



การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว
Feasibility study utilization of used activated bleaching earth

สุปราณี ปฏิสวรรณ
SUPRANEE PATISUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University
2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว
Feasibility study utilization of used activated bleaching earth

สุปราณี ปฏิสุวรรณ
SUPRANEE PATISUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University
2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว
ผู้เขียน นางสาวสุปราณี ปฏิสวรรณ
สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ ปั่นวิชัย)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ สกุลแถว)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณยู ไคลคล้าย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ ปั่นวิชัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกิง วงศ์ศิริโชติ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ ปิ่นวิชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวสุปราณี ปฏิสุวรรณ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูก
ใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวสุปราณี ปฎิสุวรรณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว
 ผู้เขียน นางสาวสุปราณี ปฏิสวรรณ
 สาขาวิชา เคมีประยุกต์
 ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

การศึกษาการเพิ่มมูลค่าดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากโรงกลั่นน้ำมันปาล์ม บริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด ศึกษาการสกัดไขมันน้ำมันและแคโรทีนหรือโปรวิตามินเอ ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี 2 ขั้นตอน และการนำกลับมาใช้ใหม่ในการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 23.96 ± 1.33 เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันอิสระเท่ากับ 23.47 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ และค่าซาฟอนนิฟิเคชันเท่ากับ 198.21 ± 0.48 มิลลิกรัม โพลีแซตเทอโรอิดต่อน้ำมัน 1 กรัม การสกัดไขมันน้ำมันและแคโรทีนหรือโปรวิตามินเอ ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ สกัดร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล มีปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 29.36 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณแคโรทีน 85.74 ± 0.16 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีปริมาณบีตาแคโรทีน 9.57 มิลลิกรัม/กิโลกรัม การผลิตไบโอดีเซล ด้วยวิธี 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีปริมาณเมทิลเอสเตอร์ เท่ากับ 97.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามประกาศมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานหรือมาตรฐาน European Standard EN 14214:2003 ซึ่งกำหนดปริมาณเมทิลเอสเตอร์ ไม่น้อยกว่า 96.50 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะการผลิต (ขั้นตอนที่ 1 อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 15:1 โมล ใช้กรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับตัวทำละลายไดคลอโรเบนซีน 10 เปอร์เซ็นต์ และโมเลกุลาร์ซีฟ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ นาน 30 นาที ขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 โมล และใช้ตัวทำละลายไซโตรออล 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) และการนำดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบไม่ต่างจากดินพอกสีที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

คำสำคัญ: ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว, ไบโอดีเซล, คาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด

Thesis Title Feasibility study utilization of used activated bleaching earth
Author Miss Supranee Patisuwan
Major Program Applied Chemistry
Academic Year 2023

ABSTRACT

A study on the value-added of used activated bleaching earth (UABE), collected from the New Biodiesel industrial refining plant. The study on the extraction of lipids and pro-vitamin A by supercritical carbon dioxide technique, two step biodiesel production and regenerated in the bleaching of crude palm oil. This used activated bleaching earth showed oil content of 23.96 ± 1.33 %, free fatty acid of 23.47 ± 0.99 % and Saponification Value 198.21 ± 0.48 mg KOH/g. Extraction of lipids and carotene content or pro-vitamin A by supercritical carbon dioxide technique at a temperature of 35 °C and a pressure of 250 bar with methanol as a co-solvent was found that 29.36 ± 0.99 % of oil, the carotene content 85.74 ± 0.16 mg/kg and beta-carotene 9.57 mg/kg. A two-step biodiesel production. In the esterification reaction, the free fatty acid content can be less than 2% and the transesterification, the fatty acid ethyl ester content of 97.62%, based on the Department of Energy Business or European Standard EN 14214:2003 the FAME conversion was lower than 96.50% was achieved under the conditions (step 1: methanol to FFA molar ratio 15:1 with 1 % H_2SO_4 catalyzed with co-solvent 10% dichlorobenzene and 5% molecular sieve at temperature 70 °C by microwave technique for 30 minutes and second step transesterification methanol to oil molar ratio 6:1 catalyzed with 1% potassium hydroxide). And regenerated the used activated bleaching earth after extraction with hexane solvent extraction, activated by sulfuric acid, the bleaching efficiency of crude palm oil is not different from activated bleaching earth.

Keywords: Used Activated Bleaching Earth, Biodiesel, Supercritical Carbon Dioxide

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยความรู้ และ การช่วยเหลือเป็น อย่างดี ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ ปิ่นวิชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายละเอียดของ เล่มวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่

ขอขอบพระคุณคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ สกุลแถว ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ญโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีณยู ไคลคล้าย กรรมการ ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และแก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใจและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัย เพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2564 จัดสรรทุน สนับสนุนการทำวิจัยและทุนสนับสนุนการศึกษา ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำ วิจัยอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม เกษตรจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปี 2565 จัดสรรทุนสนับสนุน การทำวิจัยอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณบริษัท นิว ไปโอดีเซล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างดินฟอกสี ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ประจำหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการเรียนมาโดยตลอด อีกทั้ง คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ตลอดทุกท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

สุปราณี ปฏิสุวรรณ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปาล์มน้ำมัน	4
2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	4
2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม	5
2.4 องค์ประกอบกรดไขมันของปาล์มน้ำมัน	7
2.5 ดินพอกสี	8
2.6 ชนิดของดินพอกสี	10
2.7 กลไกการดูดซับของดินพอกสีน้ำมันปาล์ม	10
2.8 แครอทินอยด์	11
2.8.1 บีตาแคโรทีน	11
2.8.2 ประโยชน์ของบีตา-แคโรทีน	12
2.9 การสกัดด้วยเทคนิคของไหลยิ่งยวด	12
2.9.1 คุณสมบัติของไหลยิ่งยวด	13
2.10 คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	14
2.11 ไบโอดีเซล	15
2.11.1 ปฏิกริยาของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	15
2.12 ปัจจัยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	16
2.12.1 ความชื้น	16
2.12.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา	16
2.12.3 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา	17
2.12.4 อุณหภูมิ	17
2.12.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	17
2.12.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	17

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.13 คลื่นรังสีไมโครเวฟ	17
2.14 คุณสมบัติของคลื่นรังสีไมโครเวฟ	18
2.14.1 การสะท้อนกลับ	18
2.14.2 การส่งผ่าน	18
2.14.3 การดูดซับ	18
2.15 หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ	18
2.15.1 การหมุนแบบชั่วคราว	18
2.15.2 การเหนี่ยวนำเชิงไอออน	18
2.16 การปรับสภาพดินพอกสี	19
2.16.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	19
2.16.2 การปรับสภาพด้วยความร้อน	19
2.17 การใช้ประโยชน์ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	23
3.1 วัสดุ สารเคมี และเครื่องมือวิทยาศาสตร์	23
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.2.1 ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	24
3.2.2 ศึกษาการสกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	26
3.2.3 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	29
3.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่	31
บทที่ 4 ผลการวิจัย	32
4.1 คุณภาพทางกายภาพ และเคมีของดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	32
4.2 การสกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	35
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	35
4.2.2 ผลของความดันต่อการสกัดดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	38
4.2.3 ผลของตัวทำละลายร่วมต่อการสกัดดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	41

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.4 ผลของระยะเวลาต่อการสกัดดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	44
4.5.1 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการสกัดไขมันน้ำมัน จากดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิค คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	48
4.6 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว	48
4.6.1 ผลของปริมาณเมทานอลต่อการเกิดไขมันอิสระต่อการเกิด ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	48
4.6.2 ผลของทำละลายร่วมต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	50
4.6.3 ผลของโมเลกุลลาร์ซีฟต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	52
4.6.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	53
4.6.5 ไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอสฟอรัสที่ผ่าน การใช้งานแล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	55
4.6.6 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว	56
4.7 ผลของการนำดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่	57
4.7.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว	57
4.7.2 ผลการทดสอบการฟอสฟอรัสของน้ำมันปาล์มดิบ	58
4.7.3 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการนำดินฟอสฟอรัสที่ผ่าน การใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการวิจัย	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	65
ประวัติผู้เขียน	70

รายการตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 1	7
ตารางที่ 2	9
ตารางที่ 3	13
ตารางที่ 4	15
ตารางที่ 5	33
ตารางที่ 6	34
ตารางที่ 7	35
ตารางที่ 8	37
ตารางที่ 9	38
ตารางที่ 10	40
ตารางที่ 11	41
ตารางที่ 12	43
ตารางที่ 13	44

รายการตาราง (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
ตารางที่ 14	องค์ประกอบกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 30-120 นาที	46
ตารางที่ 15	ปริมาณเบต้าแคโรทีน และปริมาณ Pro-vitamin A ของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	47
ตารางที่ 16	ต้นทุนการสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	48
ตารางที่ 17	ปริมาณกรดไขมันอิสระและค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์	49
ตารางที่ 18	ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับตัวทำละลายร่วม Tetrahydrofuran, Dichlorobenzene และ Toluene 10-50 เปอร์เซ็นต์ (v/v)	50
ตารางที่ 19	ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟ 5-20 เปอร์เซ็นต์	52
ตารางที่ 20	ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน	54
ตารางที่ 21	ปริมาณ Fatty acid methyl ester ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที	55
ตารางที่ 22	ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	56
ตารางที่ 23	คุณภาพสีของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีที่ผ่านการ Regenerated กลับมาใช้งานใหม่	59
ตารางที่ 24	ต้นทุนการผลิตดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่	59

รายการภาพประกอบ

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 1 องค์ประกอบของผลปาล์มสุก	4
ภาพที่ 2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	6
ภาพที่ 3 แหล่งแร่ดินเบนโทไนท์ (ก) และลักษณะแร่ดินเบนโทไนท์ (ข)	8
ภาพที่ 4 โครงสร้างของดินเบนโทไนท์	8
ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นที่ผิวของมอนท์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	9
ภาพที่ 6 กลไกของดินฟอกสีที่ดูดซับสารกลุ่มแคโรทีนอยด์บริเวณพื้นผิว	10
ภาพที่ 7 โครงสร้างของบีตาแคโรทีน	11
ภาพที่ 8 กลไกการทำงานของเอนไซม์ carotene deoxygenase	12
ภาพที่ 9 หลักการเทคนิคของไหลยิ่งยวด	13
ภาพที่ 10 แผนภาพสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด	14
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนสถานะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	14
ภาพที่ 12 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	16
ภาพที่ 13 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน	16
ภาพที่ 14 ช่วงคลื่นรังสีไมโครเวฟ	17
ภาพที่ 15 กลไกการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ	18
ภาพที่ 16 เครื่องสกัดสารด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	26
ภาพที่ 17 แผนภาพการทำงานของเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	27
ภาพที่ 18 แผนภาพการทำงานของเครื่องผลิตไปโอติเซลให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ	29
ภาพที่ 19 เก็บตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว บริษัท นิว ไปโอติเซล จำกัด	32
ภาพที่ 20 ดินฟอกสี (ก) และดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข)	32
ภาพที่ 21 น้ำมันปาล์มดิบ (ก) และน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข)	33
ภาพที่ 22 ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์	36
ภาพที่ 23 ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์	36
ภาพที่ 24 ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 150 บาร์ (ก) และความดัน 250 บาร์ (ข)	39
ภาพที่ 25 ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 75-250 บาร์	39

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
ภาพที่ 26	ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันที่สกัดได้ของไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 75-250 บาร์	39
ภาพที่ 27	ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน (ก) อะซีโตน (ข) และเมทานอล (ค) ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว	42
ภาพที่ 28	ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ที่อุณหภูมิ 35	42
ภาพที่ 29	องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล	42
ภาพที่ 30	ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 90 นาที (ก) ระยะเวลา 120 นาที (ข)	45
ภาพที่ 31	ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที	45
ภาพที่ 32	ปริมาณแคโรทีนอยด์ของไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที	45
ภาพที่ 33	ปริมาณเบต้าแคโรทีน หรือ Pro-vitamin A ของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด	47
ภาพที่ 34	ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์	49
ภาพที่ 35	ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์	49
ภาพที่ 36	ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับตัวทำละลายร่วม ปริมาตร 10-50 เปอร์เซ็นต์	51
ภาพที่ 37	ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับตัวทำละลายร่วม ปริมาตร 10-50 เปอร์เซ็นต์	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 38 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับโมเลกุลลาร์ซีฟ 5-20 เปอร์เซ็นต์	53
ภาพที่ 39 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับโมเลกุลลาร์ซีฟ 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/v)	53
ภาพที่ 40 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน	54
ภาพที่ 41 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส	55
ภาพที่ 42 ปริมาณ Fatty acid methyl ester ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	56
ภาพที่ 43 ดินฟอกสี (ก) ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข) ดินฟอกสีที่ผ่านการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (ค) ดินฟอกสี กำลังขยาย 47 เท่า (ง) ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว กำลังขยาย 47 เท่า (ฉ) และดินฟอกสีที่ผ่านการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน กำลังขยาย 47 เท่า (จ)	57
ภาพที่ 44 ดินฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก กำลังขยาย 47 เท่า 1 เปอร์เซ็นต์ (ก) 2 เปอร์เซ็นต์ (ข) 3 เปอร์เซ็นต์ (ค) และ 4 เปอร์เซ็นต์ (ง)	58

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ABE	Activated Bleaching Earth
UABE	Used Activated Bleaching Earth
CPO	Crude Palm Oil
SCCO ₂	Supercritical Carbon Dioxide
FFA	Free Fatty Acid
SV	Saponification
FAME	Fatty Acid Methyl Ester

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากน้ำมันปาล์มดิบ เป็นกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนและองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ฟอสโฟลิพิด รงควัตถุ กรดไขมันอิสระ และโลหะหนัก เป็นต้น เพื่อให้ น้ำมันปาล์มมีคุณภาพ รสชาติ กลิ่น และสี เหมาะแก่การบริโภคได้ โดย น้ำมันปาล์มดิบจะต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refining Process) ประกอบด้วยกระบวนการกำจัดสารเหนียว (Degumming) การฟอกสี (Bleaching) และการกำจัดกลิ่น (Deodorization) ซึ่งกระบวนการฟอกสี เป็นการฟอกสีของน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อกำจัดสารสีในน้ำมันปาล์ม โดยการเติมดินฟอกสี (Activated Bleaching Earth: ABE) ในปริมาณร้อยละ 0.8–2.0 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ ทำให้เกิดของเสียในรูปของแข็ง เรียกว่า ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Used Activated Bleaching Earth: UABE) เป็นแหล่งของสารประกอบอินทรีย์ดูดซับสารมีสี สารแคโรทีนอยด์ สารคลอโรฟิลล์ และอื่นๆ รวมถึงฟอสโฟลิพิดและกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถดูดซับน้ำมันประมาณ 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมักถูกกำจัดโดยใช้วิธีการฝังกลบหรือเผา อาจก่อให้เกิดอันตรายจากเพลิงลุกไหม้ และปัญหาสิ่งแวดล้อมจากมลพิษในดินเนื่องจากน้ำมันที่เหลือค้างอยู่ รวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกชั้นสู่ชั้นบรรยากาศ (Punvichai & Pioch, 2019; Kheang *et al.*, 2007) ปัจจุบันในประเทศไทยจำนวนโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ จำนวน 22 แห่ง มีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์รวม 2.5 ล้านตันต่อปี คาดว่ามีปริมาณดินฟอกสีใช้งานแล้ว มากกว่า 50,000 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม 2565) พบว่า ปี 2550 บริษัทนครไทยน้ำมันพืช จำกัด มีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 400 ตันต่อวัน ต้องกำจัดดินฟอกสีใช้งานแล้ว 2-4 ตันต่อวัน ด้วยวิธีการฝังกลบ ปี 2563 บริษัท โอสิน จำกัด มีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 700 ตันต่อวัน ต้องกำจัดดินฟอกสีใช้งานแล้ว 7-14 ตันต่อวัน ด้วยวิธีการฝังกลบ ปี 2563 บริษัท ล่ำสูง จำกัด มีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 700 ตันต่อวัน ต้องกำจัดดินฟอกสีใช้งานแล้ว 7-14 ตันต่อวัน ด้วยวิธีจ้างบริษัทกำจัดขยะเข้ามาดูแลจัดการดินฟอกสีใช้งานแล้ว สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารได้หลากหลาย นอกจากจะสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจการนำดินฟอกสีใช้งานแล้วมาใช้ประโยชน์ สามารถช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม น้ำมันที่เหลือค้างในดินฟอกสีใช้งานสามารถนำมาใช้ในการผลิตสบู่ หรือสารทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูงในการชะล้างพื้นผิว (Punvichai & Pioch, 2019) การแยกองค์ประกอบกรดไขมันสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Carbon Dioxide) เป็นเทคโนโลยีสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเลือกสกัดสารที่ต้องการ และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการสกัด สามารถลดการเสื่อมคุณภาพของสารที่ต้องการสกัด สามารถใช้ในการสกัดแยกองค์ประกอบของกรดไขมัน สารสำคัญที่มีมูลค่าสูง เช่น Pro-vitamin A ในปาล์มน้ำมัน และสารประกอบเรซินในพืชกัญชวล (Punvichai *et al.*, 2016) และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไบโอดีเซล นายศุภชัย จินตนาเลิศ และนายชนะ จินตรัตนวงศ์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันพืช

จำกัด ประกอบธุรกิจปาล์มน้ำมันแบบครบวงจรตั้งแต่ปลูกจนเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงผลิตภัณฑ์น้ำมันสำหรับบริโภค มีแนวคิดใช้ประโยชน์ผลพลอยได้ และดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อลดปัญหาพื้นที่ฝังกลบ และขยะอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์สำหรับบริโภค โดยมุ่งเน้นพัฒนาผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว และนำดินพอกสีกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค และการสกัดกรดไขมันมูลค่าสูงด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด เพื่อลดพื้นที่ฝังกลบเพิ่มผลกำไร ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และปัญหาไฟไหม้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาการสกัดสารกลุ่ม Carotene หรือ Pro-vitamin A และกรดไขมันสำคัญที่มีมูลค่าสูง ในดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด และการผลิตไบโอดีเซลจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว แบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยาระหว่างไขมันน้ำมันกับเมทานอล เพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่าร้อยละ 1 เปอร์เซ็นต์ และขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกริยาระหว่างไขมันน้ำมันกับเมทานอล ร่วมกับตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran dichlorobenzene และ toluene ร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟ เพื่อลดปริมาณน้ำ และให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีน้ำมันไบโอดีเซล ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน ตอบสนองความต้องการของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมปาล์ม และศึกษาความเป็นไปได้ของการนำดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดสารมูลค่าสูงจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (SCCO₂)

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยใช้ตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟ และให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการพอกสีน้ำมันปาล์มดิบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้การใช้ประโยชน์จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดมีมูลค่าสูงจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิค SCCO₂ คาดว่า น้ำมันดินพอกสีผ่านการใช้งานแล้ว มีสารกลุ่มแคโรทีน และกรดไขมันที่มีมูลค่า และการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว แบบ 2 ขั้นตอน ด้วยปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran dichlorobenzene และ toluene ร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟ เพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำ ช่วยไม่ให้เกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันย้อนกลับ และให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ เพื่อช่วยเร่งการเกิดปฏิกริยา

อย่างรวดเร็ว นำมาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลตามประกาศมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน รวมทั้งศึกษากระบวนการปรับสภาพดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการสกัดน้ำมันแล้วด้วยความร้อนและกรด นำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์สำหรับบริโภค นำมาดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการปรับสภาพมาเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ผิวกับดินฟอสฟอรัสที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และศึกษาการประเมินความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ราคาต้นทุน การสกัดสารสกัดที่มีมูลค่าสูงจากดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้วแบบ 2 ขั้นตอน และการนำดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลิตภัณฑ์ไขมันน้ำมันที่มีมูลค่าสูง และสารสีกลุ่มแคโรทีนจากดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด

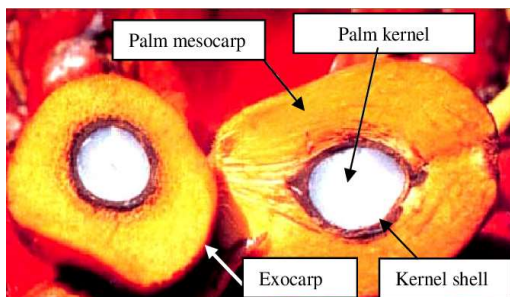
1.4.2 ได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลจากน้ำมันดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว และสามารถนำดินฟอสฟอรัสดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Elaeis guineensis* มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบแอฟริกาตะวันตก ในเขตประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมที่จะปลูกบริเวณใต้เส้นศูนย์สูตร เนื่องจากมีอากาศชุ่มชื้น และมีฝนตกชุก ทำให้ปาล์มน้ำมันเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูงตลอดทั้งปี ปาล์มน้ำมันเป็นไม้ยืนต้นใบเลี้ยงเดี่ยว ออกผลเป็นทะลาย และมีน้ำหนักทะลายละ 10-15 กิโลกรัม ผลปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นรูปรีหรือรูปไข่ เปลือกฝัวนอกของผลปาล์มอ่อนจะเป็นสีเขียวหรือดำ และผลสุกแก่จะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง ภายใต้ออกเปลือกเป็นเมล็ด (ภาพที่ 1) ผลปาล์ม แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนเปลือกด้านนอกสุด (Exocarp) เป็นผิวมันและแข็ง ส่วนเนื้อเส้นใย (Mesocarp) เป็นส่วนที่มีน้ำมันสูง นำไปสกัดเป็นน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) และกะลา (Shell) เป็นเปลือกแข็งสีดำ ซึ่งห่อหุ้มเมล็ดในอยู่ สามารถนำเมล็ดในส่งไปขายหรือเพื่อสกัดสกัดเอาน้ำมันปาล์มจากเมล็ดใน (Palm Kernel Oil)



ภาพที่ 1 องค์ประกอบของผลปาล์มสุก
ที่มา: (Mustapa & Najwa, 2008)

2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Mill Processing)

การเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มสด ผลผลิตจะถูกขนส่งเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยโรงงานอุตสาหกรรมที่สกัดน้ำมันดิบ จะใช้ส่วนผสมระหว่างน้ำมันปาล์มจากเปลือกและน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม จะมีกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม 4 ขั้นตอน (Iskandar *et al.*, 2018) ดังนี้

