือเป็นชีวมวลจากปาล์มน้ำมันที่น่าสนใจเพราะเป็นชีวมวลที่เกิดขึ้นเป็นปริมาณมากต่อปี โดย Sukiran et al. (2017) รายงานว่ามีทางปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นมากถึง 52 ล้านตันในแต่ละปี แต่มีการนำมาใช้งานเพียง 4 ล้านตันต่อปี ส่วนที่เหลือจะถูกทิ้งให้ย่อยสลายตามธรรมชาติและไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ทางปาล์มน้ำมันถือเป็นชีวมวลที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดเช่นเดียวกัน โดยมีค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า เท่ากับ 3,754.66 cal/g, 62.0 -77.0%, 83.6-88.3%, 3.2-14.8% และ 3.2 - 3.8% (Sukiran et al., 2017) ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีหลายวิธีงานวิจัยที่พยายามนำดินฟอกสีใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้วซึ่งมีหลากหลายวิธีการ ได้แก่ การสกัดน้ำมันออกด้วยตัวทำละลาย การบำบัดด้วยความร้อน การบำบัดทางเคมี และการรวมวิธีการต่าง ๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลายตามด้วยกระบวนการทางความร้อน และการกระตุ้นกรดตามด้วยกระบวนการทางความร้อน (Mu & Wang, 2019) ดังงานวิจัยของ Saputro et al. (2020) ที่ศึกษาการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยวิธีการเผาไหม้ตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดโดยผสมกับกรดซัลฟิวริก พบว่า พื้นที่ผิวของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมีขนาดใหญ่มาก คือ 151.78 m²/g ซึ่งมีค่าเกือบสองเท่าของดินฟอกสีบริสุทธิ์ เช่นเดียวกับ Thamakorn (2016) ที่รายงานว่าการปรับดินฟอกสีใช้แล้วโดยการเผาตามด้วยการแช่กรดไฮโดรคลอริกช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ใช้แล้ว โดยมีค่า 191.7 m²/g และ 0.3090 m³/g ตามลำดับ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำดินฟอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์กรณีศึกษา ; การปรับสภาพเพื่อกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ และการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงเม็ดจากดินฟอกสีที่ใช้แล้วร่วมกับทาง

ปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน และการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยกรด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากดินฟอกสีที่ใช้แล้วร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน
- 2) เพื่อศึกษาการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยกรดเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม
- 3) วิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากดินฟอกสีที่ใช้แล้วร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน และการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยกรดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากดินฟอกสีที่ใช้แล้วร่วมกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีแฟคชัน

- 1) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ ดินฟอกสีใช้แล้ว และทางปาล์มน้ำมัน
- 2) ทอร์รีแฟคชันทางปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิ 300°C เปรียบเทียบระยะเวลา 20, 40, 60 นาที
- 3) วิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน และองค์ประกอบโดยประมาณของวัตถุดิบ
- 4) อัตราส่วนระหว่างดินฟอกสีใช้แล้วต่อทางปาล์มน้ำมัน และดินฟอกสีใช้แล้วต่อทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ เท่ากับ 30:70, 50:50, และ 70:30
- 5) วิเคราะห์สมบัติของเชื้อไม้ทอร์รีไฟด์เพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) แบบชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (Non – woody biomass) และในส่วนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO 17225-8:2016

1.3.2 การปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยกรด

1) วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไฟโรไลซิส ได้แก่ ดินฟอกสีใช้แล้ว และ ถ่านกัมมันต์

2) การปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไมโครเวฟไฟโรไลซิสใช้อุณหภูมิ 600°C เปรียบเทียบระยะเวลา 20, 30, และ 40 นาที

3) การกระตุ้นด้วยกรด ใช้กรดฟอสฟอริก เข้มข้น 3 นอร์มอล เป็นระยะเวลา 30 นาที

4) วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน (BET) ของดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีใช้แล้ว และดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ

5) ทดสอบประสิทธิภาพของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์

6) วิเคราะห์ค่าสีฟ้าของน้ำมันที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์ และน้ำมันที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ

1.3.3 วิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้ว

1) วิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการ คำนวณค่าไฟฟ้า ค่าวัตถุดิบ และค่าไนโตรเจน โดยคิดเป็นหน่วย บาทต่อตัน

2) วิเคราะห์ต้นทุนในการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วโดยการ คำนวณค่าไฟฟ้า ค่าวัตถุดิบและค่าไนโตรเจน โดยคิดเป็นหน่วย บาทต่อกรัม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ทราบสมบัติของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งที่ผ่านการไมโครเวฟไฟโรไลซิส และผ่านการทอรรีไฟด์

2) ได้ทราบความเป็นไปได้ในการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาฟอกสีซ้ำในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ

3) ได้ทราบต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาฟอกสีซ้ำในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ

การทำให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ การปรับสภาพ และการขจัดกลิ่น โดยการปรับสภาพประกอบด้วยกระบวนการกำจัดกัมและกระบวนการฟอกสีน้ำมัน กระบวนการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดสารสีและสิ่งเจือปนที่ไม่พึงปรารถนา โดยมีการเพิ่มสารประกอบทางเคมี คือ กรดฟอสฟอริกและดินฟอกสีเข้าไปในกระบวนการ กรดฟอสฟอริกและดินฟอกสีทำให้เกิดการดูดซับสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ โดยมีการตรวจสอบและควบคุมสี รสชาติ และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป นอกจากนี้ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการกำจัดกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid; FFA) ออกจากน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil; CPO) ระหว่างการกลั่นด้วยไอน้ำในกระบวนการกำจัดกลิ่น แผนผังของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีละเอียดดังต่อไปนี้ (Ashaari et al., 2021)

2.1.1 การกำจัดกัม

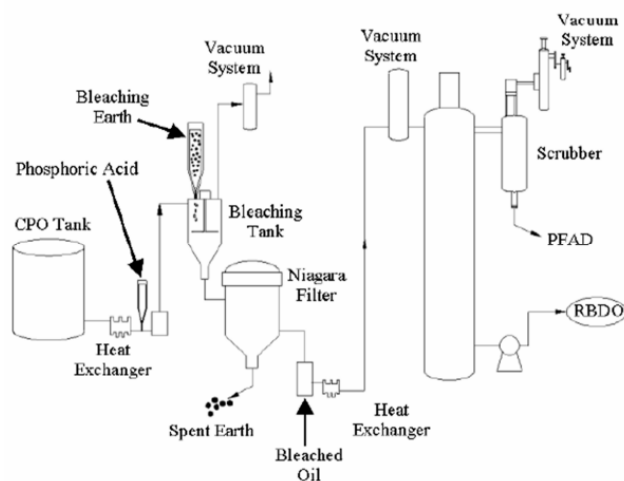
จุดประสงค์ของการกำจัดกัม คือ เพื่อกำจัดยางและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการออกจาก CPO โดยใช้กรดฟอสฟอริก ฟอสฟาไทด์ที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดออกระหว่างการกำจัดกัม จำเป็นต้องกำจัดฟอสฟาไทด์ออกเนื่องจากมีผลต่อสี กลิ่น และอายุการใช้งานของน้ำมัน ฟอสฟาไทด์เป็นตัวการหลักที่ส่งผลต่อความไม่เสถียรของการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์มดิบ กระบวนการกำจัดกัมเริ่มต้นโดยการให้ความร้อน CPO 90°C ถึง 110°C จากนั้นเติมกรดฟอสฟอริกปริมาณ 0.05% ถึง 0.1% ของน้ำหนัก CPO ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 80% ถึง 85% ฟอสฟาไทด์ที่ย่อยสลายแล้วจะถูกกำจัดออกจาก CPO

2.1.2 การฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

CPO ที่ได้จากกระบวนการกำจัดกัมถูกทำให้ร้อนถึง 100°C และเติมดินฟอกสีลงไป ในปริมาณ 0.5% ถึง 20% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม จากนั้นกวนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที จุดประสงค์ของกระบวนการนี้ คือ เพื่อกำจัดสารให้สีและสารประกอบที่ไม่ต้องการอื่น ๆ จากนั้นจึงกรองแยก CPO ออกจากดินฟอกสีใช้แล้ว ก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัดกลิ่น กรดฟอสฟอริก เม็ดสี โลหะหนัก ฟอสฟาไทด์ และสารประกอบออกซิเดชันจะถูกกำจัดออกในระหว่างการกำจัดกลิ่น

2.1.3 การกำจัดกลิ่น

น้ำมันปาล์มถูกให้ความร้อนสูงถึง 240 – 260°C ภายใต้สุญญากาศ (2 – 4 mmHg) โดยการฉีดไอน้ำโดยตรงประมาณ 2.5% ถึง 4.0% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม กระบวนการนี้ใช้สำหรับกำจัดกลิ่นของน้ำมันปาล์ม กรดไขมันอิสระ (FFA) จะถูกกำจัดออกไปในรูปของกรดไขมันปาล์ม (Palm fatty acid distillate; PFAD) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันและเม็ตสึแคโรทีนอยด์จะถูกกำจัดออกเนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อรสชาติของน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของการกำจัดกลิ่นคือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ผ่านการฟอกสีแล้ว (RBDPO) จากนั้น RBDPO จะถูกทำให้เย็นและกรองก่อนที่จะบรรจุลงในถังเก็บ (Ashaari et al., 2021) รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบทางกายภาพ



รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบทางกายภาพ (Ashaari et al., 2021)

2.2 ดินฟอกสี (Bleaching clay)

ดินฟอกสีมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้จากแร่ดินเบนโทไนท์ (Bentonites) มีองค์ประกอบหลักได้แก่ แร่อะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (Hydrated Aluminum Silicate) หรือแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) และองค์ประกอบรองลงมาได้แก่ อะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจน เป็นต้น ดินฟอกสีมีความสามารถในการดูดซับรงควัตถุในน้ำมันได้ดี โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีราคาถูก เหมาะสำหรับการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากหน้าที่ในการกำจัดสารให้สีแล้ว ดินฟอกสียังสามารถกำจัดสิ่งเจือปน อื่น ๆ เช่น สบู่ ฟอสโฟลิพิด โลหะหนัก เป็นต้น (Kinkesom & Pilakjanyakul, 2018) จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pizarro et al. (2003) และ Girgis (2005) ต่างก็แสดงให้เห็นว่า

องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีค่า เท่ากับ 79.8% และ 68.3% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1 และจากงานวิจัยของ Pizarro and Park (2003) รายงานว่าดินฟอกสีมีความหนาแน่นรวมและความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ เท่ากับ 0.7 g/ml และ 2.4 ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ Pizarro and Park (2003), Girgis (2005) และ Abd Majid & Mat (2017) รายงานว่าพื้นที่ผิวของดินฟอกสีมีค่า เท่ากับ $290.0 \text{ m}^2/\text{g}$ $78.157 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $119.7 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ดินฟอกสี (Jansuwan et al., 2019)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสี

องค์ประกอบทางเคมี	Pizarro and Park (2003)	Girgis (2005)
lg-loss	5.2	-
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	79.8	68.3
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	8.7	16.4
เฟอร์รัสออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.9	3.9
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	3.2	1.3
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.7	1.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางกายภาพของดินฟอกสี (Pizarro & Park, 2003)

องค์ประกอบทางกายภาพ	เปอร์เซ็นต์จากการทำให้แห้งที่ 110 °C
ความชื้น (%)	10.0
ความละเอียด (ร้อยละผ่านตะแกรง 90 มิลลิเมตร)	94.5
ความหนาแน่นรวม (g/ml)	0.7
ความถ่วงจำเพาะที่แท้จริง	2.4

ตารางที่ 2.3 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสี

อ้างอิง	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
Pizarro and Park (2003)	290.0	-
Saputro et al. (2020)	78.157	0.2208
Abd Majid et al. (2017)	119.7	0.0552

2.3 ดินฟอกสีใช้แล้ว (used bleaching clay)

ดินฟอกสีใช้แล้วเป็นของเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการทำให้น้ำมันพืชบริสุทธิ์ในขั้นตอนของการฟอกสีน้ำมันดิบดังรูปที่ 2.3 ดินฟอกสีใช้แล้วจะมีค่าพีเอชประมาณ 3.8 - 4.2 และมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ค่อนข้างสูง ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานจะมีปริมาณน้ำมันเหลือค้างอยู่ประมาณ 20 - 40% ของน้ำหนักดินฟอกสี โดยทั่วไปนั้นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันมักใช้วิธีการจัดการดินฟอกสีใช้แล้วด้วยการขนส่งไปยังหลุมฝังกลบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายจากไฟไหม้ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางอากาศจากกลิ่นเหม็นหื่นของน้ำมัน และสภาพแวดล้อมรอบข้าง นอกจากนี้คราบน้ำมันที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำข้างเคียงก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และประชาชนที่อาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำ (Kinkesorn & Plakjanyakul, 2018) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีที่สกัดน้ำมันออก จากข้อมูลการศึกษาโดย Saputro et al. (2020) แสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของคาร์บอนมากที่สุดทั้งในดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีที่สกัดน้ำมันออกแสดงดังตารางที่ 2.4 และในส่วนของข้อมูลพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้วที่ศึกษาโดย Abd Majid & Mat (2017) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัดแสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ดินฟอกสียังคงมีคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่น่าสนใจซึ่งมีค่าความร้อนสูงถึง 11.05 MJ/kg แสดงดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.3 ดินฟอกสีใช้แล้ว (Jansuwan & Limsuwan, 2019)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีใช้แล้วสกัดน้ำมันออก (%โดยน้ำหนัก) (Saputro et al., 2020)

ตัวอย่าง	Si	Al	Fe	Ca	P	Mg	S	O	C
UBC	5.98	1.44	0.84	0.33	0.30	0.21	0.19	39.46	51.25
UBC – สกัดน้ำมันออก	6.7	1.64	0.97	0.35	0.45	0.26	0.17	41.86	47.59

ตารางที่ 2.5 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้ว

อ้างอิง	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
Abd Majid and Mat (2017)	19.4	0.0002

ตารางที่ 2.6 สมบัติด้านเชื้อเพลิงของดินฟอกสีใช้แล้ว (Srisang et al., 2017)

สมบัติ	ดินฟอกสีใช้แล้ว
Moisture content (%)	4.00
Volatile matter (%)	35.15
Fixed carbon (%)	0.42
Ash content (%)	64.43
Calorific value (MJ/kg)	11.05

2.4 กลไกการดูดซับ

ในระหว่างขั้นตอนการฟอกสี น้ำมันที่ผ่านการกำจัดกัมและกลุ่มของกรดไขมันอิสระจะนำมาผสมกับดินฟอกสีซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับอนุภาคของสิ่งเจือปนไว้ภายในรูพรุนจากนั้นดินฟอกสีจะถูกแยกออกจากน้ำมันด้วยวิธีการกรองเพื่อนำไปกำจัดต่อไป ในขั้นตอนการฟอกสีน้ำมันจะมีการใช้ดินฟอกสีประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 ของน้ำหนักน้ำมันดิบ ทั้งนี้การใช้ดินฟอกสีในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมันมากขึ้นเนื่องจากน้ำมันจะถูกดูดซับไปด้วยขั้นตอนการฟอกสีที่ทำที่อุณหภูมิ 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส ภายใต้ระบบสุญญากาศเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิในการฟอกสีสูงเกินกว่า 120 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น และโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนจะเปลี่ยนไปซึ่งจะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและพอลิเมอไรเซชัน (Moshi, 2017) กลไกการดูดซับของดินฟอกสีมีอยู่ด้วยกัน 3 กลไก ได้แก่

1) กลไกการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับรังควัตถุไว้ที่พื้นผิวของดินฟอกสีโดยอาศัยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ระหว่างอนุภาคของดินฟอกสีกับรังควัตถุ

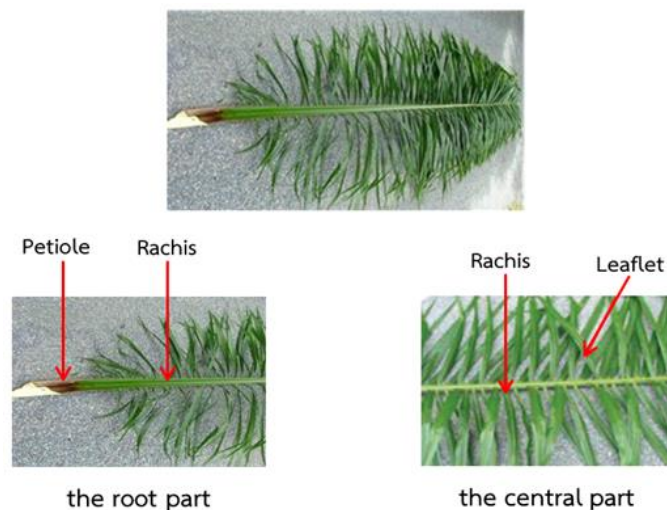
2) กลไกการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะไฮออนิกระหว่างพื้นผิวดินฟอกสีกับสารประกอบอื่น ๆ ในน้ำมัน

3) กลไกการดักจับโมเลกุล (Molecular entrapment) อนุภาคของสิ่งเจือปนจะถูกจับไว้ภายในรูพรุนที่เป็นโครงสร้างของดินฟอกสี

นอกเหนือจากกลไกดังกล่าวแล้ว ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับของดินฟอกสี คือ การที่โครงสร้างของพื้นผิวดินฟอกสีมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซ้อนทับกันการมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับมาก และความจำเพาะของพื้นผิวที่มีต่ออนุภาคของสารโดยการสร้างพันธะทางเคมีกับสารที่ต้องการดูดซับ เป็นต้น

2.5 ทางปาล์มน้ำมัน (Oil palm fronds; OPF)

ทางปาล์มน้ำมัน (Oil palm fronds; OPF) เป็นชีวมวลจากปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปีเมื่อมีการตัดแต่งทางปาล์มในระหว่างการเก็บเกี่ยวผลปาล์มน้ำมันดังแสดงในรูปที่ 2.4 การตัดแต่งทางปาล์มเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถตัดผลสุกในระหว่างการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะมีทางปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นจากตัดแต่งได้ประมาณ 52 ล้านตันต่อปี (Sukiran et al., 2017)



รูปที่ 2.4 ทางปาล์มน้ำมัน (Jantaraniyom, 2016)

2.5.1 ลักษณะทางกายภาพของทางปาล์มน้ำมัน

ทางปาล์มน้ำมันมีรูปแบบเป็นใบประกอบแบบขนนก (Pinnate) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแกนทางใบ (Rachis) ที่ใบย่อยรูปคาบ (Leaflets) อยู่ 2 ข้าง กว้าง 3.5-5.0 เซนติเมตร ทางใบปาล์มน้ำมันยาวประมาณ 5 เมตร ทางใบหนึ่งมีใบย่อยประมาณ 100-160 คู่ ใบอ่อนสีเขียวและเป็นมัน (Hamchara, 2017)

2.5.2 ส่วนประกอบทางเคมีของทางปาล์มน้ำมัน

ทางปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางโภชนาการต่าง ๆ ดังนี้ โปรตีนรวม 9.70% เยื่อใยรวม 38.50% ผนังเซลล์ 78.70% ลิกโนเซลลูโลส 55.60% และเถ้า 3.22% และมีพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ เท่ากับ 5.65 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีแคลเซียม 0.219 และฟอสฟอรัส 0.12% (Hamchara, 2017) ในส่วนของค่า Proximate และ Ultimate ของทางปาล์มน้ำมันแสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ Proximate และ Ultimate ของทางปาล์มน้ำมัน
(Chavalparit et al., 2013)

สมบัติ	ทางปาล์มน้ำมัน
Proximity analysis	
ความชื้น (%)	7.4
สารระเหย (%)	72.5
คาร์บอนคงที่ (%)	5.8
ปริมาณเถ้า (%)	14.3
Ultimate analysis	
คาร์บอน (%)	38.4
ไฮโดรเจน (%)	5.5
ไนโตรเจน (%)	2.3
ออกซิเจน (%)	32.1
ซัลเฟอร์ (%)	0.09
ค่าความร้อน (MJ/Kg)	17.2

นอกจากนี้ทางปาล์มน้ำมันมีค่า วัตถุแห้ง โปรตีนรวม สารสกัดอีเทอร์ เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด และลิกนิน แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 คุณค่าทางโภชนาการของทางปาล์มน้ำมัน (Kraiprom et al., 2018)

องค์ประกอบ (%)	ทางปาล์มน้ำมัน
วัตถุแห้ง	34.12
โปรตีนรวม	3.32
สารสกัดอีเทอร์	1.74
เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง	44.67
เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด	34.87
ลิกนิน	34.02

2.6 เทคโนโลยีทอร์รีแฟคชัน

กระบวนการทอร์รีแฟคชันเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและการเปลี่ยนรูปชีวมวลโดยกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจน (อากาศ) ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C และมีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50°C ต่อหน้าที่ใช้เวลาประมาณ 30 - 120 นาที ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลดีขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Mamvura et al., 2020) กระบวนการทอร์รีแฟคชันจะทำให้ชีวมวลกลายเป็นถ่านไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนหนาแน่นกว่าเมื่อเทียบกับไบโอออยและซินแก๊ส ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีคุณสมบัติที่เสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และง่ายต่อการขนส่ง ทำให้การทอร์รีแฟคชันเป็นเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มว่าจะผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่เป็นของแข็งที่มีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (Yek et al., 2021)



รูปที่ 2.5 กระบวนการก่อนและหลังที่ใช้สำหรับการผลิตชีวมวลทอร์รีแฟคชัน (Yek et al., 2021)

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลในกระบวนการ

ทอร์รีแฟคชัน

ในกระบวนการ ทอร์รีแฟคชันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของชีวมวลตามช่วงอุณหภูมิซึ่งมี 5 ขั้นตอน ได้แก่ (1) ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น (2) ช่วงระเหยความชื้น (3) ช่วงหลังระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิ (4) ช่วงทอร์รีแฟคชัน และ (5) ช่วงลดอุณหภูมิ (Kongto et al., 2020) ดังแสดงตามรูปที่ 2.7

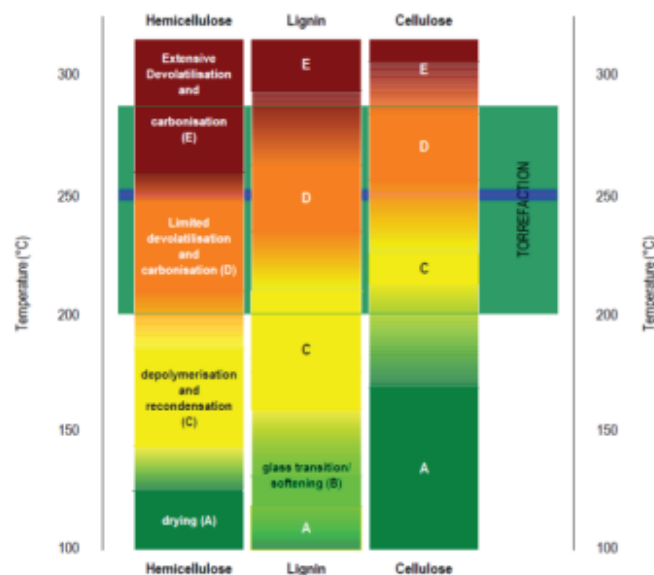
ช่วงที่ 1 ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น (Initial heating) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และเป็นช่วงที่ชีวมวลได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความชื้นเริ่มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการระเหยของความชื้นที่บริเวณผิวนอก

ช่วงที่ 2 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งบางส่วน (Pre-drying) ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 100 - 105°C ความชื้นส่วนใหญ่ในชีวมวลถูกระเหยออกไป ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงมาก ในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