2.2.1 การรับผลสด (Fresh Fruit Bunch; FFB) ผลผลิตปาล์มสดจะถูกขนส่งไปยังโรงสกัดน้ำมันปาล์มดิบ จะมีคัตน้ำหนักและสีของผลปาล์มตามคุณภาพที่กำหนด เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ ผลปาล์มสุก ผลปาล์มจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องอบทะลาย อบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) อบที่อุณหภูมิ 130-135 องศาเซลเซียส ความดัน 2.5-3 บาร์ ระยะเวลา 50-75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย

2.2.2 การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป ผลปาล์มที่ได้จะถูกย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มเพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

2.2.3 การสกัดน้ำมัน (Oil Extraction) ส่วนเนื้อปาล์ม ถูกอบที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20-30 นาที นำเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบ

2.2.4 การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดส่งไปยังถังกรอง เพื่อแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน นำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง ทำการไล่น้ำออกเพื่อทำให้ปาล์มแห้ง และส่งเข้าถังเก็บน้ำมัน

น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) มีลักษณะขุ่นหนืด สีแดงส้ม จะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude Palm Oil Olein) ปริมาณประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนล่างเป็นไขสีเหลืองส้ม (Crude Palm Oil Stearin) ปริมาณประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำมันปาล์มดิบมีความเป็นกรดสูงและมีความเสถียรต่อการออกซิเดชันต่ำ

2.3 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม (Refining Process)

การกลั่นน้ำมันปาล์มเป็นกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ เพื่อให้ได้คุณภาพ รสชาติ กลิ่น สี และอายุการเก็บรักษาตามที่ต้องการ กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มแบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี

2.3.1 การกลั่นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Refining) เริ่มใช้ในประเทศมาเลเซีย ตั้งแต่ พ.ศ. 2513 ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นการใช้อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่

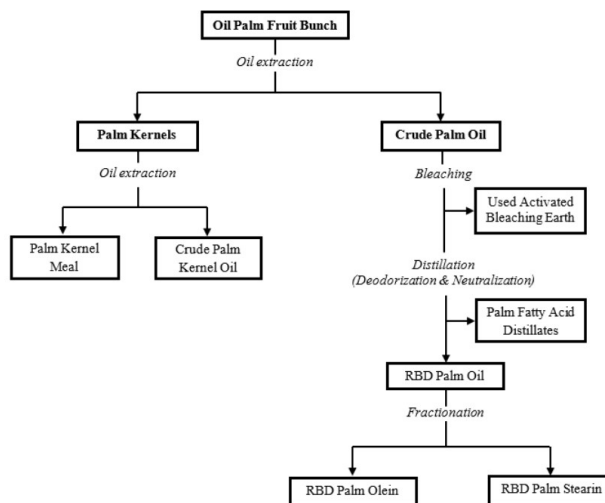
- การกำจัดยาง (Degumming) เป็นการกำจัดยางเหนียวหรือฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) โดยใช้กรดฟอสฟอริก หรือกรดซิตริกเข้มข้น 80-85 เปอร์เซ็นต์ ใส่ในน้ำมันปาล์มดิบและให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส นาน 15-30 นาที เพื่อแยกยางเหนียวก่อนเข้าสู่การฟอกสี

- การฟอกสี (Bleaching) เป็นการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้สารดูดซับ ได้แก่ ดินฟอกสี (acid activated bleaching earth) ดินฟอกสีธรรมชาติ (natural bleaching earth) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และซิลิเกตสังเคราะห์ (synthetic silicates) ทำหน้าที่ดูดซับสารสีในน้ำมัน ส่วนใหญ่มักใช้ดินฟอกสีที่มีองค์ประกอบของไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrated aluminum-silicates) มีสมบัติในการดูดซับที่ดีสามารถดูดซับสารมีสีสารคลอโรฟิลล์ และอื่นๆ รวมถึงฟอสโฟลิพิดและกรดไขมันอิสระ โดยเติมดินฟอกสีลงไป ในน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 0.8-2.0 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ และกวนให้ผสมกันเป็นเวลา 30-45 นาที นำน้ำมันที่ได้ผ่านเข้าสู่เครื่องกรองก่อนเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป (ธีรศักดิ์, 2565)

- การกำจัดกลิ่น (Deodorization) เป็นการกำจัดกรดไขมันอิสระ สารระเหยอื่นๆ กลิ่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะสุญญากาศ ช่วงอุณหภูมิของการกลั่น 240-270 องศาเซลเซียส เวลา 1-2 ชั่วโมง และความดันไม่เกิน 10 มิลลิเมตรปรอท ก็จะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Oil; RBDPO) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก และกรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate; PFAD) เป็นผลพลอยได้

2.3.2 การกลั่นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Refining) เป็นการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารเคมี ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่

- การกำจัดยางเหนียวและทำน้ำมันให้เป็นกลาง (Degumming and Neutralization) เป็นการเติมกรดฟอสฟอริก หรือกรดซิตริก และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาซาฟอนิฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่
- การฟอกสี (Bleaching) เป็นการเติมดินฟอกสี เช่นเดียวกับวิธีทางกายภาพ
- การกำจัดกลิ่น (Deodorization) เป็นการกลั่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง 240-270 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อกำจัดกลิ่นและสารเจือปนอื่นๆ ผ่านการกรองจะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์



ภาพที่ 2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
ที่มา: (Punvichai & Pioch, 2019)

กระบวนการแยกส่วนน้ำมัน (Fractionation) เป็นการแยกไขมันปาล์มสเตียรีน (Stearin) และน้ำมันปาล์มโอเลอิน (Olein) ออกจากกัน โดยอาศัยหลักการตกผลึกไขมัน (Crystallization) ที่อุณหภูมิต่ำ จะได้น้ำมัน 2 ส่วน คือ น้ำมันปาล์มโอเลอิน ลักษณะใสสีเหลืองทอง ใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร และไขมันปาล์มสเตียรีน มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง สามารถนำไปทอดอาหารที่ต้องใช้ความร้อนสูง หรือนำไปเป็นส่วนประกอบในการทำเบเกอรี่ ครีมเทียม เนยขาว (ภาพที่ 2) ผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม 2 อย่าง ได้แก่ กรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate: PFAD) และดินฟอกสีที่ผ่านการงานใช้แล้ว (Used activated bleaching earth: UABE) สามารถนำมาเพิ่มมูลค่าพัฒนาต่อยอดไปสู่อุตสาหกรรม Oleochemical เช่น Fatty acid methyl esters, Fatty alcohols, glycerol, Pro-vitamin A และผลิตภัณฑ์ Oleochemical อื่นๆ

2.4 องค์ประกอบกรดไขมันของปาล์มน้ำมัน

อุตสาหกรรมการสกัดปาล์มน้ำมัน จะได้น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil: CPO) เป็นของเหลวที่มีสีของน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในช่วงของเหลืองออกส้มแดง ส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ และอื่นๆ เช่น แคโรทีน (Carotene) โทโคฟีรอล (Tocopherols) สเตียรอล (Sterols) และฟอสโฟลิปิด (Phospholipids) และอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปาล์ม จะมีผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้จากกระบวนการ 2 อย่าง ได้แก่ กรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate: PFAD) เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติมีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งสีขาว เมื่อผ่านความร้อนจะได้กรดไขมันหอมละลายของเหลวสีเหลืองใส มีองค์ประกอบหลักกรดไขมันอิสระ แอลดีไฮด์ คีโตน เพอร์ออกไซด์ และสารอื่นๆ และดินฟอกสีที่ผ่านการงานใช้แล้ว (Used activated bleaching earth: UABE) เป็นของเสีรุขของแข็งสามารถดูดซับน้ำมันประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก เป็นแหล่งของสารประกอบอินทรีย์ สารสีกลุ่มแคโรทีน คลอโรฟิลล์ และสารประกอบอื่นๆ สามารถนำมาสกัดด้วยตัวละลายอินทรีย์เพื่อแยกน้ำมันออกมา และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไบโอดีเซลได้ (ตารางที่ 1) องค์ประกอบกรดไขมันของของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันที่ได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว และกรดไขมันปาล์ม

Fatty acid	CPO (%)	UABE Waste oil (%)	PFAD (%)
Saturated fatty acid	48.0	54.8	56.9
Lauric acid (C12:0)	0.33	0.32	0.05
Myristic acid (C14:0)	0.99	1.07	1.29
Palmitic acid (C16:0)	41.49	47.45	49.46
Stearic acid (C18:0)	4.49	5.08	5.17
Arachidic acid (C20:0)	0.40	0.43	0.45
Behenic acid (C22:0)	0.09	0.12	0.22
Other	0.19	0.30	0.23
Monounsaturated fatty acid	41.7	37.7	35.0
Palmitoleic acid (C16:1n7c)	0.17	0.12	0.14
Elaidic acid (C18:1 n-9t)	0.11	2.95	0.67
Oleic acid (C18:1 n-9c)	40.18	32.29	33.95
Eicosenoic acid (C20:1 n-9c)	0.14	0.12	0.14
Other	1.08	2.19	0.10
Polyunsaturated fatty acid	10.4	7.5	8.1
Linoleic acid (C18:2 n-6cc)	9.95	7.09	7.70
Linolenic acid (C18:3 n-3ccc)	0.28	0.28	0.23
Other	0.12	0.27	0.20

ที่มา: (Punvichai & Pioch, 2019)

2.5 ดินฟอกสี (Bleaching Earth)

ดินฟอกสี เป็นแร่ดินเหนียวหรือดินเบนโทไนท์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว (ภาพที่ 3) ดินฟอกสีมีความสามารถในการดูดซับรงควัตถุในน้ำมันได้ดี เป็นตัวดูดซับสารสี สารคลอโรฟิลล์ รวมถึงฟอสโฟลิพิด กรดไขมันอิสระ และโลหะหนักและสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น (ธีรศักดิ์, 2564; Kaynak *et al.*, 2004) โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันเปลี่ยนแปลง และมีราคาถูก เหมาะสำหรับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับโครงสร้างและคุณสมบัติ เช่น พื้นที่ผิว ความพรุน และความเป็นกรด เป็นต้น



(ก)

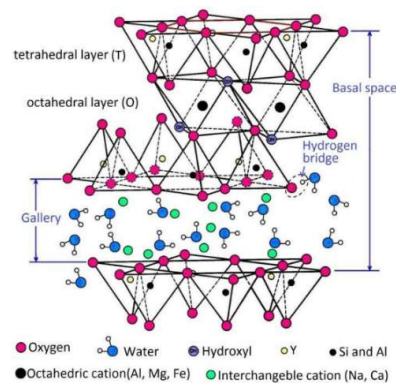


(ข)

ภาพที่ 3 แหล่งแร่ดินเบนโทไนท์ (ก) และลักษณะแร่ดินเบนโทไนท์ (ข)

ที่มา: (ธีรศักดิ์, 2564); (Bayrak, 2003)

ดินเบนโทไนท์ (Bentonites) เป็นแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) หรือแร่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซิลิเกต (Hydrated Aluminum Silicate) องค์ประกอบหลักประกอบด้วย แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) จำนวน 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) จำนวน 1 แผ่น โดยมีอะตอมซิลิกอน และอะลูมิเนียมในแผ่นยึดเกาะร่วมกับออกซิเจน เป็นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ มีสูตร $\text{Na}(\text{SiAl}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_6$ โครงสร้างของเบนโทไนท์เป็นชั้นๆ แต่ละชั้นเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของรูปเหลี่ยมสี่หน้าซิลิกา (SiO_4 ; Tetrahedral) และรูปเหลี่ยมแปดหน้า (AlO_6 ; Octahedral (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของดินเบนโทไนท์

ที่มา: (Ali *et al.*, 2019)

โครงสร้างของมอนท์มอริลโลไนต์ ประกอบด้วย tetrahedral sheet กับ octahedral sheet (Ali *et al.*, 2019) ในชั้น tetrahedral sheet โครงสร้างของ Si ถูกแทนที่ด้วย Mg และ Fe^{2+} มีแรงจับระหว่างผลึกด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ทำให้มีความชอบน้ำและสามารถจับโมเลกุลน้ำได้ เรียกว่าการบวม (Swells out) ซึ่งปริมาตรจะขยายจากเดิมถึง 6 เท่า และในชั้น octahedral sheet มีโครงสร้างจาก Al (อลูมิเนียม) และ OH (ไฮดรอกซิล) คั่นกลาง ระหว่างสองแผ่นจะถูกแทนที่ด้วยไอออนบวก Mg (แมกนีเซียม) เป็นผลให้พื้นผิวของชั้นหน่วยขาดประจุไฟฟ้าและประจุพื้นผิวรวมเป็นลบ ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นในโครงสร้างมีอะตอมของโลหะที่มีประจุบวก สามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุกับอะตอมโลหะอื่นที่ละลายอยู่ในน้ำได้ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุบวก เกิดความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) ลักษณะของพื้นผิวของโครงสร้างมอนท์มอริลโลไนต์ ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) มีรูพรุนบนพื้นผิวจำนวนมาก (ภาพที่ 5) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของดินดินฟอกสี (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของมอนท์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่มา: (Hillel, 1998)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินฟอกสี

Composition	Percent based on drying at 110 °C
SiO ₂ (Silica)	79.8
Al ₂ O ₃ (Aluminum oxide)	8.7
Fe ₂ O ₃ (Ferric oxide)	1.9
MgO (Magnesium oxide)	3.2
CaO (Calcium oxide)	0.7
Moisture (%)	10.0
Finesse (percent pass through 90 m sieve)	94.5
Specific surface area (m ² /g)	290
Residual activity (mg KOH/g)	0.9
Bulk density (g/ml)	0.7
True specific gravity	2.4

ที่มา: (ธีรศักดิ์, 2565)

2.6 ชนิดของดินฟอกสี

ดินฟอกสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมทำให้ให้น้ำมันบริสุทธิ์มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

2.6.1 ดินฟอกสีธรรมชาติ (Natural Earth) คือ ดินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ ตามธรรมชาติ นิยมนำมาใช้เป็นสารดูดซับ เพราะมีความสามารถในการดูดซับรงควัตถุและสิ่งเจือปน

2.6.2 ดินฟอกสีที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด (Acid-Activated Earth) เป็นดินฟอกสีที่ผ่านการปรับสภาพให้มีความเป็นกรด โดยกรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก การกระตุ้นด้วยกรดทำให้โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของดินฟอกสีเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้มีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้น มีประสิทธิภาพของดินฟอกสีให้สามารถดูดซับอนุภาคของรงควัตถุ และสิ่งเจือปนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันบริโภคมักนิยมใช้ดินฟอกสีที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดในการฟอกสีไขมันสัตว์และน้ำมันพืช (Zschau, 2001)

2.7 กลไกการดูดซับของดินฟอกสีน้ำมันปาล์ม

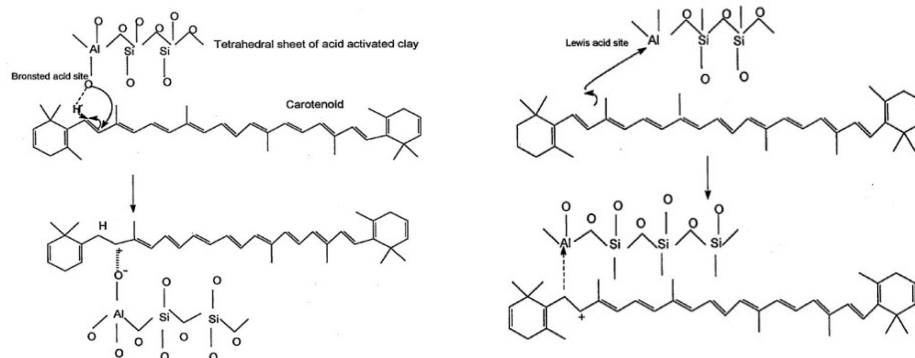
กลไกการดูดซับของดินฟอกสีน้ำมันปาล์ม ในขั้นตอนการฟอกสีจะมี 3 กลไก คือ

2.7.1 กลไกการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นการดูดซับรงควัตถุไว้ที่พื้นผิวของดินฟอกสี ระหว่างอนุภาคของดินฟอกสีและรงควัตถุ

2.7.2 กลไกการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก ระหว่างพื้นผิวและสารประกอบอื่นๆ ในน้ำมัน

2.7.3 กลไกการดักจับโมเลกุล (Molecular Entrapment) อนุภาคของสิ่งเจือปนจะถูกจับไว้ในโครงสร้างของดินฟอกสีที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

กลไกการดูดซับสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์บนพื้นผิวดินมอนต์โมริลไลนด์ พบว่า สารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ทำปฏิกิริยาได้โดยความเป็นกรดเบรินสเตด (Bronsted Acid) และกรดลิวอิส (Lewis Acid) สารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์จะยึดจับกับผิวดินเหนียวในรูปของคาร์บอนเนียมไอออน โดยการสร้างพันธะโคออร์ดิเนชันกับ Lewis site และการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับ Bronsted site (ภาพที่ 6) และกลไกการดักจับโมเลกุลอนุภาคของสิ่งเจือปนจะถูกจับไว้ในรูพรุนภายในโครงสร้าง ในอุตสาหกรรมใช้ดินฟอกสีเพื่อทำให้น้ำมันพืชบริสุทธิ์ โดยใช้ดินฟอกสีกำจัดสารสี ปัญหาของดินฟอกสีที่ผ่านการใช้แล้ว จะกักเก็บน้ำมันหลังจากการกรองจำนวนมาก (Sarier & Guler, 1989)



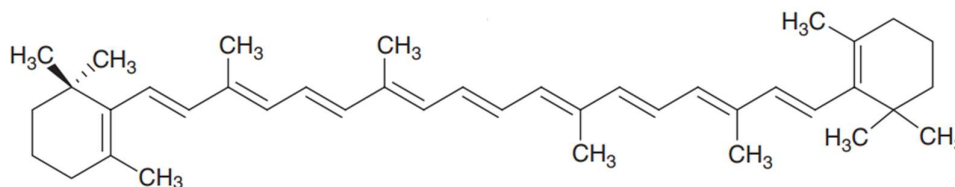
ภาพที่ 6 กลไกของดินฟอกสีที่ดูดซับสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์บริเวณพื้นผิว

ที่มา: (Sarier & Guler, 1989)

2.8 แคโรทีนอยด์ (Carotenoids)

แคโรทีนอยด์ ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน เรียกอีกชื่อว่า แคโรทีน (Carotenes) เป็นเม็ดสีชนิดละลายในไขมันพบมากในผักและผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง แดง และเขียว ทำหน้าที่ปกป้องพืชจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงแดด และสารก่อมะเร็งในสิ่งแวดล้อม ช่วยป้องกันการก่อตัวของอนุมูลอิสระ ปัจจุบันมีการค้นพบแคโรทีนอยด์ถึง 600 ชนิด และประมาณ 50 ชนิด พบได้ในผักและผลไม้สามารถรับประทาน ซึ่งน้ำมันปาล์มเป็นพืชที่อุดมไปด้วยแคโรทีนอยด์มากที่สุด จะมีสีแดงอมส้มเหลือง พบว่า สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่พบในน้ำมันปาล์ม 13 ชนิด (Benade, 2003) ส่วนใหญ่เป็นบีตาแคโรทีน (beta-carotene) 48.2 เปอร์เซ็นต์ และแคโรทีนอยด์อื่นๆ อีก 10 ชนิด ได้แก่ ไฟโตอีน (Phytoene) ไฟโตฟลูอีน (Phytofluene) แอลฟาแคโรทีน (alpha-carotene) ซิกมาแคโรทีน (zeta-carotene) แกมมาแคโรทีน (gamma-carotene) เดลต้าแคโรทีน (delta-carotene) นิวโรสปอรีน (Neurosporene) บีตาซีแคโรทีน (beta-zeacarotene) แอลฟาซีแคโรทีน (alpha-Zeacarotene) และไลโคพีน (Lycopene)

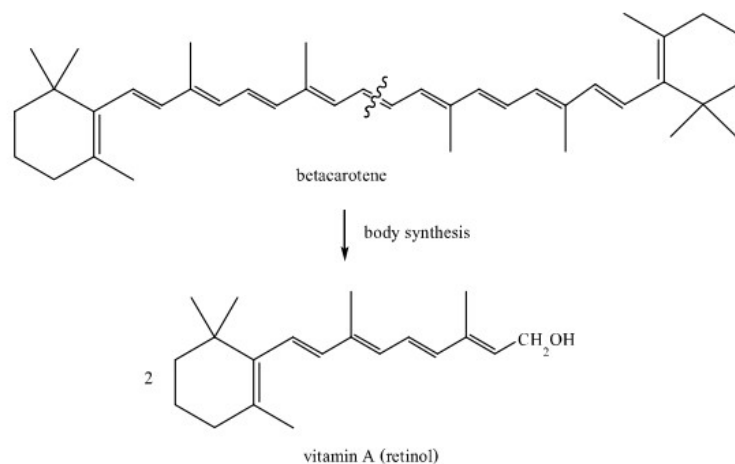
2.8.1 บีตาแคโรทีน (beta-carotene) เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) มีชื่อตามกำหนดของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry; IUPAC) คือ 1,3,3-trimethyl-2-[(1E,3E,5E,7E,9E,11E,13E,15E,17E)-3,7,12,16-tetramethyl-18-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)octadeca-1,3,5,7,9,11,13,15,17-nonaenyl] cyclohexene น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 536.87264 g/mol และสูตรโมเลกุล (Molecular Formula) $C_{40}H_{56}$ โครงสร้าง (ภาพที่ 7) ดังนี้



ภาพที่ 7 โครงสร้างของบีตาแคโรทีน

ที่มา: (Burri, 2013)

บีตาแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (Gee, 2007) โดยใช้ beta-carotene 1 โมเลกุล จะสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ 2 โมเลกุล ด้วยระบบการทำงานของเอนไซม์ carotene deoxygenase ทำให้เกิดการแตกพันธะคู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโมเลกุล (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 กลไกการทำงานของเอนไซม์ carotene deoxygenase

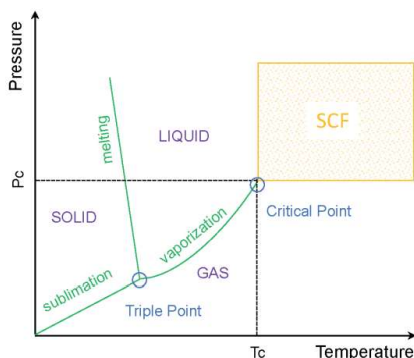
ที่มา: (Gee, 2007)

2.8.2 ประโยชน์ของบีตา-แคโรทีน

บีตา-แคโรทีนสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามิน เอ เป็นสารสำคัญที่ทำงานร่วมกับสารโรดอปซิน (rhodopsin) อยู่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์รูปแท่งในดวงตา ทำให้เกิดการมองเห็น ดังนั้นการบริโภคบีตา-แคโรทีนปริมาณสูง จะช่วยบำรุงสายตาและทำให้เกิดการมองเห็นได้ดีขึ้น อีกทั้งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สามารถช่วยชะลอความแก่และลดความเสี่ยงของเซลล์ ยังมีส่วนบำรุงผิวพรรณ บำรุงผิว ชับเซลล์ผิวเก่า และทำให้ผิวพรรณกระจ่างใส

2.9 การสกัดด้วยเทคนิคของไหลยิ่งยวด

หลักการของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluid; SCF) เป็นการสกัดด้วยตัวทำละลายที่สามารถแยกสารออกจากเมทริกซ์ของชีวมวลต่างๆ ของไหลวิกฤตยิ่งยวดจะมีสถานะในรูปของเหลว หรือก๊าซ ขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิ (ภาพที่ 9) จะมีหนึ่งจุดที่สารมีสถานะเป็นของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และเหนือจากสถานะความเป็นไอและของเหลว เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical point; Pc) ในสถานะจุดวิกฤตเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซจะเกิดการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกัน โดยสถานะของเหลวและสถานะก๊าซ จะเกิดขึ้นผ่านบริเวณวิกฤตยิ่งยวด ทำให้ได้ของไหลวิกฤตยิ่งยวด มีการบีบอัดเหมือนแก๊ส และมีความหนาแน่นเหมือนของเหลว มีความสามารถในการละลายได้ นอกจากนี้มีค่าความหนืดวิกฤตยิ่งยวดและสัมประสิทธิ์การแพร่ยังอยู่ระหว่างของเหลวและก๊าซ ซึ่งส่งผลให้แรงตึงผิวต่ำและความสามารถในการถ่ายเทมวล โดยคุณสมบัติทั่วไปสำหรับของไหลวิกฤตยิ่งยวด (ตารางที่ 3)



ภาพที่ 9 หลักการเทคนิคของไหลยิ่งยวด

ที่มา: (Guadalupe Aspromonte *et al.*, 2020)

ตารางที่ 3 สมบัติทั่วไปสำหรับของไหลวิกฤตยิ่งยวด

Properties	Gas ^a	SCF ^b	Liquid ^a
Density (kg.m ⁻³)	0.5-2.0	200-500	500-1500
Viscosity (mPa.s)	0.01-0.30	0.01-0.03	0.2-3.0
Diffusivity (m ² .s ⁻¹)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹

หมายเหตุ ^a Properties at room temperature; ^b Properties close to critical point

ที่มา: (Blackburn *et al.*, 2001)

2.9.1 สมบัติของไหลยิ่งยวด

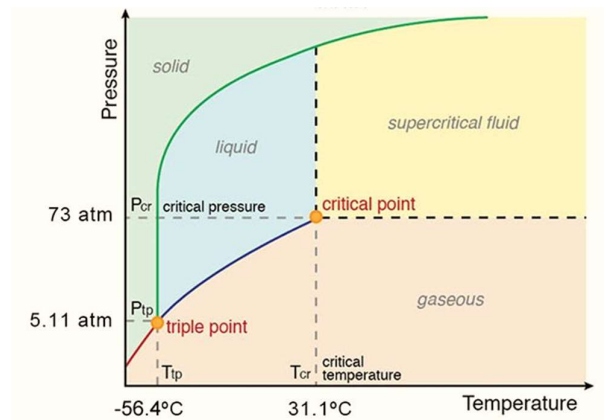
2.9.1.1 สมบัติการถ่ายเท (Transportation Property) ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงสามารถแทรกซึม (penetration) เข้าสู่โครงสร้างของของแข็ง หรืออนุภาคที่มีตัวถูกละลายได้ดี ทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวดกระจายออกจากอนุภาค จึงต้องมีการปรับสภาวะของอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสม เพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

2.9.1.2 สมบัติในการละลายของตัวทำละลาย (Solvent Power Property) ความสามารถในการละลายของตัวทำละลาย ความสามารถของตัวทำละลายของไหลวิกฤตยิ่งยวดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความหนาแน่น โดยความหนาแน่นสามารถปรับลดเพิ่มได้ โดยการปรับอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นการปรับอุณหภูมิ และความดันให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม มารอรับคุณสมบัติของของไหลวิกฤตยิ่งยวดให้เหมาะสมกับการสกัดสารในแต่ละครั้งได้ดียิ่งขึ้น

2.9.1.3 สมบัติในการเลือกสกัด (Selectivity Property) ความสามารถในการเลือกสกัดเป็นคุณสมบัติที่ดีของของไหลวิกฤตยิ่งยวด โดยการปรับอุณหภูมิ และความดัน เพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่เหมาะสม สามารถสกัดเฉพาะสารที่ต้องการได้ โดยให้มีสารที่ไม่ต้องการปนเปื้อนออกมาน้อยที่สุด เช่น ในการสกัดสารผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (natural product) ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติในการเลือกสกัดค่อนข้างดี

2.10 คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Carbon Dioxide)

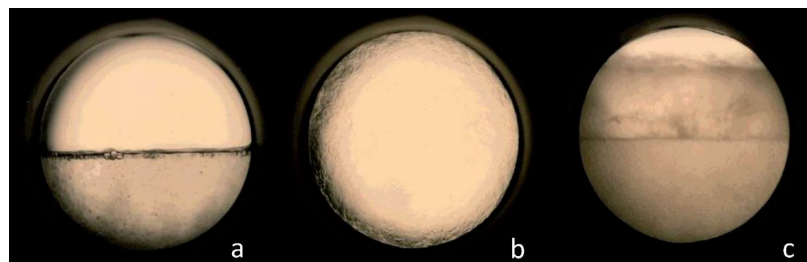
การสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ โดยมีอุณหภูมิ (Temperature critical) 31.1 องศาเซลเซียส และความดัน (Pressure critical) 73.8 บาร์ ตามแผนภาพสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 10) ข้อดีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ มีสมบัติไม่ติดไฟง่าย ราคาไม่แพง หาได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และปัจจุบันเป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมแพร่หลาย และได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมอาหารและยา ช่วยรักษาสารสกัดขององค์ประกอบของสาร และเป็นวิธีการสกัดที่สามารถป้องกันการเสื่อมเสียขององค์ประกอบสารได้ดี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Punvichai *et al.*, 2016)



ภาพที่ 10 แผนภาพสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

ที่มา: (Guadalupe Aspromonte *et al.*, 2020)

การเพิ่มอุณหภูมิและความดันให้คงที่ 73.8 บาร์ และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิกิ่งที่ 31.1 องศาเซลเซียส ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะวิกฤตยิ่งยวด โดยการกำหนดโซนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และของเหลว ที่แยกจากกันชัดเจน แต่เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะวิกฤตยิ่งยวดจากแรงดันและอุณหภูมิที่ จะแสดงการเปลี่ยนแปลงไปของสมบัติการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนสถานะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะวิกฤตยิ่งยวด สถานะก๊าซ/ของเหลวแยกกันชัดเจน (a) การเปลี่ยนเฟส (b) และเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด (c)

ที่มา: (Guadalupe Aspromonte *et al.*, 2020)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นที่นิยมใช้ในการสกัดด้วยเทคนิคในสภาวะวิกฤติยิ่งยวด เนื่องจากสามารถแทรกซึมผ่านเมทริกซ์ที่เป็นของแข็งและละลายสารสกัดที่ต้องการได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายก๊าซและของเหลว ที่สภาวะของเหลววิกฤติยิ่งยวดทำหน้าที่เป็นสารเคมีที่ละลายส่วนประกอบที่ต้องการได้ มีความหนืดต่ำและการแพร่กระจายสูง อีกทั้งการสกัดสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายอยู่ในสภาวะของไหลยิ่งยวด (Akanda *et al.*, 2012) ของไหลวิกฤติยิ่งยวดมีคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (physiochemical properties) อยู่ระหว่างก๊าซกับ ของเหลว (ตารางที่ 4) ความหนาแน่น (density) ของของไหลวิกฤติยิ่งยวดมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสาร หรืออนุภาคของแข็งที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วย โมเลกุลของของไหลวิกฤติยิ่งยวด และเกิดอันตรกิริยากัน (interaction) ทำให้พลังงานหรือเอนทัลปี (enthalpy) ลดลงจนเกิดการละลายได้ดี ในขณะที่เดียวกันของไหล วิกฤติ ยิ่งยวดยังมีความหนืด (viscosity) และสัมประสิทธิ์ การแพร่กระจาย (diffusion coefficient) ที่ใกล้เคียงกับก๊าซ ทำให้สามารถแพร่แทรกเข้าไปในโครงสร้างของของแข็งหรือเมทริกซ์ (matrix) ได้ดีด้วยคุณสมบัติ จึงนิยมนำของไหลวิกฤติยิ่งยวดมาใช้เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากมีข้อดีกว่าตัวทำละลายที่อยู่ในสถานะของเหลวคือ มีอัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer) เร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลายดีกว่า (Solvent power)

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤติยิ่งยวด

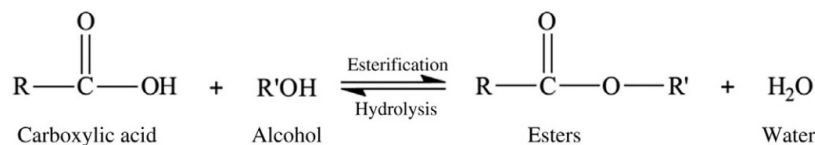
Property	CO ₂	
	Density (Kg/m ³)	Viscosity (μPa/s)
Gas (313 K 1 bar)	2	16
Supercritical (313 K 100 bar)	632	17
Liquid (300 K 500 bar)	1,029	133

2.11 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่เกิดจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย จัดเป็นสารพวกเอสเทอร์ (ester) โดยนำน้ำมันผสมกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล และมีด่างเป็นตัวทำปฏิกิริยาจะได้กรดไขมันออกมา เรียกว่า Fatty Acid Methyl Ester และสารอีกส่วนที่ได้คือ กลีเซอรอล น้ำมันไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกที่มีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียม และสามารถใช้ทดแทนกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถย่อยสลายได้เอง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.11.1 ปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

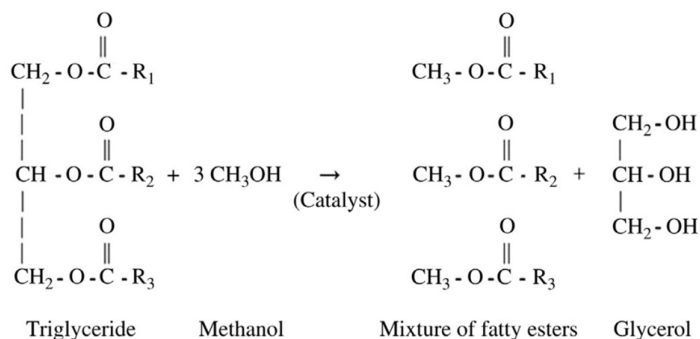
2.11.1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) เป็นปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์ ได้เอสเทอร์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ (ภาพที่ 12) มีตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกรด เช่น กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับได้ง่าย ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นขั้นตอนการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ ลดลงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ และหากในกระบวนการปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันมีน้ำปนอยู่ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)



ภาพที่ 12 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: (Pattanaik *et al.*, 2019)

2.11.1.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอริน (ภาพที่ 13) ตามมวลสารสัมพันธ์ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุล ทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมเลกุล ได้เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมเลกุลและกลีเซอริน 1 โมเลกุล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 13 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: (Pattanaik *et al.*, 2019)

2.12 ปัจจัยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.12.1 ความชื้น ความชื้นในไขมันหรือน้ำมัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมัน การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไขมันน้ำกับแอลกอฮอล์ มีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่ สบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรินที่ได้ ทำให้สารละลายผสมทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรินออกจากเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น วิธีป้องกันคือ แอลกอฮอล์ ไขมัน หรือน้ำมัน ควรมีน้ำหรือความชื้นปนอยู่น้อยที่สุดเพื่อทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์

2.12.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งกรดและเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งเบส เนื่องจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและทำให้ผลดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด สำหรับปฏิกิริยาที่เป็นกรดมีข้อเสีย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันต้องใช้ อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา ภาชนะสำหรับทำปฏิกิริยาต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดด้วย

2.12.3 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาระยะแรก จะมีค่าสูง และจะลดลงเมื่อเวลาทำปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

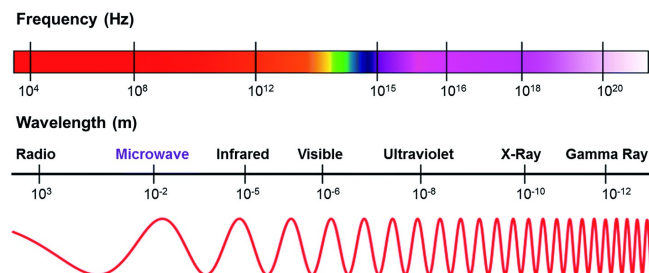
2.12.4 อุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างทำปฏิกิริยา

2.12.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ หากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำและสูงเกินไปจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำ ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกินมาไปทำปฏิกิริยากับน้ำมัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชันหรือการเกิดสบู่

2.12.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่เกิดขึ้นโดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 ในทางปฏิบัติจะต้องใช้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าในทางทฤษฎีเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ เมทานอล เพราะมีราคาถูก และมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ในปฏิกิริยามีการเติมตัวเร่งชนิดเบสทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน หากมีปริมาณกรดไขมันสูงก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ สบู่ที่เกิดขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและทำให้แยกไบโอดีเซลได้ยาก อีกทั้งปริมาณน้ำจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เนื่องจากโมเลกุลน้ำจะทำลายโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ประสิทธิภาพของเกิดผลิตไบโอดีเซลลดลง

2.13 คลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave irradiation)

รังสีไมโครเวฟ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) มีความสามารถส่งผ่านสะท้อนหรือดูดซึม คลื่นรังสีไมโครเวฟจะอยู่ระหว่างบริเวณคลื่นอินฟราเรดและคลื่นวิทยุ ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.01 เมตรถึง 1 เมตร และความถี่ตั้งแต่ 0.3 GHz ถึง 300 GHz มีความถี่คลื่นสูงสุดประมาณ 2,450 ล้านรอบ/วินาที (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ช่วงคลื่นรังสีไมโครเวฟ

2.14 สมบัติของคลื่นรังสีไมโครเวฟ

2.14.1 การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือส่วนที่มีองค์ประกอบของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด

2.14.2 การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ แก้ว พลาสติก กระดาษ เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะสำหรับรองหรือห่อหุ้มอาหารเข้าสู่ไมโครเวฟ

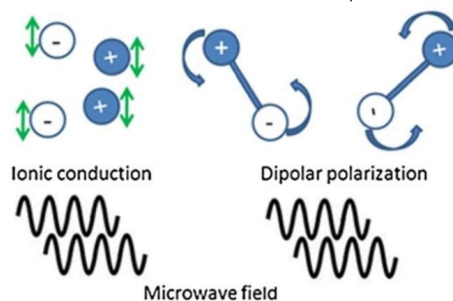
2.14.3 การดูดซับ (Adsorption) คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นจะเกิดบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเอาไว้จนเกิดความร้อน

2.15 หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ

การให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ เป็นกระบวนการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่สัมผัส สามารถเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นพลังงานความร้อนที่ความถี่ที่แน่นอน ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่รวดเร็วจะถูกดูดซับในวัสดุภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟ โดยมีกลไกการทำความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ (ภาพที่ 15) ประกอบด้วย 2 รูปแบบ ดังนี้

2.15.1 การหมุนแบบขั้วคู่ (Dipole Rotation) เป็นการเกิดความร้อนกับวัสดุที่มีสารประกอบมีขั้ว เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ น้ำ โดยน้ำเมื่ออยู่ในวัสดุจะเรียงตัวประจุบวก และประจุลบในโมเลกุลอย่างไม่มีระเบียบ เมื่อสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ประจุบวกและประจุลบเกิดการเคลื่อนที่ และจัดเรียงเป็นระเบียบขึ้น และสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการสลับประจุบวกก็เคลื่อนที่กลับทิศตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลของโมเมนต์ในการชนและเสียดสีกัน จนส่งผลทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาภายในวัสดุ

2.15.2 การเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Polarization) เป็นการเกิดความร้อนจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสารละลาย เมื่อสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับไปกลับมา แต่ละโมเลกุลมีประจุไฟฟ้าจะถูกกระตุ้น และเร่งให้มีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการเสียดสีกับโมเลกุล และเกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อน จากนั้น เกิดการกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่น ทำให้เกิดการเกิดความร้อนขึ้นภายในเซลล์ แล้วค่อยแพร่มายังด้านนอกของวัสดุ



ภาพที่ 15 กลไกการให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ

ที่มา: (Zhang *et al.*, 2017)

2.16 การปรับสภาพดินฟอสฟอรัส

ขั้นตอนการฟอสฟอรัสน้ำมัน เป็นการทำน้ำมันบริสุทธิ์เป็นไปตามมาตรฐาน โดยการกำจัดเม็ดสีคลอโรฟิลล์-เอ เม็ดสีเบต้า-แคโรทีน โคลโร กรดไขมันอิสระ และอื่นๆ ในน้ำมันปาล์มดิบ ในระดับอุตสาหกรรมใช้วิธีการฟอสฟอรัสน้ำมัน ทำให้เกิดดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว เป็นขยะมูลฝอย จากอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันพืช ที่ยังคงมีปริมาณน้ำมันเหลืออยู่ และการกำจัดในอุตสาหกรรม ยังคงใช้วิธีการฝังกลบ ส่งผลให้เกิดอันตรายจากไฟไหม้ เนื่องจากน้ำมันที่เหลือค้างในดินฟอสฟอรัส สามารถถูกออกซิไดซ์จนเกิดการติดไฟได้เองตามธรรมชาติ และเกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อลดความเสี่ยงของมลภาวะ จึงมีวิธีการปรับสภาพดินฟอสฟอรัสเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Mu & Wang, 2018) ประกอบด้วย 3 วิธี ดังนี้

2.16.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นกระบวนการกำจัดน้ำมันที่เหลือค้างและสารอินทรีย์อื่นๆ โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ขึ้นอยู่เป็นศูนย์กลางที่จะสกัด โดยตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วหลายชนิด ตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซีโตน (acetone) เมทิลเอทิลคีโตน (methyl ethyl) ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) และคลอโรฟอร์ม (chloroform) ถูกนำมาใช้เพื่อสกัด ส่วนประกอบที่มีขั้วและสารมีสี ส่วนตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น ปีโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) โทลูอิน (toluene) และเฮกเซน (hexane) นำมาใช้ในการสกัดส่วนประกอบที่ไม่มีขั้ว เช่น ไตรกลีเซอไรด์ และอื่นๆ ควรใช้ตัวทำละลายเมทานอลมากกว่าตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ในการสกัดน้ำมัน จากดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีอันตรายน้อยกว่าตัวทำละลายอื่นๆ โดยให้ผลผลิตสูง และมีคุณภาพน้ำมันดีกว่าตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ

2.16.2 การปรับสภาพด้วยความร้อน (Thermal Treatment)

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยความร้อนสูง ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ การใช้ความร้อนสูงทำให้โครงสร้างภายในของสารประกอบเกิดการแตกและการจัดเรียงตัวใหม่จะได้สารประกอบคาร์บอน ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น วัสดุตั้งต้น อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อนและอัตราการไหลของก๊าซ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน และไฮโดรเทอร์มัลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารชีวมวล (biomass) ที่มีความชื้นสูงให้กลายเป็นสารประกอบคาร์บอน ขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิ

2.17 การใช้ประโยชน์ดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานแล้ว

Silva และคณะ (2014) ศึกษาผลของดินฟอสฟอรัสต่อคุณภาพของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้ปริมาณดินฟอสฟอรัส 0.5 1.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าน้ำมันปาล์มดิบมีค่าแคโรทีนเริ่มต้น 467 ± 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ลดลงเหลือ 258 83 และ 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เพราะเม็ดสีบางส่วนในน้ำมันปาล์มดิบถูกดูดซับโดยดินฟอสฟอรัส เพราะเกิดพันธะโควาเลนต์ หรือไอออนิกกับดินฟอสฟอรัส ทำให้ค่าสีแดง (R) ของน้ำมันปาล์มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณดินฟอสฟอรัส และมีค่าเท่ากับ 68.0 42.0 และ 15.8 ตามลำดับ เพราะดินฟอสฟอรัสมีความสามารถในการดูดซับสารกลุ่มแคโรทีนและสารสีในน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Nursulihatimarsyila (2010) ศึกษาประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันและการนำกลับมาใช้ใหม่ของดินพอกสีที่ใช้แล้วด้วยตัวทำละลายเฮกเซน พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีใช้แล้วมีปริมาณสูง 20.57 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่า กรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.26 เปอร์เซ็นต์ และในน้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 555 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีใช้แล้วมีปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 41 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เนื่องจากสารประกอบกลุ่มแคโรทีนถูกดูดซับและจับตัวกันแน่นในรูพรุนของดินพอกสีที่ใช้แล้ว ทำให้น้ำมันปาล์มที่สกัดได้มีสารประกอบกลุ่มแคโรทีนน้อยกว่าน้ำมันปาล์มดิบ

Kheang และคณะ (2006) ศึกษาลักษณะของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีใช้แล้วด้วยตัวทำละลายเฮกเซน และเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี พบว่า น้ำมันที่ได้จากเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ปริมาณฟอสฟอรัส 18.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และไม่พบเหล็กและฟอสฟอรัสในน้ำมันที่สกัดได้ แต่พบปริมาณเบต้า-แคโรทีนสูงมากถึง 7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มากกว่าน้ำมันที่สกัดได้ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ซึ่งมีปริมาณเพียง 3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด มีปริมาณกรดโอเลอิก 37.9 เปอร์เซ็นต์ กรดสเตียรีน 45.2 เปอร์เซ็นต์ กรดสเตียริก 4.9 เปอร์เซ็นต์ และกรดไลโนเลอิก 10.9 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างจากการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน

Simonelli และคณะ (2020) ผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์มีปริมาณสูงขึ้น และพบว่าตัวทำละลายกลุ่มเอเทอร์ เป็นตัวทำละลายร่วมที่ดีที่สุดสามารถเร่งตั้งผิวระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันได้ เนื่องจากโมเลกุลระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์มีความต่างกันของการมีขั้วและไม่มีขั้ว การใช้ตัวทำละลายร่วมในปริมาณที่เพียงพอจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ร่วมกัน ลดเวลา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

Punvichai และคณะ (2020) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล แบบ 2 ขั้นตอน จากน้ำมันที่ได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วของโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์ม บริษัท ไอสิน จำกัด พบว่ามีน้ำมันตกค้างในดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วประมาณ 22.4 เปอร์เซ็นต์ มีกรดไขมันอิสระ 15.5 เปอร์เซ็นต์ นำมาผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อัตราส่วนโมลกรดไขมันอิสระต่อเมทานอล 1:18 โมลาร์ มีตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือ 1.07 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไบโอดีเซล (Conversion) เท่ากับ 93.09 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน มีตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล 1:13.22 โมลาร์ มีปริมาณไบโอดีเซล (FAME) 97.58 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน หรือ EN 14103 ซึ่งกำหนดปริมาณขั้นต่ำ 96.5 เปอร์เซ็นต์

Sahafi และคณะ (2016) การไปโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนจากน้ำมันที่ใช้ปรุงอาหาร และน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วของอุตสาหกรรมกลั่นบริสุทธ์น้ำมันถั่วเหลือง โดยทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำมันต่อเมทานอล 0.3 เปอร์เซ็นต์ ใช้กรดซัลฟูริก ปริมาตร 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นเมทิลเอสเทอร์โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้ได้ผลผลิตไปโอดีเซลปริมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ วัตถุประสงค์ตั้งต้น 3 ชนิดมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ทำให้เชื้อเพลิงไปโอดีเซลมีค่าเป็นไปตามข้อกำหนดเชื้อเพลิงของไปโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

Chua (2004) ศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันทอดที่ใช้แล้ว ที่อัตราส่วนโมลปฏิกิริยาเอทานอลต่อน้ำมัน 6:1 โมลาร์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟกำลังไฟ 750 วัตต์ ทำปฏิกิริยาที่เวลา 3, 15, 30, 45, 60 และ 75 นาทีตามลำดับ พบว่า การรังสีไมโครเวฟในการทำปฏิกิริยากับสารผสม จะลดเวลาในการทำปฏิกิริยา จากเดิมที่ให้ความร้อนโดยตรงใช้เวลา 75 นาที ลดลงเหลือเพียง 4 นาที และเกิดผลผลิตของไปโอดีเซลมาก เนื่องโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าทำให้โมเลกุลแอลกอฮอล์ เคลื่อนที่แบบไดโพลหรือไอออนที่มีประจุ ส่งผลให้โมเลกุลหรือไอออนมีการหมุนอย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการเสียดสีกัน ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

Guan และคณะ (2009) ผลิตเชื้อเพลิงไปโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันร่วมกับตัวทำละลายร่วม โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 8 โมลาร์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 1 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมไดเมทิลอีเทอร์ ไดเอทิลอีเทอร์ เติร์ต-บิวทิล เมทิลอีเทอร์ และเตตระไฮโดรฟิวแรน ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที พบว่าการผลิตไปโอดีเซลร่วมกับตัวทำละลายกลุ่มอีเทอร์มีประสิทธิภาพในการในการละลายแอลกอฮอล์และน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวทำละลายไดเมทิลอีเทอร์ สามารถสังเคราะห์ไปโอดีเซลได้ดีที่สุด

Elkady และคณะ (2015) ผลิตไปโอดีเซลจากน้ำมันพืชเหลือทิ้งด้วย KM Micromixer ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 16:1 โมลาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตไปโอดีเซลได้สูงสุด 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตไปโอดีเซลจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเกิดสบู่ของตัวเร่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันในน้ำมัน

Pranowo และคณะ (2020) เพิ่มประสิทธิภาพของดินฟอกสีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไนตริกและอุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีของน้ำมันปาล์มดิบ ศึกษาความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ปริมาณ 0.4 0.7 และ 1 โมลาร์ และที่อุณหภูมิ 100 300 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความร้อนจะช่วยกำจัดความชื้น สิ่งเจือปน และสิ่งสกปรกออกจากดินฟอกสีใช้แล้ว และกรดกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

ของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในชั้นดินฟอสเฟตด้วย H^+ ไอออนจากกรดตามด้วยการแตกตัวของไอออน Al^{3+} และไอออนโลหะอื่นๆ เช่น Fe^{3+} จากดินฟอสเฟตในชั้นตาข่าย ผลจากการแตกตัวของไอออน Al^{3+} ดินที่มีลีสซิทกลายเป็นประจุลบ เพิ่มความสามารถในการดูดซับและพื้นที่ผิว มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับลีสเท่ากับ 94.68 เปอร์เซ็นต์ สามารถดูดซับลีสในน้ำมันปาล์มดิบได้ แต่มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินฟอสเฟตที่ยังไม่ได้ใช้งาน ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับลีสเท่ากับ 96.77 เปอร์เซ็นต์

Wafti และคณะ (2011) การนำกลับมาใช้ใหม่ของการใช้ดินฟอสเฟตที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2 ประเภท ได้แก่ ดินฟอสเฟตใช้แล้วสกัดด้วยตัวทำละลาย และดินฟอสเฟตใช้แล้วกระตุ้นด้วยความร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิ 400 500 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ความร้อนกระตุ้นดินฟอสเฟตสามารถกำจัดความชื้น สิ่งเจือปน และสิ่งสกปรกออกได้ดีกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลาย พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของดินฟอสเฟตใช้แล้วกระตุ้นด้วยความร้อนโดยตรง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า และให้ประสิทธิภาพการฟอสเฟตที่ดีกว่าดินฟอสเฟตใช้แล้วกระตุ้นด้วยความร้อนโดยตรง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และ 800 องศาเซลเซียส

Abd Majid และคณะ (2017) ศึกษาการนำดินฟอสเฟตใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยการกระตุ้นด้วยกรดและความร้อน เพื่อลดสีและลดปริมาณออกซิเจน (BOD) ของน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่าพื้นที่ผิวของดินฟอสเฟตใหม่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $119.7 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ นำไปใช้งานฟอสเฟตน้ำมันปาล์มดิบ ดินฟอสเฟตใช้แล้ว (SBE) จะมีค่าพื้นที่ผิวลดลงเหลือ $19.4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ และการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (DSBE) ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย $31.2 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ซึ่งพื้นที่ผิวของดินฟอสเฟตใช้แล้วที่กระตุ้นด้วยกรดและความร้อน (RDSBE-AH) สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวมากถึง $122.3 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ เนื่องจากปฏิกิริยากรดกับพื้นผิวดินเหนียวและอุณหภูมิความร้อน ทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่ตกค้างหลุดออกได้

Boukerroui และ Ouali (2000) ปรับสภาพดินฟอสเฟตที่ใช้แล้วด้วยความร้อนและกรดไฮโดรคลอริก เพื่อนำมาดูดซับลีสของน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าที่ประสิทธิภาพการฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และคงตัวที่ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส เมื่อนำดินฟอสเฟตผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน มากระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการฟอสเฟตเพิ่มขึ้น 92.2 เปอร์เซ็นต์ การกระตุ้นดินฟอสเฟตที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรด สามารถนำดินฟอสเฟตที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีความสามารถในการฟอสเฟตน้ำมันปาล์มดิบอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากกรดจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับสารกลุ่มคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ได้ดี

Foletto และคณะ (2002) การใช้ประโยชน์และการปรับสภาพดินฟอสเฟตที่ใช้แล้ว โดยศึกษาประสิทธิภาพการฟอสเฟตของดินฟอสเฟตน้ำมันถั่วเหลืองนำมากลับมาใช้ใหม่ พบว่าดินฟอสเฟตใช้แล้วสกัดด้วยตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถปรับสภาพดินฟอสเฟตให้กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 300 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการฟอสเฟตของดินฟอสเฟตใช้แล้วเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพการฟอสเฟตประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุ สารเคมี และเครื่องมือวิทยาศาสตร์

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. เฮกเซน (Hexane) ยี่ห้อ Macron
2. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ยี่ห้อ Loba
3. เมทานอล (Methanol) ยี่ห้อ BDH
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol) ยี่ห้อ Macron
5. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ยี่ห้อ Loba
6. อะซิโตน (Acetone) ยี่ห้อ Merck
7. โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) ยี่ห้อ KemAus
8. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ยี่ห้อ KemAus
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ยี่ห้อ Pine chemical
10. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide) ยี่ห้อ KemAus
11. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ยี่ห้อ Macron
12. เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ยี่ห้อ Loba
13. ไดคลอโรเบนซีน (Dichlorobenzene) ยี่ห้อ Loba
14. โทลูอีน (Toluene) ยี่ห้อ Fulltime
15. โมเลกุลลาร์ ซีฟ (Molecular sieve) ยี่ห้อ Hi-media

3.1.2 เครื่องมือวิทยาศาสตร์

1. ชุดกรองสุญญากาศ (Suction pump) ยี่ห้อ Rocker รุ่น Rocker 400
2. เครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ (Rotary Evaporators) ยี่ห้อ Buchi รุ่น Rotavapor R-300
3. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Genesys 10S UV-VIS
4. เครื่องสกัดสารด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical Fluid Extraction) ยี่ห้อ Applied Separations รุ่น Spe-ed SFE-2
5. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890B
6. เครื่องวัดสี (Colour Measurement) ยี่ห้อ Lovibond รุ่น PFXi-950
7. เครื่องไมโครเวฟ ยี่ห้อ Toshiba
8. ชุดวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type K)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เก็บตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Used Activated Bleaching Earth: UABE) จากโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ บริษัท นิว ไปโอติเซล จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี เก็บตัวอย่างในที่แห้ง อุณหภูมิห้อง 26 ± 2 องศาเซลเซียส สกัด UABE ด้วยตัวทำละลาย n-hexane อัตราส่วน 1:1 (w/v) กรองแยกส่วนสารละลายน้ำมันออกจากส่วนที่เป็นของแข็ง UABE ระเหยแยกตัวทำละลาย n-hexane ที่ความดันต่ำตามวิธีของ (Punvichai & Pioch, 2016) คำนวณร้อยละผลผลิต (% yield) หรือปริมาณน้ำมัน ตามวิธี AOCS Ba 3-38 (AOCS 1993) วิเคราะห์ Free fatty acid ตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (AOCS 1993) ค่า Saponification ตามวิธี AOCS Cd 3b-76 (AOCS 1993) และ carotene content หรือ Pro-vitamin A โดยใช้ Spectrophotometer ตามวิธี ของ AOAC Official Method 941.15 (AOAC 2019)

3.2.1.1 ปริมาณน้ำมัน (% yield)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันในดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยชั่งตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 5 กรัม ห่อด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 4 แล้วบรรจุใส่หลอดกระดาษสำหรับสกัด (Extraction Thimble) ใส่ในชุดสกัดไขมันซอกท์เลต (Soxhlet extraction) ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายบรรจุในขวดก้นกลม (Boiling flask) สก๊ตนาน 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็น แล้วนำขวดก้นกลมที่มีสารละลายรวมกับไขมันน้ำมันที่สกัดได้ระเหยแยกตัวทำละลายเฮกเซนที่ความดันต่ำโดยเครื่องปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary vacuum) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน คำนวณปริมาณน้ำมัน (% yield) ตามสูตร

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)}} \times 100$$

3.2.1.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยชั่งตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 5 กรัม ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิสารละลายน้ำมันบนเตาให้ความร้อนจนสารละลายตัวอย่างใส เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ในเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล เขย่าให้เข้ากันจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูคงตัวอยู่ 30 วินาที คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ ตามสูตร

$$\text{FFA (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรต่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times \text{ความเข้มข้นต่าง (นอร์มอล)} \times 25.6}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

2.1.3 ค่าซาฟอนนิฟิเคชัน (Saponification Value)

การวิเคราะห์ค่าซาฟอนนิฟิเคชันของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยชั่งตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดที่ได้ปริมาณ 2 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 4 เปอร์เซ็นต์ในเอทานอล (w/v) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ประกอบเข้ากับชุดรีฟลักซ์ (Reflux) ให้ความร้อน 60-70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในเอทานอลเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2-3 หยด ในขวดก้นกลม (Boiling flask) เป็นอินดิเคเตอร์ นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล เขย่าให้เข้ากันจนถึงจุดยุติสารละลายเปลี่ยนสีชมพูเป็นสีใสปกติ คำนวณ ค่าซาฟอนนิฟิเคชัน ตามสูตร

$$\text{Saponification Value (SV)} = \frac{(B-S) \times N \times 56.1}{W}$$

เมื่อ	B	=	Blank titration (ml)
	S	=	Sample titration (ml)
	N	=	Normality of HCl
	W	=	Sample weight (g)

$$\text{Molecular weight} = (56.1 \times 1000 \times 3) / \text{SV}$$

3.2.1.4 ปริมาณแคโรทีน (Carotene content)

การวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีน (Carotene content) ของตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยชั่งตัวอย่างปริมาณ 0.5 กรัม ละลายด้วยตัวทำละลายอะซิโตน กับเฮกเซนอัตราส่วน 1:9 ในขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 436 นาโนเมตร คำนวณปริมาณแคโรทีน ตามสูตร

$$\text{Carotene content (mg/kg)} = (A \times 454) / (196 \times L \times W)$$

เมื่อ	L	=	Cuvette path length (cm)
	W	=	Sample weight/total volume
	A	=	Absorbance 436 nm

3.2.1.5 ปริมาณเบต้าแคโรทีน (Bata-carotene content)

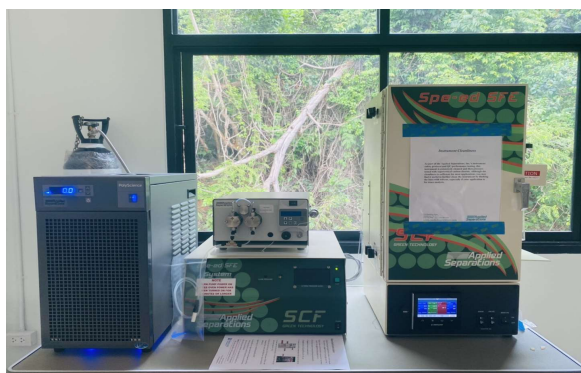
การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน (Bata-carotene content) ตามวิธีของ AOAC Official Method (2019) ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ของเหลวความดันสูง (High Performance Liquid Chromatography) ใช้คอลัมน์ Xterra วัดด้วย UV-Visible detector ที่ค่าการดูดกลืนแสง 453 นาโนเมตร ตัวทำละลายที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ อะซีโตนไทรล์ : เมทานอล : เตตระไฮโดรฟูแรน ที่ อัตราส่วน 35:60:5 (v/v/v) อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที วิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน เทียบกับกราฟมาตรฐาน (External calibration curve) และคำนวณปริมาณของเบต้าแคโรทีน

3.2.1.6 องค์ประกอบของกรดไขมัน (Fatty acid composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมัน (Fatty acid composition) ของตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ตามวิธีของ AOAC Official Method (2019) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890B โดยใช้คอลัมน์ HP-88 column (Length 100 m, Inner Diameter 0.25 mm, Film Thickness 0.2 μm) ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ 60 องศาเซลเซียส ฉีดตัวอย่างในรูปของ Fatty acid methyl ester (FAME) ปริมาตร 0.001 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สตัวพา ตรวจวัดด้วย Flame Ionization Detector (GC-FID) ที่อุณหภูมิตรวจวัดที่ 250 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 0.65 มิลลิลิตรต่อนาที วิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมัน เทียบกับกราฟมาตรฐาน (External calibration curve) คำนวณชนิดและปริมาณของกรดไขมัน

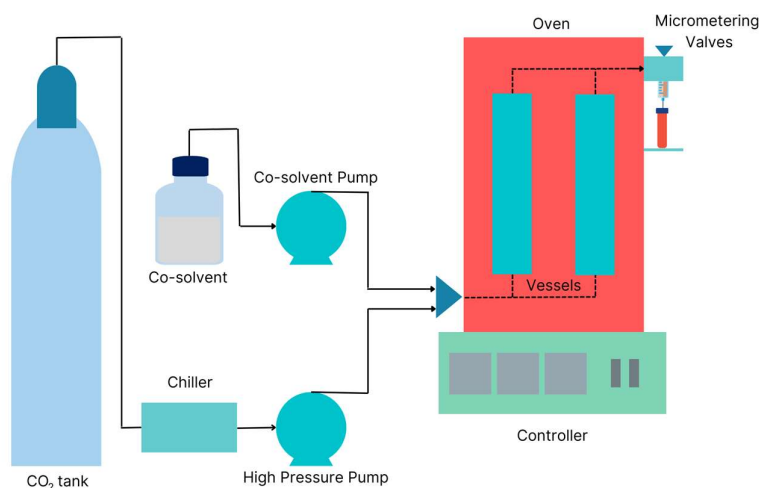
3.2.2 ศึกษาการสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

การสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วของ บริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด ด้วยเครื่องเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical carbon dioxide: SCCO₂) ยี่ห้อ Applied Separations รุ่น Spe-ed SFE-2 (ภาพที่ 16) ซึ่งตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50 กรัม บรรจุลงใน Vessel ปิดด้านหนึ่งของ vessel ด้วย end fitting บรรจุด้านล่างสุดด้วย polypropylene wool เพื่อป้องกันการรั่วไหลของตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง



ภาพที่ 16 เครื่องสกัดสารด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด รุ่น Spe-ed SFE-2

อัดให้แน่นด้วยแท่งเหล็กกลม (Tamping rod) จากนั้นใส่ตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วลงไป ใน vessel อัดให้แน่นด้วยแท่งเหล็กกลมจนเต็มปิดด้านบนด้วย polypropylene wool อีกครั้ง และปิดด้วย end fitting ให้แน่น นำ vessels ที่บรรจุดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วติดตั้งเข้ากับส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Oven) ทำการสกัดด้วยการเปิดถังก๊าซ (CO₂ tank) ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องทำความเย็น (Chiller) เพื่อควบแน่นและปรับอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อน ปล่อยเข้าปั๊มความดันสูง (High Pressure Pump) เพื่อส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ส่วนควบคุมอุณหภูมิ (Oven) ที่บรรจุ vessels สกัดด้วยตัวทำละลายร่วมโดยใช้ปั๊มตัวทำละลายร่วม (Co-Solvent Pump) เป็นส่วนควบคุมอัตราการไหลของตัวทำละลายก่อนเข้าสู่ส่วนควบคุมอุณหภูมิ โดยมีระบบควบคุม (Controller) ควบคุมอุณหภูมิ และความดันให้อยู่ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่ตั้งค่าไว้ตามสภาวะที่ต้องการสกัด ได้สารสกัดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยผ่านเครื่องวัดปริมาณก๊าซ (Micro-metering valve) ทำหน้าที่วัดปริมาณของก๊าซก่อนปล่อยออกเครื่อง ส่วนสารสกัดถูกเก็บไว้ในขวดแก้ว (ภาพที่ 17) ศึกษาการสกัดไขมันน้ำมัน และ Pro-vitamin A จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีขั้นตอนการสกัด คือ



ภาพที่ 17 แผนภาพการทำงานของเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

3.2.2.1 สกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50 กรัม สกัดที่อุณหภูมิ 35 55 75 95 และ 135 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์ คำนวณร้อยละผลผลิต (% yield) องค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography (GC) และ Carotene content หรือ Pro-vitamin A โดยใช้ Spectrophotometer ตามวิธีของ AOAC (2019) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS เลือกตัวอย่างที่มีปริมาณ Carotene content สูงที่สุดสกัดในขั้นตอนถัดไป

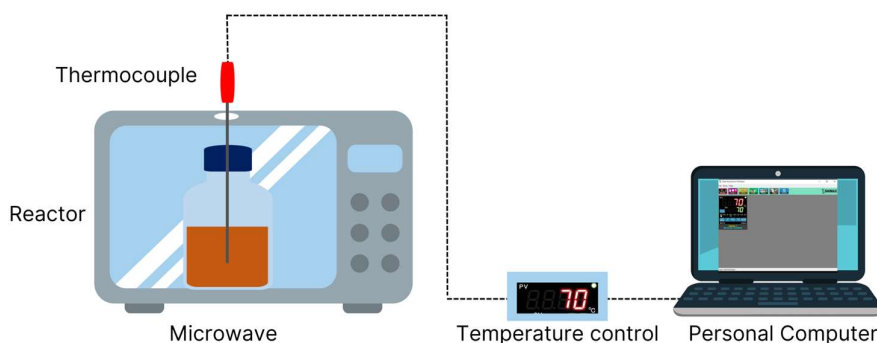
3.2.2.2 เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.1 สกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50 กรัม ที่ความดัน 75 90 100 150 และ 250 บาร์ คำนวณร้อยละผลผลิต (% yield) องค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography (GC) และ Carotene content โดยใช้ Spectrophotometer ตามวิธีของ AOAC (2019) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS เลือกตัวอย่างที่มีปริมาณ Carotene content สูงที่สุดสกัดในขั้นตอนถัดไป

3.2.2.3 เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.1 และความดันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.2 สกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ร่วมกับตัวทำละลายร่วม hexane, acetone และ methanol โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50 กรัม คำนวณร้อยละผลผลิต (% yield) และองค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography (GC) และวิเคราะห์ Carotene content โดยใช้ Spectrophotometer ตามวิธีของ AOAC (2019) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS เลือกตัวอย่างที่มีปริมาณ Carotene content สูงที่สุดสกัดในขั้นตอนถัดไป