ช่วงที่ 3 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งส่วนสุดท้ายและการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวล (Post drying and intern heating) ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 100 - 200°C ความชื้นภายในผนังเซลล์ของชีวมวลถูกระเหยหมดและมีสารระเหยเบา (Light volatile) บางส่วนเริ่มระเหยออกจากชีวมวล ในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากช่วงก่อนหน้า ซึ่งสังเกตได้จากช่วงที่ 1 - 3 นั้นมวลแห้ง (Dry mass or mass yield) ของชีวมวลค่อนข้างคงที่ตลอดการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงการระเหยความชื้นและการเพิ่มอุณหภูมิเป็นหลัก

ช่วงที่ 4 ช่วงทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200°C ในช่วงดังกล่าวเกิดการสูญเสียมวลอย่างชัดเจน เนื่องจากการระเหยของสารระเหย (Volatiles) และการแตกตัวกลายเป็นไอระเหยของลิกโนเซลลูโลสเนื่องจากความร้อน (Therma decomposition) โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 - 400°C พลังงานความร้อนสะสมในช่วงนี้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ช่วงที่ 5 ช่วงลดอุณหภูมิของชีวมวลทอร์รีไฟด์ (Solid cooling of torrefied biomass) เป็นช่วงการลดอุณหภูมิของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม ในช่วงนี้พลังงานความร้อนสะสมลดลงในขณะที่มวลค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

(Kongto et al., 2020)

2.6.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Cahyanti et al., 2020)

1) ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นเป็นสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิง เพราะยังมีความชื้นมากเท่าใดการสูญเสียพลังงานระหว่างการเผาไหม้ก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้ชีวมวลที่มีความชื้นน้อยจะมีความเสถียรมากกว่าในระหว่างการเก็บรักษา โดยมีความเสี่ยงต่ำต่อการเสื่อมสภาพทางชีวภาพ อีกทั้งการขนส่งของแข็งที่ไม่ชอบน้ำก็มีราคาถูกลง กระบวนการทำให้แห้งไม่สามารถป้องกันชีวมวลจากการดูดซับความชื้นเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง

2) ความไม่ชอบน้ำ

ในชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส พบว่า น้ำจะจับตัวกับพื้นผิวของรูพรุนของมวลชีวภาพด้วยพันธะไฮโดรเจนกับกลุ่มไฮดรอกซิลในผนังเซลล์ ไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำจับกับออกซิเจนในกลุ่มไฮดรอกซิลที่ผนังเซลล์ ยิ่งปริมาณออกซิเจนในผนังเซลล์สูงเท่าใด ความเป็นไปได้ในการสร้างพันธะไฮโดรเจนก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากทอร์รีแฟคชันทำให้กลุ่มไฮดรอกซิลในผนังเซลล์ลดลง ชีวมวลจึงไม่ชอบน้ำมากขึ้น

3) สารระเหยและคาร์บอนคงที่

ในระหว่างการทอร์รีแฟคชันไม่เพียงแต่ความชื้นที่จะระเหยออกไปเท่านั้น แต่ยังสูญเสียสารที่ระเหยง่ายอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันปริมาณคาร์บอนคงที่จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก สารระเหย คือ ส่วนประกอบ (ไม่รวมความชื้น) ที่ระเหยเป็นไอเมื่อไม่มีอากาศที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่คาร์บอนคงที่สามารถกำหนดได้ว่าเป็นคาร์บอนแข็งที่ยังคงอยู่ในถ่านหลังจากการระเหย

4) ปริมาณเถ้า

ส่วนประกอบอื่นที่ได้รับผลกระทบจากการทอร์รีแฟคชัน คือ ปริมาณเถ้า การเพิ่มปริมาณเถ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ในองค์ประกอบของมวลชีวภาพระหว่างการทอร์รีแฟคชัน ในขณะที่สารอินทรีย์สลายตัวระหว่างการทอร์รีแฟคชัน สารประกอบอนินทรีย์จะไม่ถูกย่อยสลาย ทำให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น

5) ผลผลิตมวลและความหนาแน่นของพลังงาน

มวลที่ลดลงเกี่ยวข้องกับการสูญเสียสารระเหยและความชื้น พบว่า ผลผลิตมวลของแข็งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิในการทอร์รีแฟคชันและเวลาเพิ่มขึ้น โดยไม่ลดทอนปริมาณพลังงานส่วนใหญ่ และด้วยเหตุนี้ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้ค่า HHV ของมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วยการทอร์รีแฟคชัน สภาพแวดล้อมในการทอร์รีแฟคชันยังมีอิทธิพลต่อมวลและผลผลิตพลังงานอย่างมาก ในขณะเดียวกันอากาศหรือ CO₂ สามารถเป็นทางเลือกแทน N₂ เพื่อลดต้นทุนการทอร์รีแฟคชัน

6) ความสามารถในการบด

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการบดจะประเมินจากปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการบด ยิ่งต้องการพลังงานต่ำเท่าใดความสามารถในการบดก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น โดยทั่วไปปริมาณไฟเบอร์ในชีวมวลดิบจะสูง เส้นใยเหล่านี้เชื่อมต่อกันซึ่งนำไปสู่ความยากในการบดของชีวมวลดิบ ความสามารถในการบดที่ดีขึ้นในชีวมวลแบบทอรรีแฟคชันเป็นเพราะคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของเส้นใยชีวมวล ซึ่งทำให้ความคงทนของไฟเบอร์ลดลงและเพิ่มความเปราะบาง ความคงทนของไฟเบอร์ที่ลดลงนี้อาจเป็นเพราะการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสระหว่างการทอรรีแฟคชัน ค่าที่ได้แสดงดังตารางตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของทางปาล์มน้ำมันภายหลังการทอรรีแฟคชัน

อ้างอิง	Proximate contents (%โดยน้ำหนัก)				Elemental content (%โดยน้ำหนัก)				H/C	O/C	MY (%)	EY (%)	HHV (MJ/ kg)
	MC	VM	FC	A C	C	H	N	O					
Matali et al. (2016)	-	46.4	53.3	30.0	56.7	3.8	2.7	36.8	0.8	0.5	43.2	60.1	24.9
Lau et al. (2018)	0.2	77.6	22.4	4.8	-	-	-	-	-	-	69.6	86.0	27.9
Lu et al. (2012)	-	29.1	55.3	15.5	-	-	-	-	-	-	43.9	61.3	23.9

2.7 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด คือ เชื้อเพลิงที่แปรสภาพมาจากการอัดชีวมวลให้มีลักษณะเป็นแท่งกลมมีความหนาแน่นสูง ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีปริมาตรลดลง และมีปริมาณพลังงานความร้อนสูงขึ้น มีความสะดวกในการจัดเก็บขนส่ง เชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถทำมาจากเศษวัสดุชีวมวล ซึ่งการนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำให้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นการเพิ่มมูลค่าของชีวมวลและของเหลือใช้ทางการเกษตร นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดเม็ดยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้พลังงานสูงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 (Panunumpa et al., 2014)



รูปที่ 2.7 เชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดที่ใช้อุณหภูมิในการผลิตต่างกัน (Thrän et al., 2016)

2.7.1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดประกอบด้วย 6 ขั้นตอน (รูปที่ 2.10) ได้แก่

- 1) กระบวนการบดย่อย (Crushing process) เป็นกระบวนการบดชีวมวลที่ยังมีขนาดไม่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ด ให้มีขนาดที่เล็กลงเหมาะสำหรับการอัดเม็ด
- 2) กระบวนการลดความชื้น (Drying process) กระบวนการนี้ เป็นการลดความชื้น โดยการทำให้แห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้วัตถุดิบมีค่าความชื้นที่เหมาะสมกับกระบวนการอัดเม็ด
- 3) กระบวนการผสมวัตถุดิบ (Mixing process) เป็นกระบวนการผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดเม็ดตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 4) กระบวนการอัดเม็ด (Pelleting process) เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวตามความต้องการ
- 5) กระบวนการระบายความร้อน (Cooling process) เป็นกระบวนการระบายความร้อนให้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้มีความเย็นตัวลง และคงรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
- 6) กระบวนการบรรจุ (Packing process) เป็นกระบวนการบรรจุเชื้อเพลิงอัดเม็ดใส่ในถุงเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าไปยังเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ (Pongsa et al., 2017)



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ด (Ungureanu et al., 2016)

2.7.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

- 1) ค่าความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเสียจนหมด มีหน่วยเป็นกิโลจูล (KJ) หรือกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของเสีย (Kcal/kg)
- 2) ปริมาณสารระเหย เป็นองค์ประกอบในของเสียที่สามารถระเหยได้เมื่อถูกความร้อนของเสียที่มีสารระเหยสูงมักจะมีค่าความร้อนสูง
- 3) ปริมาณความชื้น คือ ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่หลังจากที่ของเสียแห้งแล้ว ปริมาณความชื้นของของเสียส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนหากของเสียมีความชื้นมาก ความร้อนลดลงเนื่องจากการระเหยของความชื้นระหว่างการเผาไหม้ทำให้ค่าความร้อนลดลง
- 4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว คือ ปริมาณสารประกอบคาร์บอนที่ระเหยได้ยากที่ยังคงเหลืออยู่ในของเสียหลังจากการเผาสารระเหยที่อุณหภูมิ 750°C ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน
- 5) ปริมาณเถ้า (Ash) คือ ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาปภายในเตาเผาที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้ หากวัสดุมีปริมาณเถ้ามากเป็นปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้น (Sangkhaphan, 2017)

2.8 มาตรฐานเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ด

มาตรฐานเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) แบบชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (non – woody biomass) (ตารางที่ 2.13)

มาตรฐานเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับตามมาตรฐาน ISO/TS 1 7 2 2 5 - 8 : 2 0 1 6 Solid biofuels — Fuel specifications and classes (Part 8 : Graded thermally treated and densified biomass fuels) (ตารางที่ 2.14)

ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ASTM E873
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน \pm 1mm ของค่าระบุ)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน \pm 1 mm ของ ค่าระบุ)	
ความคงทน	ไม่น้อยกว่า 96.0% w/w	ไม่น้อยกว่า 96.0% w/w	
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 3.0 % w/w	ไม่เกิน 6 % w/w	
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm สำหรับ D ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10mm	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 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 (เฉพาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm)	ไม่เกิน 45.0 mm	ไม่เกิน 45.0 mm	-
ความยาวที่เกินกว่า 40 mm	ไม่เกิน 1 % w/w	ไม่เกิน 1 % w/w	-

ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (ต่อ)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ
เถ้า	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 18 % w/w	ASTM D1102
สารเติมแต่ง	ไม่เกิน 5 % w/w	ไม่กำหนด	ผู้ทำต้อง พิสูจน์
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
ส่วนประกอบของ ไนโตรเจน (N)	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ISO 16948
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 1 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของ แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.5 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968
ส่วนประกอบของ โครเมียม (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

ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3
ที่มาและแหล่งที่มา ISO 17225-1		1. ชีวมวลไม้ล้มลุกจาก การเกษตรและพืชสวน 1.1 ผลพลอยได้และเศษ เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูป อาหารและสมุนไพรที่ไม่ ผ่านการบำบัดทางเคมี และ กากสมุนไพร 2. สวนผลไม้และพืชสวน 2.1 ผลพลอยได้และของ เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูป อาหารและผลไม้ กาก ผลไม้ที่ไม่ผ่านกระบวนการ ทางเคมี 3. ชีวมวลทางน้ำ	1. ไม้ล้มลุก 2. ชีวมวล จำพวกผลไม้ 3. ชีวมวลทาง น้ำ	1. ไม้ล้มลุก 2. ชีวมวลจำพวก ผลไม้ 3. ชีวมวลทางน้ำ
เส้นผ่าศูนย์กลาง, D ^a และ ความยาว L ^b , ISO 17829 According	มิลลิเมตร	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L \leq 40$ (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L \leq 50$ (จาก D12 ถึง D25)	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L \leq 40$ (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L \leq 50$ (จาก D12 ถึง D25)	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L \leq 40$ (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L \leq 50$ (จาก D12 ถึง D25)

ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (ต่อ)

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3
ความชื้น, M ^c , ISO 18134-1, ISO 18134-2	%โดย น้ำหนัก เปียก	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$
เถ้า, A, ISO 18122	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$A5.0 \leq 5.0$	$A10.0 \leq 10.0$	ค่าที่ต้องกำหนด
ดัชนีความคงทน, DU, ISO 17831-1	%โดย น้ำหนัก	$DU97.5 \geq 97.5$	$DU96.5 \geq 96.5$	$DU95.0 \geq 95.0$
ฝุ่น, F ^d , ISO 18846	%	$F2.0 \leq 2.0$	$F2.0 \leq 2.0$	$F3.0 \leq 3.0$
สารเติมแต่ง ^e	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ชนิดและปริมาณที่ต้องการ กำหนด	ชนิดและ ปริมาณที่ ต้องการกำหนด	ชนิดและปริมาณ ที่ต้องการกำหนด
ค่าความร้อนสุทธิ, Q, ISO 18125	MJ/kg หรือ kWh/kg	$Q18, Q \geq 18$ $Q5.0, Q \geq 5.0$ ปริมาณที่ต้องการกำหนด	$Q17, Q \geq 17$ $Q4.7, Q \geq 4.7$ ปริมาณที่ ต้องการกำหนด	ปริมาณที่ต้องการ กำหนด
ความหนาแน่นรวม, BD, ISO 17828	kg/m ³	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$
คาร์บอน, C, ISO 16948	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ปริมาณที่ต้องการกำหนด	ปริมาณที่ ต้องการกำหนด	ปริมาณที่ต้องการ กำหนด

ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (ต่อ)

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3
ไนโตรเจน, N, ISO 16948	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$N 1.5 \leq 1.5$	$N 2.0 \leq 2.0$	$N 2.0 \leq 2.0$
ซัลเฟอร์, S, ISO 16994	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$S 0.05 \leq 0.05$	$S 0.05 \leq 0.05$	$S 0.05 \leq 0.05$
คลอรีน, Cl, ISO 16994	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$Cl 0.2 \leq 0.2$	$Cl 0.3 \leq 0.3$	$Cl 0.3 \leq 0.3$
สารหนู, As, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 2	≤ 2	≤ 2
แคดเมียม, Cd, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 1	≤ 1	≤ 1
โครเมียม, Cr, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 50	≤ 50	≤ 50
ทองแดง, Cu, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 20	≤ 20	≤ 20
ตะกั่ว, Pb, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 10	≤ 10	≤ 10
นิกเกิล, Ni, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 10	≤ 10	≤ 10
สังกะสี, Zn, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 200	≤ 200	≤ 200
ปริมาณสารระเหย, VM, ISO 18123	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ปริมาณที่ต้องการกำหนด	ปริมาณที่ ต้องการกำหนด	ปริมาณที่ต้องการ กำหนด

- a เลือกรูขนาด D06 หรือ D08 ของเม็ดที่กำหนด
- b ปริมาณเม็ดที่ยาวกว่า 40 มม. ได้ 1%โดยน้ำหนัก ความยาวสูงสุดต้องมีค่า < 45 มม.
- c ณ จุดรับสินค้า.
- d ที่จุดจัดส่ง. ความละเอียดน้อยกว่า 3.15 มม. คัดกรองด้วยมือตามมาตรฐาน ISO 18846
- e ประเภทของสารเติมแต่งเพื่อช่วยในการผลิต การจัดส่ง หรือการเผาไหม้ (เช่น สารช่วยกด สารยับยั้งตะกรัน หรือสารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น แป้ง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง น้ำมันพืช ลิกนิน)
- f ควรระบุคุณสมบัติคุณลักษณะทั้งหมด (อุณหภูมิเริ่มต้นการหดตัว (SST) อุณหภูมิการเสีรูรูป (DT) อุณหภูมิซีกโลก (HT) และอุณหภูมิต่ำ (FT) ในสภาวะออกซิไดซ์

2.9 การปรับสภาพของดินฟอสฟอรัสที่ใช้แล้ว

Mu & Wang (2019) ได้ทำการศึกษาแนวทางที่เป็นไปได้ในการปรับสภาพดินฟอสฟอรัสที่ใช้แล้ว โดยสรุปงานวิจัยที่ครอบคลุมและผลงานวิจัยล่าสุดไว้ ดังต่อไปนี้

2.9.1 การปรับสภาพด้วยความร้อน

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการของการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ทางความร้อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ เพื่อผลิตของแข็งที่มีปริมาณคาร์บอนและสารระเหยต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับสภาพไซซ์เป็นตัวดูดซับ โดยทำการทดลองในสภาวะการปรับสภาพของอุณหภูมิอัตราคงที่ 10°C/นาที่ ภายใต้อัตราการไหลของ N₂ เท่ากับ 0.3 ลิตร/นาที่ และอัตราการไหลของ CO₂ เท่ากับ 0.3 ลิตร/นาที่ ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับสภาพสามารถใช้เป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำสำหรับการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชที่มีประจุบวก (เช่น พาราควอต) จากสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำ เป็นที่ทราบกันดีว่าการทำงานของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น วัสดุตั้งต้นและสภาวะการทำงาน รวมถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส เวลา อัตราการให้ความร้อน และอัตราการไหลของก๊าซไหล และเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกันทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันซึ่งมีสมบัติต่างกัน

2.9.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการทั่วไปในการปรับสภาพดินฟอสฟอรัสที่ใช้แล้ว โดยการกำจัดน้ำมันที่ตกค้างและสารอินทรีย์อื่น ๆ โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ตัวทำละลาย ทั้งแบบที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วหลายชนิดสามารถใช้เป็นตัวกลางในการสกัดได้ ตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน เมทิลเอทิลคีโตน เพอร์คลอโรเอทิลีน เมทิลีนคลอไรด์ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และคลอโรฟอร์มสามารถนำมาใช้เพื่อสกัดส่วนประกอบที่มีขั้วและสารแต่งสีจากดินฟอสฟอรัสที่ใช้แล้ว ในทางตรงกันข้ามตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น ปิโตรเลียมอีเทอร์ ปิโตรเลียมเบนซีน ไซลีน โทลูอีน และเฮกเซน ถูกนำมาใช้ใน

การสกัดส่วนที่ไม่มีขี้ เช่น ไตรกลีเซอไรด์ รวมถึงส่วนประกอบที่ไม่มีขี้ที่มีประโยชน์ อื่น ๆ ชนิดของตัวทำละลายและวิธีการสกัดน้ำมันมักจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีใช้แล้ว

2.9.3 การปรับสภาพทางเคมี

ดินฟอกสีใช้แล้วถูกเปลี่ยนให้เป็นตัวดูดซับแบบ mesoporous silica โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยกรด ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ตรวจสอบ พบว่า H_2SO_4 ที่ใช้ในการสกัดเพื่อเพิ่มปริมาณภายในของโครงสร้างรูพรุนที่มีอยู่ในดินฟอกสีใช้แล้ว ทำให้พื้นที่ผิวมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาตรรูพรุนมากขึ้นทั้งหมด (มากกว่า $0.3 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ SEM, XRD และ FTIR อย่างละเอียด นอกจากนี้ยังมีรายงานด้วยว่าการปรับสภาพด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 1 M มีอิทธิพลที่มากที่สุดต่อดินฟอกสีใช้แล้วสำหรับการดูดซับฟลูออไรด์ ซึ่งมีมากกว่าวิธีการปรับสภาพแบบอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับของวัสดุต่าง ๆ พบว่า ดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพเป็นตัวดูดซับที่มีแนวโน้มดี ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพค่อนข้างมากสำหรับการกำจัดฟลูออไรด์ (Abdelbasir et al., 2023)

2.9.4 การผสมผสานวิธีการต่าง ๆ

1) การสกัดด้วยตัวทำละลายตามด้วยกระบวนการทางความร้อน

ดินฟอกสีใช้แล้วอยู่ภายใต้สภาวะทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในแหล่งกำเนิดด้วยอัลตราซาวนด์ด้วยตัวทำละลายเพื่อเปลี่ยนน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) จากนั้นนำดินฟอกสีที่เหลือไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที และนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการฟอกสี การไม่มีค่าสูงสุดของการดูดซึมในการวิเคราะห์ FTIR และ TGA-FTIR ของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการปรับสภาพของวิธีนี้ การปรับสภาพช่วยเพิ่มปริมาตรรูพรุนโดยไม่ส่งผลเสียต่อโครงสร้างดินฟอกสี การใช้เอทิลเมทิลคีโตน (EMK) เป็นตัวทำละลายร่วมในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้ได้ดินฟอกสีที่มีคุณสมบัติในการฟอกสีดีขึ้น

2) การปรับสภาพด้วยการกระตุ้นกรดตามด้วยกระบวนการทางความร้อน

การปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้ว ดำเนินการโดยการแช่กรดกรดในตอนแรกตามด้วยกระบวนการทางความร้อน วิธีการปรับสภาพที่คล้ายคลึงกันถูกนำไปใช้กับดินฟอกสีใช้แล้วที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด ซึ่งการปรับสภาพดินฟอกสีที่ใช้แล้วที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริก 20% และให้ความร้อนที่ 350°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพที่ได้สามารถนำไปใช้ในการดูดซับสีย้อมอินทรีย์หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสีย้อมปฏิกริยาและสีย้อมกรด โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นตามลำดับที่ 2 – 300 mg/g ในการทดลอง พบว่าการแช่กรดตามด้วยการให้ความร้อนของดินฟอกสีใช้แล้ว เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของดินฟอกสีใช้

แล้วที่ได้รับความร้อนในการฟอกสีน้ำมันดิบมีการใช้ดินฟอกสีสองประเภท ได้แก่ ดินฟอกสีที่กระตุ้นด้วยกรดและดินฟอกสีธรรมชาติ ดำเนินการปรับสภาพสองประเภท ได้แก่ การสกัดด้วยตัวทำละลายตามด้วยการให้ความร้อน และการให้ความร้อนโดยตรง ผลการวิจัย พบว่า ดินฟอกสีใช้แล้วที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนโดยตรงในการปรับสภาพให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสูงกว่าดินฟอกสีใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออกแล้วให้ความร้อนในการปรับสภาพ ซึ่งดำเนินการโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายและการปรับสภาพด้วยความร้อน ส่งผลให้เกิดการกำจัดความชื้น สิ่งเจือปน และสิ่งสกปรก โดยการให้ความร้อนโดยตรงปรับสภาพได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลาย ยิ่งไปกว่านั้น ดินฟอกสีที่ใช้แล้วที่ผ่านการให้ความร้อนโดยตรงที่ปรับสภาพที่อุณหภูมิ 500°C แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดที่มากกว่า รวมถึงประสิทธิภาพการฟอกสีดีกว่าที่ 400°C และ 800°C ตารางที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ ตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ และตารางที่ 2.9 แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ

ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ (RUBC) (%โดยน้ำหนัก)
Saputro et al. (2020)

อ้างอิง	Si	Al	Fe	Ca	P	Mg	S	O
Saputro et al. (2020)	28.71	3.09	1.59	0.46	0.14	0.34	0.26	65.4
Malakootian et al. (2011)	54.0	11.9	2.68	0.02	-	0.9	-	-

ตารางที่ 2.13 องค์ประกอบทางกายภาพของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ
(%โดยน้ำหนัก) (Saputro et al., 2020)