3.2.2.4 เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.1 ความดันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.2 และตัวทำละลายร่วมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2.3 สกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้ดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50 กรัม คำนวณร้อยละผลผลิต (%yield) องค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography (GC) วิเคราะห์ Carotene content โดยใช้ Spectrophotometer ตามวิธีของ AOAC (2019) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS เลือกตัวอย่างที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุด นำมาวิเคราะห์ปริมาณ Beta-Carotene โดยใช้ High Pressure Liquid Chromatographic (HPLC) ตามวิธีของ AOAC (2019)

3.2.3 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เก็บตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วจากบริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด สกัดไขมันน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซนอัตราส่วน 1:1 (w/v) เขย่าส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กรองแยกส่วนสารละลายน้ำมันกับส่วนกากดินฟอกสีด้วยชุดกรองสุญญากาศ นำสารละลายน้ำมันระเหยแยกตัวทำละลายเฮกเซนด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) ตามวิธีของ Punvichai & Pioch (2016) นำน้ำมันที่สกัดได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน รุ่น Toshiba อัตราการให้ความร้อน 800 วัตต์ ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขวดดูแรน ขนาด 250 มิลลิลิตร มีชุดวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type K) ร่วมกับโปรแกรม SHIMAX เพื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนตัว (ภาพที่ 18) และมีแผนการทดลอง คือ



ภาพที่ 18 แผนภาพการทำงานของเครื่องผลิตไบโอดีเซลให้ความร้อนด้วยรังสีไมโครเวฟ

3.2.3.1 นำตัวอย่างน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยตัวทำละลายเฮกเซนอัตราส่วน 1:1 (w/v) ศึกษาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 40 กรัม ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์ ใช้กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (1993) และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ Conversion ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS

3.2.3.2 เลือกอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.1 ศึกษาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 40 กรัม ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran, dichlorobenzene และ toluene 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (v/v) ใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (1993) และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ Conversion ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS

3.2.3.3 เลือกอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.1 เลือกตัวทำละลายร่วมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.2 ศึกษาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 40 กรัม ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ใช้กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (1993) และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ Conversion ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS

3.2.3.4 เลือกอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.1 เลือกตัวทำละลายร่วมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.2 เลือกโมเลกุลาร์ซีฟที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.3.3 ศึกษาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว 40 กรัม ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (1993) และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ Conversion ของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความแตกต่างทางสถิติด้วย SPSS

$$\text{Conversion (\%)} = \frac{(a - b)}{a} \times 100$$

เมื่อ a = ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน
b = ปริมาณกรดไขมันอิสระหลังปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

3.2.3.5 เลือกตัวอย่างน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์จากการทดลองที่ 3.2.3.4 ศึกษาขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ปริมาณเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณ Fatty Acid Methyl Ester (FAME) ด้วยเทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detector (TLC/FID) เปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน โดยใช้เครื่อง TLC/FID Itronscan MK-6 และ Chroma rods type S-III quartz rod นำตัวอย่างน้ำมันละลายด้วยเฮกเซน หยดลงบน chroma rod หลังจากนั้นแช่ในตัวทำละลายสำหรับเฟสเคลื่อนที่แรก เฮกเซน:ไดเอทิลอีเทอร์:กรดฟอร์มิก 50:20:0.3 (v/v) และใช้ตัวทำละลายสำหรับเฟสเคลื่อนที่สอง เฮกเซน:เบนซีน 1:1 (v/v) หลังจากแช่ในตัวทำละลายสำหรับเฟสเคลื่อนที่เสร็จแล้ว นำ Chroma rod อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเอสเทอร์ ด้วยวิธี flame ionization detection โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน อัตราการไหล 165 มิลลิลิตรต่อนาที และอากาศที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที

3.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

ซึ่งตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่สกัดน้ำมันออกแล้วด้วยตัวทำละลายเฮกเซนอัตราส่วน 1:1 (w/v) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomize design: CRD) ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำใช้ตัวอย่างปริมาณ 100 กรัม เผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก อัตราส่วน 1:1 (w/v) ที่ความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ (v/v) กวนผสมด้วย magnetic bar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมากรองแยกดินฟอกสีและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดัดแปลงตามวิธีของ Pranowo และคณะ (2020) วิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้อง Stereo Microscopes ยี่ห้อ Optec รุ่น SZ810B2L ใช้ตัวอย่าง 20 กรัม ใส่ใน Glass Plate นำมาส่องด้วย กล้อง Stereo Microscopes เลนส์ใกล้ตา กำลังขยาย 10x และเลนส์ใกล้วัตถุกำลังขยาย 4.7x และทดสอบคุณภาพการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ (Bleaching test) ตามวิธีการของ AOCS (1993) ซึ่งตัวอย่างน้ำมันปาล์มดิบ 100 กรัม กวนผสมด้วย magnetic bar เติมดินฟอกสีที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก 8 กรัม กวนผสมเป็นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกน้ำมันและดินฟอกสีที่ใช้งานแล้วด้วยชุดกรองสุญญากาศ ได้น้ำมันปาล์มที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่ วัดค่าสี RYBN ของน้ำมันปาล์มตามวิธีการของ AOCS Cc 13e-92 (1993) ด้วยเครื่องวัดสี Lovibond PFXi800 ใช้ Glass cell ขนาด $5^{1/4}$ นิ้ว ที่ความยาวคลื่น 420-710 นาโนเมตร บันทึกค่าสีที่ได้

3.2.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

ศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ราคาต้นทุนสกัดสารกลุ่มแคโรทีนและกรดไขมันที่มีมูลค่าจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวดการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน โดยให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟและการนำดินฟอกสีใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

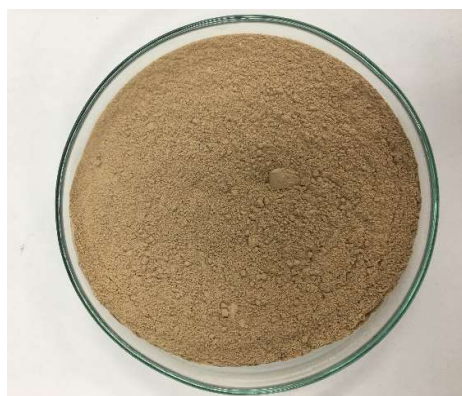
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 คุณภาพทางกายภาพ และเคมีของดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เก็บตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี (ภาพที่ 19) เก็บตัวอย่างในถัง อูณหภูมิห้อง 26 ± 2 องศาเซลเซียส ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเกิดกลิ่นเหม็นหืน ลักษณะทางกายภาพของดินฟอกสี (Activated Bleaching Earth: ABE) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือ สีน้ำตาลอ่อน ใช้ในกระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้ดินฟอกสีในอัตราส่วน 0.8-2.0 เปอร์เซ็นต์ (w/v) เพื่อกำจัดสารสีออกจากน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช หลังจากผ่าน กระบวนการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ ดินฟอกสีจะถูกกรองแยกออกมา เรียกว่า ดินฟอกสีที่ผ่านการ ใช้ งานแล้ว (Used Activated Bleaching Earth: UABE) จะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำ (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 19 เก็บตัวอย่างดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว บริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 ดินฟอกสี (ก) และดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 21 น้ำมันปาล์มดิบ (ก) และน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข)

คุณภาพทางกายภาพ และเคมีของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองออกน้ำตาลมีสีอ่อนกว่าน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีสีน้ำตาลแดงเข้ม เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง น้ำมันที่สกัดได้มีลักษณะเป็นไขมันปนน้ำมันชั้นหนืดคล้าย น้ำมันปาล์มดิบ (ภาพที่ 21) คำนวณผลผลิต (%yield) หรือปริมาณน้ำมัน ตามวิธี AOCS Ba 3-38 (AOCS 1993) ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ตามวิธี AOCS Ca 5a-40 (AOCS 1993) ค่าซาฟอนนิฟิเคชัน (Saponification Value) ตามวิธี AOCS Cd 3-25 (AOCS 1993) และปริมาณแคโรทีน (Carotene content) ตามวิธี AOAC 941.15 (AOAC 2019) วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography ตามวิธีของ AOAC Official Method (2019) พบว่า น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (UABE waste oil) มีปริมาณ 23.96 ± 1.33 เปอร์เซ็นต์ มีกรดไขมันอิสระสูงมีค่าเท่ากับ 23.47 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณแคโรทีนน้อย ค่าเท่ากับ 42.60 ± 0.93 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 849.10 กรัม/โมล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันปาล์มดิบ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 สมบัติทางเคมีของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วของบริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด

Properties	CPO	UABE waste oil
Oil (%)	-	23.96 ± 1.33^a
Free Fatty Acid (%)	7.36 ± 0.03^a	23.47 ± 0.99^b
Saponification Value (mg KOH/g)	200.08 ± 1.34^a	198.21 ± 0.48^b
Carotene content (mg/kg)	576.98 ± 0.81^a	42.60 ± 0.93^b
Molecular weight (g/mole)	841.15	849.10

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรต่างกันตามนัยนัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

องค์ประกอบของกรดไขมันน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated fatty acid) มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 49.62 เปอร์เซ็นต์ และ 46.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก (C16:0) ปริมาณเท่ากับ 41.78 เปอร์เซ็นต์ และ 39.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Saturated fatty acid) กรดโอเลอิก (C18:1) ปริมาณเท่ากับ 40.93 และ 42.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 6) สอดคล้องกับรายงานของ Punvichai และคณะ (2021) วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่ามีกรดปาล์มมิติก (16:0) มากที่สุด มีปริมาณเท่ากับ 41.49 และ 47.45 เปอร์เซ็นต์ กรดโอเลอิก (C18:1) ปริมาณเท่ากับ 40.18 และ 32.29 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว บริษัท นิว ไบโอดีเซล จำกัด

Fatty Acid	CPO (%)	UABE waste oil (%)
Saturated fatty acid		
Caprylic acid (C8:0)	0.06	0.03
Capric acid (C10:0)	0.02	0.03
Lauric acid (C12:0)	0.91	0.43
Myristic acid (C14:0)	1.24	0.95
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.05	0.05
Palmitic acid (C16:0)	41.78	39.62
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.11	0.10
Stearic acid (C18:0)	4.86	4.65
Arachidic acid (C20:0)	0.44	0.42
Behenic acid (C22:0)	0.08	0.07
Lignoceric acid (C24:0)	0.09	0.07
Total saturated fatty acid	49.62	46.42
Monounsaturated fatty acid		
cis-10-Pentadecenoic acid (C15:1)	0.15	0.15
cis-10-Heptadecenoic acid (C17:1)	0.07	-
Oleic acid (C18:1n9c)	40.93	42.98
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1n9)	0.16	0.16
Total monounsaturated fatty acid	41.31	43.30
Polyunsaturated fatty acid		
Linoleic acid (C18:2n6c)	8.84	10.01
Alpha-linolenic acid (C18:3n3)	0.23	0.28
Total polyunsaturated fatty acid	9.07	10.29
Total fatty acid	100.00	100.00

4.2 การสกัดไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการสกัดดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

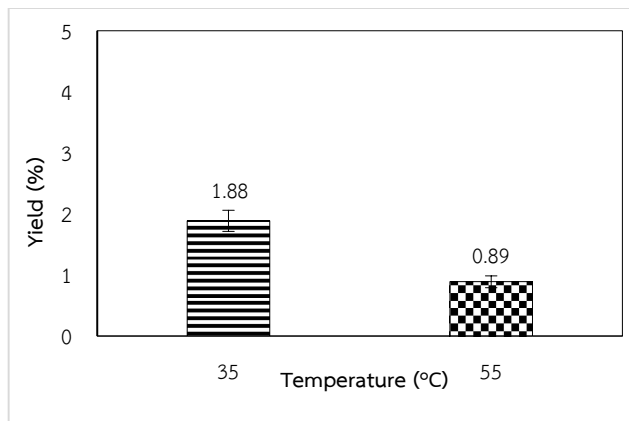
การสกัดดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 55 75 95 และ 135 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์ เวลา 120 นาที พบว่า ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส ที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะเป็นไขมันบนน้ำมันชั้นหนืดสีเหลืองขุ่นมีปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้ เท่ากับ 1.88 ± 0.17 เปอร์เซ็นต์ และ 0.89 ± 0.10 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณแคโรทีนอยด์ เท่ากับ 19.57 ± 0.36 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 9.19 ± 0.89 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 75 95 และ 135 องศาเซลเซียส กลับไม่พบปริมาณตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้ (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ปริมาณน้ำมันและปริมาณแคโรทีนอยด์ของไขมันน้ำมันจากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35-135 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์

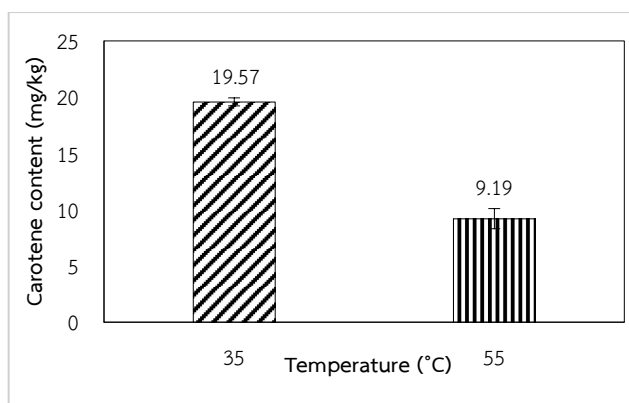
Temperature (°C)	Yield (%)	Carotene content (mg/kg)
35	1.88 ± 0.17	19.57 ± 0.36
55	0.89 ± 0.10	9.19 ± 0.89
75	<0.01	ND.
95	<0.01	ND.
135	<0.01	ND.

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$), ND. = ไม่มีการวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มปริมาณไขมันน้ำมันลดลง (ภาพที่ 22) และปริมาณสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์มีลดลง (ภาพที่ 23) สอดคล้องกับรายงานของ Pereira และ Meireles (2010) พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่ความดันคงที่ความหนาแน่นจะลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายและผลผลิตลดลงเช่นเดียวกับการศึกษาของ Machmudah และคณะ (2022) การสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากดินพอกสีใช้แล้ว โดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส และความดัน 30 เมกะปาสคาล เวลา 180 นาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันมากกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าผลผลิตน้ำมันลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อคุณสมบัติความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดลดลง ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน ทำให้ปริมาณน้ำมันโดยรวมลดลงด้วย จึงเลือกอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นตัวอย่างที่มีปริมาณ Carotene content สูงที่สุดนำมาศึกษาการทดลองที่ 4.2.2 ต่อไป



ภาพที่ 22 ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์



ภาพที่ 23 ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วย Gas Chromatography ของไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์ พบว่า อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ไขมันน้ำมันที่สกัดได้มีองค์ประกอบของกรดปาล์มมิติก (C16:0) สูงที่สุดเท่ากับ 45.96 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกรดไขมันปาล์มมิติก (C16:0) มีค่าลดลงเหลือ 39.19 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่อุณหภูมิสูง 55 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการสกัด Monounsaturated fatty acid และ Polyunsaturated fatty acid มีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และมีค่าเท่ากับ 39.47 และ 8.84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่ง กรดไขมันโอเลอิก (C18:1) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 34.27 และที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงเหลือ 39.16 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 8) แสดงให้เห็นว่าถ้าต้องการสกัดน้ำมันประเภทกรดไขมันอิ่มตัวสูง (Saturated fatty acid) จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดควรเลือกใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

และถ้าต้องการกลุ่ม Monounsaturated fatty acid และ Polyunsaturated fatty acid สูง ควรเลือกใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ในการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤต ยิ่งยวด และที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่ใช้ในการสกัดพบว่าปริมาณสารสกัดที่ได้น้อยมากทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์คุณภาพของสารสกัดได้ และการทดลองถัดไป ข้อ 4.2.2 เลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด คือ 35 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 8 องค์ประกอบกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอสที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 75 บาร์

Fatty acids (%)	Temperature (°C)	
	35	55
Saturated fatty acid		
Caproic acid (C6:0)	0.07	-
Caprylic acid (C8:0)	0.62	0.40
Capric acid (C10:0)	0.50	0.38
Lauric acid (C12:0)	5.95	4.84
Myristic acid (C14:0)	2.86	2.45
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.07	-
Palmitic acid (C16:0)	45.96	39.19
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.09	-
Stearic acid (C18:0)	3.33	4.08
Arachidic acid (C20:0)	0.17	0.33
Total saturated fatty acid	59.63	51.69
Monounsaturated fatty acid		
Palmitoleic acid (C16:1n7c)	0.17	0.16
trans-9-Elaidic acid (C18:1n9t)	0.58	-
Oleic acid (C18:1n9c)	34.27	39.16
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1n9)	0.08	0.15
Total monounsaturated fatty acid	35.10	39.47
Polyunsaturated fatty acid		
Linoleic acid (C18:2n6c)	5.17	8.55
Alpha-linolenic acid (C18:3n3)	0.10	0.30
Total polyunsaturated fatty acid	5.27	8.84
Total fatty acid	100.00	100.00

4.2.2 ผลของความดันต่อการสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

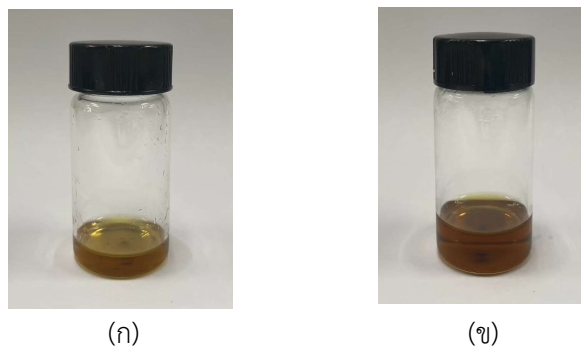
สกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสความดัน 75 90 100 150 และ 250 บาร์ ระยะเวลา 120 นาที ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้จะมีสีเหลืองเข้ม ที่อุณหภูมิห้อง 26 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นไขมันปนน้ำมันชั้นหนืดสีเหลืองเข้ม (ภาพที่ 24) ผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้มีค่าเท่ากับ 1.88 ± 0.17 1.39 ± 0.06 2.21 ± 0.27 3.95 ± 0.31 และ 9.73 ± 0.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีปริมาณแคโรทีนอยด์ 19.57 ± 0.36 , 19.60 ± 1.32 , 20.85 ± 0.94 , 20.89 ± 0.45 และ 48.67 ± 0.56 มิลลิกรัม/กิโลกรัมตามลำดับ (ตารางที่ 9) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำมันและปริมาณแคโรทีนอยด์ของไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสความดัน 75-250 บาร์

Pressure (bar)	Yield (%)	Carotene content (mg/kg)
75	1.88 ± 0.17^d	19.57 ± 0.36^b
90	1.39 ± 0.06^c	19.60 ± 1.32^b
100	2.21 ± 0.27^c	20.85 ± 0.94^b
150	3.95 ± 0.31^b	20.89 ± 0.45^b
250	9.73 ± 0.17^a	48.67 ± 0.56^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

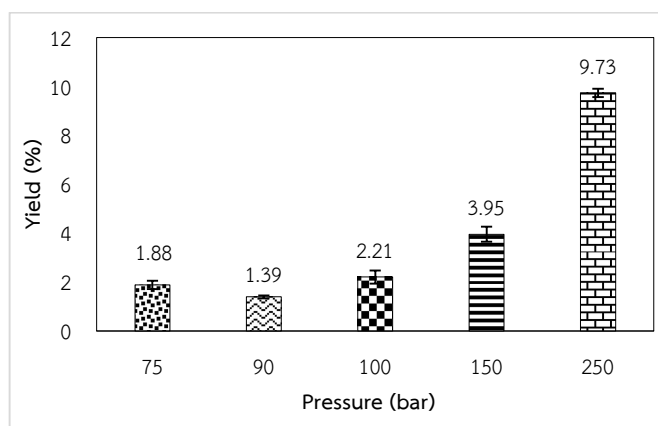
ผลการศึกษาความดันที่ใช้ในการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดแสดงให้เห็นว่าความดันที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อปริมาณไขมันน้ำมันเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 25) และปริมาณสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 26) เนื่องจากลักษณะดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมีรูพรุนค่อนข้างดี ทำให้ความสามารถในการแทรกซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านตัวอย่างได้ดีเมื่อความดันเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Machmudah และคณะ (2022) การสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากดินฟอกสีใช้แล้ว โดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 20, 25 และ 30 เมกะปาสคาล ระยะเวลา 180 นาที พบว่าที่ความดัน 30 เมกะปาสคาล มีปริมาณน้ำมันมากกว่าที่ความดัน 20 และ 25 เมกะปาสคาล สรุปได้ว่าผลผลิตน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำมันโดยรวมเพิ่มขึ้นด้วย จึงเลือกความดัน 250 บาร์ เป็นตัวอย่างที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุด นำมาศึกษาการทดลองที่ 4.2.3 ต่อไป



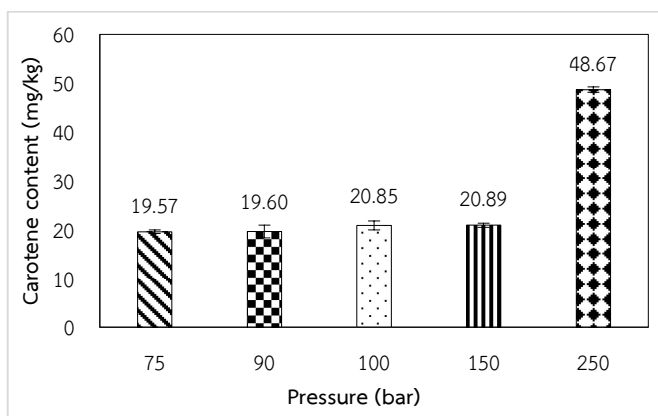
(ก)

(ข)

ภาพที่ 24 ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 150 บาร์ (ก) และความดัน 250 บาร์ (ข)



ภาพที่ 25 ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 75-250 บาร์



ภาพที่ 26 ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันที่สกัดได้ของไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 75-250 บาร์

องค์ประกอบของกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ พบว่า มีปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated fatty acid) มากที่สุด ประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก (C16:0) มากที่สุดเท่ากับ 46.13 เปอร์เซ็นต์ และกรดโอเลอิก (C18:1) เท่ากับ 38.47 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือกรดไขมันสเตียริก (C18:0) เท่ากับ 4.14 เปอร์เซ็นต์ และกรดลิโนเลอิก (C18:2) เท่ากับ 6.50 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 10) ผลของความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณกรดไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Zaidul และคณะ (2007) พบว่าการแยกองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (PKO) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 313.2 เคลวิน และความดัน 20.7 27.6 34.5 41.4 และ 48.3 เมกะปาสคาล เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้กรดไขมันสายยาว (C16-C18:2) มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสกัดแยกกรดไขมันในน้ำมันเมล็ดในปาล์มได้

ตารางที่ 10 องค์ประกอบกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 75-250 บาร์

Fatty acids (%)	Pressure (bar)				
	75	90	100	150	250
Saturated fatty acid					
Caproic acid (C6:0)	0.07	0.06	0.08	0.04	-
Caprylic acid (C8:0)	0.62	0.56	0.71	0.38	0.13
Capric acid (C10:0)	0.50	0.47	0.57	0.36	0.12
Lauric acid (C12:0)	5.95	5.58	6.44	4.58	1.72
Myristic acid (C14:0)	2.86	2.72	2.93	2.51	1.73
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06
Palmitic acid (C16:0)	45.96	45.25	44.69	45.31	46.13
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10
Stearic acid (C18:0)	3.33	3.38	3.25	3.53	4.14
Arachidic acid (C20:0)	0.17	0.18	0.15	0.21	0.30
Total saturated fatty acid	59.63	58.37	58.98	57.07	54.41
Monounsaturated fatty acid					
Palmitoleic acid (C16:1n7c)	0.17	0.18	0.18	0.17	0.16
trans-9-Elaidic acid (C18:1n9t)	0.58	0.39	0.47	0.28	0.22
Oleic acid (C18:1n9c)	34.27	34.95	34.31	35.90	38.47
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1n9)	0.08	0.08	0.07	0.08	0.11
Total monounsaturated fatty acid	35.10	35.60	35.03	36.43	38.96
Polyunsaturated fatty acid					
Linoleic acid (C18:2n6c)	5.17	5.90	5.85	6.36	6.50
Alpha-linolenic acid (C18:3n3)	0.10	0.13	0.14	0.14	0.12
Total polyunsaturated fatty acid	5.27	6.03	5.99	6.50	6.62
Total fatty acid	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

4.2.3 ผลของตัวทำละลายร่วมต่อการสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด

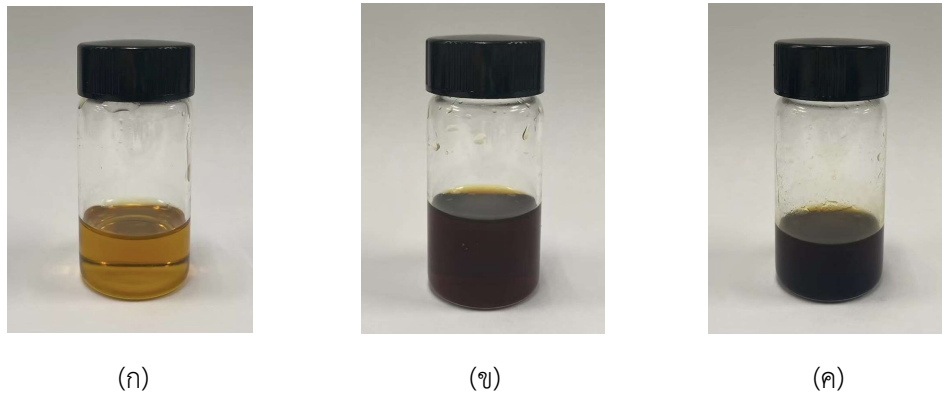
การสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ สกัดร่วมกับตัวทำละลายร่วม 3 ชนิด เฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล อัตราการไหลของตัวทำละลาย 5 ลิตร/นาที่ เวลา 120 นาที่ พบว่าตัวทำละลายร่วมที่มีสีเหลืองเข้ม เป็นไขมันปนน้ำมันชั้นหนืดสีเหลืองเข้มที่อุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 28) ตัวทำละลายร่วมเมทานอลมีปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้มากที่สุดเท่ากับ 29.36 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวทำละลายร่วมอะซีโตน และเฮกเซน มีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 22.03 ± 0.45 เปอร์เซ็นต์ และ 16.24 ± 0.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และปริมาณแคโรทีนอยด์ของตัวทำละลายร่วมเมทานอลมากที่สุดเท่ากับ 85.74 ± 0.16 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนตัวทำละลายร่วมอะซีโตน และเฮกเซน มีค่าเท่ากับ 68.43 ± 0.60 และ 19.37 ± 0.87 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 11) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 11 ปริมาณน้ำมันและปริมาณแคโรทีนอยด์ของไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล

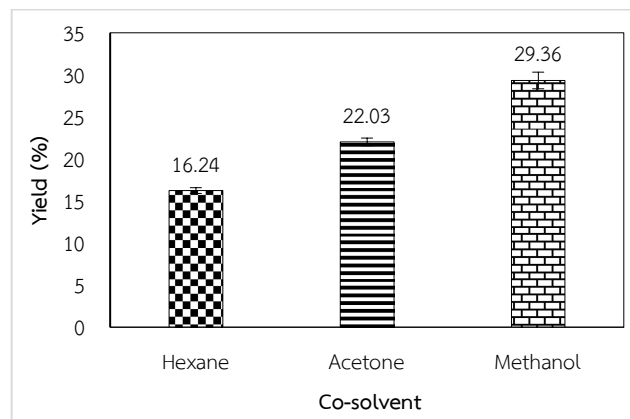
Co-solvent	Yield (%)	Carotene content (mg/kg)
Hexane	16.24 ± 0.34^c	19.37 ± 0.87^c
Acetone	22.03 ± 0.45^b	68.43 ± 0.60^b
Methanol	29.36 ± 0.99^a	85.74 ± 0.16^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

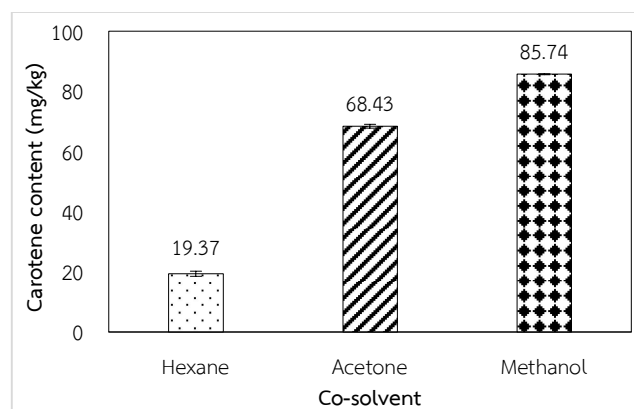
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวดเป็นตัวทำละลายมีความเป็นขั้วต่ำความสามารถในการแยกสารเป้าหมายออกจากตัวอย่างของแข็งทำได้ยาก ควรใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมในการสกัดจะช่วยเพิ่มความมีขั้วของคาร์บอนไดออกไซด์ และความสามารถในเป็นตัวละลายเพิ่มขึ้น การใช้ตัวทำละลายมีขั้ว ปริมาณน้ำมันจะเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 28 และภาพที่ 29) ทำให้ปริมาณสอดคล้องกับรายงานของ Machmudah และคณะ (2022) การสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากดินฟอกสีใช้แล้ว โดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 30 เมกะปาสคาล เวลา 180 นาที่ ตัวทำละลายร่วมเอทานอล 10 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณน้ำมันที่เวลา 30 นาที่ เท่ากับ 7.47 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นเป็น 93.52 เปอร์เซ็นต์ เวลา 180 นาที่ เนื่องจากตัวทำละลายร่วมจะทำปฏิกิริยากับสารเป้าหมายด้วยปฏิกิริยาพันธะไฮโดรเจนหรือแรงไดโพล-ไดโพล จะส่งผลให้ผลผลิตการสกัดเพิ่มขึ้น จึงเลือกตัวทำละลายร่วมเมทานอลที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ เป็นตัวอย่างที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุด นำมาศึกษาการทดลองที่ 4.2.4 ต่อไป



ภาพที่ 27 ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน (ก) อะซีโตน (ข) และเมทานอล (ค)



ภาพที่ 28 ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล



ภาพที่ 29 ปริมาณแคโรทีนอยด์จากไขมันน้ำมันที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล

องค์ประกอบของกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล พบว่า องค์ประกอบของกรดไขมันไม่มีความแตกต่างกัน มีองค์ประกอบของกรดไขมันปาล์มมิติก (C16:0) เท่ากับ 45.19 46.12 และ 45.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 องค์ประกอบกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเฮกเซน อะซีโตน และเมทานอล

Fatty acids (%)	Co-solvent		
	Hexane	Acetone	Methanol
Saturated fatty acid			
Caprylic acid (C8:0)	0.07	0.06	0.06
Capric acid (C10:0)	0.07	0.06	0.06
Lauric acid (C12:0)	1.09	0.87	0.93
Myristic acid (C14:0)	1.38	1.26	1.29
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.05	0.05	0.05
Palmitic acid (C16:0)	45.19	46.12	45.54
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.11	0.11	0.11
Stearic acid (C18:0)	4.41	4.62	4.64
Arachidic acid (C20:0)	0.33	0.35	0.36
Behenic acid (C22:0)	0.05	-	0.07
Lignoceric acid (C24:0)	0.07	-	0.10
Total saturated fatty acid	52.83	53.51	53.22
Monounsaturated fatty acid			
Palmitoleic acid (C16:1n7c)	0.16	0.15	0.14
trans-9-Elaidic acid (C18:1n9t)	0.19	0.24	0.24
Oleic acid (C18:1n9c)	39.42	38.85	39.10
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1n9)	0.12	0.12	0.13
Total monounsaturated fatty acid	39.88	39.35	39.62
Polyunsaturated fatty acid			
Linoleic acid (C18:2n6c)	7.14	6.99	6.98
Alpha-linolenic acid (C18:3n3)	0.15	0.15	0.18
Total polyunsaturated fatty acid	7.29	7.14	7.16
Total fatty acid	100.00	100.00	100.00

4.2.4 ผลของระยะเวลาต่อการสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

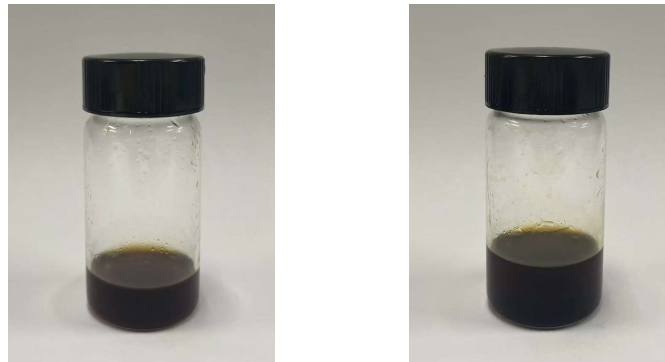
การสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ และตัวทำละลายร่วมเมทานอล สกัดที่ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที พบว่า ตัวอย่างไขมันน้ำมันจะมีสีเหลืองเข้ม เป็นไขมันปนน้ำมัน ชั้นหนืดสีเหลืองเข้มที่อุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 30) มีปริมาณไขมันน้ำมันเท่ากับ 15.91 ± 0.40 24.31 ± 0.25 29.13 ± 0.30 และ 29.36 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณแคโรทีนอยด์ 81.30 ± 0.51 83.19 ± 0.47 83.86 ± 0.28 และ 85.74 ± 0.16 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 13) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 13 ปริมาณน้ำมันและปริมาณแคโรทีนอยด์ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 30-120 นาที

Time (min)	Yield (%)	Carotene content (mg/kg)
30	15.91 ± 0.40^d	81.30 ± 0.51^c
60	24.31 ± 0.25^c	83.19 ± 0.47^b
90	29.13 ± 0.30^b	83.86 ± 0.28^b
120	29.36 ± 0.99^a	85.74 ± 0.16^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

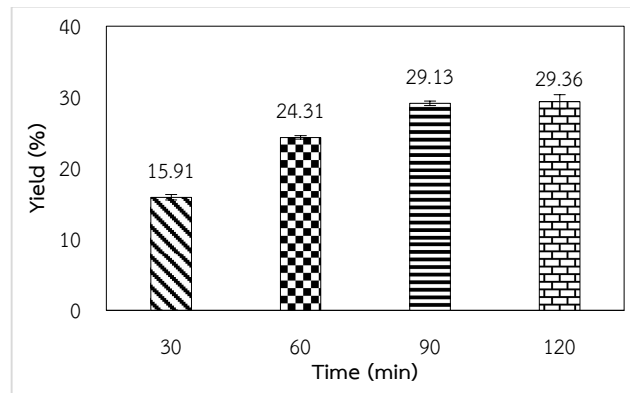
ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณไขมันน้ำมันเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 31) และปริมาณสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 32) สอดคล้องกับรายงานของ Phan Tai และ Brunner (2019) สกัดกากเส้นใยปาล์มน้ำมันในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความดัน 300 บาร์ เวลา 120 นาที พบว่า ปริมาณน้ำมันและปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกด้วย จึงเลือกระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอลสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด นำมาศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการผลิตของการสกัดดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว



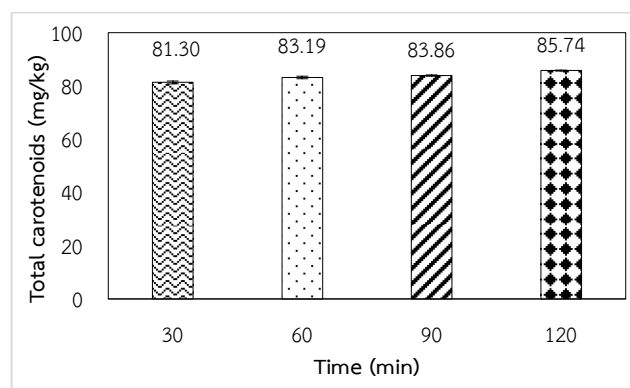
(ก)

(ข)

ภาพที่ 30 ตัวอย่างไขมันน้ำมันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 90 นาที (ก) ระยะเวลา 120 นาที (ข)



ภาพที่ 31 ปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที



ภาพที่ 32 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของไขมันน้ำมันที่สกัดได้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที

องค์ประกอบของกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที พบว่า ปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated fatty acid) มากที่สุด ประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก (C16:0) มากที่สุดอยู่ในช่วง 41.39-45.54 เปอร์เซ็นต์ โดยมีกรดโอเลอิก (C18:1) อยู่ในช่วง 40.25-39.10 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ กรดไขมันสเตียริก (C18:0) อยู่ในช่วง 3.77-4.64 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 14) ผลของระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณกรดไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

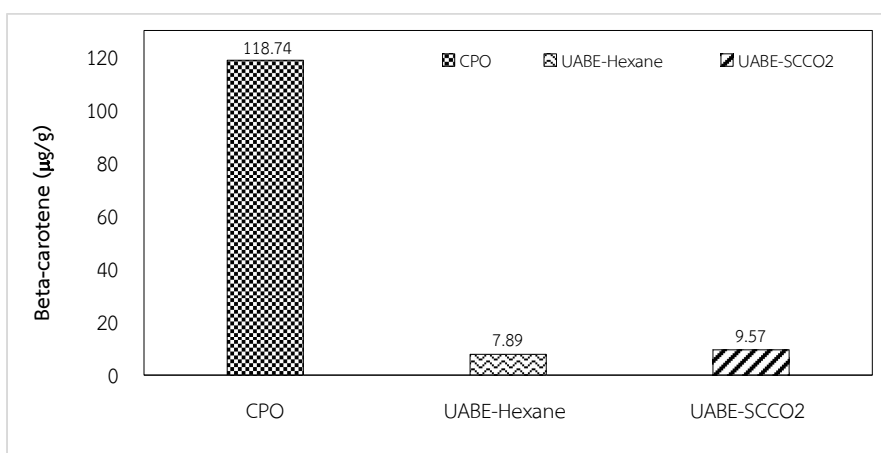
ตารางที่ 14 องค์ประกอบกรดไขมันของไขมันน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ระยะเวลา 30-120 นาที

Fatty acid (%)	Time (min)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
Saturated fatty acid				
Caprylic acid (C8:0)	0.14	0.10	0.05	0.06
Capric acid (C10:0)	0.15	0.10	0.05	0.06
Lauric acid (C12:0)	2.13	1.52	0.85	0.93
Myristic acid (C14:0)	1.90	1.76	1.20	1.29
Pentadecanoic acid (C15:0)	0.06	0.06	0.05	0.05
Palmitic acid (C16:0)	41.39	43.47	43.29	45.54
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.09	0.09	0.10	0.11
Stearic acid (C18:0)	3.77	3.73	4.71	4.64
Arachidic acid (C20:0)	0.25	0.24	0.37	0.36
Behenic acid (C22:0)	-	-	0.06	0.07
Lignoceric acid (C24:0)	-	-	0.06	0.10
Total saturated fatty acid	49.88	51.08	50.80	53.22
Monounsaturated fatty acid				
Palmitoleic acid (C16:1n7c)	0.18	0.18	0.14	0.14
trans-9-Elaidic acid (C18:1n9t)	0.10	0.07	0.09	0.24
Oleic acid (C18:1n9c)	40.25	39.09	40.02	39.10
cis-11-Eicosenoic acid (C20:1n9)	0.11	0.10	0.15	0.13
Total monounsaturated fatty acid	40.52	39.45	40.39	39.62
Polyunsaturated fatty acid				
Linoleic acid (C18:2n6c)	9.21	9.20	8.58	6.98
Alpha-linolenic acid (C18:3n3)	0.28	0.26	0.23	0.18
Total polyunsaturated fatty acid	9.60	9.46	8.81	7.16
Total fatty acid	100.00	100.00	100.00	100.00

ปริมาณเบต้า-แคโรทีน (Beta-Carotene) ตามวิธีของ AOAC (2019) โดยใช้ High Pressure Liquid Chromatographic (HPLC) เลือกตัวอย่างไขมันน้ำมันที่มีปริมาณ Carotene content สูงที่สุดที่สภาวะการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล พบว่า น้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณ Carotene content เท่ากับ 118.74 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานมีปริมาณเบต้า-แคโรทีน เท่ากับ 7.89 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดมีปริมาณเบต้า-แคโรทีน สูงกว่าการใช้ตัวทำละลายในการสกัด (ภาพที่ 33) และมีค่าเท่ากับ 9.57 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 ปริมาณเบต้าแคโรทีน และปริมาณวิตามินเอของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

Sample	Beta-carotene (mg/kg)	Vitamin A ($\mu\text{g}/100\text{g}$)
CPO	118.74	1,979.00
UABE-Hexane	7.89	131.57
UABE-SCCO ₂	9.57	159.55



ภาพที่ 33 ปริมาณเบต้าแคโรทีน ของน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

4.5.1 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด

การสกัด Pro-vitamin A และไขมันน้ำมันที่มีมูลค่าจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล ที่อัตราการไหลเท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที เวลา 120 นาที มีปริมาณไขมันน้ำมันเท่ากับ 16.23 ± 0.19 กรัม มีต้นทุนการผลิตต่อผลิตภัณฑ์ ขนาด 100 กรัม เป็นเงิน 201 บาท (ตารางที่ 16) ดังนี้

ตารางที่ 16 ต้นทุนการสกัดไขมันน้ำมันจากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ขนาด 100 กรัม

รายการ	จำนวน	ราคา (บาท)
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.5%	600 ลิตร	103.00
เมทานอล	60 มิลลิลิตร	18.00
บรรจุภัณฑ์	1 ชิ้น	50.00
อื่นๆ (ค่าแรง ค่าเครื่องจักร ค่าไฟ)	-	30.00
รวม		201.00

4.6 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

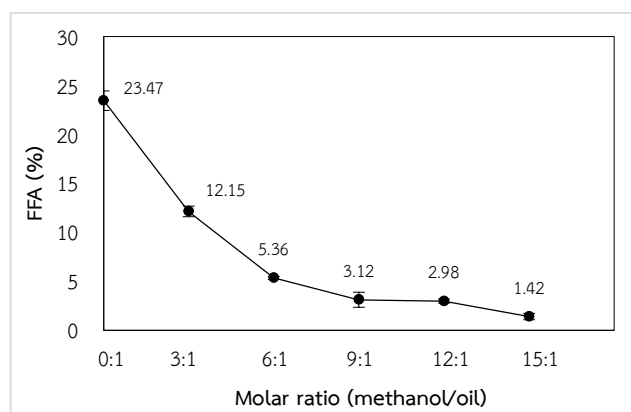
4.6.1 ผลของปริมาณเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

น้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (UABE waste oil) มีปริมาณ 23.96 ± 1.33 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีกรดไขมันอิสระสูงมีค่าเท่ากับ 23.47 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 849.10 g/mol มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันปาล์มดิบ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์ ใช้กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ระยะเวลา 30 นาที พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 34) และมีค่าเท่ากับ 12.15 ± 0.54 5.36 ± 0.15 3.12 ± 0.76 2.98 ± 0.21 และ 1.42 ± 0.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่า Conversion ของการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 35) มีค่าเท่ากับ 48.22 ± 2.31 77.17 ± 0.66 86.70 ± 3.23 87.29 ± 0.89 และ 93.96 ± 1.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 17) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับรายงานของ Punvichai และคณะ (2021) ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าปริมาณเมทานอลที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้อย่างรวดเร็ว และปริมาณกรดไขมันอิสระที่น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากการทดลองสรุปได้ว่าอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 15:1 โมลาร์ ลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือ 1.42 ± 0.33 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอน 4.6.2 ต่อไป

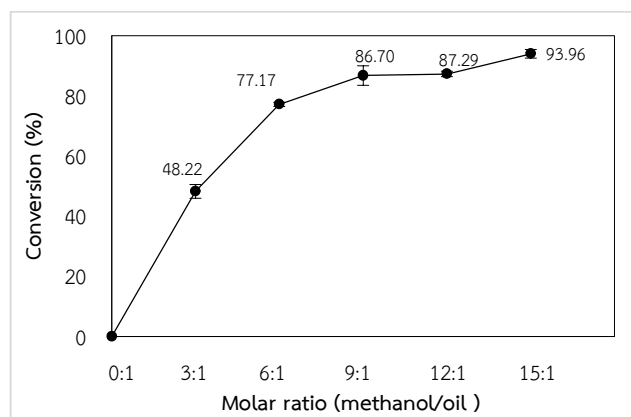
ตารางที่ 17 ปริมาณกรดไขมันอิสระและค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์