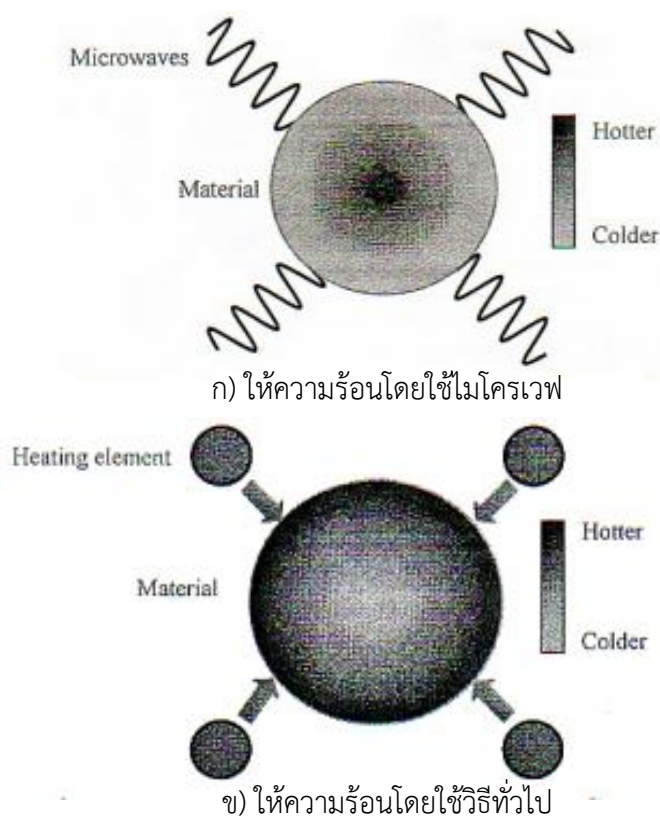
สมบัติ	ดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ	PT. SMART Tbk
ความชื้น	3.7	Max. 15
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	2.56	2-6
ค่าความเป็นกรด	0.31	Max. 5
ความสามารถในการฟอกสี	25%	>20%

ตารางที่ 2.14 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ (RUBC)

อ้างอิง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
Thamakorn (2016)	191.7	0.2322
Saputro et al. (2020)	151.780	0.2228
Abd Majid and Mat (2017)	122.3	0.0568

2.10 พื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสมบัติเดินทางเป็นเส้นตรง ช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง 300 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4 ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุและสารต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย อย่างเช่น การประกอบอาหาร การสังเคราะห์สารเคมี การอบแห้ง เป็นต้น (Mutyala et al., 2010)



รูปที่ 2.9 การกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟเปรียบเทียบกับเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธีทั่วไป

หลักการงานพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วย ไมโครเวฟ (Microwave heating) คือ โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุหลาย ๆ ชนิดสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้แตกต่างกัน คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดการกระตุ้นของสารที่สามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ จากนั้นโมเลกุลของสารนั้นเกิดการสั่นและการเสียดสีกัน จนกระทั่งภายในเนื้อสารเกิดความร้อนสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ก) ให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ

การให้ความร้อนโดยทั่วไป จะเริ่มต้นจากความร้อนจากแหล่งกำเนิดเดินทางผ่านตัวกลางต่าง ๆ 3 รูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน เพื่อไปถึงยังตัววัสดุที่ต้องการรับความร้อน แล้วจึงจึงถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ข) ให้ความร้อนโดยใช้วิธีทั่วไป

การสั่นสะเทือนของโมเลกุลของวัสดุเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟจะมากหรือน้อยนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาค ทั้งภายในอนุภาคและระหว่างโมเลกุล คลื่นไมโครเวฟยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในการเดินทางผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ อยู่อีก 3 รูปแบบ (อมรรักษ์, 2556) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวจะมีผลต่อการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้งาน

2.10.1 คุณสมบัติที่แตกต่างกันในการเดินทางผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ

1) การสะท้อน (Reflection)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟตกกระทบบัวัสดุที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะทำให้ไม่สามารถทะลุผ่านได้ จึงเกิดการสะท้อนกลับมาหมด และทำให้แมกนีตรอนเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานน้อยลง

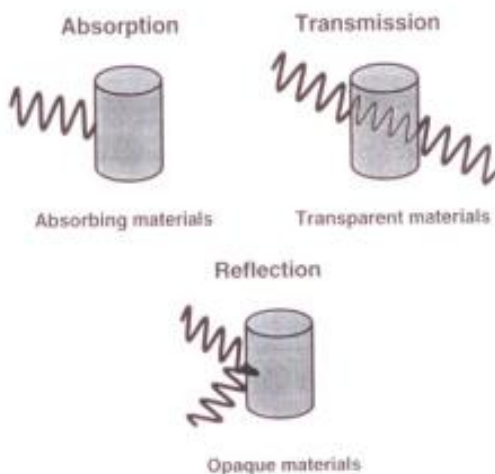
2) การส่งผ่าน (Transmission)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบบัตัวกลางที่ไม่มีส่วนผสมของโลหะ และไม่นำไฟฟ้าก็จะสามารถทะลุผ่านได้อย่างง่ายดาย

3) การดูดซึม (Absorption)

วัสดุบางชนิดมีความสามารถในการดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ แล้วหลังจากนั้นจะทำให้สารนั้นมีความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากหลักการงานดังกล่าวข้างต้น ทำให้การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้นกว่าและสูญเสียความร้อนไปน้อยกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบเดิมที่ทำให้ช่วยประหยัดระยะเวลา พลังงาน และลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างไปจากการแตกตัวของสาร โดยการใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเดิมอีกด้วย (อมรรักษ์, 2556)



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุประเภทต่าง ๆ (อมรรักษ์า, 2556)

2.10.2 หลักการของไมโครเวฟไพโรไลซิส

เป็นกระบวนการทำให้สารตั้งต้นแตกตัวด้วยความร้อนที่ด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับหลักการของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศเฉื่อย หรือที่เรียกว่า “ไพโรไลซิส” นั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง กระบวนการไพโรไลซิสนิยมนำมาใช้ในการแตกตัววัตถุดิบตั้งต้นชนิดต่าง ๆ เพื่อให้มีขนาดเล็กและให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ รวมถึงผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่น ๆ อีกด้วย สารตั้งต้นหลากหลายประเภทสามารถถูกนำมาใช้ในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสได้ เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยทางด้านนี้ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Sajadi et al., 2023)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และการปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปาล์ม ซึ่งวัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ดินพอกสีใช้แล้ว โดยมีวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการในการทดลอง ดำเนินการดังต่อไปนี้

3.1 การผลิตเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1) ดินพอกสีใช้แล้ว

ดินพอกสีใช้แล้วที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากบริษัท นิวไปโอติเซล จำกัด ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยดินพอกสีใช้แล้วที่ได้มานั้นถือได้ว่าเป็นของเสียอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ



ก) ดินพอกสีใช้แล้วที่เหลือทิ้งในโรงงาน

ข) ตัวอย่างดินพอกสีใช้แล้ว

รูปที่ 3.1 ดินพอกสีใช้แล้ว

2) ทางปาล์มน้ำมัน

ทางปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากสวนปาล์ม ที่ตั้งอยู่ในตำบลขุนทะเล อำเภอเมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่มีอายุของต้นปาล์มประมาณ 15 ปี แสดงดังรูปที่ 3.2

ซึ่งทางปาล์มน้ำมันเองก็ถือได้ว่าเป็นชีวมวลที่เกิดขึ้นภายในสวนปาล์มน้ำมัน และเกิดขึ้นในปริมาณมากเช่นเดียวกัน



ก) การเก็บทางปาล์มน้ำมันจากสวนปาล์ม ข) ทางปาล์มน้ำมันหลังตัดใบปาล์มออก

รูปที่ 3.2 ทางปาล์มน้ำมัน

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่

- 1) ขวดดูแรน ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร
- 2) ตะแกรงร่อนเบอร์ No.3/8 (ขนาดรูเปิด 9 มิลลิเมตร)
- 3) เทอร์โมคัปเปิ้ล
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง
- 5) กระดาษเลเบล
- 6) ถังซีปล็อก และถังดำ
- 7) กะละมัง
- 8) ถาดสแตนเลส
- 9) มีดพริก
- 10) เครื่องเลื่อยไฟฟ้า เป็นเครื่องเลื่อยขนาดเล็กที่ใช้เพื่อเลื่อยทางปาล์มน้ำมันให้มีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร เพื่อง่ายต่อการจัดเก็บและง่ายต่อการบดให้ละเอียด

11) เครื่องบดชีวมวลขนาดใหญ่ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่องบดชีวมวลขนาดใหญ่

12) เครื่องบดขนาดเล็ก (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่องบดชีวมวลขนาดเล็ก

13) ระบบไมโครเวฟทอรรีแฟคชัน

เครื่องไมโครเวฟทอรรีแฟคชันประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

(1) เตาไมโครเวฟทอรรีแฟคชัน (รูปที่ 3.5) เตาไมโครเวฟทอรรีแฟคชันเป็นเตาที่สร้างขึ้นมาเพื่อกระบวนการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟโดยเฉพาะ ซึ่งตัวของผนังโพรงทำจากสแตนเลสอย่างดี มีความกว้าง ความลึก และความสูง เท่ากับ 0.22 เมตร, 0.22 เมตร และ 0.31 เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ก็ยังมีขวดปฏิกรณ์ดูแรน ขนาด 2,000 มิลลิลิตร ที่ใช้สำหรับใส่ทางปาล์มน้ำมันที่บดอย่างละเอียดแล้ว จากนั้นนำขวดดูแรนใส่เข้าไปในเตาไมโครเวฟเพื่อเข้าสู่กระบวนการให้ความ

ร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และสุดท้าย คือ แมกนีตรอน 1,000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ที่เป็น ส่วนประกอบหลักทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.5 เตาปฏิบัติการไมโครเวฟทอรัรีแพคชั่น

(2) ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) (รูปที่ 3.6) ในระบบนี้ประกอบด้วยถังไนโตรเจน วาล์วสำหรับเปิด-ปิดก๊าซไนโตรเจนและเครื่องวัดการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ ขนาดถัง 6 Q มี ปริมาณก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ 6,000 ลิตร



รูปที่ 3.6 ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2)

(3) ระบบควบคุมความร้อนเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟเทอร์รีแฟคชัน (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมความร้อนเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟเทอร์รีแฟคชัน

5) เครื่องอัดเม็ด (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดเม็ด

3.1.3 กระบวนการเตรียมดินฟอกสีใช้แล้ว และทางปาล์มน้ำมัน

1) ดินฟอกสีใช้แล้ว

เนื่องจากดินฟอกสีใช้แล้วเป็นผงละเอียดอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการบด จึงได้มีการลองอัดเม็ดดินฟอกสีอย่างเดียวมผสมกับน้ำเพื่อดูว่าสามารถขึ้นรูปได้หรือเปล่า ปรากฏว่าสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ โดยดินฟอกสีที่ใช้แล้วถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้น

2) ทางปาล์มน้ำมัน

การเตรียมทางปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดลองนี้ เริ่มจากการตัดเอาใบปาล์มออกให้เหลือแค่ก้านทางปาล์มน้ำมัน จากนั้นทำการเลื่อยทางปาล์มน้ำมันให้เหลือความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการบด หลังจากตากแห้งโดยสีของทางปาล์มน้ำมันเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำตาล เมื่อได้ทางปาล์มน้ำมันที่ตากจนแห้งแล้วก็นำมาบดลดขนาดด้วยเครื่องบดขนาดใหญ่ แต่ด้วยความที่ทางปาล์มน้ำมันที่ได้ออกมาแล้วยังคงมีขนาดใหญ่เกินกว่านำมาอัดเม็ดได้เลย จึงจำเป็นต้องบดให้ละเอียดอีกครั้งโดยใช้เครื่องบดขนาดเล็ก หลังการบดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก ก็ได้ทางปาล์มน้ำมันที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 9 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.9 แล้วนำทางปาล์มน้ำมันมาเก็บใส่ไว้ในถุงดำ นอกจากนี้ก็ทำการวิเคราะห์ค่าความชื้นเช่นเดียวกับดินฟอกสีใช้แล้ว ซึ่งค่าความชื้นของทางปาล์มน้ำมันมีค่าน้อยกว่า 10% จึงสามารถเข้าสู่กระบวนการต่อไปได้



ก) ทางปาล์มน้ำมันที่ตัดใบออก



ข) ทางปาล์มน้ำมันที่มีความยาวประมาณ 50 ซม.



ค) ทางปาล์มน้ำมันหลังเข้าเครื่องบดขนาดใหญ่



ง) ทางปาล์มน้ำมันที่บดให้มีขนาด 9 ซม.

รูปที่ 3.9 ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการเตรียม

3.1.4 กระบวนการทอร์รีแฟคชันและการวิเคราะห์สมบัติของทางปาล์มน้ำมัน

3.1.4.1 กระบวนการทอร์รีแฟคชันของทางปาล์มน้ำมัน

ในการทดลองนี้ใช้วิธีการทอร์รีแฟคชันทางปาล์มน้ำมันด้วยเครื่องไมโครเวฟทอร์รีแฟคชัน แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งในกระบวนการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ชั่งทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดอย่างละเอียดแล้วปริมาณ 200 กรัมต่อการทดลอง จากนั้นใส่ทางปาล์มน้ำมันที่ชั่งไว้เข้าไปในขวดดูแรนแล้วปิดฝาขวดด้วยเทปล่อนที่เจาะรูไว้สำหรับใส่ก๊าซไนโตรเจนและเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อวัดอุณหภูมิ

2) นำขวดดูแรนใส่เข้าไปในเตาไมโครเวฟแล้วใส่เทอร์โมคัปเปิ้ลเข้าไปในรูที่เจาะไว้เพื่อวัดอุณหภูมิของตัวอย่าง

3) เติมก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบผ่านทางหลอดแก้วที่ต่อไว้กับถังก๊าซไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที และจับเวลาในการเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าไปก่อนเปิดเครื่องเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ก๊าซออกซิเจนได้อย่างสมบูรณ์

4) เชื่อมต่อระบบควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการเทอร์ริแฟคชันโดยใช้โปรแกรม Shimax เมื่อเชื่อมต่อและตั้งค่าเสร็จแล้วก็สามารถเปิดเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟเทอร์ริแฟคชันเพื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลได้เลย



ก) ทางปาล์มน้ำมันที่เตรียมไว้



ข) นำทางปาล์มใส่ขวดดูแรน และปิดฝา



ค) นำขวดดูแรนใส่ในเตาไมโครเวฟเทอร์ริแฟคชัน



ง) ใส่เทอร์โมคัปเปิ้ล แล้วจึงต่อระบบก๊าซไนโตรเจนและระบบควบคุมความร้อน

รูปที่ 3.10 กระบวนการเทอร์ริแฟคชันทางปาล์มน้ำมัน

โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้กำหนด เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ศึกษา เท่ากับ 20 นาที, 40 นาที และ 60 นาที (เริ่มจับเวลาหลังจากอุณหภูมิภายในระบบ เท่ากับ 300°C) ในแต่ละเวลาทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ เมื่อได้ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการเทอร์ริแฟคต์ตามเวลาที่ต้องการแล้วนำมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกไว้แล้วใส่ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการเทอร์ริแฟคต์ไว้ในถุง

ชิบล็อคเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าไปในทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ซ้ำอีก ทำตามวิธีที่กล่าวไปข้างต้นจนได้ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ครบทุกสภาวะ

เมื่อได้ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ครบตามที่ต้องการแล้วจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมกับดินฟอกสีใช้แล้ว

3.1.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของดินฟอกสี ทางปาล์มน้ำมัน และทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟด์

วิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างดินฟอกสีใช้แล้ว ทางปาล์มน้ำมัน และทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟด์ ตัวอย่างถูกส่งวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สมบัติที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า

3.1.5 กระบวนการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ด

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการอัดเม็ดเพื่อขึ้นรูปชีวมวลให้กลายเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดเม็ด ซึ่งในการทดลองนี้แบ่งการอัดเม็ดออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การผสมระหว่างดินฟอกสีใช้แล้วกับทางปาล์มน้ำมัน และการผสมระหว่างดินฟอกสีใช้แล้วกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ และศึกษาอัตราส่วนของดินฟอกสีใช้แล้วกับทางปาล์มน้ำมัน/ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ (ที่ได้มาจากการเลือกสภาวะการทอร์รีแฟคชันที่ดีที่สุด) แสดงดังตารางที่ 3.1 และขั้นตอนในการอัดเม็ด (รูปที่ 3.11) ดำเนินการดังต่อไปนี้

1) ชั่งดินฟอกสีและทางปาล์มน้ำมันหรือทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ คือ ดินฟอกสีต่อทางปาล์มน้ำมัน/ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ เท่ากับ 30:70, 50:50, 30:70 ซึ่งใช้ปริมาณรวมทั้งหมด เท่ากับ 2 กิโลกรัม

2) ผสมดินฟอกสีกับทางปาล์มน้ำมัน/ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ให้เข้ากัน โดยใช้วิธีการคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันในถาดและจับเวลาในการผสมประมาณ 5 นาที ทุกอัตราส่วนและทุกครั้งที่ทำ การผสมวัตถุดิบเพื่อให้วัตถุดิบผสมเข้ากันได้ดี

3) นำวัตถุดิบที่ผสมเข้ากันดีแล้วไปอัดขึ้นรูปในเครื่องอัดเม็ด โดยเริ่มต้นจากการเปิดเครื่องทิ้งไว้เพื่อให้เครื่องมีความร้อน จากนั้นนำส่วนผสมใส่เข้าไปในเครื่องอัดเม็ดซึ่งภายในเครื่องมีลูกเหล็กทรงกลมที่หมุนอยู่ตลอดเวลาเพื่อบดวัตถุดิบให้ละเอียดพอที่อัดวัตถุดิบเข้าไปในแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด ในช่วงแรก ๆ เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่ค่อยเป็นเม็ดและมีบางส่วนที่ยังเป็นวัตถุดิบออกมาจึง

ต้องนำวัตถุดิบใส่เข้าไปในเครื่องอัดเม็ดอีกรอบ ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนเครื่องอัดเม็ดมีความร้อนมากพอที่หลอมละลายวัตถุดิบให้สามารถจับตัวกันเป็นเม็ดเชื้อเพลิงตามที่ต้องการ

4) หลังจากได้เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมาแล้ว ทำการเลือกเม็ดเชื้อเพลิงที่มีลักษณะ ความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางที่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ออกจากเม็ดเชื้อเพลิงที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้ไม่สมบูรณ์และมีบางส่วนที่กลายเป็นฝุ่นผง จากนั้น นำเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดใส่ไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงได้อีก



ก-1) ชั่งน้ำหนักทางปาล์มน้ำมันและดินฟอกสีใช้แล้วตามอัตราส่วนที่กำหนด ให้ได้น้ำหนักรวม 2 กิโลกรัม



ก-2) ผสมทางปาล์มน้ำมันและดินฟอกสีใช้แล้วให้เข้ากัน



ก-3) เปิดเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงและรอให้เครื่องร้อน



ก-5) นำวัตถุดิบที่ผสมไว้ใส่เข้าไปในเครื่องอัดเม็ดและรอให้เครื่องบีบอัดส่วนผสมจนเป็นเม็ดออกมา



ก-6) เชื้อเพลิงอัดเม็ด

ก) แสดงกระบวนการอัดเม็ดของดินฟอกสีใช้แล้วกับทางปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 3.11 กระบวนการอัดเม็ด



ข-1) ชั่งน้ำหนักทางปาล์มทอร์รีไฟด์และดินฟอกสีใช้แล้วตามอัตราส่วนที่กำหนด ให้น้ำหนักรวม 2 กิโลกรัม



ข-2) ผสมทางปาล์มทอร์รีไฟด์และดินฟอกสีใช้แล้วให้เข้ากัน



ข-3) เปิดเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงและรอให้เครื่องร้อน



ข-5) นำวัตถุดิบที่ผสมไว้ใส่เข้าไปในเครื่องอัดเม็ดและรอให้เครื่องบีบอัดส่วนผสมจนเป็นเม็ดออกมา



ข-6) เชื้อเพลิงอัดเม็ด

ข) กระบวนการอัดเม็ดของดินฟอกสีใช้แล้วกับทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์

รูปที่ 3.11 กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง (ต่อ)

3.1.6 การวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดส่งไปวิเคราะห์ค่าสมบัติที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่ และภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ อย่างเช่น ค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) และ Ultimate ค่าธาตุองค์ประกอบ ค่าความหนาแน่น และค่าดัชนีความคงทน เป็นต้น โดยส่วนของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) แบบชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (Non - woody biomass) และในส่วนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบกับมาตรฐาน ISO 17225-8:2016

3.2 การปรับสภาพดินฟอสไฟซ์แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ในการฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มซ้ำอีกครั้ง

3.2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1) ดินฟอสไฟบริสุทธิ

ดินฟอสไฟบริสุทธิที่ใช้ในการทดลองนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท นิวไบโอดีเซล จำกัด โดยปกติแล้วดินฟอสไฟบริสุทธิถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มดิบในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มของอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม

2) ดินฟอสไฟซ์แล้ว

ดินฟอสไฟซ์แล้วที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท นิวไบโอดีเซล จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งดินฟอสไฟซ์แล้วที่ได้มานั้นถือได้ว่าเป็นของเสียอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ

3) ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือเกรดทางการค้า (รูปที่ 3.12) ซึ่งถ่านกัมมันต์ทำจากกะลามะพร้าว โดยถูกใช้ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟ



รูปที่ 3.12 ถ่านกัมมันต์

4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 85% ที่เป็นเกรดวิเคราะห์ (รูปที่ 3.13) ถูกใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยกรด



รูปที่ 3.13 กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 85%

5) น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil; CPO)

น้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท นิวไบโอดีเซล จำกัด (รูปที่ 3.14) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มโดยตรง ในการทดลองนี้ใช้สำหรับกระบวนการกำจัดยางและฟอกสีน้ำมันด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์และดินฟอกสีปรับสภาพเพื่อเปรียบเทียบค่าสีผ่านการฟอกสี



รูปที่ 3.14 น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil; CPO)

6) อะซิโตน (Acetone)

อะซิโตนเป็นสารตัวทำละลายอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้เป็นเกรดระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้อะซิโตนเพียงเพื่อชำระล้างคราบน้ำมันที่ติดอยู่ภายในหลอดแก้ว ขวดก้นกลม และขวดรูปชมพู่ ซึ่งอะซิโตนเป็นสารเคมีที่เป็นตัวทำละลายจึงสามารถละลายคราบน้ำมันที่ติดอยู่ที่เครื่องแก้วได้เป็นอย่างดี

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปีกเกอร์ ขนาด 10, 50, 100, 250, และ 600 มิลลิลิตร
- 2) ขวดควอตซ์รูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) ขวดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 4) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 5) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 6) ขวดคูแรน ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 7) ปิเปต ขนาด 1 และ 10 มิลลิลิตร
- 8) แท่งแก้วคนสาร และช้อนตักสาร

- 9) โถดูดความชื้น
- 10) กระจกกรองเบอร์ 1
- 11) กล่องสำหรับผสมดินพอกสีใช้แล้วกับถ่านกัมมันต์
- 12) ถูซับลิ้นอก กระจกเลเบล และกระจกทึบ
- 13) เทอร์โมคัปเปิล
- 14) เต้าไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดกวน
- 15) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 16) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่างแบบพกพา
- 17) เครื่องปั๊มสุญญากาศพร้อมชุดกรอง
- 18) ตู้บลูมร้อน
- 19) ระบบไมโครเวฟไฟโรไลซิส

ระบบไมโครเวฟไฟโรไลซิสมีความคล้ายคลึงกับเตาไมโครเวฟทอร์รี่แฟคชันแต่มีกำลังวัตต์น้อยกว่าและมีระบบคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้นมา เต้าไมโครเวฟไฟโรไลซิสมีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

(1) เต้าไมโครเวฟไฟโรไลซิส ซึ่งเป็นเต้าไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนกำลัง 800 วัตต์ โดยถูกดัดแปลงเพื่อใช้กับกระบวนการไฟโรไลซิส แสดงดังรูปที่ 3.15 มีแมกนีตรอนกำลัง 800 วัตต์ และขนาดของเต้าไมโครเวฟมีขนาดเท่ากับเต้าไมโครเวฟบ้านตามปกติ ซึ่งมีการเจาะรูด้านบนของเต้าเพื่อให้สามารถใส่เทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในชเวดควอตซ์รูปขมพูได้



รูปที่ 3.15 เต้าไมโครเวฟไฟโรไลซิส

(2) ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน (N_2) ในระบบนี้ประกอบด้วยถังไนโตรเจน วาล์วสำหรับเปิด-ปิดไนโตรเจน และเครื่องวัดการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.6 ขนาดของถังเท่ากับ 6 คิว หรือ 6,000 ลิตร

(3) ระบบควบคุมความร้อนของเตาไมโครเวฟไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 3.16 โดยเตาได้รับพลังงานไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีกำลัง 800 วัตต์ วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล K-type นอกจากนี้สามารถตั้งค่าหรือควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการโดยใช้โปรแกรม Shimax รุ่น MAC3D-MSF-EN-NRN



รูปที่ 3.16 ระบบควบคุมความร้อนเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟไพโรไลซิส

(4) ระบบคอนเดนเซอร์แสดงดังรูปที่ 3.17 มีหน้าที่หลักในการระบายความร้อนให้กับสารทำความเย็น โดยในการทดลองนี้ใช้ระบบคอนเดนเซอร์เพื่อเปลี่ยนสถานะของไอระเหยที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงที่ไม่ได้ควบแน่นกลายเป็นของเหลวในขวดก้นกลม และยังคงเป็นไอระเหยอยู่ให้กลั่นตัวเป็นของเหลว และควบแน่นเอาความร้อนออกแต่ยังคงสถานะความดันอยู่ในระดับเดิม



รูปที่ 3.17 ระบบคอนเดนเซอร์

3.2.3 ขั้นตอนและกระบวนการทดลองปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้วเพื่อพอกสีน้ำมัน

ปาล์มดิบ

สำหรับขั้นตอนและวิธีทำในการปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้วสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1) กระบวนการไพโรไลซิส และ 2) กระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังต่อไปนี้

1) กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกในการปรับสภาพดินพอกสีใช้แล้วแสดงดังรูปที่ 3.18 ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเผาเอาน้ำมันและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ระเหยได้ที่มีอยู่ในดินพอกสีใช้แล้วออกไป มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

(1) ชั่งน้ำหนักดินพอกสีและถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนน้ำหนักดินพอกสีต่อถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 80:20 โดยใช้ปริมาณโดยรวมทั้งหมด เท่ากับ 100 กรัม

(2) ผสมดินพอกสีใช้แล้วกับถ่านกัมมันต์ให้เข้ากันดี จากนั้นเติมวัตถุดิบเข้าไปในขวดควอตซ์รูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปิดปากขวดด้วยเทปลอนที่เจาะรูไว้เพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิล ก๊าซไนโตรเจน และหลอดแก้ว ที่ให้ก๊าซผ่านออกมา

(3) นำขวดควอตซ์รูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่เข้าไปในเตาไมโครเวฟ แล้วจึงนำเทอร์โมคัปเปิล ก๊าซไนโตรเจน และหลอดแก้วที่ให้ก๊าซผ่านออกมา ใส่เข้าไปในขวดควอตซ์ทางรูที่เจาะไว้

(4) ต่อระบบคอนเดนเซอร์เข้ากับเตาไมโครเวฟ โดยการต่อหลอดแก้วที่ปลายด้านหนึ่งต่ออยู่กับขวดก้นกลมอีกฝั่งต่อกับคอนเดนเซอร์ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไปรองไว้ใต้หลอดคอนเดนเซอร์เพื่อรองรับน้ำมันที่กลั่นตัวเป็นของเหลวจากไอรระเหย แล้วจึงต่อปั๊มสูบน้ำ เข้ากับหลอดคอนเดนเซอร์ และเปิดเครื่องปั๊ม

(5) เชื่อมต่อระบบควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการในการไพโรไลซิสโดยใช้โปรแกรม Shimax (ในระหว่างเชื่อมต่อทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเพื่อเข้าไปแทนที่ก๊าซออกซิเจนและจับเวลา 5 นาที) เมื่อเชื่อมต่อและตั้งค่าเสร็จแล้วก็สามารถเปิดเครื่องไมโครเวฟไพโรไลซิสเพื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลได้เลย



ก) ชั่งน้ำหนักดินฟอกสีและ ถ่านกัมมันต์ตามที่กำหนด



ข) ผสมดินฟอกสีและ ถ่านกัมมันต์ให้เข้ากัน



ค) นำวัสดุที่ผสมกันแล้วใส่ ควอร์ซรูบชมพูและปิดด้วยเทปลอน



ง) นำควอร์ซรูบชมพู ใส่เข้าไปในเตา



จ) ต่อก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ต่อบระบบควบคุม อุณหภูมิ และต่อบระบบคอนเดนเซอร์ จากนั้นตั้งอุณหภูมิ และเปิดเครื่องไมโครเวฟแล้วจับเวลาตามที่ต้องการ



ฉ) ดินฟอกสีใช้แล้วที่ผสม กับถ่านกัมมันต์หลังจาก ผ่านการไพโรไลซิส



ช) ร่อนแยกดินฟอกสีที่ผ่าน การไพโรไลซิสออกจาก ถ่านกัมมันต์ผ่านตะแกรง



ซ) ดินฟอกสีใช้แล้วผ่านการไพโรไลซิส

รูปที่ 3.18 กระบวนการไพโรไลซิสดินฟอกสีใช้แล้ว

โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 600 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้เปรียบเทียบกับระหว่างเวลา 20 นาที 30 นาที และ 40 นาที (เริ่มจับเวลาหลังจากอุณหภูมิภายในขวดควอตซ์รูปขมพู เท่ากับ 600 องศาเซลเซียส) ในแต่ละเวลาทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ เมื่อได้ดินพอกสีไพโรไลซิสครบทุกสภาวะที่ต้องการแล้ว จึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออกจากนั้นนำดินพอกสีไพโรไลซิสมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกไว้ แล้วใส่ไว้ในถุงซิปล็อกเพื่อป้องกันความชื้น ทำให้ได้ตัวอย่างทั้งหมด 9 ตัวอย่าง

2) กระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

ในกระบวนการนี้ดินพอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมาลงมาแช่กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 3 นอร์มอล ในอัตราส่วนดินพอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสต่อกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1:5 โดยขั้นตอนการเตรียมกรดฟอสฟอริกและกระบวนการทดลองมีวิธีการดังต่อไปนี้

- เตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 3 นอร์มอล

ปีเปตกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% ปริมาตร 5.12 มิลลิลิตร แล้วใส่ไปในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปในบีกเกอร์ประมาณ 50 มิลลิลิตร แล้วคนด้วยแท่งแก้วคนกรดฟอสฟอริกกับน้ำกลั่นให้เข้ากันดี หลังจากนั้นนำสารที่ผสมกันดีแล้วใส่ลงไปในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมครบ 250 มิลลิลิตร เมื่อได้กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 3 นอร์มอล แล้วจึงเก็บไว้ในขวดสีชา

- วิธีการกระตุ้นด้วยกรด (แช่กรด) ฟอสฟอริก (รูปที่ 3.19) มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

(1) ชั่งดินพอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและกรดฟอสฟอริกด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง อย่างละ 10 และ 50 กรัม ตามลำดับ ใส่ในบีกเกอร์ (อัตราส่วน 1:5 ตามที่กำหนดไว้)

(2) นำบีกเกอร์ที่ใส่กรดฟอสฟอริกไว้ไปตั้งบนเตาไฟฟ้า เปิดโหมด Stirrers แล้วใส่แม่เหล็กกวนสารลงไป จากนั้นเติมดินพอกสีซึ่งไว้ใส่ลงไปในกรดฟอสฟอริกแล้วจับเวลา 30 นาที เพื่อให้กรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของดินพอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิส

(3) ในระหว่างที่รอเวลาในการแช่กรดให้ครบ 30 นาที ทำการวัดค่าความเป็นกรด - ด่างของดินพอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และบันทึกผล

(4) เมื่อครบเวลา 30 นาที แล้วนำบีกเกอร์ที่มีสารทั้งสองอย่างออกจากเตาเพื่อมาวัดค่าความเป็นกรด - ด่างก่อน จากนั้นนำสารผสมไปกรองแยกด้วยปั๊มดูดสุญญากาศพร้อมชุดกรองเพื่อแยกกรดฟอสฟอริกออกจากดินพอกสีที่ผ่านการแช่กรด แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด - ด่างหลังแยกสารผสมออกจากกันแล้ว

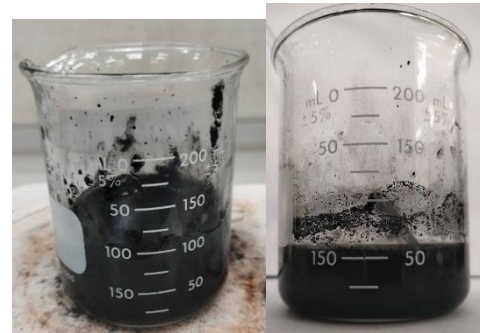
(5) ล้างดินฟอกสีด้วยน้ำกลั่นแล้ววัดค่าความเป็นกรด - ด่างอีกครั้ง จากนั้นนำไปกรองด้วยแยกด้วยปั๊มดูดสุญญากาศพร้อมชุดกรองอีกครั้ง ทำตามวิธีนี้ไปเรื่อย ๆ จนค่าความเป็นกรด - ด่างของดินฟอกสีที่ผ่านการแช่กรดมีค่าประมาณ 3 - 4

(6) เมื่อได้ดินฟอกสีผ่านการแช่กรดที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง ตามที่ต้องการแล้ว นำมาเทใส่ถ้วยระเหยสาร จากนั้นนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(7) หลังจากอบครบตามเวลาที่กำหนดไว้แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกข้อมูล จากนั้นนำดินฟอกสีที่ผ่านการแช่กรดใส่ในถุงซิปล็อกและนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นจากอากาศข้างนอกเข้าไปในตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการแช่กรด



ก) ชั่งน้ำหนักกรด (50g) และหนักดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิส (10g)



ข) ผสมดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสเข้ากับกรดโดยการใช้ magnetic stirrer กวนผสมให้เข้ากันจนครบเวลา 30 นาที



ค) ดินฟอกสีที่ผ่านการแช่กรดจนครบเวลา 30 นาที



ง) กรองแยกดินฟอกสีออกจากกรดด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ



จ) นำดินฟอกสีที่ผ่านการแช่กรดออกมาวัดค่า pH และล้างด้วยน้ำกลั่น

รูปที่ 3.19 แสดงกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



ฉ) กรองแยกดินฟอกสีออกจากน้ำกลั่นแล้ว
นำไปวัดค่า pH อีกรอบ ล้างและวัดค่า pH
ไปเรื่อย ๆ จนค่า pH มีค่าประมาณ 3-4

ช) นำดินฟอกสีที่ได้
ไปอบที่ 105 °C
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ซ) นำดินฟอกสีที่ผ่านการ
ไพโรไลซิส + แสงกรด

รูปที่ 3.19 แสดงกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (ต่อ)

หลังจากกระบวนการนี้ได้ตัวอย่างดินฟอกสีออกเป็น 2 แบบ ทั้งหมด 18 ตัวอย่าง ได้แก่ 1) ดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จำนวน 9 ตัวอย่าง และ 2) ดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแสงกรด จำนวน 9 ตัวอย่าง รวมเป็น 18 ตัวอย่าง นำทั้ง 18 ตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบต่อไป

3.2.4 กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

ในกระบวนการฟอกสีใช้ดินฟอกสี 3 แบบ ได้แก่ ดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแสงกรด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ โดยขั้นตอนในการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบและขั้นตอนการฟอกสีน้ำมันมีวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

1) การเตรียมน้ำมันปาล์มดิบ

น้ำมันปาล์มดิบประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.20)



ก) น้ำมันปาล์มดิบที่
แยกตัวเป็นไขและน้ำมัน

ข) ต้มน้ำมันปาล์มดิบ
เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ค) มันปาล์มดิบหลังต้ม
จนเป็นเนื้อเดียวกัน

ง) เก็บมันปาล์มดิบใส่
ไว้ในขวดดูแรน

รูปที่ 3.20 แสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบ

2) กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

โดยปกติในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบมีอยู่ 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการกำจัดยางโดยใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้น ต่อมา คือ การฟอกสีโดยใช้ดินฟอกสีในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบ และขั้นตอนสุดท้าย คือ การกลั่นน้ำมันปาล์มให้มีความบริสุทธิ์สามารถนำมาใช้ประกอบอาหารได้ ซึ่งตัวอย่างน้ำมันปาล์มดิบที่ได้มานั้นยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกำจัดยางออก ในการทดลองนี้จึงต้องทำการกำจัดยางออกก่อนฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ (รูปที่ 3.21) โดยมีขั้นตอนทั้งหมดดังต่อไปนี้

(1) ชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบ 100 กรัม และ ชั่งน้ำหนักดินฟอกสีบริสุทธิ์หรือดินฟอกสีผ่านการไพโรไลซิส หรือดินฟอกสีผ่านการไพโรไลซิสและแช่กรด 1 กรัม (ได้น้ำหนักดินฟอกสี 1% โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบตามที่กำหนดไว้)

(2) นำน้ำมันปาล์มดิบไปต้มให้ความร้อนบนเตาไฟฟ้าพร้อมกับเปิดโหมด Stirrers แล้วใส่แม่เหล็กกวนสารลงไป ต้มน้ำมันจนมีความร้อน เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส จึงเติมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% ลงไป 1% โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบ (3 – 5 หยด) เพื่อเป็นการ กำจัดยาง แล้วจับเวลา 10 นาที

(3) หลังจากครบ 10 นาทีแล้ว เติมน้ำหนักดินฟอกสีบริสุทธิ์ ลงไปปริมาณ 1 กรัม เพิ่มอุณหภูมิจนมีความร้อน เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นจับเวลา 15 นาที เพื่อเป็นการฟอกสีน้ำมัน

(4) หลังจากฟอกสีเสร็จแล้ว คีบเอาแม่เหล็กกวนสารออก แล้วนำไปกรองแยกดินฟอกสีออกจากน้ำมันด้วยด้วยปั๊มดูดสุญญากาศพร้อมชุดกรอง เมื่อกรองแยกเสร็จแล้วนำน้ำมันที่ผ่านการฟอกสีและดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มใหม่ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า โดยน้ำมันที่ผ่านการฟอกสีเก็บไว้ในขวดขนาด 120 มิลลิลิตร และดินฟอกสีเก็บไว้ในถุงซิปล็อคแล้วนำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเหมือนเดิม



ก) ชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบ (100g) และดินฟอกสีบริสุทธิ์หรือดินฟอกสีผ่านการไพโรไลซิส หรือดินฟอกสีผ่านการไพโรไลซิสและแช่กรด (1g)



ข) ต้มน้ำมันปาล์มดิบด้วย พร้อมการกวน ที่ 90°C แล้วเติมกรด H_3PO_4 ลงไป 3-5 หยด กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที

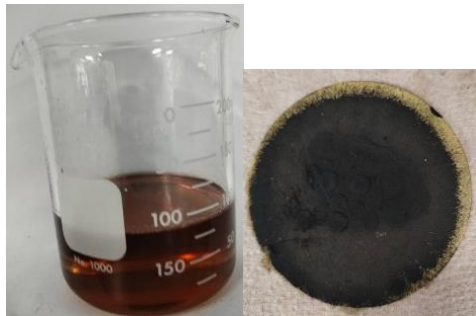
รูปที่ 3.21 กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ



ค) เติมดินฟอกสี ลงไปในน้ำมันปาล์มดิบและปรับอุณหภูมิเป็น 105°C ทำการกวนผสมเป็นเวลา 15 นาที



ง) เมื่อครบเวลา 15 นาที กรองแยกดินฟอกสีออกจากน้ำมัน



ช) น้ำมันผ่านการฟอกสีและดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพและนำมาฟอกสีอีกครั้ง



จ) เก็บน้ำมันผ่านการฟอกสีไว้ในขวดและดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพและนำมาฟอกสีอีกครั้งในถุงซิปล็อกเพื่อส่งวิเคราะห์

รูปที่ 3.21 กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ (ต่อ)

ในการทดลองฟอกสีน้ำมันของดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแชนด์รท ก็ทำตามขั้นตอนต่าง ๆ เหมือนกับดินฟอกสีบริสุทธิ์ (ตั้งแต่ข้อที่ 1 – 4) โดยแต่ละตัวอย่างของดินฟอกสีแต่ละแบบก็ทำการฟอกสีน้ำมันซ้ำ 3 ครั้ง ก็ได้จำนวนน้ำมันทั้งหมด เท่ากับ 57 ตัวอย่าง คือ

- จากดินฟอกสีบริสุทธิ์ 3 ตัวอย่าง
- จากดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส 27 ตัวอย่าง
- จากดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแชนด์รท 27 ตัวอย่าง

3.2.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างจากกระบวนการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้วและกระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์ม

1) วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน (BET)

ส่งวิเคราะห์ ณ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดยเป็นการทดสอบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยวิธี Physisorption (Multipoint; 120 points) ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ ดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีใช้แล้ว (สกัดน้ำมันออกด้วยเฮกเซน) ดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส 20, 30, และ 40 นาที ดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส 20, 30, 40 นาที ตามด้วยการแช่กรด ดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพการไพโรไลซิส 20, 30, และ 40 นาทีแล้วนำมาฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบซ้ำอีกครั้ง (สกัดน้ำมันออกด้วยเฮกเซน) และดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ การไพโรไลซิส 20, 30, 40 นาที และแช่กรดแล้วนำมาฟอกสี

2) วิเคราะห์ค่าสีของน้ำมันปาล์ม

ส่งวิเคราะห์ค่าสีของน้ำมันปาล์ม ณ ห้องปฏิบัติการของ บริษัท นิวไบโอดีเซล จำกัด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าสีฟ้าด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าสีแบบ Manual ยี่ห้อ Lovibond

3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับการทดลอง

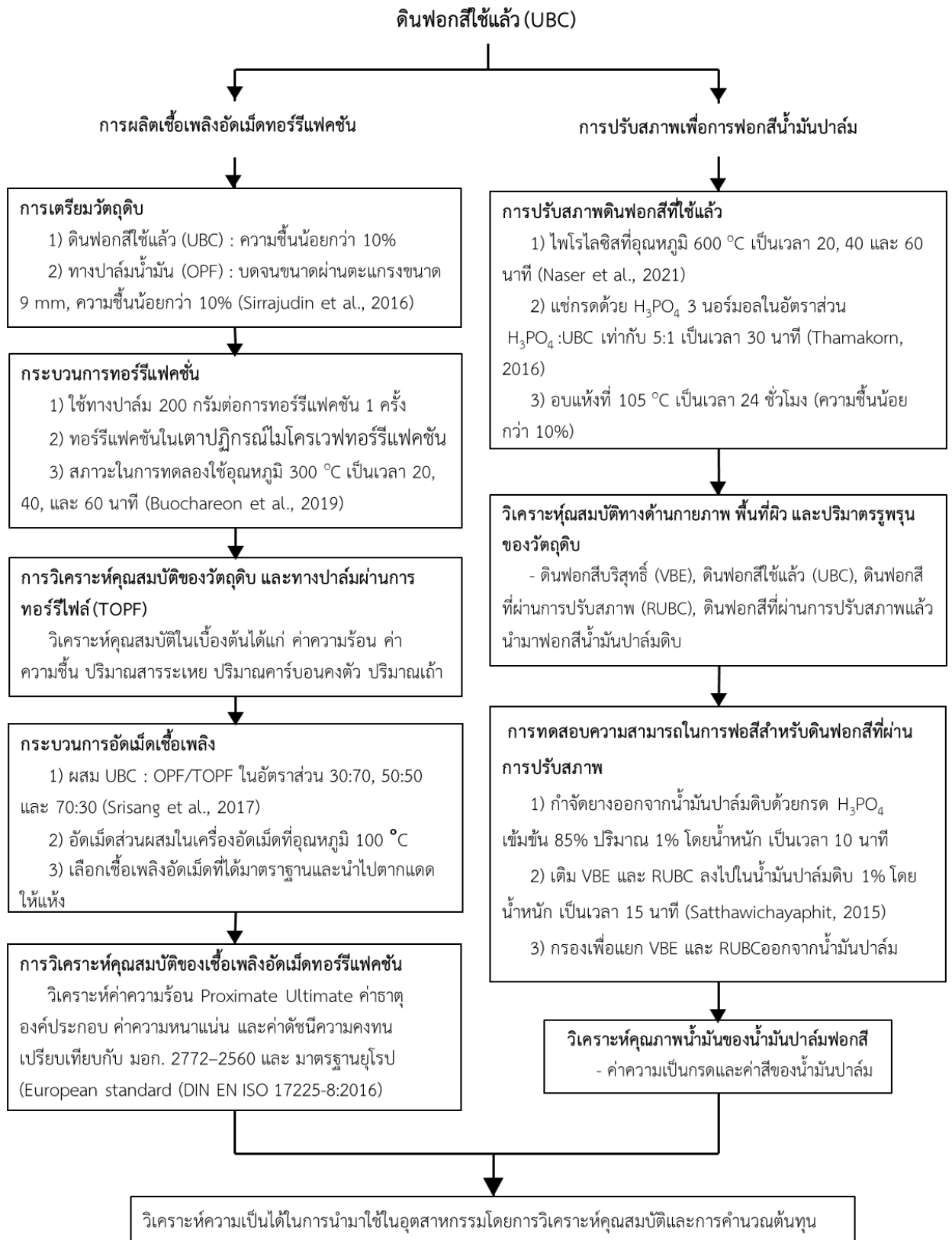
ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการคำนวณต้นทุนต่าง ๆ ในแต่ละขั้นตอนตลอดกระบวนการเพื่อรวบรวมข้อมูลพิจารณาต้นทุนและความคุ้มค่า รวมถึงเป็นแนวทางในการพัฒนาและนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 การทดลอง คือการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการปรับสภาพเพื่อการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นของเสียจากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้ดินฟอกสีใช้แล้วและทางปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบ เพื่อสร้างมูลค่าและเป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์ ในการคำนวณต้นทุนใช้วิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในกระบวนการนี้ใช้ดินฟอกสีใช้แล้วและทางปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบ และมีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า ได้แก่ เต้าปฏิกิริยาไมโครเวฟเทอร์รี่แพคชัน เครื่องอัดเม็ด และมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่เป็นต้นทุนในการผลิตด้วย

3.3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนในการปรับสภาพเพื่อใช้ในการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

ในกระบวนการนี้ใช้ดินฟอกสีเป็นวัตถุดิบ และมีการใช้เครื่องไมโครเวฟไพโรไลซิสให้ความร้อน ใช้ก๊าซไนโตรเจน และมีการใช้กรดฟอสฟอริกที่เป็นต้นทุนในการผลิตทั้งหมด



รูปที่ 3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

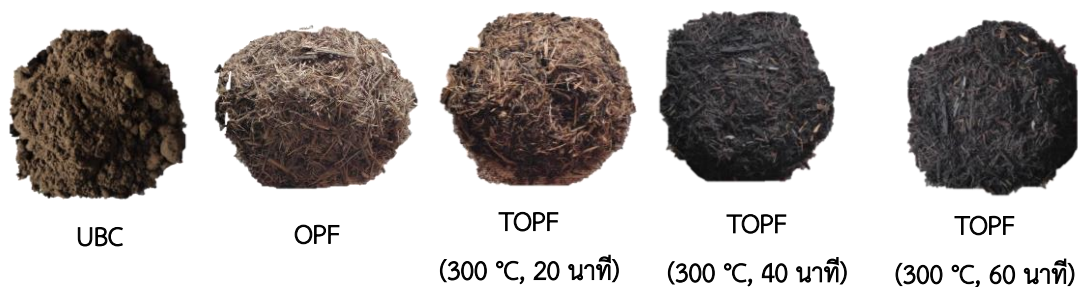
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ในส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองการผลิตเชื้อเพลิง และในส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์และอภิปรายผลการปรับสภาพดินฟอกสีใช้แล้วเพื่อนำมาฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 สมบัติของดินฟอกสีใช้แล้ว (UBC) ทางปาล์มน้ำมัน (OPF) ทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟต์ (TOPF)

1) ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟต์นั้นแสดงดังรูปที่ 4.1 ดินฟอกสีใช้แล้วมีสีเขียวแกมเทา มีความหนืดเนื่องจากมีน้ำมันอยู่ภายใน 20 - 40% (Mu et al., 2019) และมีเนื้อสัมผัสที่ละเอียดคล้ายแป้ง ในส่วนของทางปาล์มน้ำมัน หลังจากตากให้แห้งแล้วเปลี่ยนสีจากสีเขียวกลายเป็นสีน้ำตาล และเมื่อนำมาบดให้ละเอียดก็ได้ลักษณะส่วนใหญ่เป็นเส้นใย และบางส่วนก็เป็นฝุ่นผงละเอียด และสุดท้ายทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟต์ โดยทางปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 นาที กลายเป็นสีน้ำตาลเข้มและมีบางส่วนที่ยังมีสีของทางปาล์มปกติอยู่ และเมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที พบว่า ทางปาล์มน้ำมันกลายเป็นสีดำทั้งหมด เช่นเดียวกับที่เวลา 60 นาที ทางปาล์มน้ำมันก็กลายเป็นสีดำ และน้ำหนักลดลงเหลือประมาณ 50 กรัม จาก 80 กรัมทั้งสามช่วงเวลา



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ UBC, OPF และ TOPF

2) ค่าความร้อน และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate)

ค่าความร้อนของดินพอกสีใช้แล้วและทางปาล์มน้ำมันมีค่า เท่ากับ 9.20 MJ/kg, 16.70 MJ/kg ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุไว้ว่าค่าความร้อนของดินพอกสีใช้แล้วมีค่า เท่ากับ 11.05 MJ/kg (Srisang et al., 2017) และในส่วนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20, 40, และ 60 นาที มีค่าความร้อน เท่ากับ 21.12 MJ/kg, 23.01 MJ/kg, 22.11 MJ/kg ตามลำดับ ค่าที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Kongto et al. (2021) และ Brotto et al. (2022) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าความร้อนของ ชีวมวลสูงขึ้นในเมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยทางปาล์มทอร์รีไฟด์มีค่าความร้อนสูงกว่าทางปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการทอร์รีไฟด์ เนื่องจากการลดลงขององค์ประกอบต่าง ๆ เช่น H และ O รวมทั้งค่าความชื้น และปริมาณสารระเหยที่ลดลงด้วย อีกอย่าง คือ ค่าความร้อนชีวมวลที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ในการทดลองนี้เห็นได้ชัดว่าทางปาล์มทอร์รีไฟด์ที่มีค่าความร้อนสูงสุด (23.01 MJ/kg) ที่สภาวะการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 40 นาที และเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเป็น 60 นาที ค่าความร้อนที่ได้มีค่าลดลงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kongto et al. (2021) ที่กล่าวไว้ว่าเวลาในการทอร์รีแฟคชันไม่ได้ทำให้ค่าความร้อนในกระบวนการทอร์รีแฟคชันสูงขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสภาวะการทอร์รีแฟคชันที่มีค่าความร้อนสูงสุด โดยนำมาผสมกับดินพอกสีใช้แล้วเพื่อผลิตเชื้อเพลิงไม่ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดต่อไป

ในส่วนของผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) มีคุณสมบัติที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดของแต่ละตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางเห็นได้ว่าในระหว่างขั้นตอนการ ทอร์รีแฟคชัน ค่าความชื้นและปริมาณสารระเหยของทางปาล์มน้ำมันลดลงมากที่สุด ในสภาวะการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที เช่นเดียวกับสภาวะที่มีค่าความร้อนสูงสุด (รูปที่ 4.3) ค่าความชื้นลดลงจาก 2.64% ไปเป็น 1.63% และปริมาณสารระเหยลดลงจาก 76.19% ไปเป็น 46.43% ซึ่งอุณหภูมิ และเวลาของกระบวนการทอร์รีแฟคชันล้วนส่งผลต่อปริมาณสารระเหยที่ปล่อยออกมาจากชีวมวล (Singh et al., 2020) ในขณะที่ภายหลังจากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่มีค่ามากที่สุด คือ สภาวะเดียวกับค่าความร้อนที่สูงที่สุด (300°C เวลา 40 นาที) ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจาก 17.99% เป็น 46.06% และปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นจาก 3.18% เป็น 5.87% เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Buochareon et al. (2019) ที่ทำการทอร์รีแฟคชันทางปาล์ม พบว่า ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้สลายไปในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ส่งผลให้สัดส่วนของเถ้าในชีวมวลเพิ่มขึ้น

การลดลงของปริมาณสารระเหยในผลิตภัณฑ์ของแข็ง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้ามีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสารระเหยได้ถูกกำจัดออกไปจากชีวมวล ปริมาณสารระเหยที่ลดลงและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้คงที่และสมบูรณ์ (C. Wang et al., 2021) นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของทางปาล์มทอร์รีไฟด์นั้นเกิดจากปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นหลังจากการทอร์รีแฟคชัน เมื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิทอร์รีแฟคชันต่อส่วนประกอบมวลรวมในทางปาล์มทอร์รีไฟด์ พบว่า ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลส (โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส) สลายตัวเร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ลิกนินสลายตัวช้ากว่า การสลายตัวด้วยความร้อนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสทำให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงสูงขึ้นอีกด้วย (T. Wang et al., 2018)

ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

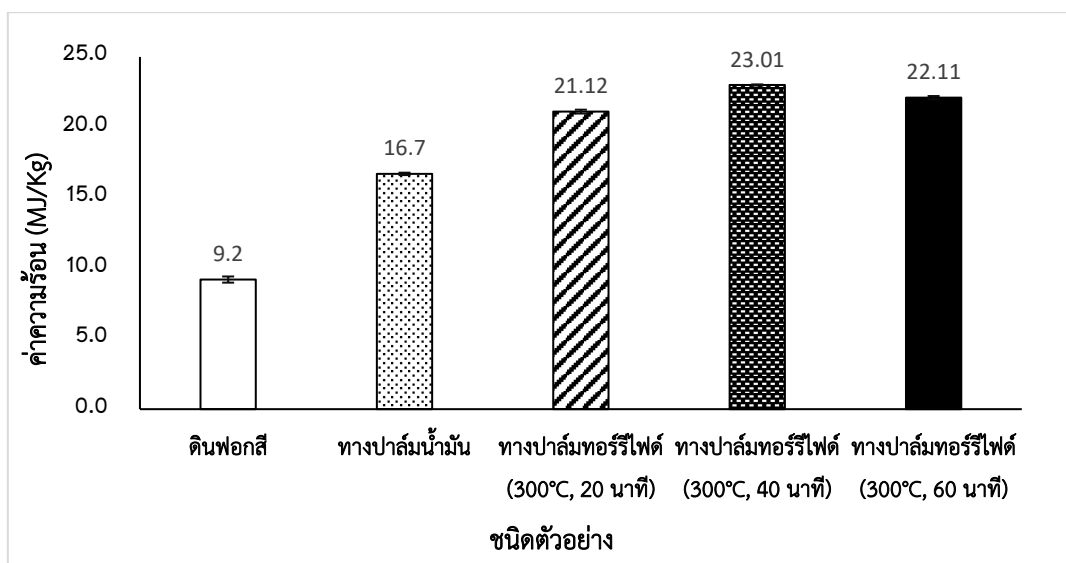
ชนิดตัวอย่าง	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ดินฟอกสีใช้แล้ว	9.2 ± 0.22
ทางปาล์มน้ำมัน	16.7 ± 0.08
ทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟด์ (300°C, 20 นาที)	21.12 ± 0.14
ทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟด์ (300°C, 40 นาที)	23.01 ± 0.04
ทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟด์ (300°C, 60 นาที)	22.11 ± 0.11

ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ต่อ)

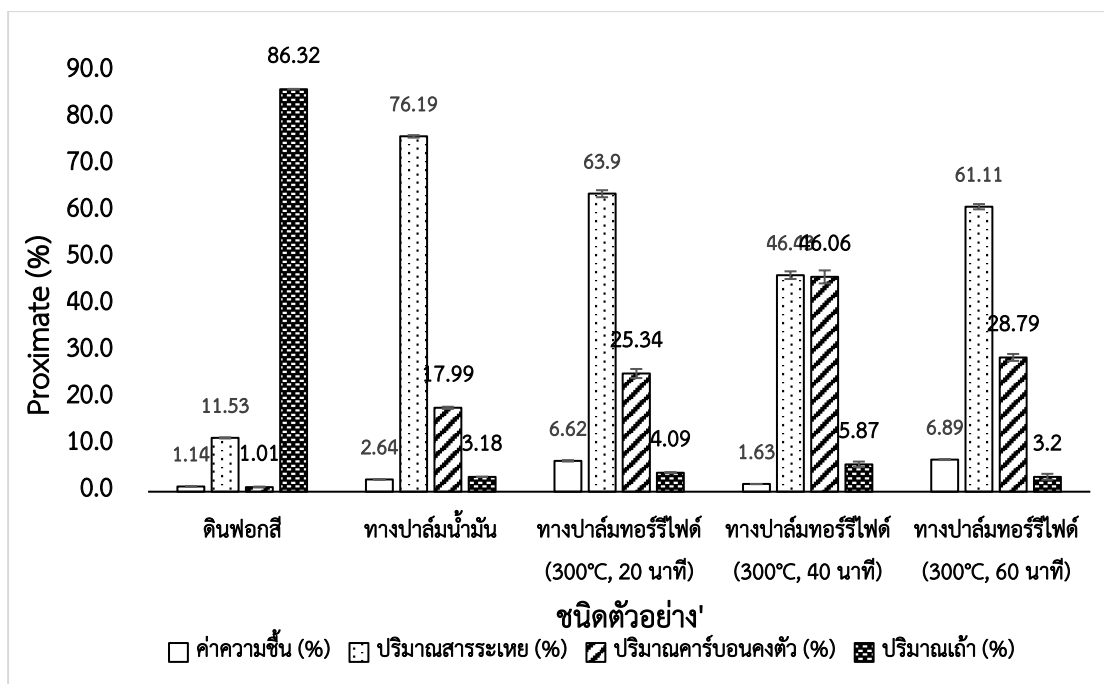
ชนิดตัวอย่าง	Proximate			
	ค่าความชื้น (%)	ปริมาณสารระเหย (%)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)	ปริมาณเถ้า (%)
ดินฟอกสีใช้แล้ว	1.14 ± 0.09	11.53 ± 0.12	1.01 ± 0.08	86.32 ± 0.05
ทางปาล์มน้ำมัน	2.64 ± 0.05	76.19 ± 0.26	17.99 ± 0.23	3.18 ± 0.04

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ต่อ)

ชนิดตัวอย่าง	Proximate			
	ค่าความชื้น (%)	ปริมาณสารระเหย (%)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)	ปริมาณเถ้า (%)
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 20 นาที)	6.62 ± 0.15	63.9 ± 0.75	25.34 ± 0.97	4.09 ± 0.11
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 40 นาที)	1.63 ± 0.02	46.43 ± 0.83	46.06 ± 1.39	5.87 ± 0.59
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 60 นาที)	6.89 ± 0.10	61.11 ± 0.56	28.79 ± 0.74	3.2 ± 0.63



รูปที่ 4.2 ค่าความร้อนของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) ของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

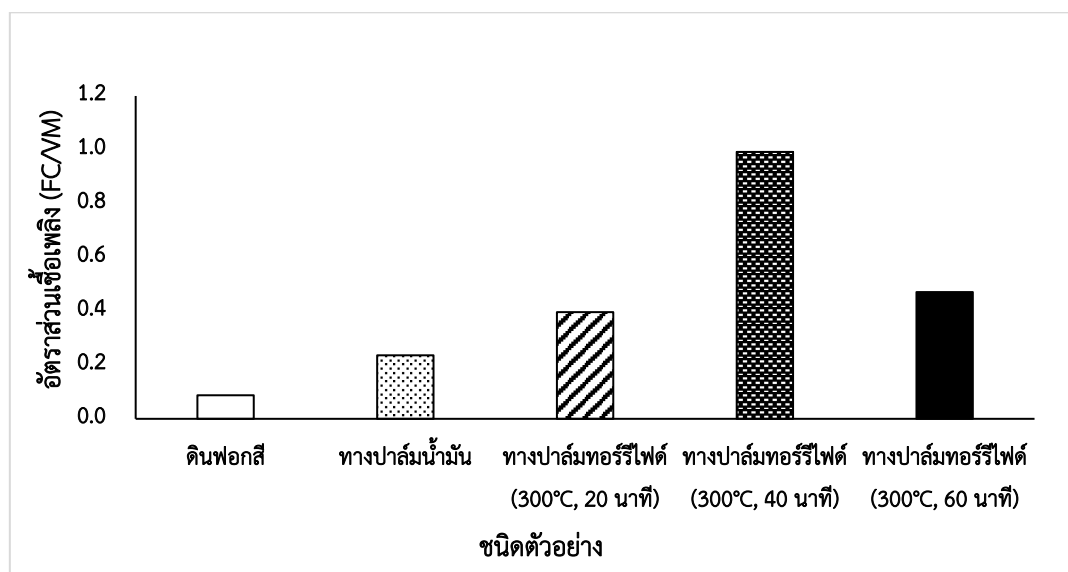
4.1.2 อัตราส่วนเชื้อเพลิง

อัตราส่วนเชื้อเพลิง หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนคงตัวต่อปริมาณสารระเหย (FC/VM) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญเมื่อนำไปผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และเมื่อใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ เนื่องจากสามารถบอกถึงประเภทการเผาไหม้ที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการได้ (Khempila, 2022) จากตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงของวัตถุดิบมีค่าน้อย แต่เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ส่งผลให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นทั้ง 3 สภาวะในการทอรรีไฟต์ (รูปที่ 4.4)

เนื่องจาก ชีวมวลทั่วไปมีสารระเหยในปริมาณสูงและคาร์บอนคงตัวค่อนข้างต่ำ จึงทำให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงของชีวมวลมีค่าไม่สูงมากนัก อัตราส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลที่ต่ำมักส่งผลให้เกิดเปลวไฟขณะเผาไหม้มากขึ้น การเผาไหม้ของถ่านน้อยลงและเผาไหม้ได้ไม่นาน ในทางตรงกันข้าม ปริมาณสารระเหยที่ลดลงและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นของทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ทำให้เกิดความเสถียรในการเผาไหม้ได้มากกว่า โดยทั่วไปอัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านหินมีค่าในช่วง 0.5 - 3.0 (Singh et al., 2020) ซึ่งในการทดลองนี้อัตราส่วนเชื้อเพลิงที่มีค่ามากที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับถ่านหิน คือ ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 40 นาที มีค่า เท่ากับ 0.99 แสดงดังรูปที่ 3.4 ค่าที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เหมาะสมในการเผาไหม้ได้

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของ UBC, OPF, และ TOPF

ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณคาร์บอน คงตัว (FC)	ปริมาณสารระเหย (VM)	อัตราส่วนเชื้อเพลิง (FC/VM)
ดินฟอกสีใช้แล้ว	1.01	11.54	0.09
ทางปาล์มน้ำมัน	15.68	66.42	0.24
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 20 นาที)	25.34	63.9	0.40
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 40 นาที)	46.06	46.43	0.99
ทางปาล์มน้ำมันทอรรีไฟต์ (300°C, 60 นาที)	28.79	61.11	0.47



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

4.1.3 ผลผลิตเชิงมวล

ผลได้เชิงมวล (Mass yield; MY) หลังจากกระบวนการทอร์แฟคชันได้มีการคำนวณค่าผลได้เชิงมวล สามารถคำนวณได้จากค่ามวลเริ่มต้นของทางปาล์มน้ำมันก่อนทอร์แฟคชันเปรียบเทียบกับภายหลังการกระบวนการทอร์แฟคชันดังสมการ 4.1 (Acharya et al., 2016)

$$MY (\%) = \frac{m_{tor}}{m_{raw}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ m_{raw} คือ มวลของชีวมวลใบอ้อยก่อนการปรับสภาพ (กรัม)

m_{tor} คือ มวลของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ภายหลังการปรับสภาพ (กรัม)

ผลผลิตพลังงาน (Energy yield; EY) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ได้ภายหลังกระบวนการทอรรีแฟคชัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณผลได้เชิงมวลและค่าความร้อน คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$EY (\%) = MY \times \frac{HHV_{tor}}{HHV_{raw}} \quad (4.2)$$

เมื่อ HHV_{raw} คือ ค่าความร้อนสูงของชีวมวลก่อนการปรับสภาพ

(เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

HHV_{tor} คือ ค่าความร้อนสูงของชีวมวลหลังการปรับสภาพ

(เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification, ED) บ่งบอกถึงความหนาแน่นของพลังงานเมื่อเทียบกับชีวมวลก่อนทำการทอรรีแฟคชัน คำนวณได้จากสมการที่ 4.3

$$ED = \frac{EY (\%)}{MY (\%)} \quad (4.3)$$

การสลายตัวที่สำคัญของชีวมวลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชีวมวลและอุณหภูมิของปฏิกิริยาในระหว่างการทอรรีแฟคชัน ซึ่งผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลได้เชิงมวลของทางปาล์มทอรรีไฟด์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลได้เชิงมวลของทางปาล์มทอรรีไฟด์

ชนิดตัวอย่าง	LHV	HHV	MY (%)	EY (%)	ED (GJ/m ³)
ทางปาล์มน้ำมัน	14.81	14.04	-	-	-

ทางปาล์มทอร์รีไฟต์ (300°C, 20 นาที)	18.40	22.62	64.50	103.90	1.61
ทางปาล์มทอร์รีไฟต์ (300°C, 40 นาที)	25.97	30.72	49.00	66.55	1.36
ทางปาล์มทอร์รีไฟต์ (300°C, 60 นาที)	19.91	25.46	41.00	33.98	0.83

เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตพลังงานและความหนาแน่นของพลังงานจากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของผลผลิตเชิงมวล (MY) ผลผลิตพลังงาน (EY) และความหนาแน่นของพลังงาน (ED) สำหรับทางปาล์มน้ำมันและทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟต์ เห็นว่าค่า MY, EY และ ED ของทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟต์ อยู่ในช่วง 64.50 - 41.00%, 103.90 - 33.98% และ 4.94 - 6.59 GJ/m³ ตามลำดับ ซึ่งค่า MY, EY และ ED ของ ทางปาล์มน้ำมันทอร์รีไฟต์มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการทอร์รีแฟคชัน ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ของทางปาล์มน้ำมันมีค่าเป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (Niyomukiza et al., 2022) ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่มีความคงตัวทางความร้อนต่ำและเกิดการสลายตัวได้ง่ายในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน การลดลงของผลได้เชิงมวลและพลังงานภายหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถอธิบายได้ว่าไบโอโพลีเมอร์เชิงโครงสร้างของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง (Krysanova et al., 2019) นอกจากนี้ การลดลงของผลได้เชิงมวลเกิดจากการสลายตัวบางส่วนของเซลลูโลสด้วยเช่นกัน (Khempita, 2022)

4.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA)

ในการทดลองนี้ได้มีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเข้าไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design Expert ซึ่งค่าที่ได้สามารถบอกได้ว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA) ของค่าความร้อนและการวิเคราะห์โดยประมาณของทางปาล์มทอร์รีไฟต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

	ค่าความร้อน	ค่าความชื้น	ปริมาณ สารระเหย	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว	ปริมาณ เถ้า

p-value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1360
R ²	0.9876	0.9987	0.9942	0.9907	0.4857
Adjusted R ²	0.9834	0.9983	0.9922	0.9876	0.3143

ค่า p-value หมายถึง ความน่าจะเป็นสำหรับบอกนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (p-value < 0.05) หาก p < 0.05 หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ (มีความแตกต่างกัน) หาก p > 0.05 หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (มีความไม่แตกต่างกัน)

จากตารางเห็นได้ว่า ค่า p-value ของค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวนั้นมีค่า p-value < 0.0001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าระยะเวลาในการทอรรีแพคชันที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในส่วนของปริมาณเถ้าที่มีค่า p-value = 0.1360 นั้นก็แสดงว่าระยะเวลาในการทอรรีแพคชันที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้เห็นได้ว่าค่า R² มีค่ามากกว่า 0.90 ทั้งหมด ยกเว้นปริมาณเถ้า ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีความน่าเชื่อถือเนื่องจาก R² ยิ่งมาก ก็แสดงว่า Linear regression model ก็สอดคล้องกับข้อมูลที่มีมาก

4.2 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงทั้งเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ด ในอัตราส่วนของทางปาล์มน้ำมัน (OPF) หรือทางปาล์มที่ผ่านการทอรรีไฟด์ (TOPF) ต่อดินพอกสีใช้แล้ว (UBC) เท่ากับ 30:70, 50:50 และ 70:30 จากสภาวะการทอรรีแพคชันที่ดีที่สุด ได้แก่ การทอรรีแพคชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งผลที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติของเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอรรีไฟด์อัดเม็ด

1) ลักษณะทางกายภาพ

งานวิจัยนี้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และมีความยาวในช่วง 5 – 30 มิลลิเมตร ส่งผลให้ได้ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ สีของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเนื้อผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทั้งสอง

ชนิด ซึ่งเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟต์อัดเม็ดนั้นมีสีเขียวกมเทาตามสีของวัตถุดิบที่นำมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง แต่ในส่วนของเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ดนั้นมีสีดำทั้งสามอัตราส่วน และในส่วนของเนื้อผิวสัมผัสของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ มีความเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันทั้งสามอัตราส่วน แต่แตกต่างกับเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟต์อัดเม็ดที่มีลักษณะของเชื้อเพลิงที่ได้ออกมาค่อนข้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ตามปริมาณของทางปาล์มที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด คือ อัตราส่วน OPF:UBC เท่ากับ 70:30 ดังรูปที่ 4.5



ก-1) อัตราส่วน
OPF:UBC = 30:70



ก-2) อัตราส่วน
OPF:UBC = 50:50
ก) เชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟต์อัดเม็ด



ก-3) อัตราส่วน
OPF:UBC = 70:30



ข-1) อัตราส่วน
TOPF:UBC = 30:70

ข-2) อัตราส่วน
TOPF:UBC = 50:50

ข-3) อัตราส่วน
TOPF:UBC = 70:30

ข) เชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

2) ค่าความร้อน และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate)

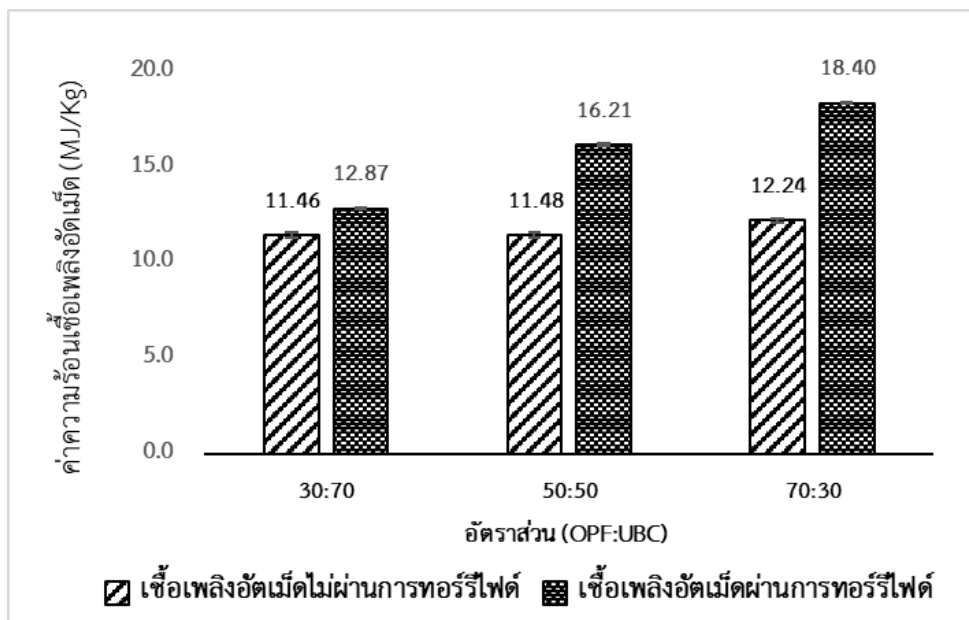
ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) แสดงดังตารางที่ 4.5 จากผลการค่าความร้อนวิเคราะห์ พบว่า ค่าความร้อนของวัตถุดิบ และอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทางปาล์มที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันก่อนนำมาอัดเม็ดที่มีค่าสูงกว่าดินฟอกสีใช้แล้ว เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2017) ที่ พบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดระหว่างดินฟอกสีใช้แล้วกับทะเลาะปาล์มเปล่าเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของทะเลาะปาล์มเปล่าที่เพิ่มขึ้น และในส่วนของค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด พบว่า ค่าความร้อนที่ได้เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนทางปาล์มทอร์รีไฟต์ที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องมาจากค่าความร้อนของทางปาล์มทอร์รีไฟต์ก่อนนำมาอัดเม็ดมีค่าสูงกว่าดินฟอกสีใช้แล้วเช่นเดียวกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดไม้ทอร์รีไฟต์

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์ พบว่า เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่าความร้อนน้อยกว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดทั้งสามอัตราส่วน เนื่องจากค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

ชนิดตัวอย่าง (OPF/TOPF:UBE)	ค่าความร้อน (MJ/Kg)
30:70 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	11.46 ± 0.14
50:50 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	11.48 ± 0.14
70:30 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	12.24 ± 0.07
30:70 (ทอร์รีไฟต์)	12.87 ± 0.05
50:50 (ทอร์รีไฟต์)	16.21 ± 0.09

70:30 (ทอร์รีไฟด์)	18.40 ± 0.03
--------------------	--------------



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในส่วนของการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) นั้นประกอบด้วย ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ซึ่งในแต่ละค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยปกติแล้วเชื้อเพลิงอัดเม็ดควรมีค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณสารระเหยที่สูง และมีค่าความชื้นและปริมาณเถ้าที่ต่ำ เนื่องจากปริมาณสารระเหยที่สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดติดไฟได้ง่าย และปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีค่าสูงทำให้มีจุดติดไฟได้นาน และในส่วน of ค่าความชื้นหากมีปริมาณมากทำให้เกิดการจุดติดไฟได้ยาก (Srisang et al., 2017)

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ISO/TS17225-8 :2016 Solid biofuels — Fuel specifications and classes (Part 8 : Graded thermally treated and densified biomass fuels) ทั้งสองชนิด ซึ่งค่าความชื้นของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดทุกอัตราส่วน เนื่องมาจากวัตถุดิบทางปาล์มน้ำมันมีค่าความชื้นสูงกว่าทางปาล์มทอร์รีไฟด์ เมื่อเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่าความชื้นต่ำบ่งชี้ได้ว่ามีแนวโน้มที่เกิดการแตกร่วนได้น้อยลงเมื่อนำไปใช้และจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น (Khempila, 2022) และในส่วน of ปริมาณสารระเหยค่าที่ได้ออกมา พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดไม้ ทอร์รีไฟด์มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดทุกอัตราส่วนเช่นเดียวกับค่าความชื้น และในส่วน of ปริมาณคาร์บอนคงตัวนั้นเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ดอย่างเห็นได้ชัดใน

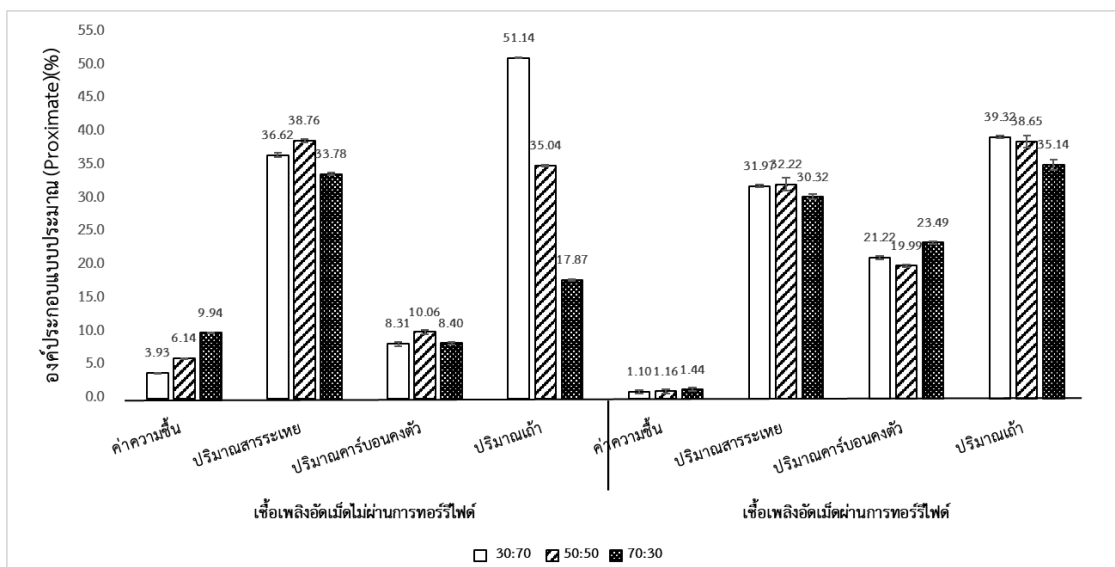
ทุกอัตราส่วน ซึ่งผลที่ได้สามารถบอกได้ว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดสามารถจุดติดไฟได้นานกว่าเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าจากตารางที่ 4.6 พบว่า ปริมาณเถ้าที่ได้ออกมาลดลงตามปริมาณของดินฟอสฟอรัสใช้แล้วที่ลดลงทั้งเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด เนื่องจากปริมาณเถ้าในดินฟอสฟอรัสใช้แล้วมีค่าสูงจึงส่งผลให้ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงตามไปด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Srisang et al. (2017) ที่กล่าวไว้ว่าดินฟอสฟอรัสมีปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น เนื่องจากดินฟอสฟอรัสเป็นแร่ดินเหนียวชนิด มอลต์มอริลไลไนต์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารเผาไหม้ได้ยาก ดังนั้นปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว นอกจากนี้เถ้าเป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ซึ่งไม่สามารถติดไฟและให้พลังงานได้ หากมีสัดส่วนอยู่มากมีผลทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าลดลงและอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในระบบเผาไหม้ลดลงได้ (L. Cao et al., 2015)

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

ชนิดตัวอย่าง (OPF/TOPF:UBE)	ค่าความชื้น (%)	ปริมาณ สารระเหย (%)	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว (%)	ประมาณเถ้า (%)
30:70 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	3.93 ± 0.06	36.62 ± 0.36	8.31 ± 0.32	51.14 ± 0.06
50:50 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	6.14 ± 0.04	38.76 ± 0.29	10.06 ± 0.34	35.04 ± 0.10
70:30 (ไม้ทอร์รีไฟต์)	9.94 ± 0.08	33.78 ± 0.24	8.40 ± 0.16	17.87 ± 0.14
30:70 (ทอร์รีไฟต์)	1.10 ± 0.21	31.97 ± 0.21	21.22 ± 0.20	39.32 ± 0.20
50:50 (ทอร์รีไฟต์)	1.16 ± 0.28	32.22 ± 0.96	19.99 ± 0.19	38.65 ± 0.92

ชนิดตัวอย่าง (OPF/TOPF:UBE)	ค่าความชื้น (%)	ปริมาณ สารระเหย (%)	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว (%)	ปริมาณเถ้า (%)
70:30 (ทอรรีไฟต์)	1.44 ± 0.25	30.32 ± 0.38	23.49 ± 0.16	35.14 ± 0.80



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate) เชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟต์อัดเม็ด
เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ด

4.2.2 สมบัติที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนสูงสุด

จากข้อมูลค่าความร้อนและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟต์อัดเม็ดกับเชื้อเพลิงทอรรีไฟต์อัดเม็ดเห็นได้ชัดว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองแบบนี้มีค่าความร้อนสูงสุดที่อัตราส่วน OPF:UBC และ TOPF:UBC เท่ากับ 70:30 ในการทดลองนี้จึงได้เลือกทำการวิเคราะห์ค่าสมบัติเพิ่มเติมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองแบบ ซึ่งค่าที่วิเคราะห์เพิ่มเติม มีดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate)

ค่า Ultimate ประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) (รูปที่ 4.8) ซึ่งค่าเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ค่า

C, H, O, N, และ S ของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่า เท่ากับ 33.28%, 4.68%, 25.00%, 0.13%, และ 0.13% ตามลำดับ และในส่วนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่า เท่ากับ 45.88%, 6.27%, 10.10%, 0.33%, และ 0.84% แสดงดังตารางที่ 4.7

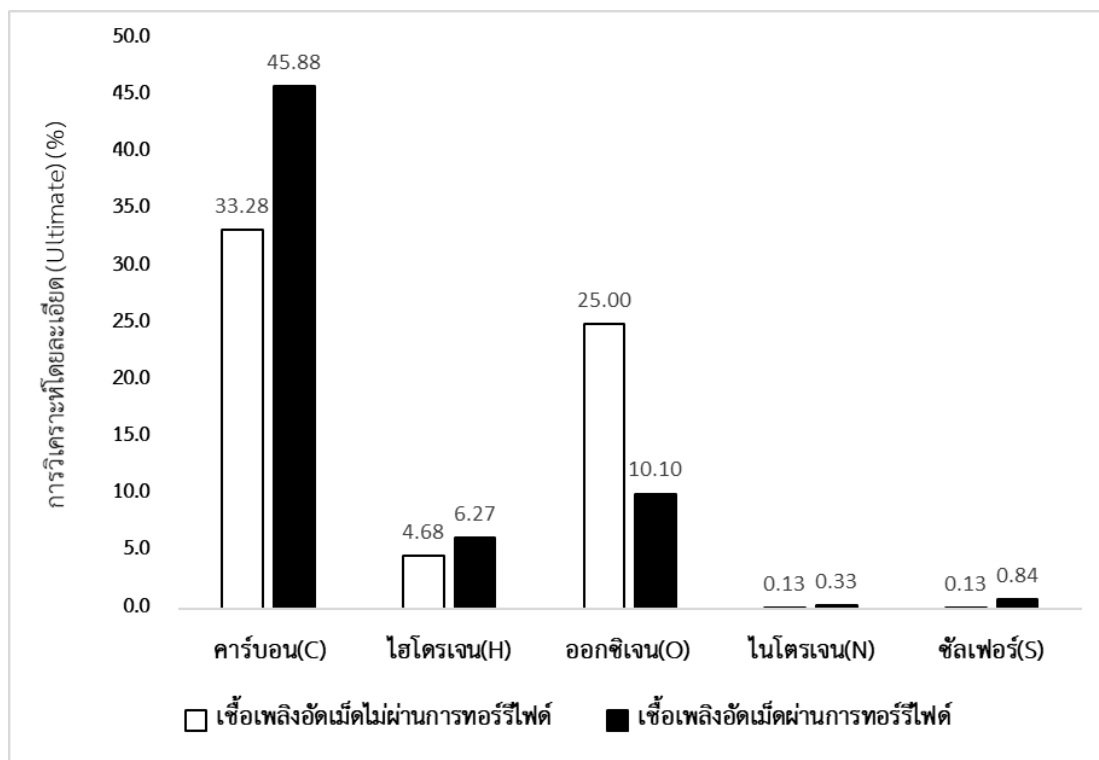
ผลการศึกษา พบว่า เชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนและการลดลงของปริมาณออกซิเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ด การลดลงของออกซิเจนในเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเกิดจากการปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ซึ่งทำให้เกิดการระเหยน้ำและสารประกอบที่ประกอบด้วยออกซิเจน เช่น ฟีนอลและกรดในสถานะของเหลวและผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ เช่น CO₂ และ CO (González Martínez et al., 2021) ส่งผลให้สัดส่วนของปริมาณคาร์บอนมีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน (Tumuluru et al., 2016) ปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนและเมื่อเทียบกับแล้ว พบว่า เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่าน้อยกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์

ปริมาณไนโตรเจนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองชนิดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากไนโตรเจนที่พบในชีวมวลอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรสูง การสลายตัวและการปลดปล่อยไนโตรเจนส่วนใหญ่เกิดในช่วงอุณหภูมิ 600 – 900°C (Mei et al., 2015) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ในส่วนของปริมาณซัลเฟอร์ พบว่า เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีค่าน้อยกว่าเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์นั้นมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณเถ้า จากการที่ปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้นหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันจึงทำให้ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเพิ่มสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำกว่าถ่านหินชนิดลิกไนต์ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ในการเผาไหม้หรือเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ จึงเป็นข้อดีของเชื้อเพลิงแข็งที่ผ่านการปรับสภาพเนื่องจากเกิด NO_x และ SO_x ปริมาณต่ำ (หรือไม่มี) ในก๊าซไอเสีย (Kongto et al., 2021)

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate) เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด

การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate)	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	ไนโตรเจน (N)	ซัลเฟอร์ (S)
เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ด	33.28	4.68	25.00	0.13	0.13

การวิเคราะห์โดย ละเอียด (Ultimate)	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	ไนโตรเจน (N)	ซัลเฟอร์ (S)
เชื้อเพลิงอัดเม็ดผ่าน การทอร์รีไฟต์	45.88	6.27	10.10	0.33	0.84



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ Ultimate ของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดในอัตราส่วน OPF:UBC 70:30

2) ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นและดัชนีความคงทน

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยวิธีการคำนวณมวลต่อปริมาตร (Z. Cao et al., 2020) โดยซึ่งมวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 ตำแหน่ง และวัดขนาดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ผลการคำนวณ พบว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดในอัตราส่วน OPF:UBC 70:30 มีค่าเท่ากับ 770 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 820 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ดเพิ่มขึ้นมากกว่าเชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟต์อัดเม็ด ผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Khempila (2022) ที่ศึกษาการผลิต

ไบโอชาร์และไฮโดรชาร์อัดเม็ดจากไบอ้อยและชานอ้อยอัดเม็ด พบว่า ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้นจาก 848.59 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรไปเป็น 891.18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นสมบัติที่สัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล เช่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และดัชนีความคงทน ตลอดจนความเสถียรในการขนส่งและจัดเก็บ ดังนั้นความหนาแน่นจึงเป็นสมบัติที่สามารถใช้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบชีวมวลอัดเม็ดซึ่งผลิตด้วยเงื่อนไขในการอัดเม็ดที่แตกต่างกันได้

ดัชนีความคงทนเป็นสมบัติทางกลที่สำคัญของเชื้อเพลิงประเภทอัดเม็ดเนื่องจากช่วยป้องกันการแตกหักระหว่างขนส่งและกักเก็บ ผลการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกลของเชื้อเพลิงไมทอร์รีไฟด์อัดเม็ดและเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดในอัตราส่วน OPF/TOPE: UBC 70:30 จากสมบัติดัชนีความคงทน ที่มีค่าเท่ากับ 74.11% และ 93.32% ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น แต่อย่างไรก็ตามสมบัติดัชนีความคงทนที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองแบบมีค่าดัชนีความคงทนไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิง ชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) แบบชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (non – woody biomass) และมาตรฐาน ISO 17225-8:2016 เนื่องมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดเม็ดมีปริมาณลิกนินต่ำ ซึ่งดัชนีความคงทนสัมพันธ์กับปริมาณลิกนินในผลิตภัณฑ์ของแข็งนั้น ๆ หากชีวมวลเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณลิกนินสูงทำให้การอัดเม็ดสามารถขึ้นรูปเป็นแท่งได้ดี แต่เมื่อชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบมีค่าลิกนินต่ำจึงทำให้การอัดเม็ดขึ้นรูปมีความยืดเกาะกันเป็นเม็ดได้น้อยจึงทำให้ค่าดัชนีความคงทนที่ได้มีค่าน้อยตามไปด้วย

4.3 ผลการปรับสภาพดินฟอสไฟซ์แล้ว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับสภาพดินฟอสไฟซ์แล้วด้วยวิธีการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 20, 30, และ 40 นาที ตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ความเข้มข้น 3 นอร์มอล เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนกรดฟอสฟอริกต่อดินฟอสไฟซ์ที่ผ่านการไพโรไลซิส เท่ากับ 5:1 ซึ่งธาตุองค์ประกอบของดินฟอสไฟซ์บริสุทธิ์ ดินฟอสไฟซ์แล้ว (สกัดน้ำมันออก) แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ธาตุองค์ประกอบของดินฟอสไฟซ์บริสุทธิ์ ดินฟอสไฟซ์แล้ว (สกัดน้ำมันออก) และดินฟอสไฟซ์หลังการปรับสภาพ

ธาตุองค์ประกอบ	ดินฟอสฟอรัสบริสุทธิ์ (%)	ดินฟอสฟอรัสใช้แล้ว (สกัดน้ำมันออก) (%)
SiO ₂	47.676	54.687
Al ₂ O ₃	11.023	10.277
Fe ₂ O ₃	10.602	6.043
CaO	2.897	4.220
P ₂ O ₅	0.044	5.683
MgO	0.975	1.565
SO ₃	3.027	1.201
O	10.653	8.550
C	0.206	5.608

4.3.1 ผลการไพโรไลซิสดินฟอสฟอรัสใช้แล้วด้วยไมโครเวฟ

ในกระบวนการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟที่ อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 20, 30, และ 40 นาที พบว่า ดินฟอสฟอรัสที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะต่าง ๆ มีลักษณะสีแสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาจากสีของดินฟอสฟอรัสใช้แล้วนั้นเห็นได้ว่าสีของดินฟอสฟอรัสใช้แล้วเปลี่ยนจากสีเขียวแกมเทา เป็นสีดำและมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ร่วนซุยขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักของดินฟอสฟอรัสหลังการไพโรไลซิสนั้นมีน้ำหนักลดลงทั้งสามสภาวะ และมีน้ำหนักที่เหลือหลังการไพโรไลซิสที่ใกล้เคียงกัน คือ ลดลงจาก 80 กรัม เหลือประมาณ 50 กรัม ซึ่งน้ำหนักที่หายไปอาจเนื่องมาจากน้ำมันที่อยู่ในดินฟอสฟอรัสใช้แล้วระเหยออกมาเป็นก๊าซ รวมถึงสารระเหยและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่อยู่ในดินฟอสฟอรัสถูกระเหยออกมาด้วย

การปรับสภาพด้วยความร้อนสร้างรอยแยกระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ ซึ่งช่วยปรับปรุงความสามารถในการดูดซับ การปรับสภาพด้วยความร้อนสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของแร่ธาตุดินฟอสฟอรัส คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่สำคัญหลายอย่างของดินฟอสฟอรัส เช่น ความแข็งแรง ขนาดอนุภาค ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ความเป็นกรดของพื้นผิว และพื้นที่ผิวจำเพาะ สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างเห็นได้ชัดโดยขึ้นอยู่กับการวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อน (Abdelbasir et al., 2023)



ก.ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส	ข.ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส	ค.ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส
20 นาที	30 นาที	40 นาที

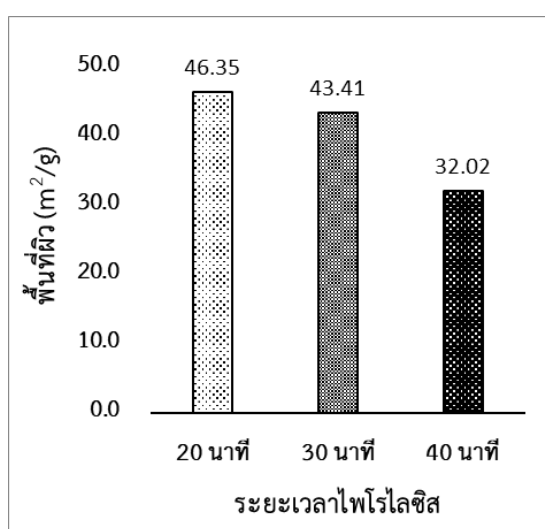
รูปที่ 4.9 ดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 20 30 และ 40 นาที

สำหรับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600°C เวลา 20 30 และ 40 นาที แสดงดังตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบกับดินฟอกสีบริสุทธิ์และดินฟอกสีใช้แล้ว จากตารางเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้ว (63.33 m²/g, 0.13 cm³/g) มีค่าลดลงจากดินฟอกสีบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด (241.79 m²/g, 0.34 cm³/g) เนื่องจากดินฟอกสีใช้แล้วได้มีการดูดซับรังควัตถุและอนุภาคของสิ่งเจือปน เช่น ฟอสโฟลิพิด และโลหะหนักเข้ามาไว้ที่รูพรุนของดินฟอกสี (Pilakjanyakul et al., 2018)

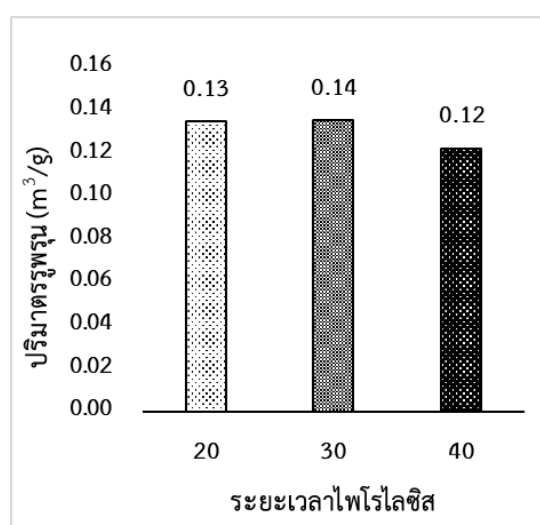
และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอกสีใช้แล้วกับดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส พบว่า พื้นที่ผิวดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิสยังคงมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวของดินฟอกสีใช้แล้วทั้งสามสถานะ แต่ในส่วนของปริมาตรรูพรุนดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิสมีค่าใกล้เคียงกับดินฟอกสีใช้แล้วและสถานะการไพโรไลซิสที่ 30 นาที มีค่ามากกว่าดินฟอกสีใช้แล้วแต่ยังคงน้อยกว่าดินฟอกสีบริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเห็นได้ว่าดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิสมีค่ามากกว่าทั้งดินฟอกสีบริสุทธิ์และดินฟอกสีใช้แล้ว ผลที่ได้สามารถกล่าวได้ว่าการไพโรไลซิสสามารถสกัดน้ำมันและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากดินฟอกสี ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Sapawe et al., 2018) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส พบว่า เมื่อเวลาในการไพโรไลซิสเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวมีค่าลดลง (รูปที่ 4.10) แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน พบว่า เมื่อเวลาในการไพโรไลซิสเพิ่มมากขึ้นทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีใช้แล้ว และดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส

สภาวะตัวอย่าง	เวลา (นาท)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (\AA)
ดินฟอกสีบริสุทธิ์	-	241.79	0.34	56.85
ดินฟอกสีใช้แล้ว	-	63.33	0.13	82.23
ดินฟอกสีใช้แล้ว	20	46.35	0.13	116.24
ปรับสภาพด้วยการ	30	43.41	0.14	124.68
ไพโรไลซิส	40	32.02	0.12	152.46



ก) พื้นที่ผิว



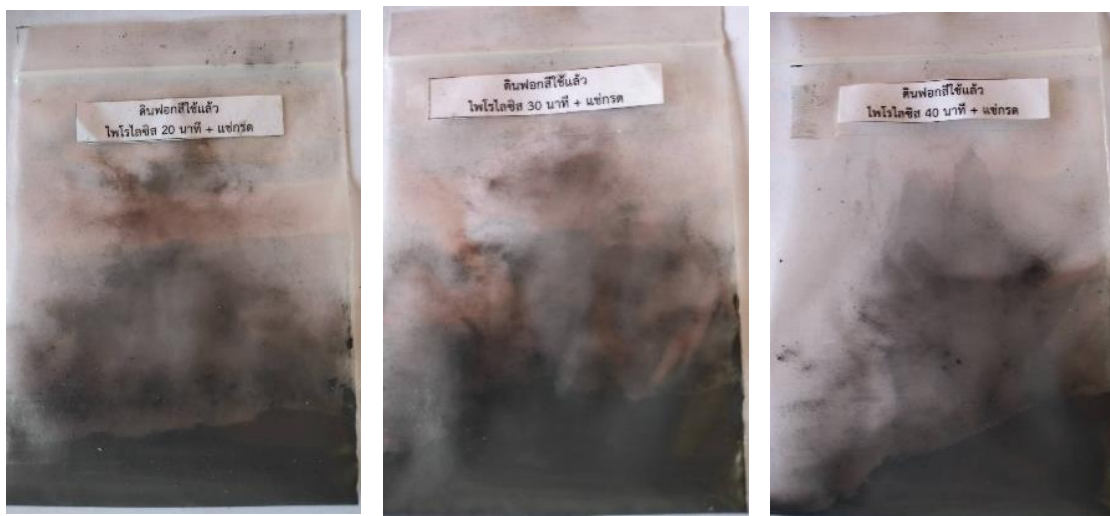
ข) ปริมาตรรูพรุน

รูปที่ 4.10 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส

4.3.2 ผลการไพโรไลซิสดินฟอกสีใช้แล้วด้วยไมโครเวฟตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด

ในการทดลองนี้ นำดินฟอกสีใช้แล้วหลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมากระตุ้นด้วยกรด (แซ่กรด) ฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 3 นอร์มอล โดยใช้อัตราส่วนกรดฟอสฟอริกต่อดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิส เท่ากับ 5:1 ลักษณะของดินฟอกสีหลังกระบวนการไพโรไลซิสตามด้วยการแซ่ด้วยกรดแสดงดังรูปที่ 4.11 เห็นได้ว่าลักษณะของดินฟอกสีทั้งสามสภาวะยังคงมีสีดำและหลังจากอบด้วยอุณหภูมิ 105°C ทำให้ดินฟอกสีแห้งและร่วนซุยเหมือนเดิม

การกระตุ้นด้วยกรดเป็นวิธีการปรับสภาพแบบหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยรวมแล้วกระบวนการกระตุ้นกรดประกอบด้วยสองขั้นตอน (1) การแทนที่ไอออนบวกที่เปลี่ยนรูปได้ด้วยโปรตอน และ (2) การละลายไอออนบวกของโลหะจากโครงสร้างดินฟอกสีใช้แล้ว โดยกรดละลายไอออนบวก (Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+}) โดยการกำจัดไอออนบวกระหว่างชั้นและแทนที่ด้วยโปรตอน (Abdelbasir et al., 2023)



ก) ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส
+ แฉกรด 20 นาที

ข) ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส
+ แฉกรด 30 นาที

ค) ดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส
+ แฉกรด 40 นาที

รูปที่ 4.11 ดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด

ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด พบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนในแต่ละสภาวะมีค่า เท่ากับ $81.25 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.19 \text{ cm}^3/\text{g}$, $69.44 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.18 \text{ cm}^3/\text{g}$, $75.72 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.18 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส พบว่า ทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่ามากกว่าทั้งสามสภาวะ แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีบริสุทธิ์ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีใช้แล้ว ดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส และดินฟอกสีใช้แล้วที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด

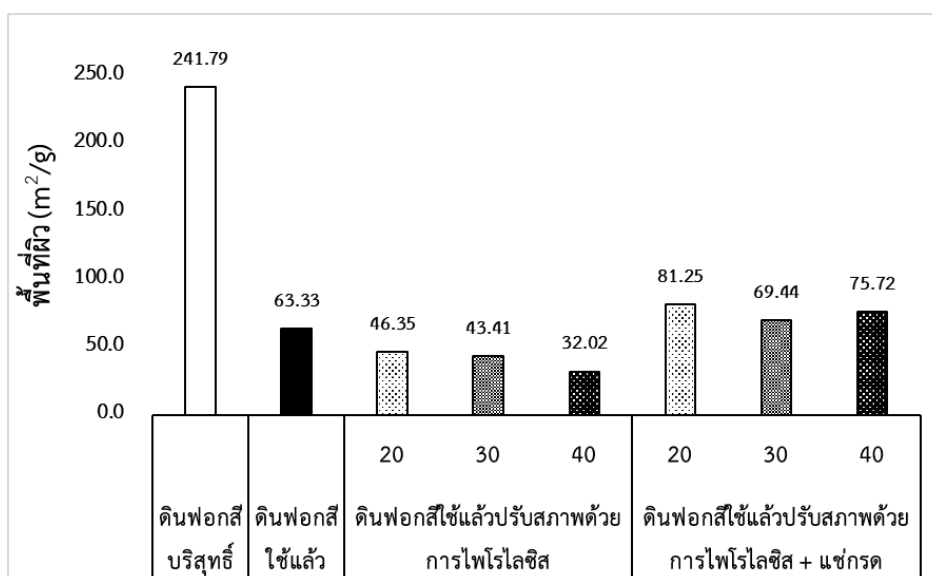
สภาวะตัวอย่าง	เวลา (นาที)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (\AA)
ดินฟอกสีบริสุทธิ์	-	241.79	0.34	56.85
ดินฟอกสีใช้แล้ว	-	63.33	0.13	82.23

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างดินฟอกสีบริสุทธิ์ ดินฟอกสีใช้แล้ว

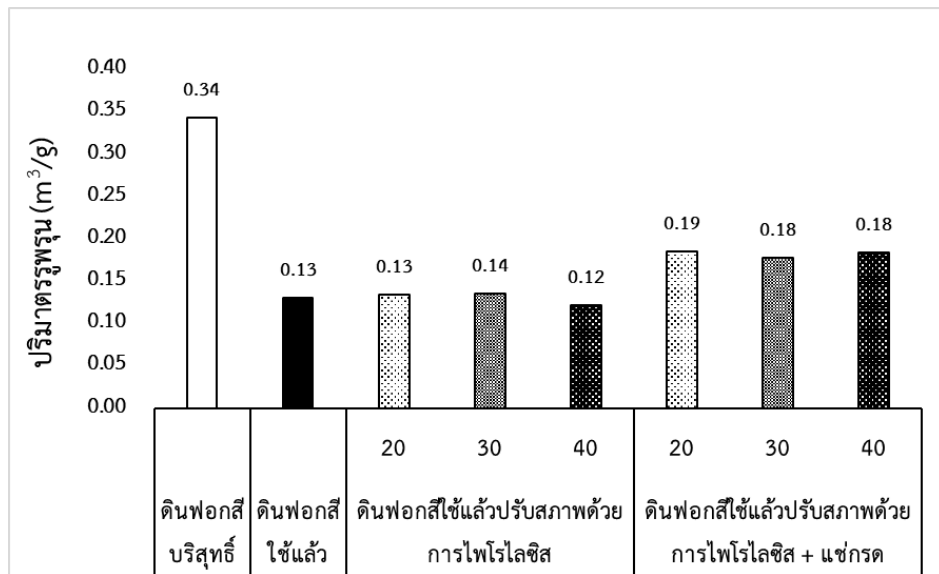
ดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส และดินฟอกสีใช้แล้วที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด (ต่อ)

สภาวะตัวอย่าง	เวลา (นาท)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (\AA)
ดินฟอกสีใช้แล้ว	20	46.35	0.13	116.24
ปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส	30	43.41	0.14	124.68
ไพโรไลซิส	40	32.02	0.12	152.46
ดินฟอกสีใช้แล้ว	20	81.25	0.19	91.17
ปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส	30	69.44	0.18	102.48
ไพโรไลซิส + แสงกรด	40	75.72	0.18	97.35

จากตารางเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดมีค่ามากกว่าดินฟอกสีใช้แล้วและดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิส ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thamakorn (2016) พบว่า ดินฟอกสีหลังผ่านการแช่กรดมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่ามากกว่าดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการเผา แสดงดัง รูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงว่าการแช่กรดของดินฟอกสีที่ผ่านการเผาช่วยชะล้างสิ่งตกค้างในรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิว การดูดซับ ซึ่งอาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับดินที่เผาได้ และสามารถบอกได้ว่ากรดละลายไอออนบวก (Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+}) โดยการกำจัดไอออนบวกระหว่างชั้นและแทนที่ด้วยโปรตอน ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น (Abdelbasir et al., 2023) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดทั้งสามสภาวะในการทดลองที่เวลาในการไพโรไลซิส 20 นาที (รูปที่ 4.11) ตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดมีค่ามากที่สุดทั้งพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิส

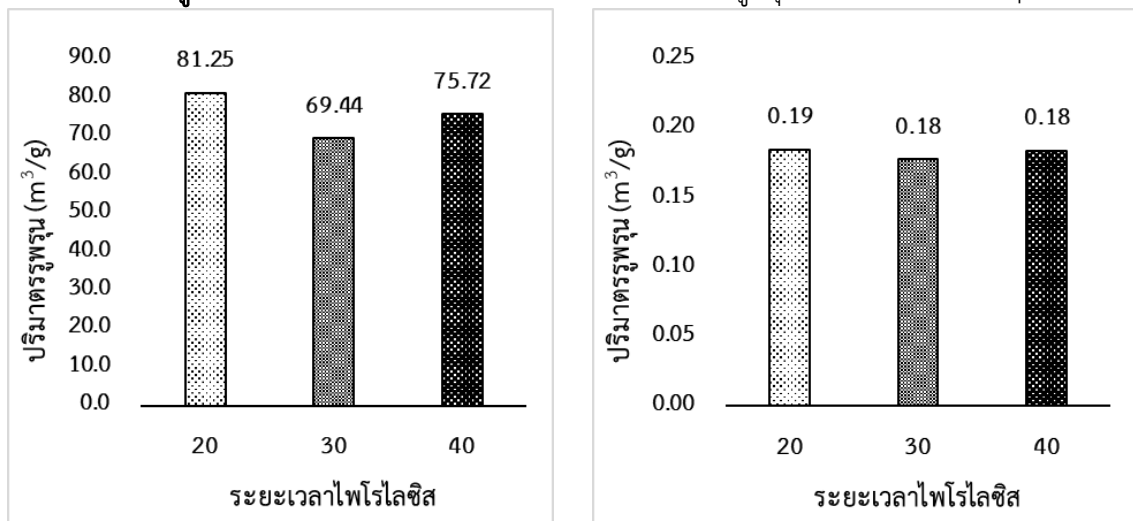


ก) พื้นที่ผิว



ข) ปริมาตรรูพรุน

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนดินฟอกสีชนิดต่าง ๆ

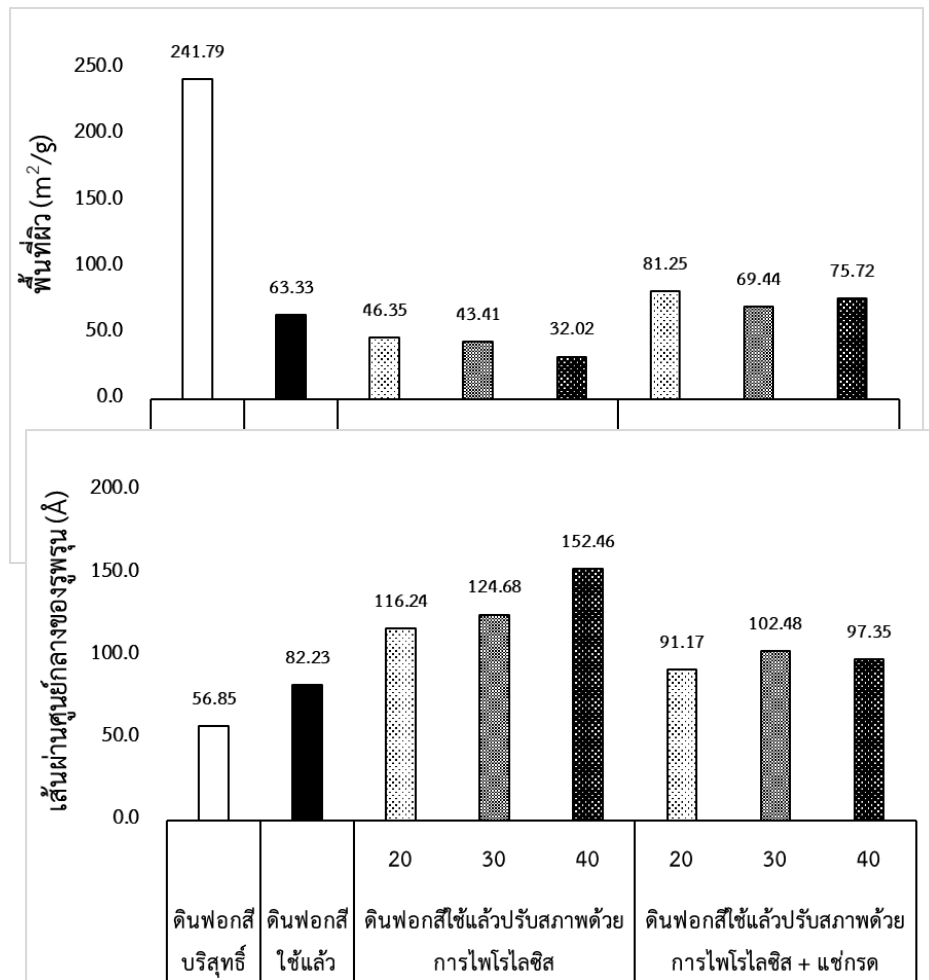


ก) พื้นที่ผิว

ข) ปริมาตรรูพรุน

รูปที่ 4.13 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีใช้แล้วปรับสภาพด้วยการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรด

ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเห็นว่าปริมาตรรูพรุนของดินฟอกสีที่ผ่านการไพโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดทั้งสามสถานะในการทดลองที่เวลาในการไพโรไลซิส 20 นาที ตามด้วยการกระตุ้นด้วยกรดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.13 เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนลดลงเรื่อย ๆ และเมื่อพื้นที่ผิวลดลงทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นผลมาจากการที่สารดูดซับมีพื้นที่ผิวมากกว่ามีรูพรุนขนาดเล็กมากมายทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับและทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ลดน้อยลง



ข) เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)

รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนในดินฟอกสีชนิดต่าง ๆ

4.4 ผลการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

ในการทดลองนี้ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนำมาฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับดินฟอกสีบริสุทธิ์ และด้วยวัตถุประสงค์ในการที่นำกลับไปใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน จึงเลือกใช้วิธีการฟอกสีน้ำมันตามขั้นตอนและวิธีที่ใช้จริงในโรงงานนิเวศโอติเซล ซึ่งเป็นโรงงานที่ได้รับความอนุเคราะห์ที่ดินฟอกสีใช้แล้ว ดินฟอกสีบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มดิบ โดยในการทดลองการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบทำการฟอกสี 3 ซ้ำ

ลักษณะของน้ำมันปาล์มหลังจากนำมาฟอกสีด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์ พบว่า สีของน้ำมันปาล์มที่ได้ออกมายังคงมีสีที่ใกล้เคียงกับน้ำมันปาล์มดิบ ทั้งที่ฟอกสีด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์และดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพแสดงดังรูปที่ 4.13



ก) น้ำมันปาล์มดิบ



ข) น้ำมันที่ฟอกสีด้วยดินฟอกสีบริสุทธิ์



ค-1) น้ำมันที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส 20 นาที



ค-2) น้ำมันที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส 30 นาที



ค-3) น้ำมันที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีใช้แล้วไพโรไลซิส 40 นาที

รูปที่ 4.15 น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีชนิดต่าง ๆ



ง-1) น้ำมันที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีใช้แล้วไฟโรไลซิส + แชกรด 20 นาที



ง-2) น้ำมันที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีใช้แล้วไฟโรไลซิส + แชกรด 30 นาที



ง-3) น้ำมันที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีใช้แล้วไฟโรไลซิส + แชกรด 40 นาที

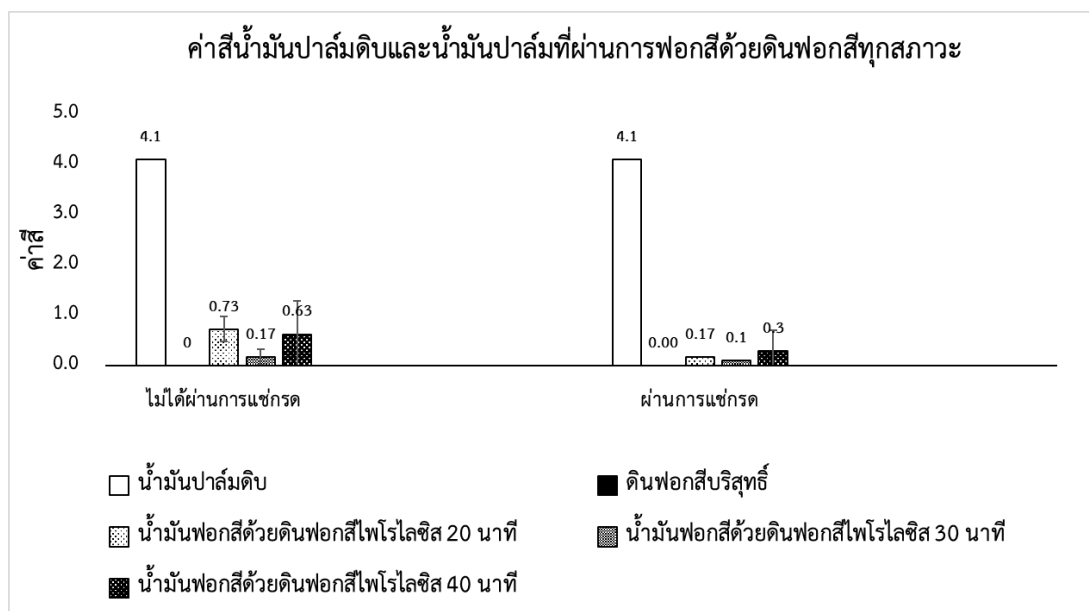
รูปที่ 4.15 น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

หลังจากการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบด้วยดินพอกสีบริสุทธิ์และดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ได้มีการส่งตัวอย่างน้ำมันไปวิเคราะห์ค่าสีของน้ำมัน ณ โรงงานนิวไบโอดีเซล ผลที่ได้พบว่า ค่าสีฟ้าของน้ำมันปาล์มที่พอกสีด้วยดินพอกสีบริสุทธิ์ (ค่าสีฟ้า = 0) และดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ (ค่าสีฟ้า = 0.00 – 2.00) มีสีฟ้าที่ลดลงจากน้ำมันปาล์มดิบ (ค่าสีฟ้า = 4.10) แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีบริสุทธิ์และน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า ค่าสีของน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพยังคงมีค่าสีที่สูงกว่าน้ำมันที่พอกสีด้วยดินพอกสีบริสุทธิ์ (ตารางที่ 4.11) ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินพอกสีบริสุทธิ์และดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพในหัวข้อก่อนหน้า

เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการไฟโรไลซิส พบว่า การใช้ดินพอกสีที่ไม่ผ่านการแชกรด มีอิทธิพลต่อค่าสีฟ้าทำให้ค่าสีฟ้ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การใช้ดินพอกสีที่ผ่านการแชกรดไม่มีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าสีฟ้า และเมื่อพิจารณาการแชกรดและไม่แชกรด พบว่า ค่าสีฟ้าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่าสีฟ้าอยู่ในช่วง 0.00 – 2.00 เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ผ่านการพอกสีที่ทางโรงงานได้มีการทดลองไว้ พบว่า ค่าสีฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าสีฟ้าเท่ากับ 0.00 แสดงดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าสีแดงและสีฟ้าของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีดินพอกสีบริสุทธิ์ และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ

สภาวะตัวอย่าง	กระบวนการปรับสภาพ	
	ไม่ได้ผ่านการแช่กรด	ผ่านการแช่กรด
น้ำมันปาล์มดิบ	4.1	4.1
น้ำมันพอกสีด้วยดินพอกสีบริสุทธิ	0	0.00
น้ำมันพอกสีด้วยดินพอกสีไพโรไลซิส 20 นาที	0.73 ± 0.25	0.17 ± 0.29
น้ำมันพอกสีด้วยดินพอกสีไพโรไลซิส 30 นาที	0.17 ± 0.15	0.1 ± 0.10
น้ำมันพอกสีด้วยดินพอกสีไพโรไลซิส 40 นาที	0.63 ± 0.35	0.3 ± 0.10



รูปที่ 4.16 ค่าสีฟ้าของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีดินพอกสีบริสุทธิ และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการพอกสีด้วยดินพอกสีดินพอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ

4.5 ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการปรับสภาพเพื่อนำมาฟอกสีซ้ำ

ในการทดลองมีการทดลองสองการทดลองที่แยกออกจากกันโดยชัดเจน จึงต้องให้การคำนวณต้นทุนที่แยกออกจากกันแสดงดังตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 ดังต่อไปนี้

4.5.1 การต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการคำนวณวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าก๊าซ ไนโตรเจน โดยคิดในหน่วยบาทต่อตัน

ตารางที่ 4.12 การต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ต้นทุน						
อัตราส่วน OPF:UBC	ขั้นตอน การทดลอง	ค่าไฟฟ้า (บาทต่อ ตัน)	ค่าก๊าซ ไนโตรเจน (บาทต่อการ ทดลอง)	ค่าดินฟอกสี (บาทต่อการ ทดลอง)	ค่าต้นทุน (บาทต่อ ตัน)	รวม (บาทต่อ ตัน)
70: 30	การทอรรี แพคชั่น	26320	15400	-	41720	41801.33
	การอัดเม็ด เชื้อเพลิง	17.43	-	81.33		
50: 50	การทอรรี แพคชั่น	18800	11000	-	29800	29921.33
	การอัดเม็ด เชื้อเพลิง	17.43	-	100	121.33	

30: 70	การทอรรี่ แพคชั่น	11280	6600		17880	18041.33
	การอัดเม็ด เชื้อเพลิง	17.43		140	161.33	

4.5.2 ต้นทุนในการปรับสภาพเพื่อนำมาฟอกสีซ้ำ

ในกระบวนการปรับสภาพเพื่อนำมาฟอกสีซ้ำมีการคำนวณวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าก๊าซ ไนโตรเจน ค่าสารเคมี (กรดฟอสฟอริก) โดยคิดในหน่วยบาทต่อตัน

ตารางที่ 4.13 การต้นทุนในกระบวนการปรับสภาพเพื่อนำมาฟอกสีซ้ำ

ก) ต้นทุนในการไพโรไลซิส

ต้นทุนการผลิต		
การทดลอง ครั้งที่	ระยะเวลาในการไพโรไลซิส (นาท)	การทดลองไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ (บาทต่อกรัม)
1	30	0.078
2	40	0.097

ก) ต้นทุนในการไพโรไลซิส (ต่อ)

ต้นทุนการผลิต		
การทดลอง ครั้งที่	ระยะเวลาในการไพโรไลซิส (นาท)	การทดลองไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ (บาทต่อกรัม)
3	20	0.057
4	30	0.075
5	30	0.081
6	40	0.107
7	20	0.054
8	40	0.097
9	20	0.051

ข) ต้นทุนในการไพโรไลซิสตามด้วยการแช่กรด

ต้นทุนการผลิต		
การทดลอง ครั้งที่	ระยะเวลาในการไพโรไลซิส (นาทีก)	การทดลองไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟตามด้วยการ แช่กรด (บาทต่อกรัม)
1	30	0.090
2	40	0.105
3	20	0.067
4	30	0.088
5	30	0.094
6	40	0.114
7	20	0.066
8	40	0.104
9	20	0.051

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1) การทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 40 นาที ทำให้ทางปาล์มน้ำมันที่ได้มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงกว่าสถานะอื่น ๆ

2) อัตราส่วน OPF/TOPF: UBC เท่ากับ 70:30 ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอร์รีไฟด์และไม่ผ่านการทอร์รีไฟด์เป็นสถานะที่ดีที่สุด ซึ่งค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงไม่การทอร์รีไฟด์อัดเม็ด ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์อัดเม็ดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ในส่วนของค่าดัชนีความคงทนไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO/TS 1 7 2 2 5 - 8 :2 0 1 6 Solid biofuels — Fuel specifications and classes (Part 8 : Graded thermally treated and densified biomass fuels) ในทุกสภาวะการอัดเม็ด

3) ต้นทุนในการ ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่อัตราส่วน TOPF: UBC 30:70 มีต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด เท่ากับ 18041.33 บาทต่อตัน

5.1.2 การปรับสภาพดินฟอสซีใช้แล้ว

1) กระบวนการปรับสภาพดินฟอสซีใช้แล้วเพื่อนำกลับมาฟอสซีซ้ำ น้ำมันปาล์มที่ฟอสซีด้วยดินฟอสซีที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าสีฟ้าลดลงจากน้ำมันปาล์มดิบ แต่ยังคงมีค่าสีฟ้าสูงกว่าน้ำมันที่ฟอสซีด้วยดินฟอสซีบริสุทธิ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของดินฟอสซีที่ผ่านการปรับสภาพที่มีค่ามากกว่าดินฟอสซีใช้แล้ว แต่มีค่าน้อยกว่าดินฟอสซีบริสุทธิ์

2) ต้นทุนในการปรับสภาพดินฟอสซีใช้แล้วที่มีราคาถูกที่สุด ได้แก่ การไพโรไลซิสที่ 20 นาที มีค่าเท่ากับ 0.051 บาทต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดควรมีการเพิ่มตัวประสาน อย่างเช่น ชี้เค้ก แป้งมัน แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น เพื่อเพิ่มดัชนีความคงทนให้แก่เชื้อเพลิงอัดเม็ด
- 2) ในกระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบควรเพิ่มปริมาณดินฟอกสีบริสุทธิ์และดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากในปริมาณที่ใช้ในการทดลองนี้น้อยเกินไปจนทำให้ค่าสีที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บรรณานุกรม

- Abd Majid, R., & Mat, C. R. C. (2017). Regenerated spent bleaching earth for the decolourisation and BOD reduction of palm oil mill effluent. *J. of Oil Palm Res.*
- Abdelbasir, S. M., Shehab, A. I., & Khalek, M. A. A. (2023). Spent bleaching earth; recycling and utilization techniques: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances, 17*, 200124.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200124>
- Acharya, B., & Dutta, A. (2016). Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction. *Biomass Conversion and Biorefinery, 6*(2), 139-149. doi:10.1007/s13399-015-0170-x
- Ashaari, A., Ahmad, T., Awang, S. R., & Shukor, N. A. (2021). A Graph-Based Dynamic Modeling for Palm Oil Refining Process. *Processes, 9*(3), 523.
- Brotto, J. d. O., Salla, J. d. S., da Silva, J. C. G., Rodríguez-Castellón, E., José, H. J., de Amorim, S. M., & Moreira, R. d. F. P. M. (2022). Investigation of the thermal behavior of Pinus wood pellets during torrefaction for application in metallurgical processes. *Journal of Materials Research and Technology, 19*, 3749-3759. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.082>
- Buochareon, S., Thararux, C., Homdoun, N., Dussadee, N., Pintana, P., & Chindarak, S. (2019). Upgrading Oil Palm leaves with using Microwave Torrefaction Process. *JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY, 12*, 317-322.
- Cahyanti, M. N., Doddapaneni, T. R. K. C., & Kikas, T. (2020). Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements. *Bioresource technology, 301*, 122737.
- Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., . . . Zeng, G. (2015). Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresource Technology, 185*, 254-262.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.045>

- Cao, Z., Zhang, S., Huang, X., Liu, H., Sun, M., & Lyu, J. (2020). Correlations between the compressive strength of the hydrochar pellets and the chemical components: Evolution and densification mechanism. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 104956.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104956>
- Chavalparit, O., Ongwandee, M., & Trangkprasith, K. (2013). Production of pelletized fuel from biodiesel-production wastes: oil palm fronds and crude glycerin. *Engineering Journal*, 17(4), 61-70.
- Girgis, A. Y. (2005). Reuse of discarded deactivated bleaching earth in the bleaching of oils. *Grasas y Aceites*, 56(1), 34-45.
- González Martínez, M., Hélias, E., Ratel, G., Thiéry, S., & Melkior, T. (2021). Torrefaction of Woody and Agricultural Biomass: Influence of the Presence of Water Vapor in the Gaseous Atmosphere. *Processes*, 9(1). doi:10.3390/pr9010030
- Hamchara, P. (2017). *Effect of Fungal Treated Ol Palm Frond on Feed Intake, Digestibility, Ruminal Fermentation, and Nitrogen Balance in Goats* (Master of Science in Animal Science). Prince of Songkla University,
- Jansuwan, K., & Limsuwan, W. (2019). *Production of biodiesel from used bleaching earth with microwave energy*. (Bachelor of Science in Environmental Management Technology). Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani
- Jantaraniyom, T. (2016). *Farmer's Guide Efficient production of palm oil*. Songkla: hadyai digital print.
- Khempila, J. (2022). *Production of High-Quality Biomass Fuel using Torrefaction and Hydrothermal Carbonization Processes*. (Doctor of Philosophy). Mahasarakham University,
- Kittithammavong, V., Charoensaeng, A., Khaodhiar, S., Netvichien, R., & Arpornpong, N. (2016). *Extraction of residual palm oil from spent bleaching earth (SBE) using surfactant*.
- Kongto, P., Palamanit, A., Chaiprapat, S., & Tippayawong, N. (2020). Biomass Torrefaction Technology for Producing High Quality Solid Biofuels. *Engineering Journal*

Chiang Mai University, 27, 131-150.

Kongto, P., Palamanit, A., Chaiprapat, S., & Tippayawong, N. (2021). Enhancing the fuel properties of rubberwood biomass by moving bed torrefaction process for further applications. *Renewable Energy*, 170, 703-713.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.012>

Kraiprom, T., Jantararat, S., Madting, P., & Dueraso, H. (2018). Study of Nutritive Value of Oil Palm Frond Silage with Molasses. *Journal of Science and Technology*, 3(2).

Krysanova, K., Krylova, A., & Zaichenko, V. (2019). Properties of biochar obtained by hydrothermal carbonization and torrefaction of peat. *Fuel*, 256, 115929.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115929>

Lau, H. S., Ng, H. K., Gan, S., & Jourabchi, S. A. (2018). Torrefaction of oil palm fronds for co-firing in coal power plants. *Energy Procedia*, 144, 75-81.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.010>

Lu, K.-M., Lee, W.-J., Chen, W.-H., Liu, S.-H., & Lin, T.-C. (2012). Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource technology*, 123, 98-105.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.096>

Malakootian, M., Fatehizadeh, A., Yousefi, N., Ahmadian, M., & Moosazadeh, M. (2011). Fluoride removal using Regenerated Spent Bleaching Earth (RSBE) from groundwater: Case study on Kuhbonan water. *Desalination*, 277(1-3), 244-249.

Mamvura, T. A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 6(3), e03531.

Matali, S., Rahman, N. A., Idris, S. S., Yaacob, N., & Alias, A. B. (2016). Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. *Procedia Engineering*, 148, 671-678. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.550>

Mei, Y., Liu, R., Yang, Q., Yang, H., Shao, J., Draper, C., . . . Chen, H. (2015). Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. *Bioresource Technology*, 177, 355-360.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.113>

- Moshi, A. (2017). Characterization of Spent Bleaching Earth and Its Utilization for Improving Manure-based Biogas Production. *Biotechnology Journal International*, 17, 1-13. doi:10.9734/BJI/2017/31601
- Mu, B., & Wang, A. (2019). Regeneration and recycling of spent bleaching earth. *Handbook of ecomaterials*, 5, 3147-3167.
- Mutyala, S., Fairbridge, C., Paré, J. R. J., Bélanger, J. M. R., Ng, S., & Hawkins, R. (2010). Microwave applications to oil sands and petroleum: A review. *Fuel Processing Technology*, 91(2), 127-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.09.009>
- Niyomukiza, J. B., Nabitaka, K. C., Kiwanuka, M., Tiboti, P., & Akampulira, J. (2022). Enhancing Properties of Unfired Clay Bricks Using Palm Fronds and Palm Seeds. *Results in Engineering*, 16, 100632. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100632>
- Nursulihatimarsyila, A., Cheah, K., Chuah, T., Siew, W., & Choong, T. (2010). Deoiling and regeneration efficiencies of spent bleaching clay. *American Journal of Applied Sciences*, 7(3), 434-437.
- Panunumpa, N., Boonyam, T., Wongkhamchan, B., Suksi, C., Junjula, B., & Ureerak, P. (2014). Pellet fuel Clean Alternative energy. In. Bangkok.
- Pilakjanyakul, N., & Klinkesorn, U. (2018). Extraction and Characterization of Residual Oil from Spent Bleaching Earth. *The Journal of KMUTNB*, 28, 687-698.
- Pizarro, A. V. L., & Park, E. Y. (2003). Lipase-catalyzed production of biodiesel fuel from vegetable oils contained in waste activated bleaching earth. *Process Biochemistry*, 38(7), 1077-1082.
- Pongsa, U., Saengkhiao, P., Phangphet, P., Sangrayub, P., Mookam, N., & Pumchan, W. (2017). *Pineapple leaves used as alternative material for biomass pellet production*. Prachuap Khiri Khan: Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin.
- Sajadi, M., & Mokhtarani, N. (2023). Catalytic pyrolysis of oil sludge using the nano alumina powder. *Energy*, 270, 126954. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126954>
- Sangkhaphan, A. (2017). *CO-PELLETIZED BRIQUETTES PRODUCTION FROM MUNICIPAL WASTEWATER SLUDGE; CASE STUDY OF PATTAYA*

MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT. (MASTER DEGREE OF ENGINEERING (ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY MANAGEMENT)). THAMMASAT UNIVERSITY,

Sapawe, N., & Hanafi, M. F. (2018). Analysis of the pyrolysis products from spent bleaching clay. *Materials Today: Proceedings*, 5(10, Part 2), 21940-21947. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.054>

Saputro, K. E., Siswanti, P., Nugroho, D. W., Ikono, R., Noviyanto, A., & Rochman, N. T. (2020). *Reactivating Adsorption Capacities of Spent Bleaching Earth for Using in Crude Palm Oil Industry.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Singh, S., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2020). Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. *Renewable Energy*, 153, 711-724. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.037>

Srisang, N., Srisang, S., Wongpithawat, P., The-Eye, K., Wongkeaw, K., & Sinthoo, C. (2017). Production of Biomass Briquette from Residual Bleaching Earth and Empty Palm Bunch. *Energy Procedia*, 138, 1079-1084. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.119>

Sukiran, M. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., Bakar, N. A., & Loh, S. K. (2017). A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Conversion and Management*, 149, 101-120.

Thamakorn, P. (2016). *Reactivation of used bleaching clay from palm oil industry for recycled frying oil.* Bangkok:

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Central Library.

Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., . . . Majer, S. (2016). Moving torrefaction towards market introduction—Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project. *Biomass and bioenergy*, 89, 184-200.

- Tumuluru, J. S., Conner, C. C., & Hoover, A. N. (2016). Method to Produce Durable Pellets at Lower Energy Consumption Using High Moisture Corn Stover and a Corn Starch Binder in a Flat Die Pellet Mill. *J Vis Exp*(112). doi:10.3791/54092
- Ungureanu, N., Vladut, V., G, P., Ionescu, M., Zăbavă, B.-Ş., & Grigore, I. (2016). *PRODUCTION STATUS OF BIOMASS PELLETS – REVIEW*.
- Wang, C., Yuan, X., Li, S., & Zhu, X. (2021). Enrichment of phenolic products in walnut shell pyrolysis bio-oil by combining torrefaction pretreatment with fractional condensation. *Renewable Energy*, *169*, 1317-1329.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.112>
- Wang, T., Zhai, Y., Li, H., Zhu, Y., Li, S., Peng, C., . . . Li, C. (2018). Co-hydrothermal carbonization of food waste-woody biomass blend towards biofuel pellets production. *Bioresource Technology*, *267*, 371-377.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.059>
- Yek, P. N. Y., Cheng, Y. W., Liew, R. K., Mahari, W. A. W., Ong, H. C., Chen, W.-H., . . . Kong, S. H. (2021). Progress in the torrefaction technology for upgrading oil palm wastes to energy-dense biochar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *151*, 111645.
- อมรรักษ์, ส. (2556). การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิสสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, *23*.

ภาคผนวก

ก

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานเชื้อเพลิงไม้ออร์รีไฟด์อัดเม็ดเปรียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) แบบชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ (non – woody biomass) กับเชื้อเพลิงไม้ออร์รีไฟด์อัดเม็ด (70:30)

ตารางที่ ก-1 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (ข้อ 4.2)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ	เชื้อเพลิงไม้ออร์รีไฟด์อัดเม็ด (70:30)
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m ³	ASTM E873	770 kg/m ³
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 mm ของค่าระบุ)	ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามที่ระบุ (ค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 mm ของค่าระบุ)		9 mm
ความคงทน	ไม่น้อยกว่า 96.0% w/w	ไม่น้อยกว่า 96.0% w/w		74.11% w/w
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกิน 3.0 % 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 mm		ประมาณ 10 mm ถึง 40 mm
	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 50 mm สำหรับ D ตั้งแต่ 12 mm ถึง 25 mm			

ตารางที่ ก-1 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (ข้อ 4.2) (ต่อ)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ	เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ด (70:30)
ความยาวต่ำสุด	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm	ไม่น้อยกว่า 3.15 mm		10mm
ความยาวสูงสุด (เฉพาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm)	ไม่เกิน 45.0 mm	ไม่เกิน 45.0 mm		40mm
ความยาวที่เกินกว่า 40 mm	ไม่เกิน 1 % w/w	ไม่เกิน 1 % w/w		-
ความชื้น ไม่เกิน	15 % w/w	15 % w/w	ASTM E871	9.94 ± 0.08 % w/w
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ASTM E711	12.24 ± 0.07 MJ/kg
เถ้า	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 18 % w/w	ASTM D1102	17.87 ± 0.14 % w/w
สารเติมแต่ง	ไม่เกิน 5 % w/w	ไม่กำหนด	ผู้ทำต้อง พิสูจน์	-
ส่วนประกอบของ คลอรีน (Cl)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ISO 16994	0.457 % w/w
ส่วนประกอบของ กำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ไม่เกิน 0.30 % w/w	ISO 16994	0.146 % w/w
ส่วนประกอบของ ไนโตรเจน (N)	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ไม่เกิน 2.0 % w/w	ISO 16948	0.127 % w/w
ส่วนประกอบของสารหนู (As)	ไม่เกิน 1 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968	-

ตารางที่ ก-1 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (ข้อ 4.2) (ต่อ)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	วิธีทดสอบ	เชื้อเพลิงไม้ทอร์รีไฟด์อัดเม็ด (70:30)
ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.5 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968	-
ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr)	ไม่เกิน 50 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968	19 mg/kg
ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 20 mg/kg	ไม่กำหนด	ISO 16968	10 mg/kg
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	12 mg/kg

หมายเหตุ ชั้นคุณภาพ 1 อ้างอิงจากชั้นคุณภาพ B ของ ISO 17225-6

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอร์รีไฟต์เปรียบกับตามมาตรฐาน ISO/TS 17225 - 8:2016 Solid biofuels — Fuel specifications and classes (Part 8 : Graded thermally treated and densified biomass fuels) กับเชื้อเพลิงทอร์รีไฟต์อัดเม็ด (70:30)

ตารางที่ ก-2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3	เชื้อเพลิงไม้ทอร์รี ไฟต์อัดเม็ด (70:30)
ที่มาและ แหล่งที่มา ISO 17225-1		1. ชีวมวลไม้ล้มลุก จากการเกษตรและ พืชสวน 1.1 ผลพลอยได้ และเศษเหลือจาก อุตสาหกรรมแปรรูป อาหารและ สมุนไพรที่ไม่ผ่าน การบำบัดทางเคมี และกากสมุนไพร 2. สวนผลไม้และ พืชสวน 2.1 ผลพลอยได้ และของเหลือจาก อุตสาหกรรมแปรรูป อาหารและผลไม้ กากผลไม้ที่ไม่ผ่าน กระบวนการทาง เคมี 3. ชีวมวลทางน้ำ	1. ไม้ล้มลุก 2. ชีวมวล จำพวกผลไม้ 3. ชีวมวล ทางน้ำ	1. ไม้ล้มลุก 2. ชีวมวล จำพวกผลไม้ 3. ชีวมวล ทางน้ำ	

ตารางที่ ก-2 คุณสมบัติที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (ต่อ)

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3	เชื้อเพลิงไม้ทอร์รี ไฟต์อัดเม็ด (70:30)
เส้นผ่าศูนย์กลาง, D^a และ ความยาว L^b , ISO 17829 According	มิลลิเมตร	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L \leq 40$ (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L \leq 50$ (จาก D12 ถึง D25)	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L$ ≤ 40 (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L$ ≤ 50 (จาก D12 ถึง D25)	D06 ถึง D25, $D \pm 1$; $3.15 \leq L$ ≤ 40 (จาก D06 ถึง D10) $3.15 \leq L$ ≤ 50 (จาก D12 ถึง D25)	D9 mm, $10 \leq L \leq 40$
ความชื้น, M^c , ISO 18134-1, ISO 18134-2	%โดย น้ำหนัก เปียก	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$	1.44 ± 0.25 %โดยน้ำหนัก เปียก
เถ้า, A, ISO 18122	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$A5.0 \leq 5.0$	$A10.0 \leq 10.0$	ค่าที่ต้อง กำหนด	35.14 ± 0.80 %โดยน้ำหนัก แห้ง
ดัชนีความคงทน , DU, ISO 17831-1	%โดย น้ำหนัก	$DU97.5 \geq 97.5$	$DU96.5 \geq 96.5$	$DU95.0 \geq 95.0$	93.32 %โดยน้ำหนัก
ฝุ่น, F^d , ISO 18846	%	$F2.0 \leq 2.0$	$F2.0 \leq 2.0$	$F3.0 \leq 3.0$	-

ตารางที่ ก-2 คุณสมบัติที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (ต่อ)

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3	เชื้อเพลิงไม้ทอรรี ไฟต์อัดเม็ด (70:30)
สารเติมแต่ง ^e	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ชนิดและปริมาณที่ ต้องการกำหนด	ชนิดและ ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	ชนิดและ ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	-
ค่าความร้อน สุทธิ, Q, ISO 18125	MJ/kg หรือ kWh/kg	Q18, $Q \geq 18$ Q5.0, $Q \geq 5.0$ ปริมาณที่ต้องการ กำหนด	Q17, $Q \geq 17$ Q4.7, $Q \geq 4.7$ ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	18.40 ± 0.03 MJ/kg
ความหนาแน่น รวม, BD, ISO 17828	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	820 kg/m ³
คาร์บอน, C, ISO 16948	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ปริมาณที่ต้องการ กำหนด	ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	45.88%
ไนโตรเจน, N, ISO 16948	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$N 1.5 \leq 1.5$	$N 2.0 \leq 2.0$	$N 2.0 \leq 2.0$	0.33 %โดยน้ำหนัก แห้ง
ซัลเฟอร์, S, ISO 16994	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$S 0.05 \leq 0.05$	$S 0.05 \leq 0.05$	$S 0.05 \leq 0.05$	0.84 %โดยน้ำหนัก แห้ง

ตารางที่ ก-2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนแบบแบ่งเกรดที่ผลิตได้จากมวลชีวภาพที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (ต่อ)

สมบัติ, ชั้นที่ วิธีการวิเคราะห์	หน่วย	TA1	TA2	TA3	เชื้อเพลิงไม้ทอรรี ไฟต์อัดเม็ด (70:30)
คลอรีน, Cl, ISO 16994	%โดย น้ำหนัก แห้ง	$Cl\ 0.2 \leq 0.2$	$Cl\ 0.3 \leq 0.3$	$Cl\ 0.3 \leq 0.3$	0.057 %โดยน้ำหนัก แห้ง
สารหนู, As, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 2	≤ 2	≤ 2	1.88 mg/kg แห้ง
แคดเมียม, Cd, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 1	≤ 1	≤ 1	0.0013 mg/kg แห้ง
โครเมียม, Cr, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 50	≤ 50	≤ 50	0.15 mg/kg แห้ง
ทองแดง, Cu, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 20	≤ 20	≤ 20	1.78 mg/kg แห้ง
ตะกั่ว, Pb, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 10	≤ 10	≤ 10	0.0073 mg/kg แห้ง
นิกเกิล, Ni, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 10	≤ 10	≤ 10	384.53 mg/kg แห้ง
สังกะสี, Zn, ISO 16968	mg/kg แห้ง	≤ 200	≤ 200	≤ 200	56.30 mg/kg แห้ง
ปริมาณสาร ระเหย, VM, ISO 18123	%โดย น้ำหนัก แห้ง	ปริมาณที่ต้องการ กำหนด	ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	ปริมาณที่ ต้องการ กำหนด	30.32 ± 0.38 %โดยน้ำหนัก แห้ง

^a เลือกขนาด D06 หรือ D08 ของเม็ดที่กำหนด

^b ปริมาณเม็ดที่ยาวกว่า 40 มม. ได้ 1 %โดยน้ำหนัก ความยาวสูงสุดต้องมีค่า < 45 มม.

^c ณ จุดรับสินค้า.

^d ที่จุดจัดส่ง. ความละเอียดน้อยกว่า 3,15 มม. คัดกรองด้วยมือตามมาตรฐาน ISO 18846

^e ประเภทของสารเติมแต่งเพื่อช่วยในการผลิต การจัดส่ง หรือการเผาไหม้ (เช่น สารช่วยยกด สารยับยั้งตะกรัน หรือสารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น แปะง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง น้ำมันพืช ลิกนิน ...)

^f ควรระบุคุณสมบัติคุณลักษณะทั้งหมด (อุณหภูมิเริ่มต้นการหดตัว (SST) อุณหภูมิการเสียรูป (DT) อุณหภูมิซีกโลก (HT) และอุณหภูมิต่ำ (FT) ในสภาวะออกซิไดซ์

ตารางที่ ก-3 AVANO ผลค่าสีฟ้าจากน้ำมันที่ฟอกสีด้วยดินฟอกสีไพโรไลซิส 30 นาที
Anova: Single Factor

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Column 1	9	4.6	0.51111	0.12111
Column 2	9	1.7	0.18888	0.03361

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.46722	2	0.23361	6.03949	0.02578	4.49399
Within Groups	1.23777	16	0.07736			
Total	1.705	17				

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล เพ็ญศิริ ร่มเย็น

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6410120012

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2563

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนจากสำนักวิจัยและพัฒนา (RDO) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สนับสนุนโครงการนี้ภายใต้ศูนย์วิจัยบูรณาการไอทีโอเคมีมูลค่าสูง (IH-VO) และทุนวิจัยวิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์/พัฒนาเครื่องมือ/พัฒนานวัตกรรมที่ต้องใช้วัสดุ