Molar ratio (methanol/oil)	FFA (%)	Conversion (%)
0:1	23.47±0.99 ^e	-
3:1	12.15±0.54 ^d	48.22±2.31 ^d
6:1	5.36±0.15 ^c	77.17±0.66 ^c
9:1	3.12±0.76 ^b	86.70±3.23 ^b
12:1	2.98±0.21 ^b	87.29±0.89 ^b
15:1	1.42±0.33 ^a	93.96±1.41 ^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 34 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์



ภาพที่ 35 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์

4.6.2 ผลของทำละลายร่วม tetrahydrofuran, dichlorobenzene และ toluene ต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เลือกอัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 15:1 โมลาร์ จากการทดลองที่ 4.6.1 ร่วมกับตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran, dichlorobenzene และ toluene ปริมาตร 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ (v/v) ใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น เท่ากับ 23.46 ± 0.46 เปอร์เซ็นต์ ตัวทำละลายร่วมทุกชนิดมีแนวโน้มทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลง ตัวทำละลายร่วม dichlorobenzene ปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือ เท่ากับ 0.96 ± 0.18 เปอร์เซ็นต์ ตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran ปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือเท่ากับ 4.63 ± 0.17 เปอร์เซ็นต์ และตัวทำละลายร่วม toluene สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 1.52 ± 0.13 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 18) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

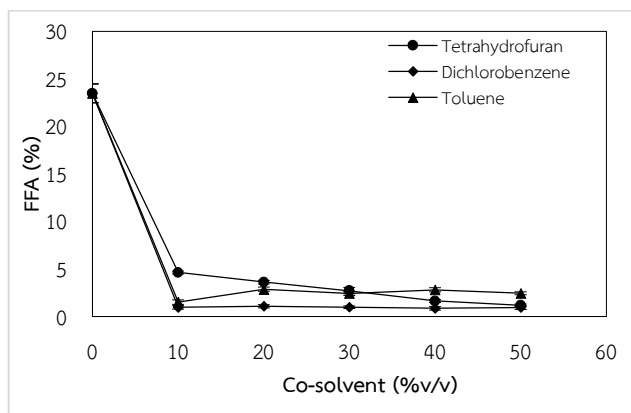
ตารางที่ 18 ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กับตัวทำละลายร่วม tetrahydrofuran dichlorobenzene และ toluene 10-50 เปอร์เซ็นต์ (v/v)

(%v/v)	Tetrahydrofuran		Dichlorobenzene		Toluene	
	FFA (%)	Conversion (%)	FFA (%)	Conversion (%)	FFA (%)	Conversion (%)
0	23.47 ± 0.99^f	-	23.47 ± 0.99^a	-	23.47 ± 0.99	-
10	4.64 ± 0.16^e	80.25 ± 0.69^e	0.96 ± 0.18^b	95.92 ± 0.75^{ab}	1.52 ± 0.24^a	93.51 ± 1.04^a
20	3.62 ± 0.19^d	84.56 ± 0.80^d	1.08 ± 0.16^b	95.41 ± 0.68^a	2.87 ± 0.22^c	87.77 ± 0.94^c
30	2.72 ± 0.33^c	88.42 ± 1.43^c	0.98 ± 0.13^b	95.81 ± 0.56^{ab}	2.44 ± 0.21^b	89.62 ± 0.88^b
40	1.63 ± 0.14^b	93.05 ± 0.61^b	0.86 ± 0.18^b	96.31 ± 0.74^b	2.81 ± 0.21^c	88.01 ± 0.91^c
50	1.18 ± 0.13^a	94.98 ± 0.53^a	0.95 ± 0.20^b	95.95 ± 0.83^{ab}	2.44 ± 0.17^b	89.60 ± 0.70^b

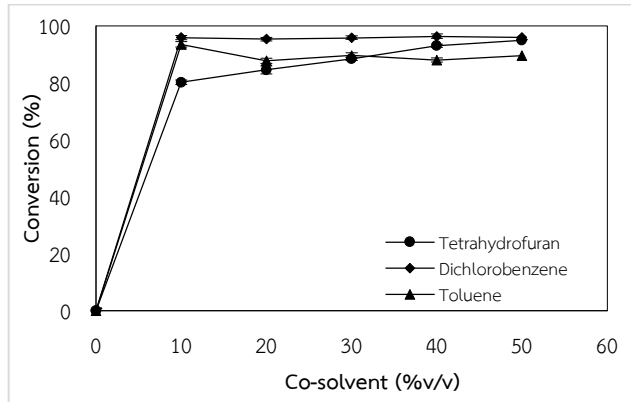
หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวทำละลายร่วมทุกชนิดมีแนวโน้มทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลง เมื่อปริมาณตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 36) และเปอร์เซ็นต์ Conversion เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 37) สุนทร และคณะ (2014) พบว่าตัวทำละลายร่วมช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคของน้ำมันและแอลกอฮอล์ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Lin และ Hsiao (2013) เดิมตัวทำละลายร่วมทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงอย่างรวดเร็ว และอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล คือ น้ำมันและแอลกอฮอล์มีขั้วและความหนาแน่นที่ต่างกัน ตัวทำละลายร่วมสามารถลดแรงตึงผิวระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันได้ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอีกด้วย จึงเลือกตัวทำละลายร่วม dichlorobenzene ปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ ที่สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือ 0.96 ± 0.18 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองร่วมกับโมเลกุลลาร์ซีฟลดปริมาณความชื้นหลังการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอน 4.6.3 ต่อไป



ภาพที่ 36 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับตัวทำละลายร่วม ปริมาตร 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 37 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับตัวทำละลายร่วม ปริมาตร 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์

4.6.3 ผลของโมเลกุลาร์ซีฟต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

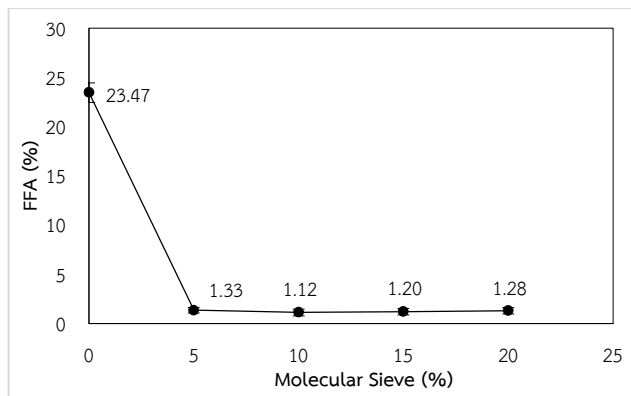
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 15:1 โมลาร์ ตัวทำละลายร่วม dichlorobenzene ปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ สารดูดความชื้นโมเลกุลาร์ซีฟ 5 10 15 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ระยะเวลา 30 นาที พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อปริมาณโมเลกุลาร์ซีฟเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 38) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 23.46 ± 0.46 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 1.33 ± 0.11 1.12 ± 0.12 1.19 ± 0.11 และ 1.28 ± 0.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่า Conversion เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 39) มีค่าเท่ากับ 94.32 ± 1.19 95.24 ± 1.43 94.91 ± 1.41 และ 94.52 ± 1.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 19) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 19 ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินพอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับโมเลกุลาร์ซีฟ 5-20 เปอร์เซ็นต์

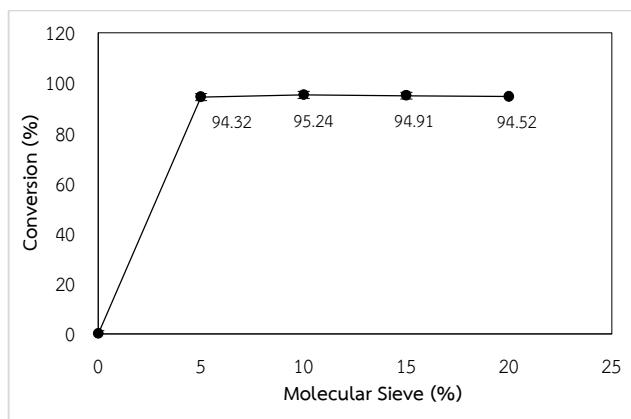
Molecular Sieve (%)	FFA (%)	Conversion (%)
0	23.47 ± 0.99^b	-
5	1.33 ± 0.28^a	94.32 ± 1.19^a
10	1.12 ± 0.34^a	95.24 ± 1.43^a
15	1.20 ± 0.33^a	94.91 ± 1.41^a
20	1.28 ± 0.31^a	94.52 ± 1.34^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดน้ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล เป็นสาเหตุสำคัญที่ชะลอการเกิดปฏิกิริยา การใช้โมเลกุลาร์ซีฟที่มีคุณสมบัติชอบน้ำและดูดซับโมเลกุลน้ำ เพื่อลดปริมาณน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระ การเติมโมเลกุลาร์ซีฟช่วยให้ปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มคงที่เมื่อปริมาณโมเลกุลาร์ซีฟ 5 เปอร์เซ็นต์ และ ค่า Conversion มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและคงที่ สอดคล้องกับรายงานของ Lin และ Ma (2021) พบว่าการใช้โมเลกุลาร์ซีฟสามารถกำจัดน้ำในน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 60 นาที ดังนั้นเลือกโมเลกุลาร์ซีฟปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ใช้ในการทดลองที่ 4.6.4 ต่อไป



ภาพที่ 38 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับโมเลกุลลาร์ซีฟ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 39 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ร่วมกับโมเลกุลลาร์ซีฟ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/v)

4.6.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

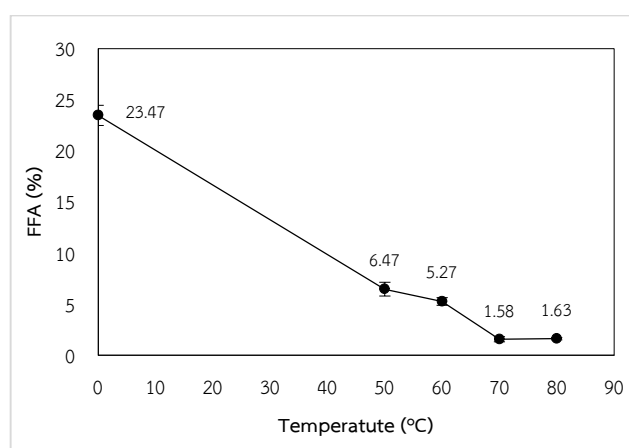
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 15:1 โมลาร์ ตัวทำละลายร่วม dichlorobenzene 10 เปอร์เซ็นต์ (v/v) และปริมาณโมเลกุลลาร์ซีฟ 5 เปอร์เซ็นต์ มีกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน ระยะเวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 23.46 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 6.47 ± 0.22 4.40 ± 0.50 1.58 ± 0.09 และ 1.63 ± 0.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่า Conversion เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 72.42 ± 2.85 81.24 ± 6.35 93.28 ± 1.11 และ 93.04 ± 0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 20) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 20 ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน

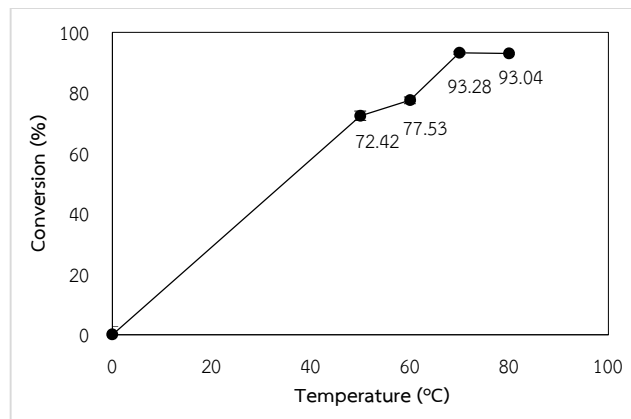
Temperature (°C)	FFA (%)	Conversion (%)
0	23.47±0.99 ^d	-
50	6.47±0.67 ^c	72.42±2.85 ^c
60	4.40±1.49 ^b	81.24±6.35 ^b
70	1.58±0.26 ^a	93.28±1.11 ^a
80	1.63±0.12 ^a	93.04±0.50 ^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 40) และทำให้ค่า Conversion เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 41) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากที่สุด สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือเพียง 1.58 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Aggarwal และคณะ (2018) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและช่วยลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้อย่างรวดเร็ว แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าจุดเดือดของเมทานอล มีแนวโน้มที่สูญเสียเมทานอลที่ทำให้ปฏิกิริยาอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง จำเป็นต้องใช้ความดันช่วยในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเลือกระดับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ใช้ในการทดลองที่ 4.6.5 ต่อไป



ภาพที่ 40 ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน



ภาพที่ 41 ค่า Conversion ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส

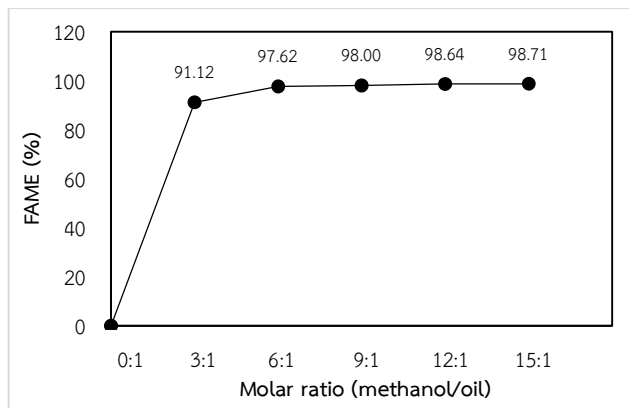
4.6.5 ไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวอย่างน้ำมันดินฟอกสีที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันการทดลองที่ 4.3.4 ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 โมลาร์ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น ปริมาตร 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ปริมาณ Fatty Acid Methyl Ester (FAME) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเมทานอลเพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 42) และมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 91.12 97.62 98.00 98.64 และ 98.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 21) เป็นไปตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานมีค่า FAME ไม่น้อยกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์ และ สอดคล้องกับรายงานของ Meher และคณะ (2006) เมื่ออัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น ปริมาณ FAME หรือไบโอดีเซลมีค่าสูงขึ้น และที่ปริมาณเมทานอลต่อ Karanja oil ที่อัตราส่วน 12:1 ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้นมีปริมาณเท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและสมบูรณ์ขึ้น รวมทั้งเกิดเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 21 ปริมาณ Fatty Acid Methyl Ester ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 โมลาร์ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที

Molar ratio (methanol/oil)	ME (%)	TG (%)	FFA (%)	DC (%)	MG (%)
3:1	91.12±0.36 ^d	6.65±0.39 ^d	0.54±0.09 ^b	1.22±0.20 ^b	0.47±0.08 ^b
6:1	97.62±0.20 ^c	1.58±0.14 ^c	0.27±0.04 ^a	0.23±0.11 ^a	0.30±0.10 ^a
9:1	98.00±0.15 ^b	0.95±0.07 ^b	0.46±0.09 ^b	0.32±0.08 ^a	0.28±0.06 ^a
12:1	98.64±0.16 ^a	0.53±0.09 ^a	0.28±0.05 ^a	0.29±0.08 ^a	0.26±0.02 ^a
15:1	98.71±0.19 ^a	0.52±0.06 ^a	0.26±0.07 ^a	0.30±0.07 ^a	0.22±0.08 ^a

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 42 ปริมาณ Fatty Acid Methyl Ester ของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.6.6 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน การเลือกอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันจาก 15:1 โมลาร์ ร่วมกับตัวทำละลายร่วม Dichlorobenzene 10 เปอร์เซ็นต์ (%v/v) เต็มโมเลกุลลาร์ซีฟ 5 เปอร์เซ็นต์ ใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นปริมาตร 1.0 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 โมลาร์ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลจากน้ำมันดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยวิธี 2 ขั้นตอน จำนวน 1 ลิตร มีราคาต้นทุนการผลิต 53 บาทต่อลิตร (ตารางที่ 22)

ตารางที่ 22 ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

รายการ	จำนวน	ราคา (บาท)
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน		
Methanol ถังละ 1,200 บาท ขนาด 18 ลิตร	388 มิลลิลิตร	26
Sulfuric acid ขวดละ 660 บาท ขนาด 2.5 ลิตร	10 มิลลิลิตร	3
รวมเป็นเงิน		29
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน		
Methanol ถังละ 1,200 บาท ขนาด 18 ลิตร	203 มิลลิลิตร	14
Potassium Hydroxide ขวดละ 480 บาท ขนาด 1 กิโลกรัม	20 กรัม	10
รวมเป็นเงิน		24
รวมเงินทั้งสิ้น		53

4.7 ผลของการนำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

4.7.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว

นำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมาสกัदन้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน นำมาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก อัตราส่วน 1:1 (w/v) ความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ (v/v) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาส่องด้วยกล้อง Stereo Microscopes เลนส์ใกล้ตา กำลังขยาย 10x และเลนส์ใกล้วัตถุ 4.7x กำลังขยาย (ภาพที่ 43) ซึ่งถ่ายภาพที่กำลังขยาย 47 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นผิว และสีของดินฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก มีสีพื้นผิวคล้ายกับดินฟอกสีที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (ภาพที่ 44) สอดคล้องกับผลการทดลองของ (Bachmann *et al.*, 2020) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำดินฟอกสีกลับมาใช้ใหม่คือ 108 นาที ที่อุณหภูมิ 587 องศาเซลเซียส ลักษณะของดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Machmudah และคณะ (2022) ลักษณะทางกายภาพของดินฟอกสีก่อนใช้งานมีสีน้ำตาลเทาเนื้อละเอียด เมื่อผ่านกระบวนการฟอกสีดินฟอกสีมีลักษณะจับตัวเป็นก้อน สีเทาเข้ม และเมื่อสกัदन้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซนจะมีสีเทาจางลง เนื่องจากตัวทำละลายเฮกเซนสามารถกำจัดสารสี หรือสิ่งสกปรกบางส่วนออกได้ ทำให้มีความคล้ายคลึงกับดินฟอกสีก่อนการใช้งาน (ABE)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

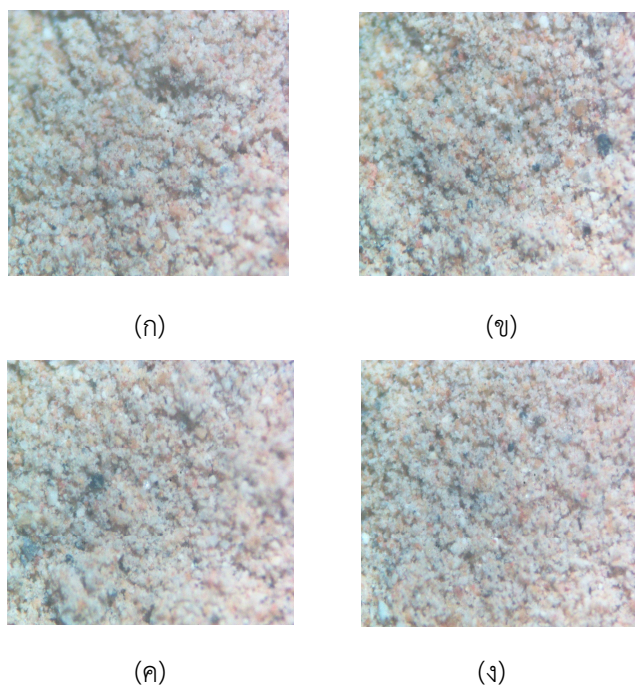


(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 43 ดินฟอกสี (ก) ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ข) ดินฟอกสีที่ผ่านการสกัदन้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (ค) ดินฟอกสี กำลังขยาย 47 เท่า (ง) ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว กำลังขยาย 47 เท่า (ฉ) และดินฟอกสีที่ผ่านการสกัदन้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน กำลังขยาย 47 เท่า (ฉ)



ภาพที่ 44 ดินฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก กำลังขยาย 47 เท่า: 1 เปอร์เซนต์ (ก) 2 เปอร์เซนต์ (ข) 3 เปอร์เซนต์ (ค) และ 4 เปอร์เซนต์ (ง)

4.7.2 ผลการทดสอบการฟอกสีของน้ำมันปาล์มดิบ (Bleaching test)

ทดสอบประสิทธิภาพของดินฟอกสีหลังจากการ Regenerated ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 เปอร์เซนต์ นำมาทดสอบการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบด้วยวิธี Bleaching test เติมน้ำมันฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่ลงในน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 8 เปอร์เซนต์ กวนผสมเป็นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกดินฟอกสีทิ้งให้เย็น นำมาวัดสี ด้วยเครื่องวัดสี Lovibond PFXi-950 รายงานค่าสีเป็น RYBN พบว่าดินฟอกสีที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 เปอร์เซนต์ สามารถลดค่าสีแดงของน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 46.33 ± 3.18 ลดลงเหลือ 13.07 ± 0.24 11.97 ± 0.09 11.00 ± 0.06 และ 11.00 ± 0.00 ตามลำดับ (ตารางที่ 23) ซึ่งความสามารถในการดูดซับค่าสีแดง (R) ในน้ำมันปาล์มดิบ และที่ปริมาณกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 3 และ 4 เปอร์เซนต์ มีประสิทธิภาพไม่ต่างกับการใช้ดินฟอกสีที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีค่าสีแดงลดลงเท่ากับ 10.00 ± 0.00 และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากกรดซัลฟูริกจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของพื้นที่ผิว และอุณหภูมิสูงจะช่วยกำจัดสิ่งตกค้างหลุดออกได้ (Boukerroui & Ouali, 2000)

ตารางที่ 23 คุณภาพสีของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการฟอกสีด้วยดินฟอกสีที่ผ่านการ Regenerated กลับมาใช้งานใหม่

Sample	RYBN			
	Red (R)	Yellow (Y)	Blue (B)	Neutral (N)
CPO	46.33±3.18 ^a	0.00±0.00 ^b	6.20±3.04 ^a	0.00±0.00 ^c
ABE	10.00±0.00 ^c	70.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c
UABE (H ₂ SO ₄ 1%)	13.07±0.24 ^b	70.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.43±0.17 ^a
UABE (H ₂ SO ₄ 2%)	11.97±0.09 ^{bc}	70.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.30±0.12 ^{ab}
UABE (H ₂ SO ₄ 3%)	11.00±0.06 ^{bc}	70.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.10±0.00 ^{bc}
UABE (H ₂ SO ₄ 4%)	11.00±0.00 ^{bc}	70.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.30±0.03 ^c

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางหมายถึงค่าเฉลี่ย+ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

4.7.3 ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ต้นทุนศึกษาการนำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

การนำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เผาด้วยความร้อน 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีราคาต้นทุนการผลิต 6.78 บาทต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 24)

ตารางที่ 24 ต้นทุนการผลิตดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

รายการ	จำนวน	ราคา (บาท)
Sulfuric acid ขวดละ 660 บาท ขนาด 2.5 ลิตร	20 มิลลิลิตร	5.28
ประมาณการค่าแรง ค่าเครื่องจักร ค่าไฟ (ต่อครั้ง)		1.50
รวมเป็นเงิน		6.78

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว แบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ การสกัด Carotene content หรือ Pro-vitamin A ด้วยเทคนิค คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี 2 ขั้นตอน และการ Regenerated นำกลับมาใช้ใหม่ในการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบ พบว่า

1. การสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ สกัดร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล อัตราการไหลของตัวทำละลาย 0.5 มิลลิลิตร/นาที เวลา 120 นาที มีปริมาณไขมันน้ำมันที่สกัดได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ 29.36 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณแคโรทีน 85.74 ± 0.16 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีปริมาณบีตาแคโรทีน 9.57 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน สามารถสกัด Pro-vitamin A ได้ดี และมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 201 บาทต่อ 100 กรัมไขมันน้ำมัน

2. ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณไขมันน้ำมันเหลือประมาณ 23.96 ± 1.33 เปอร์เซ็นต์ มีกรดไขมันอิสระสูงเท่ากับ 23.47 ± 0.99 เปอร์เซ็นต์ การผลิตไบโอดีเซลจำเป็นต้องใช้วิธีแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ด้วยปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมัน 15:1 โมลาร์ ตัวทำละลายร่วม dichlorobenzene ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ (v/v) สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 23.46 ± 0.46 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.96 ± 0.18 เปอร์เซ็นต์ และการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 5 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดปริมาณน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอัตราส่วนเมทานอลต่อไขมันที่เหมาสมต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ 6:1 โมลาร์ ใช้ต่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่า FAME เท่ากับ 97.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามประกาศมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน มีค่า FAME ไม่น้อยกว่า 96.50 เปอร์เซ็นต์ และมีต้นทุนการผลิต 53 บาทต่อลิตร

3. การนำดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เหนือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบไม่ต่างจากดินฟอกสีที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และมีต้นทุนการผลิตนำกลับมาใช้ใหม่ 6.78 บาทต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วจากอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ มีปริมาณมากต่อปี เป็นปัญหาในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ต้องใช้พื้นที่มาก ค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัด และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม หากเป็นไปได้ในอนาคตควรมีศึกษาทดลองและใช้ประโยชน์จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้วในเรื่องพลังงาน สบู่ หรือสารทำความสะอาด อาหารสัตว์ การนำกลับมาใช้ใหม่ และอื่นๆ จะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน และประเทศชาติ

บรรณานุกรม

- สุนทร แสงส่อง, ปาทินันท์ แสงปิ่น, & กิตติวัฒน์ วงศ์พิศาล. (2557). จลนศาสตร์และการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการเติมตัวทำละลายร่วม. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 24(1), 178-188.
- ธีรศักดิ์ ปั่นวิชัย. (2565). *เทคโนโลยีปาล์มน้ำมัน*. หาดใหญ่: ดิจิตอล พรินท์.
- Abd Majid, R., & Mat, C. R. C. (2017). Regenerated spent bleaching earth for the decolourisation and bod reduction of palm oil mill effluent. *Journal of Oil Palm Research*, 29(4), 579-587.
- Aggarwal, J. K., Arora, R., & Kaushik, D. (2018). Two step biodiesel production from High Free Fatty Acid Spent Bleaching Earth. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6(2), 24-27.
- Akanda, M. J. H., Sarker, M. Z. I., Ferdosh, S., Manap, M. Y. A., Ab Rahman, N. N. N., & Ab Kadir, M. O. (2012). Applications of Supercritical Fluid Extraction (SFE) of Palm Oil and Oil from Natural Sources. *Molecules*, 17(2), 1764-1794.
- Ali, M. M., Attia, A. A., Taha, M. H., El-Maadawy, M. M., Abo-Raia, A. M., & Abouria, A. (2019). Application of Acid Activated Bentonite for Efficient Removal of Organic Pollutants from Industrial Phosphoric Acid: Kinetic and Thermodynamic Study. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain.
- Bachmann, S. A. L., Valle, R. de C. S. C., Vegini, A. A., & Tavares, L. B. B. (2020). Determination of optimum conditions for thermal regeneration and characterization of a spent bleaching earth. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2).
- Bayrak, Y. (2003). Adsorption isotherms in bleaching hazelnut oil. *The Journal of the American Oil Chemists' Society*, 80(11): 1143-1146.
- Benade, A. J. (2003). Place for palm fruit oil to eliminate vitamin A deficiency. *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, 12(3).
- Blackburn, J. M., Long, D. P., Cabanas, A., & Watkins, J. J. (2001). Deposition of conformal copper and nickel films from supercritical carbon dioxide. *Science*, 294(5540), 141-145.
- Boukerroui, A., & Ouali, M.-S. (2000). Regeneration of a spent bleaching earth and its reuse in the refining of an edible oil. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 75(9), 773-776.
- Burri, B. J. (2013). Carotenoids: Chemistry, Sources and Physiology. In *Encyclopedia of Human Nutrition* (pp. 283-291). Elsevier.

- Chua, K. H. (2004). *Production of Ethyl Ester (Biodiesel) From Used Frying Oil: Optimization of Transesterification Process using Microwave Irradiation*. 6(1).
- Elkady, M. F., Zaatout, A., & Balbaa, O. (2015). Production of Biodiesel from Waste Vegetable Oil via KM Micromixer. *Journal of Chemistry*, 1-9.
- Foletto, E. L., Alves, C. C. A., Sganzerla, L. R., & Porto, L. M. (2002). Regeneration and utilization of spent bleaching clay. *Latin American applied research*, 32(2), 205-208.
- Gee, P. T. (2007). Analytical characteristics of crude and refined palm oil and fractions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 373-379.
- Guadalupe Aspromonte, S., Andrés Piovano, F., Alonso, E., & Viviana Boix, A. (2020). Synthesis of Supported Mesoporous Catalysts Using Supercritical CO₂. *Advances in Microporous and Mesoporous Materials*, 1.
- Guan, G., Sakurai, N., & Kusakabe, K. (2009). Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents. *Chemical Engineering Journal*, 146(2), 302-306.
- Hillel, D., (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego.
- Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology-A review. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 169-185.
- Kaynak, G., Ersoz, M., & Kara, H. (2004). Investigation of the properties of oil at the bleaching unit of an oil refinery. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280(1), 131-138.
- Kheang, L. S., Foon, C. S., May, C. Y., & Ngan, M. A. (2006). A Study of Residual Oils Recovered from Spent Bleaching Earth: Their Characteristics and Applications. *American Journal of Applied Sciences*, 3(10), 2063-2067.
- Lin, C.-C., & Hsiao, M.-C. (2013). Optimization of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil Assisted by Co-Solvent and Microwave Using a Two-Step Process. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 03(01), 1-6.
- Lin, C.-Y., & Ma, L. (2021). Comparison of Water-Removal Efficiency of Molecular Sieves Vibrating by Rotary Shaking and Electromagnetic Stirring from Feedstock Oil for Biofuel Production. *Fermentation*, 7(3), 132.
- Aggarwal, J. K., Arora, R., & Kaushik, D. (2018). Two step biodiesel production from High Free Fatty Acid Spent Bleaching Earth. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6(2), 24-27.
- Bachmann, S. A. L., Valle, R. de C. S. C., Vegini, A. A., & Tavares, L. B. B. (2020). Determination of optimum conditions for thermal regeneration and

- characterization of a spent bleaching earth. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2).
- Lin, C.-C., & Hsiao, M.-C. (2013). Optimization of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil Assisted by Co-Solvent and Microwave Using a Two-Step Process. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 03(01), 1-6.
- Lin, C.-Y., & Ma, L. (2021). Comparison of Water-Removal Efficiency of Molecular Sieves Vibrating by Rotary Shaking and Electromagnetic Stirring from Feedstock Oil for Biofuel Production. *Fermentation*, 7(3), 132.
- Machmudah, S., Maulana, N. A., Norman, A. S. M., Nyoto, V. M., Amrullah, I., Wahyudiono, Winardi, S., Wenten, I. G., & Goto, M. (2022). Oil removal from spent bleaching earth of vegetable oil refinery plant using supercritical carbon dioxide. *Heliyon*, 8(10).
- Md Zaidul, I., Nik Norulaini, N., & Mohd Omar, A. (2006). Separation/fractionation of triglycerides in terms of fatty acid constituents in palm kernel oil using supercritical CO₂. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(7), 1138-1145.
- Meher, L. C., Dharmagadda, V. S. S., & Naik, S. N. (2006). Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata oil for production of biodiesel. *Bioresource Technology*, 97(12), 1392-1397.
- Mu, B., & Wang, A. (2018). Regeneration and recycling of spent bleaching earth. *Handbook of ecomaterials*, 5, 3147-3167.
- MUSTAPA, A. N. (2008). Extraction of Palm Oil from Palm Mesocarp Using Sub-Critical R134a (Doctoral dissertation, Msc Thesis. Universiti Teknologi Malaysia).
- Noyan, H., Onal, M., & Sarikaya, Y. (2007). The effect of sulphuric acid activation on the crystallinity, surface area, porosity, surface acidity, and bleaching power of a bentonite. *Food Chemistry*, 105(1), 156-163.
- Nursulihatimarsyila. (2010). Deoiling and Regeneration Efficiencies of Spent Bleaching Clay. *American Journal of Applied Sciences*, 7(3), 434-437.
- Pattanaik, L., Pattnaik, F., Saxena, D. K., & Naik, S. N. (2019). Biofuels from agricultural wastes. In *Second and Third Generation of Feedstocks* (pp. 103-142). Elsevier.
- Phan Tai, H., & Brunner, G. (2019). Extraction of Oil and Minor Compounds from Oil Palm Fruit with Supercritical Carbon Dioxide. *Processes*, 7(2), 107.
- Pereira, C. G., & Meireles, M. A. A. (2010). Supercritical Fluid Extraction of Bioactive Compounds: Fundamentals, Applications and Economic Perspectives. *Food and Bioprocess Technology*, 3(3), 340-372.

- Pranowo, D., Dewanti, B. S. D., Fatimah, H., & Setyawan, H. Y. (2020). Optimization of regeneration process of spent bleaching earth. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 524(1),
- Punvichai, T., Amor, A., Tardan, E., Palu, S., & Pioch, D. (2016). SC-CO₂ Extraction of guayule biomass (*Parthenium argentatum*) - yield and selectivity towards valuable co-products, *lipids and terpenics*. 6(6), 1777-1787.
- Punvichai, T., & Pioch, D. (2019). Covalorization of Palm Oil-Refining by-Products as Soaps. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96(3), 329–336.
- Punvichai, T., Patisuwan, S., Pongkanpai, V., & Khamon, P. (2021). Two-step Biodiesel Production from Used Activated Bleaching Earth at Palm Oil Refining Plant. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(1), 7973-7980.
- Sahafi, S. M., Goli, S. A. H., Tabatabaei, M., Nikbakht, A. M., & Pourvosoghi, N. (2016). The reuse of waste cooking oil and spent bleaching earth to produce biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(7), 942-950.
- Sarier, N., & Guler, C. (1989). The mechanism of β - Carotene adsorption on activated montmorillonite. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 66(7), 917-923.
- Silva, S. M., Sampaio, K. A., Ceriani, R., Verh e, R., Stevens, C., De Greyt, W., & Meirelles, A. J. A. (2014). Effect of type of bleaching earth on the final color of refined palm oil. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2), 1258-1264.
- Simonelli, G., Ferreira J nior, J. M., Pires, C. A. de M., & Santos, L. C. L. dos. (2020). Biodiesel production using co-solvents: A review. *Research, Society and Development*, 9(1),
- Wafti, N. S. A., Yoo, C. K., Lin, S. W., Choong, T., Yaw, S., & Abdullah, L. C. (2011). Regeneration and characterization of spent bleaching clay. *Journal of Oil Palm Research*, 23, 999-1004
- Zhang, X., Rajagopalan, K., Lei, H., Ruan, R., & Sharma, B. K. (2017). An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: Microwave irradiation. *Sustainable Energy & Fuels*, 1(8), 1664-1699.
- Zschau, W. (2001). Bleaching of edible fats and oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 103(8), 505-551.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

1.1 การเตรียมสารละลาย Phenolphthalein 1 % (w/v)

ชั่ง Phenolphthalein 1 กรัม ละลายด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
คนจนเป็นสารละลายสีใส นำปรับปริมาตรด้วย Volumetric Flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.1 N

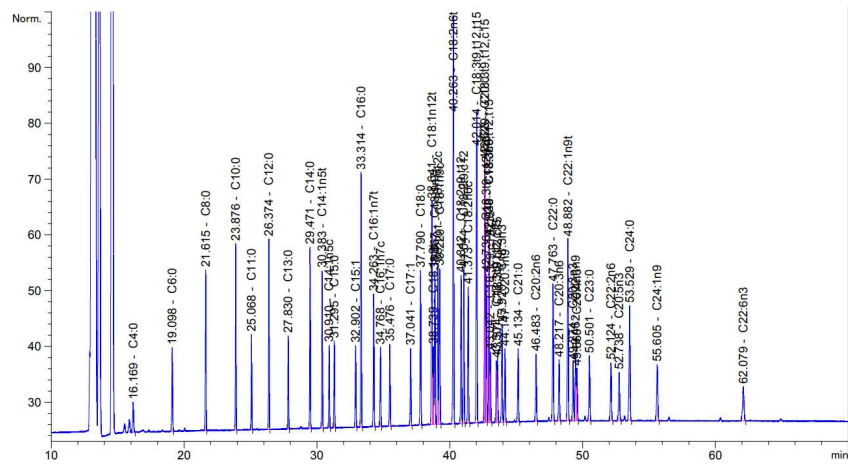
ชั่ง NaOH 4.1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น คนจนเป็นสารละลายสีใส และนำมาปรับ
ปริมาตรด้วย Volumetric Flask ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

หมายเหตุ Standardize NaOH 0.1%

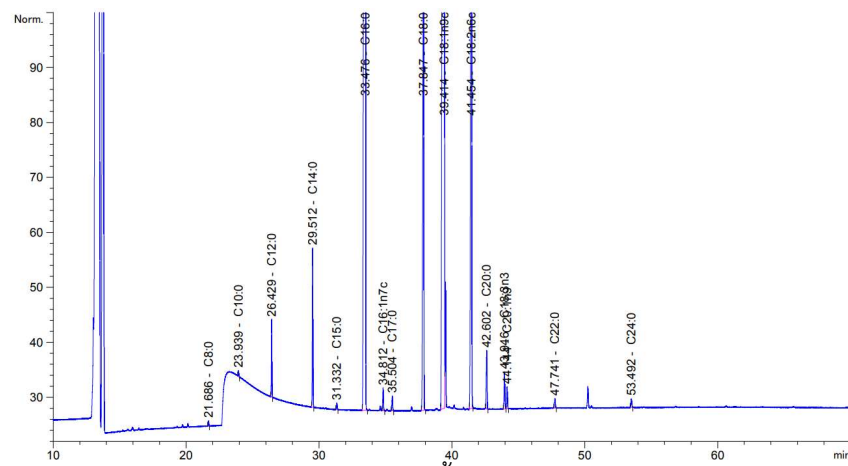
- นำ Potassium hydrogen phthalate อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
เวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น
- ชั่งน้ำหนัก 0.8 กรัม ใส่ในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ละลายให้เข้ากัน
- เติม Phenolphthalein 2-3 หยด นำไตเตรทด้วย NaOH 0.1 N จนเป็นสี
ชมพูจาง บันทึกปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไป นำมาคำนวณตามสูตร

$$\text{Normality of NaOH} = \frac{(g \times 1,000)}{(mL \times 204.216)}$$

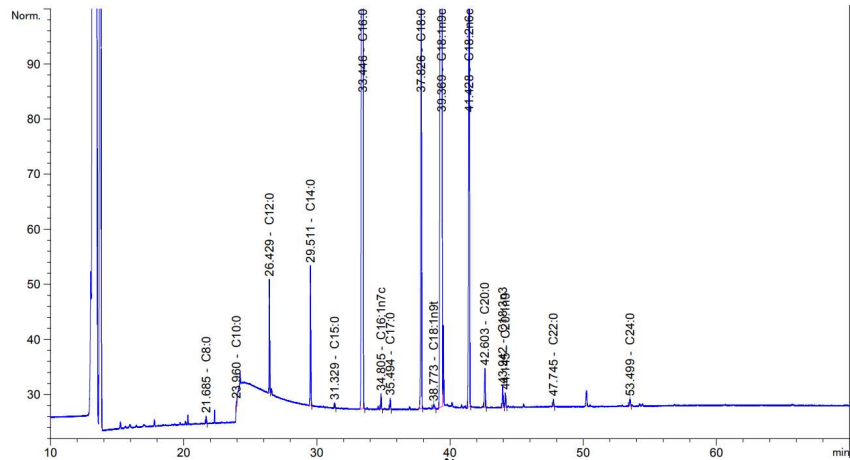
ภาคผนวก ข
รูปผลการทดลอง



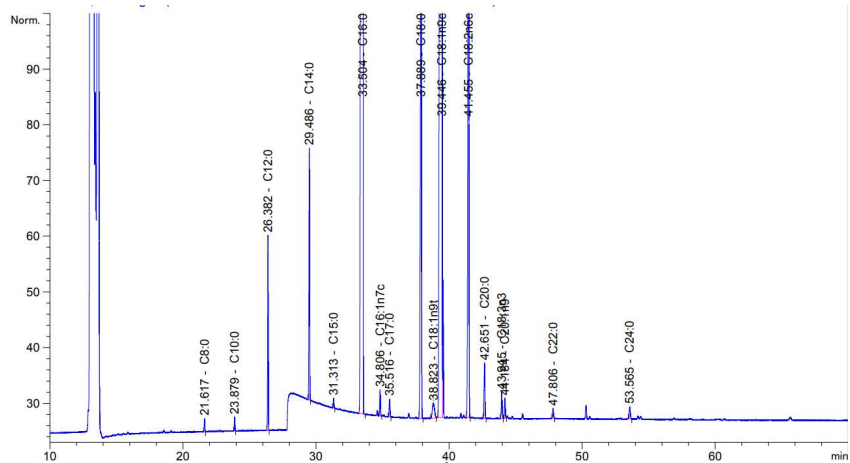
ภาพที่ 1 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานกรดไขมัน



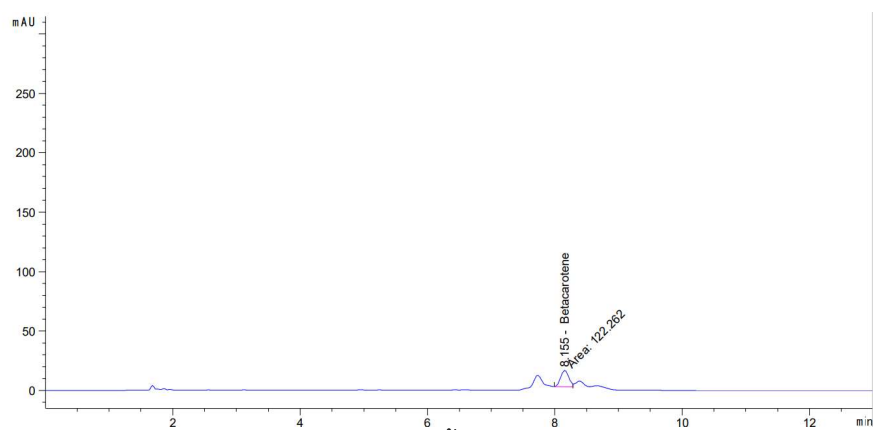
ภาพที่ 2 โครมาโทแกรมองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบ (CPO)



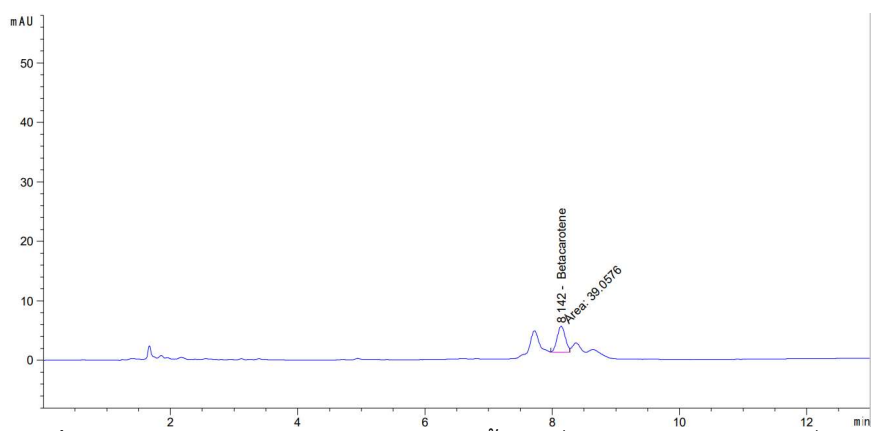
ภาพที่ 3 โครมาโทแกรมองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (UABE oil)



ภาพที่ 4 โครมาโทแกรมองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ สกัดร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล เวลา 120 นาที



ภาพที่ 5 โครมาโทแกรมเบต้า-แคโรทีนของน้ำมันปาล์มดิบ (CPO)



ภาพที่ 6 โครมาโทแกรมเบต้า-แคโรทีนของน้ำมันที่สกัดได้จากดินฟอกสีที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 250 บาร์ สกัดร่วมกับตัวทำละลายร่วมเมทานอล เวลา 120 นาที

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุปราณี ปฎิสุวรรณ
รหัสประจำตัวนักศึกษา 6340320404
วุฒิการศึกษา
วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2560
(เคมีเพื่ออุตสาหกรรม)

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2564
2. ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร ปีงบประมาณ 2565

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน (ถ้ามี)

1. ผู้ช่วยนักวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี