รายงานโครงการวิจัย

เรื่อง

Extraction of Para rubber seed oil by single screw press and supercritical carbon dioxide

การสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

โดย

นางสาวกาญจนา อั๋งสกุล 5832905423

นางสาว จุฑามาศ วะสมบัติ 5832914023

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

โครงการวิจัยการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและรายงานฉบับเต็มของโครงการวิจัยที่ส่งผ่านทางคณะฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด
The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

รายงานโครงงานวิจัย

เรื่อง

Extraction of Para rubber seed oil by single screw press and supercritical carbon dioxide

การสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

โดย

นางสาวกาญจนา อั้งสกุล 5832905423

นางสาว จุฑามาศ วะสมบัติ 5832914023

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Extraction of Para rubber seed oil by single screw press and supercritical carbon dioxide

Kanchana Aungsakul

Jutamas Wasombut

A project submitted in partial Senior Project subject (2306499)

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2018

ชื่อโครงการ การสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต
นิสิตผู้ทำโครงการ นางสาวกาญจนา อั้งสกุล
นางสาวจุฑามาศ วะสมบัติ
อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว
ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

เมล็ดยางพารามีน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 40 ถึง 50 โดยน้ำหนัก มีกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวอยู่ร้อยละ 83.70 และ 15.61 ตามลำดับ ในปัจจุบันน้ำมันจากเมล็ดยางพาราถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมเคลือบผิว และผลิตเป็นไบโอดีเซล เป็นต้น การสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราใช้วิธีบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเกลียว เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ง่ายและเวลาในการสกัดน้อย แต่ในระหว่างการสกัดอาจเกิดอุณหภูมิสูงทำให้ไปทำลายองค์ประกอบของน้ำมันและมีน้ำมันเหลืออยู่ในกากมาก การสกัดด้วยตัวทำละลายด้วยวิธีซอกห์เลตเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นำมาใช้สกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราเพราะให้ร้อยละผลได้สูง อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอาจเกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ได้เพื่อปรับปรุงการสกัด งานวิจัยนี้จึงใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมาช่วยในการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดยาพาราที่ผ่านบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว โดยศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันที่ความดัน 200 250 และ 300 บาร์ และที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่ภาวะความดัน 300 บาร์ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้สูงที่สุดคือ 15.96 ± 0.38 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันที่สกัดด้วยวิธีซอกห์เลต (22.08%) พบว่าการสกัดคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีประสิทธิ์ในการสกัดน้ำมัน 72.28% ผลการศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าน้ำมันจากการสกัดทั้ง 3 วิธี มีองค์ประกอบของน้ำมันใกล้เคียงกันโดยมีกรดไลโนเลอิกเป็นองค์ประกอบมากที่สุดร้อยละ 43.52 - 48.71

คำสำคัญ: น้ำมัน, เมล็ดยาพารา, เครื่องอัดสกรูเดียว, คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ภาควิชาเคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....
ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขา เคมีวิศวกรรม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....

Title Extraction of Para rubber seed oil by single screw press and supercritical carbon dioxide

Student name Miss Kanchana Aungsakul

Miss Jutamas Wasombut

Thesis Advisor Prof. Dr. Somkiat Ngamprasertsith

Thesis Co-advisor Dr. Ruengwit Sawangkeaw

Abstract

Para rubber seeds are the by-product from rubber tree. Rubber seeds consist of 40-50 wt % of oil, which is 83.70% of saturated and 15.6% of unsaturated fatty acid, respectively. Para rubber seed oil has recently used in many industries such as rubber industry, protective coating industry or be the reactant of biodiesel oil. Screw pressing is the most popular method that uses to extract oil from Para rubber seed because it takes a short time. However, the high temperature, which was generated during the process, can reduce the quality of oil. In addition, numerous of oil also remained in press cake. The solvent extraction is one of process for oil extraction, it produced a high yield. However, the contamination of solvent in the product is the disadvantage of this method. In order to resolve above problem, the Supercritical carbon dioxide was employed to extract the remained oil in press cake after screw pressing. The pressure parameters were set at 200, 250 and 300 and the temperature at 40, 50 and 60 $^{\circ}$C, respectively. The result shows that the best condition for supercritical carbon dioxide extraction was 300 bar and 60 $^{\circ}$C and provided the highest yield of 15.96 ± 0.38 wt %. In comparison, the oil from solvent extraction about 22.08 % and supercritical carbon dioxide method has efficiency 72.28%. The component of fatty acid in oil from solvent, screw pressing, and supercritical carbon dioxide extraction was analyzed by Gas Chromatograph-Mass Spectrometer. The result shows that the soxhlet extraction, screw pressing, and supercritical carbon dioxide give a similar result. The most component is Linoleic acid, which is approximately 43.52 - 48.71%

Keywords: oil, Para rubber seed, Screw press, Supercritical carbon dioxide

Department of chemical technology Student's signature Kanchana Aungsakul

Student's signature Jutamas Wasombut

Major: Chemical engineering Advisor's signature Somkiat Ngamprasertsith

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ประจำปีการศึกษา 2561 ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ความสำเร็จของโครงการ “การสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต”

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัย เสียสละเวลาอันมีค่าให้ความช่วยเหลือตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดทั้งโครงการ

ขอขอบคุณ ดร.วินัฏฐา ศักดาศรี คุณจริพงศ์ เม่นหวา และ คุณศจี น้อยตั้ง ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ วิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในงานวิจัย ดูแลการทำวิจัย และแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคและสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการพร้อมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ในการใช้เครื่องมืออย่างปลอดภัย

ขอขอบคุณหน่วยเครื่องกล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือซ่อมแซมอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้ที่เกี่ยวข้องที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่าง ๆ เสมอมา

โครงการนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากโครงการการเรียนการสอนเพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ยางพารา	3
2.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดยางพารา	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	11
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	11
3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง	11
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	16
4.1 ลักษณะของสารตัวอย่างและผลิตภัณฑ์ที่ได้	16
4.2 ร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยวิธีต่างๆ	17
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในงานวิจัย	24
5.1 สรุปผลการทดลอง	24
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	24
ภาคผนวก	25
บรรณานุกรม	32

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่พบในน้ำมันเมล็ดยางพารา 5
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเมล็ดยางพารา 6
ตารางที่ 2.3 ชนิดของการสกัดน้ำมันโดยการบีบด้วยสกรู 7
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสกัดน้ำมันพืชโดยการบีบอัด 7
ตารางที่ 2.5 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต 9
ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์หากรดไขมัน 14
ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าอุณหภูมิในตู้อบคอลัมน์ 15
ตารางที่ 4.1 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 17
ตารางที่ 4.2 ผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต 17
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันแต่ละชนิดที่สกัดได้ 22
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน 23
ตารางที่ ก.1 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 26
ตารางที่ ก.2 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 26
ตารางที่ ก.3 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราหลังการบีบอัดโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 26
ตารางที่ ก.4 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 26
ตารางที่ ก.5 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 26
ตารางที่ ก.6 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 27
ตารางที่ ก.7 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 27
ตารางที่ ก.8 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 27

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะของเมล็ดยางพารา 3
รูปที่ 2.2 ลักษณะของรากยางพารา 3
รูปที่ 2.3 ลักษณะของต้นยางพารา 4
รูปที่ 2.4 ลักษณะใบยางพารา 4
รูปที่ 2.5 ลักษณะดอกยางพารา 4
รูปที่ 2.6 ลักษณะผลและเมล็ดยางพารา 5
รูปที่ 2.7 เครื่องบีบอัดน้ำมันแบบสกรูอัดเดี่ยว 6
รูปที่ 2.8 ชุดเครื่องมือสกัดซอกห์เลต 8
รูปที่ 2.9 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ 8
รูปที่ 3.1 แสดงถึงกากเมล็ดยางพาราที่เตรียมจากการบีบด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 12
รูปที่ 3.2 ชุดการสกัดแบบซอกห์เลต 12
รูปที่ 3.3 เครื่องระเหยแบบหมุน 12
รูปที่ 3.4 ชุดการสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 13
รูปที่ 3.5 เครื่องแสโครมาโทกราฟี 14
รูปที่ 4.1 กากเมล็ดยางพารา 16
รูปที่ 4.2 น้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัด 16
รูปที่ 4.3 แผนภาพบล๊อคแสดงองค์ประกอบในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 18
รูปที่ 4.4 อิทธิพลของความดันต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 19
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการสกัดน้ำมัน 19
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 20
รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 20
รูปที่ 4.8 โครมาโตแกรมของน้ำมันจากเมล็ดยางพาราซึ่งไม่ถูกบีบอัดที่สกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต 21
รูปที่ ก.1 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 28
รูปที่ ก.2 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน 28
รูปที่ ก.3 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 29
รูปที่ ก.4 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 29

รูปที่ ก.5 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 30
รูปที่ ก.6 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 30
รูปที่ ก.7 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 31

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

การสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ การสกัดด้วยวิธีเชิงกลหรือกระบวนการบีบอัดและการใช้ตัวทำละลาย วิธีเชิงกลหรือกระบวนการบีบอัดเป็นวิธีที่ใช้ง่ายและไม่ใช้สารเคมี แต่ในระหว่างกระบวนการอาจมีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำมันที่สกัดได้ นอกจากนี้ยังให้ร้อยละผลได้ (% yield) ต่ำและเหลือน้ำมันในเมล็ดพืชที่มาก ในขณะที่กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน ตัวทำละลายอาจปนเปื้อนไปกับน้ำมันที่สกัดและของเสียที่เกิดจากกระบวนการหากกำจัดไม่ดีอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (supercritical carbon dioxide) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากไม่เป็นพิษ ไม่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้หลังจากสกัดน้ำมันแล้วคาร์บอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สแยกออกจากน้ำมันที่อุณหภูมิห้อง จึงช่วยลดขั้นตอนและพลังงานในการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมัน และสามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับไปใช้ใหม่ได้

เมล็ดยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาสกัดน้ำมัน เนื่องจากเมล็ดยางพาราเป็นผลพลอยได้จากสวนยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย เมล็ดยางพารามีน้ำมันร้อยละ 40-50 ของน้ำหนักรวม น้ำมันจากเมล็ดยางพารามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 13.9 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 80.5 คือ กรดไลโนเลอิกและกรดโอเลอิก โดยน้ำมันจากเมล็ดยางพารานี้ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมเคลือบผิว หรือผลิตเป็นไบโอดีเซล เป็นต้น ดังนั้นวิธีสกัดที่ให้ร้อยละผลได้และคุณภาพน้ำมันสูงสุดจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเมล็ดยางพารา โครงการนี้จึงมีแนวคิดในการใช้เครื่องอัดสกรูเดี่ยว (single screw pressed) เพื่อสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราในขั้นแรก และนำเมล็ดยางพาราซึ่งถูกบีบอัดให้แตกด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวไปสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตนี้สามารแทรกผ่านเข้าไปสกัดน้ำมันในเมล็ดยางพาราได้ดีขึ้น นอกจากนี้การบีบน้ำมันออกบางส่วนช่วยลดข้อจำกัดการถ่ายโอนมวล (Mass transfer limitation) และเป็นการลดระยะเวลาสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้อีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- เพื่อศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราโดยการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต
- เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ทดลองสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว เปรียบเทียบร้อยละผลได้จากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันและอุณหภูมิที่ต่างกันเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และหาองค์ประกอบในน้ำมันยางพาราจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันและอุณหภูมิที่ต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะต่อการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางพารา

ยางพารา (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Hevea Brasiliensis)* มีถิ่นกำเนิดที่ประเทศบราซิลและประเทศแถบลุ่มน้ำอะเมซอน ในประเทศไทยพบได้ทั่วไปในภาคใต้ ภาคตะวันออก และบางจังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมล็ดยางพาราเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากสวนยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้ประเทศไทย เมล็ดยางพารามีน้ำมันในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 40 ถึง 50 ของน้ำหนักรวม [1] มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว คือ กรดไลโนเลอิก (linoleic acid) และกรดโอเลอิก (oleic acid) [2] โดยน้ำมันจากเมล็ดยางพารานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม เช่น ทำสบู่ น้ำมันเคลือบเงา ผสมสี และผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น

รูปที่ 2.1 ลักษณะของเมล็ดยางพารา [3]

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของยางพารา มีดังนี้

2.1.1.1 ราก ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นมีระบบรากแก้ว (tap root system) เมื่อต้นยางเติบโตได้ประมาณ 3 ปี รากแก้วจะยาวประมาณ 2.5 เมตร บริเวณรากแขนงเจริญเติบโตไปด้านข้างประมาณ 7-10 เมตร

รูปที่ 2.2 ลักษณะของรากยางพารา [4]

2.1.1.2 ต้น ต้นอ่อนยางสามารถเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทำให้เกิดข้อปล้องบริเวณลำต้น โดยเริ่มต้นนั้นต้นยางมีเปลือกสีเขียว แต่เมื่อเริ่มเจริญเติบโตเปลือกจะเปลี่ยนสีเป็นสีเทาหรือน้ำตาล ต้นยางพาราเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะมีความสูงประมาณ 30-40 เมตร โดยเปลือกของต้นยางแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. คอร์ก (Cork) เนื้อเยื่อชั้นนอกสุด มีลักษณะเป็นเปลือกแข็ง
2. เปลือกแข็งชั้นนอก (Hard bark) เป็นชั้นที่ 2 จากนอกสุด มีท่อน้ำยาง (latex vessel) กระจัดกระจายอย่างไม่ต่อเนื่องและไม่สมบูรณ์แบบ ซึ่งเกิดจาก stone cell และ stone cell ยังทำให้เปลือกชั้นนี้มีความแข็งอีกด้วย

3. เปลือกชั้นในสุด (Soft bark) เป็นส่วนในสุดของเปลือกติดกับเนื้อเยื่อเจริญหรือเนื้อไม้ เป็นชั้นที่มีการสร้างท่อน้ำยาง บริเวณนี้จึงมีท่อน้ำยางหนาแน่นและสมบูรณ์ที่สุด เปลือกบริเวณนี้ค่อนข้างบางเนื่องจากไม่มี stone cell meและมีความอ่อนนุ่มมากกว่าชั้นอื่นๆ

รูปที่ 2.3 ลักษณะของต้นยางพารา [5]

2.1.1.3 ใบ ส่วนนี้มีหน้าที่สำคัญที่สุดคือการสังเคราะห์แสง หายใจ และคายน้ำ ใบของต้นยางพาราใช้เวลาเจริญเติบโตเต็มที่ประมาณ 2-3 เดือน ไม่มีการผลัดใบ

รูปที่ 2.4 ลักษณะใบยางพารา [4]

2.1.1.4 ดอก ยางพารามีช่อดอกเกิดตามปลายกิ่ง เป็นดอกสมบูรณ์เพศ โดยจะทำการผสมกันแบบเปิดภายในช่อเดียวกัน

รูปที่ 2.5 ลักษณะดอกยางพารา [6]

2.1.1.5 ผลและเมล็ด ผลของยางพาราแรกเริ่มจะมีสีเขียวเมื่อแก่ไปจะกลายเป็นสีน้ำตาล แข็ง ส่วนตัวเมล็ดนั้นเมื่อตกจากต้นจะมีโอกาสงอกสูงมาก ภายใน 20 วัน ขนาดของเมล็ดมีรัศมีประมาณ 1.5 – 2.5 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 3.6 กรัม มีสีคล้ายเมล็ดละหุ่ง

รูปที่ 2.6 ลักษณะผลและเมล็ดยางพารา [7]

2.1.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพ

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันเมล็ดยางพารามีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก มีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าร้อยละ 83 ส่วนใหญ่เป็นกรดไลโนเลอิกและกรดโอเลอิก นอกเหนือจากนี้น้ำมันเมล็ดยางพารามีกรดปาล์มิติก (ร้อยละ 8.78) กรดสเตียริก (ร้อยละ 6.17) และกรดไลโนเลนิก (ร้อยละ 2.38) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่พบในน้ำมันเมล็ดยางพารา [8]

ชนิดของไตรกลีเซอไรด์	**ร้อยละ**
กรดปาล์มิติก (C16:0)	8.78 ± 0.05
กรดปาล์มิโตเลอิก (C16:1)	0.23 ± 0.02
กรดสเตียริก (C18:0)	6.17 ± 0.16
กรดโอเลอิก (C18:1)	38.96 ± 0.36
กรดไลโนเลอิก (C18:2)	42.13 ± 0.06
กรดไลโนเลนิก (C18:3)	2.83 ± 0.00
กรดอะราคิโดนิก (C20:0)	0.66 ± 0.02
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	83.70
กรดไขมันอิ่มตัว	15.61

น้ำมันเมล็ดยางพารามีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง มีสีเหลืองน้ำตาล น้ำมันเมล็ดยางพาราที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์จะมีกลิ่นค่อนข้างเหม็น จุดหลอมเหลวของน้ำมันยางพาราจะอยู่ที่ 45 ถึง 48 องศาเซลเซียส โดยตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของน้ำมันเมล็ดยางพารา

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเมล็ดยางพารา [9]

สมบัติทางกายภาพ	ค่า
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.46
ค่าความเป็นกรด – เบส (pH)	6
ความหนืด (พอยซ์)	10.32
ความถ่วงจำเพาะ	0.92
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	45 - 48
ค่าเพอร์ออกไซด์ (meq O_2/Kg)	14.4
ความชื้น (%)	8.6
ค่าสะพอนิฟิเคชัน (mg/g)	193.61
ค่าไอโอดีน (mg I_2/g)	134.51
ค่าเอสเตอร์ (mg KOH/ g)	191.93
ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	1.68
สารที่สะพอนิไฟด์ไม่ได้ (unsaponificable matter content) (%)	0.7

2.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดยางพารา

วิธีการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพารามีหลายวิธี เช่นการสกัดโดยการบีบอัดเชิงกลด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

2.2.1 การบีบอัดเชิงกลด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

การสกัดน้ำมันโดยการบีบอัดเชิงกลด้วยเครื่องอัดสกรู (Screw pressing) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เหมาะสำหรับบีบน้ำมันจากพืชเปลือกแข็ง เช่น เมล็ดงา เมล็ดทานตะวัน เป็นต้น โดยจะแบ่งออกเป็นการสกัดด้วยสกรูเดี่ยว (Single screw press) สกรูคู่ (Double screw press) และการใช้สกรูบีบอัดเพียงเล็กน้อยแล้วนำไปสกัดต่อด้วยวิธีอื่น (Pre-press) หากใช้ความร้อนเป็นเกณฑ์การบีบอัดด้วยสกรูจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือการบีบอัดธรรมดาหรือบีบร้อน และการบีบเย็น [10-11] ซึ่งความแตกต่างของสองวิธีนี้จะแสดงในตารางที่ 2.3 และตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีบีบอัดแสดงดังตารางที่ 2.4

รูปที่ 2.7 เครื่องบีบอัดน้ำมันแบบสกรูอัดเดี่ยว [10]

ตารางที่ 2.3 ชนิดของการสกัดน้ำมันโดยการบีบด้วยสกรู [10],[11]

การสกัดเย็น	การสกัดร้อน
เป็นการบีบอัดด้วยอุณหภูมิปกติ โดยวัตถุดิบที่นำมาสกัดต้องไม่ผ่านความร้อนหรือสารเคมีมาก่อน	เป็นกรรมวิธีที่ให้ความร้อน ทำให้น้ำมันเกิดการละลายตัวออกมา
น้ำมันที่สกัดได้มีสีใส สะอาด ไม่มีกลิ่นหืน และยังคงสภาพวิตามิน	น้ำมันที่สกัดได้มีสีเข้มกว่าน้ำมันทั่วไป เนื่องจากความร้อน มีการเจือปนของเปลือก และอาจสูญเสียวิตามิน
ใช้สกัดสารเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ	นิยมใช้สกัดน้ำมันหอมระเหย

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสกัดน้ำมันพืชโดยการบีบอัด [10]

ข้อดี	**ข้อเสีย**
ต้นทุนสกัดต่ำ	ปริมาณน้ำมันที่ติดกาก อาจมีถึง 10-15 %
กรรมวิธีไม่ยุ่งยาก	ได้ปริมาณน้ำมันน้อย
สามารถทำเป็นอุตสาหกรรมภายในครัวได้	ไม่สามารถสกัดสิ่งเจือปนภายในวัตถุดิบได้หมด
ผลพลอยได้สามารถนำไปจำหน่ายเป็น อาหารสัตว์ได้	ควบคุมคุณภาพน้ำมันได้ยาก

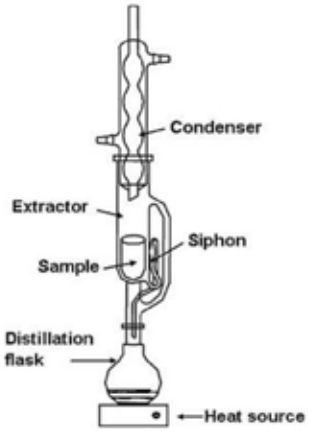
2.2.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีทำสารให้บริสุทธิ์หรือเป็นวิธีแยกสารออกจากกันวิธีหนึ่ง การสกัดด้วยตัวทำละลายอาศัยสมบัติของการละลายของสารแต่ละชนิด และสารที่ต้องการสกัดต้องละลายอยู่ในตัวทำละลาย หลักในการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม คือ ต้องเป็นตัวทำละลายที่ละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดี ไม่ละลายสารอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ หรือละลายได้น้อยมาก ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการจะแยก ที่สำคัญไปกว่านั้นคือ ควรแยกออกจากสารละลายได้ง่ายและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายเพื่อจะได้นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก มีราคาถูก หาง่าย ไม่มีพิษ มีจุดเดือดที่ต่ำ [12]

เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต (Soxhlet extractor) เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาสำหรับสกัดสารให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด [13] เป็นเครื่องมือที่ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อยแสดงดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากการสกัดจะเป็นลักษณะการใช้ตัวทำละลายหมุนเวียนผ่านสารที่ต้องการสกัดหลาย ๆ ครั้ง ต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งสกัดสารออกมาได้เพียงพอ โดยใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำ การสกัดทำได้โดยให้ความร้อนจนตัวทำละลายระเหยขึ้นไปแล้วกลั่นตัวลงมาในกระดาษกรองสำหรับการสกัด (thimble) ซึ่งบรรจุตัวอย่างไว้ เมื่อสารที่สกัดได้สูงถึงระดับกาลักน้ำ สารสกัดจะไหลกลับลงมาในขวดก้นกลมวนเวียนเช่นนี้จนกระบวนการสกัดสมบูรณ์ โดยสามารถสังเกตจากสีของตัวทำละลายที่ใสขึ้น [14] แม้ว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายมีข้อดีคือทำให้ได้ปริมาณผลได้ของสารที่ต้องการสกัดมากที่สุด สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย ราคาไม่แพง และใช้ตัวทำละลายในการสกัดน้อย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังสกัดจะมีการปนเปื้อนตัวทำละลายอินทรีย์อยู่ ซึ่งตัวทำละลายอินทรีย์มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ผู้ปฏิบัติการ และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัด [15]

ตัวแปรที่ส่งผลต่อการสกัด มีดังนี้ ชนิดของตัวทำละลายต้องเหมาะสมกับสารที่ต้องสกัด ปริมาตรตัวทำละลายที่ใช้ต้องมีมากพอ เวลาที่ใช้ในการสกัดต้องมีความเหมาะสม ที่จะสามารถสกัดเอาสารที่ต้องการออกจากตัวอย่างให้ได้มากที่สุด

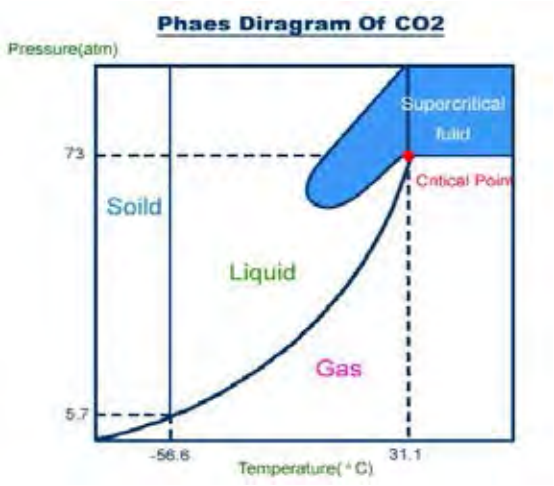
ซึ่งมีการใช้เทคนิคที่ทำให้เกิดการรีฟลักซ์ (reflux) ซ้ำของตัวทำละลายหลายครั้ง เพื่อทำให้เกิดการสกัดสารออกจากตัวอย่างจนหมดหรือจนกระทั่งสีของตัวทำละลายบริเวณกระดาษกรองสำหรับการสกัด (extraction thimble) ใส ไม่มีสี ส่วนสุดท้ายคือ วัตถุดิบที่ใช้สกัด มักใช้ตัวอย่างเป็นของแข็ง ดังนั้นจำเป็นต้องทำให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลงเพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น [14]



รูปที่ 2.8 ชุดเครื่องมือสกัดซอกห์เลต [16]

2.2.3 การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (supercritical carbon dioxide extraction)

การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเป็นวิธีการสกัดทางเลือกหนึ่งในปัจจุบัน โดยการใช้ของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย โดยการทดลองนี้ได้ศึกษาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลาย คาร์บอนไดออกไซด์มีจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 31.1 องศาเซลเซียส และความดัน 73 atm เหนือจุดวิกฤตเป็นภาวะที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าสารอยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงถึงภาวะที่สสารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีเส้นหลอมเหลว (fusion line) แบ่งขอบเขตระหว่างของแข็งกับของเหลว และ เส้นความดันไอ (vapor pressure line หรือ boiling line) จะเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระหว่างของเหลวกับแก๊ส สำหรับจุดที่อยู่ระหว่างทั้งสามสถานะเรียกว่าจุดร่วมสาม (triple point)



รูปที่ 2.9 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ [18]

ตารางที่ 2.5 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต [17]

	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด (μPa-s)	สมบัติการแพร่ (mm^2/s)
แก๊ส	1	10	1-10
ของไหลภาวะเหนือวิกฤต	100-1000	50-100	0.01-0.1
ของเหลว	1000	500-1000	0.001

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าที่ภาวะเหนือวิกฤตความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตใกล้เคียงกับความหนาแน่นของของเหลว ความหนาแน่นที่มากทำให้อนุภาคของตัวลูกละลายจะถูกละลายได้ดี เนื่องจากเกิดการกระทำระหว่างสาร 2 ชนิด หรือเรียกว่า อันตรกิริยา (interaction) ส่งผลต่อพลังงานภายในระบบที่ลดลงและเกิดการละลายได้ดีขึ้น นอกจากนี้ความหนืดและสมบัติการแพร่ยังส่งผลต่อการเป็นตัวทำละลาย โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจะมีผลต่อการแพร่ของของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤต หากอุณหภูมิมีค่าสูงความสามารถในการแพร่ก็จะเพิ่มตามไปด้วย การแพร่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำละลายลดลงเนื่องจากความหนาแน่นลดลง ดังนั้นจึงมีการเพิ่มความดันเพื่อเพิ่มความหนาแน่นและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลาย การสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ทำให้สามารถรักษาองค์ประกอบอื่น ๆ ในน้ำมันและยังเป็นวิธีที่ไม่มีการเจือปนของตัวทำละลายหลังการทดลอง นอกจากนี้การศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่าการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้อัตราการสกัดสูงกว่าการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเหลว จึงทำให้วิธีนี้เป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน [19]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mhemdi H. และคณะ [20] ศึกษาการสกัดน้ำมันพืชและน้ำมันหอมระเหยจากเมล็ดผักชีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์และขนาดของเมล็ดต่อน้ำมันที่ได้ ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพการสกัดขึ้นอยู่กับความดัน อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ และขนาดของเมล็ดบด ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดเป็นร้อยละ 90 และพบว่าการสกัดโดยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตนั้นไม่มีผลกระทบสำคัญต่อคุณภาพของน้ำมันและองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมัน

Lee N. และคณะ [21] ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส และความดันในช่วง 20 ถึง 30 เมกะพาสคัล ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 180 นาที ต่อน้ำมันที่ได้ และศึกษาการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องซอกห์เลตโดยใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีความใส ไร้กลิ่น และมีร้อยละผลได้น้ำมันเป็นร้อยละ 33.652 ในขณะที่น้ำมันจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตมีสีค่อนข้างน้ำตาลเมื่อสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วและมีร้อยละผลได้ของน้ำมันเป็นร้อยละ 7 ถึง 12 นอกจากนี้พบว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายใช้ระยะเวลานานกว่าการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

Koubaa M. และคณะ [22] ศึกษาการสกัดน้ำมันและการสกัดพอลีฟีนอลจากไทเกอร์นัทด้วยเทคโนยีการสกัดเชิงกลร่วมกับแก๊ส (GAME) โดยการเปลี่ยนความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตและการสกัดเชิงกลในช่วง 10 ถึง 30 เมกะพาสคัล จากนั้นเปรียบเทียบผลกับการสกัดโดยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตหรือการสกัดเชิงกลเพียงอย่างเดียว ผลการวิจัยพบว่าการสกัดเชิงกลร่วมกับแก๊สโดยใช้ความดัน 20 เมกะพาสคัล สามารถสกัดน้ำมันได้ร้อยละ 50 หลังจากเวลาผ่านไปเพียง 10 นาที หากเมื่อเทียบกับการสกัด โดยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตหรือการสกัดเชิงกลเพียงอย่างเดียวที่ 30 เมกะปาสคัล นอกจากนี้น้ำมันจากการสกัดเชิงกลร่วมกับแก๊สมีปริมาณพอลีฟีนอลสูงกว่าที่การสกัดโดยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตหรือการสกัดเชิงกลเพียงอย่างเดียว

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่องอัดสกรูเดี่ยว (Single screw press)
- ชุดสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดซอกห์เลต (Soxhlet Extraction Apparatus)
- ชุดสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 150 มิลลิลิตร (Supercritical carbon dioxide Extraction Apparatus)
- เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
- เตาหลุมให้ความร้อน (Heating Mantle)
- เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator)
- ตู้อบ (Oven)
- ตะแกรงร่อนขนาด 0.7 มิลลิเมตร
- เครื่องเขย่าสารแบบสั่น (Vortex)
- เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifuge)
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Agilent

3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมี

- เมล็ดยางพารา (*Hevea Brasiliensis*) จากจังหวัดชุมพร
- เฮกเซน (n-Hexane, C_6H_{14}): Commercial Grade 99%
- คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) 99%
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
- เฮปเทน (Heptane, C_7H_{16}): Commercial Grade 99%
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล ความเข้มข้น 2 นอร์มอล
- สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Saturated NaCl)

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเพื่อเปรียบเทียบผลได้กับวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

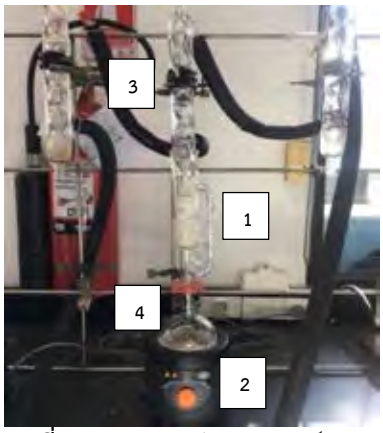
3.2.1 การสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและการเตรียมกากเมล็ดยางพารา

นำเมล็ดยางพาราแห้ง ปริมาณ 9.5 กิโลกรัมมาบีบอัดด้วยเครื่องสกรูเดี่ยว (Single screw press) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยเมล็ดยางพาราที่บีบอัดแล้วจะเรียกว่า กากเมล็ดยางพารา (pressed cake) จากนั้นนำกากเมล็ดยางพาราไปทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.7 มิลลิเมตร เพื่อรอสกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตต่อไป

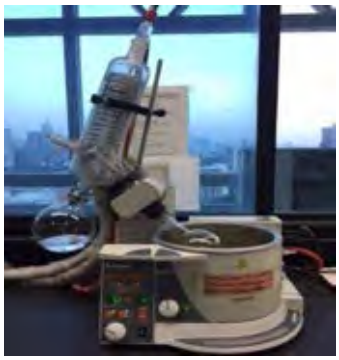
รูปที่ 3.1 แสดงถึงกากเมล็ดยางพาราที่เตรียมจากการบีบด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

3.2.2 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดยางพาราด้วยตัวทำละลายโดยเครื่องซอกห์เลต

การใช้เครื่องสกัดซอกห์เลต (Soxhlet Extractor) เตรียมวัตถุดิบประมาณ 5 กรัม ใส่ในกระดาษกรองสำหรับการสกัด (extraction thimble) (หมายเลข 1) แล้วตั้งชุดการทดลองการสกัดแบบซอกห์เลตขนาด 500 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 3.2 จากนั้นเติมเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ปริมาณ 200 มิลลิลิตร แล้วดำเนินการสกัดโดยเริ่มเปิดเครื่องทำความร้อน (หมายเลข 2) โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส ให้ตัวทำละลายระเหยและผ่านระบบหล่อเย็น (หมายเลข 3) ควบแน่นลงมาผ่านสารที่ต้องการสกัด สารที่สกัดได้จะอยู่ในขวดก้นกลม (หมายเลข 4) ส่วนตัวทำละลายก็จะระเหยกลับขึ้นไปใหม่แล้วกลั่นตัวหยดลงบนเมล็ดยางพาราซ้ำ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จึงเก็บสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนแสดงดังรูปที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความดัน 260 มิลลิบาร์ จนตัวทำละลายถูกแยกออกไปหมดเหลือเพียงสารที่สกัดได้ จากนั้นจึงนำมาหาผลได้น้ำมันจากการสกัด



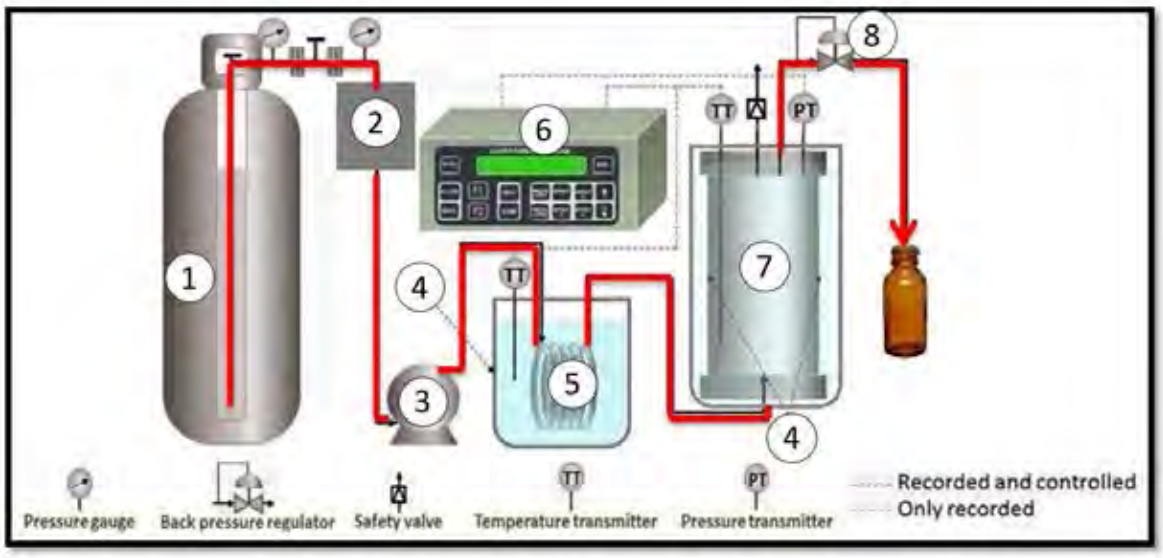
รูปที่ 3.2 ชุดการสกัดแบบซอกห์เลต



รูปที่ 3.3 เครื่องระเหยแบบหมุน

3.2.3 การสกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide Extraction)

การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตใช้ชุดการสกัดและแยกด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในการสกัดเริ่มจากบรรจุตัวอย่างกากเมล็ดยางพาราประมาณ 10 กรัม ในเครื่องสกัด (Extractor) (หมายเลข 7) แล้วปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงที่มีระบบหล่อเย็นเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์คงสภาพเป็นของเหลวก่อนปั๊ม แล้วปรับเพิ่มความดันด้วย Back-pressure regulator เมื่อความดันในระบบถึงค่าที่ต้องการ (200 250 และ 300 บาร์) จึงเริ่มจับเวลา โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที เป็นระยะเวลารวม 300 นาที



รูปที่ 3.4 ชุดการสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต [23] 1) ถังแก๊สคาร์บอนไดดอกไซด์ 2) อ่างน้ำเย็น 3) ปั๊มแรงดันสูง 4)และ 5) อ่างควบคุมอุณหภูมิ 6) แผงควบคุม 7) เครื่องสกัด และ 8) ผลิตภัณฑ์สู่ขวดเก็บตัวอย่าง

เครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ประกอบด้วยถังคาร์บอนไดออกไซด์เหลว อ่างน้ำเย็น ปั๊มแรงดันสูง อ่างควบคุมอุณหภูมิ เครื่องสกัด ขวดเก็บตัวอย่าง และแผงควบคุม โดยการทำงานของเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเริ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์จากถัง (1) จะถูกควบคุมอัตราการไหล (10 กรัมต่อนาที) โดยแผงควบคุม (6) ผ่านเข้าสู่อ่างน้ำเย็น (2) เพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวทั้งหมด จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวถูกปั๊ม (3) ไปยังอ่างควบคุมอุณหภูมิ (4, 5) เพื่อปรับอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ (40 50 และ 60 องศาเซลเซียส) และเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เหลวให้อยู่ในภาวะเหนือวิกฤต แล้วจึงสกัดสารภายในเครื่องสกัด (7) ได้เป็นน้ำมันที่ไม่มีการปนเปื้อนของตัวทำละลาย (8) เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

3.2.4 วิเคราะห์หาองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดได้

ส่งตัวอย่างวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันที่สถาบันวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Agilent วิธีการเตรียมตัวอย่างมาตรฐานน้ำมันตามวิธี IUPAC 1989 [24]

รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี [24]

3.2.4.1 การเตรียม fatty acid methyl ester (FAME)

ชั่งน้ำมันตัวอย่างที่สกัดได้ประมาณ 0.1000 กรัม ใส่ในหลอดทดลองฝาเกลียว เติมเฮปเทน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วย Vortex 1 นาที เติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลความเข้มข้น 2 นอร์มอล ปริมาตร 200 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วย Vortex 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว ทิ้งไว้ให้แยกชั้น ดูดส่วนใสด้านบนไปเหวี่ยงตะกอนออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifuge) จากนั้นดูส่วนใส 1 มิลลิลิตรใส่ใน vial เพื่อเตรียมนำไปฉีดวิเคราะห์

3.2.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

นำสารตัวอย่างที่เตรียมจากข้อ 3.2.4.1 มาฉีดวิเคราะห์องค์ประกอบ ซึ่งเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมีภาวะในการดำเนินเครื่องดังตาราง 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์หากรดไขมัน

ภาวะ	ค่า
Carrier gas	Helium (He)
Colum size	30 m × 0.3 mm i.d.
Heating rate	8°C/ min
Detector temperature (FID)	250°C
Split ratio	50 : 1
Injection part temperature	150 °C
Inject volume	1 µL
Column initial temperature	150 °C
Column temperature	250 °C

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าอุณหภูมิในตู้อบคอลลัม

	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (°C/min)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงสภาพ (min)	เวลาที่ใช้ (min)
เริ่มต้น	-	150	0	0
ระดับที่ 1	5	180	0	6
ระดับที่ 2	5	200	0	10
ระดับที่ 3	1	205	0	15
ระดับที่ 4	9	250	1	21

จากตาราง 3.2 การทำงานของอุณหภูมิในตู้อบคอลลั่มเป็นดังนี้ อุณหภูมิในตู้อบคอลัมน์เริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 205 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 9 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้วิเคราะห์ทั้งสิ้น 21 นาที

3.2.4.3 การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันที่สกัดได้

การคำนวณน้ำมันโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดยางพารา สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน แสดงดังสมการที่ 1

$$MW_{oli} = \sum x_i \times MW_i \qquad (1)$$

โดยที่ MW_{oli} = น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างน้ำมันเมล็ดยางพารา (g/mol)

x_i = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันที่พบในน้ำมันเมล็ดยางพารา

MW_i = น้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (g/mol)

i = ชนิดของกรดไขมัน

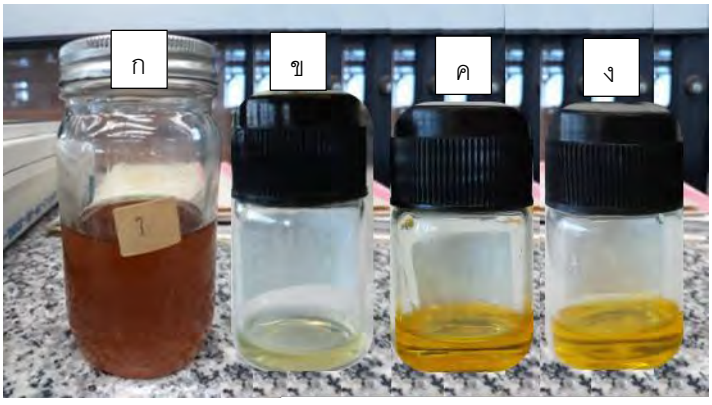
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของสารตัวอย่างและผลิตภัณฑ์ที่ได้

รูปที่ 4.1 (ก) แสดงกากเมล็ดยางพาราหลังถูกบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว รูป 4.1 (ข) กากเมล็ดยางพาราหลังสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต และ (ค) กากเมล็ดยางพาราหลังสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ตามลำดับ พบว่ากากเมล็ดยางพาราหลังถูกบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวจะมีลักษณะเปียก มีกลิ่นแรง และสีเข้มกว่าการสกัดด้วยแบบอื่น เนื่องจากมีน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดยางพารา การสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตกากเมล็ดยางพาราหลังการสกัดจะแห้งกว่า ไม่มีกลิ่นและมีสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจากน้ำมันได้ถูกสกัดออกมาจนหมด เช่นเดียวกับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

รูปที่ 4.1 ก) กากเมล็ดยางพาราหลังถูกบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว ข) กากเมล็ดยางพาราหลังการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต ค) กากเมล็ดยางพาราหลังสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากรูปที่ 4.2 แสดงน้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว เครื่องซอกห์เลต และคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าน้ำมันที่ได้มีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม เนื่องจากมีการเจือปนของเปลือกในน้ำมัน ในขณะที่น้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต มีลักษณะค่อนข้างใส มีสีเหลืองอ่อนๆ อย่างไรก็ตามน้ำมันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนมีกลิ่นของตัวทำละลายหลงเหลือในผลิตภัณฑ์ชัดเจน น้ำมันที่ได้จากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีลักษณะใสและมีสีเหลืองเข้ม มีกลิ่นคล้ายถั่ว และผลของความดันและอุณหภูมิ 250 บาร์ 40°C องศา และ 300 บาร์ 60°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 (ค) และ (ง) ไม่ส่งผลต่อสีและกลิ่นของน้ำมัน



รูปที่ 4.2 น้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัด ก) สกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว ข) สกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต ค) และ ง) สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ 250 บาร์ 40°C องศา และ 300 บาร์ 60°C ตามลำดับ

4.2 ร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยวิธีต่างๆ

4.2.1 การสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการสกัดด้วยวิธีนี้ได้น้ำมันร้อยละ 17.80 โดยน้ำหนัก และส่วนประกอบอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการสกัดพบว่าได้กากเมล็ดยางพารา (pressed cake) ร้อยละ 73.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดว่ายังคงเหลือน้ำมันที่สามารถนำไปสกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตต่อไป

ตารางที่ 4.1 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว (น้ำหนักเมล็ดยางพาราเริ่มต้น 9,500 กรัม)

	น้ำหนัก (กรัม)	ร้อยละผลได้
น้ำมัน	1,691.65	17.80
ตะกอน	633.45	6.66
กากเมล็ดยางพารา	6,948.92	73.11
Loss	231.00	2.43

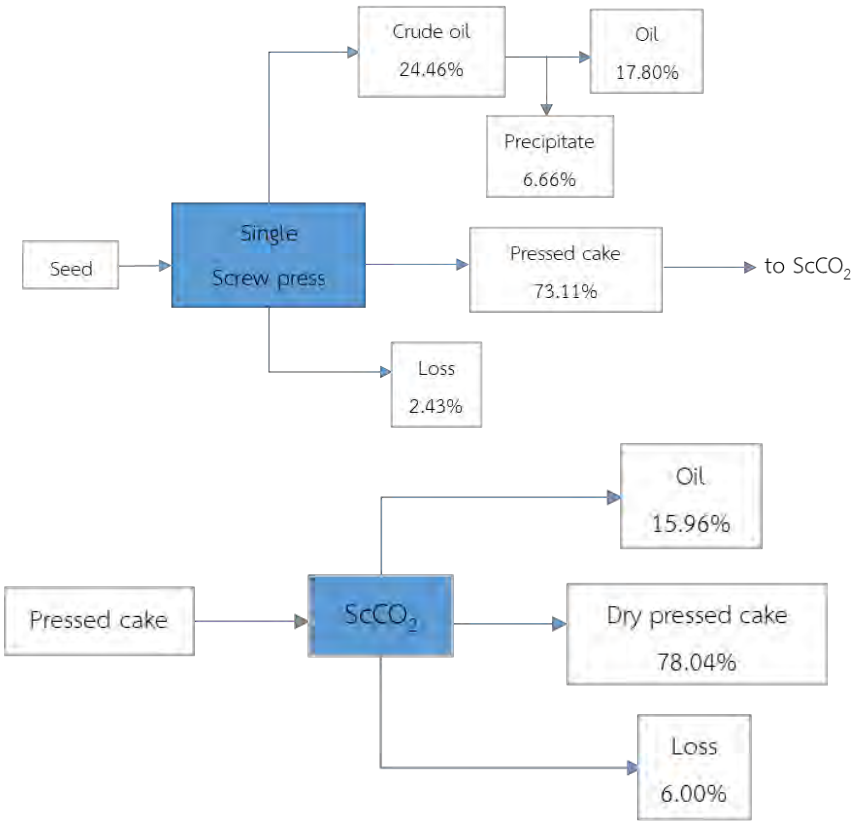
4.2.2 การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำลาย (เครื่องซอกห์เลต)

การสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตหรือการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีที่ใช้สำหรับหาร้อยละผลได้ของน้ำมันที่สูงที่สุด ซึ่งในการทดลองใช้ตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง คือ เมล็ดยางพาราก่อนเข้าเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและกากเมล็ดยางพาราหลังเข้าเครื่องอัดสกรูเดี่ยว ผลการสกัดน้ำมันแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ากากเมล็ดยางพาราหลังเข้าเครื่องอัดสกรูเดียวยังคงมีน้ำมันเหลือร้อยละ 22.08 ± 2.30

ตารางที่ 4.2 ผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต

ตัวอย่าง	**ครั้งที่**	**น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)**	**น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)**	**ร้อยละผลได้**	**ร้อยละผลได้เฉลี่ย**
เมล็ดยางพาราก่อนการสกัด	1	5.09	2.06	40.47	49.95 ± 9.36
	2	5.06	3.01	59.49	
กากเมล็ดยางพารา	1	4.98	1.22	24.50	22.08 ± 2.30
	2	5.03	0.99	19.68	

4.2.3 การสกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต



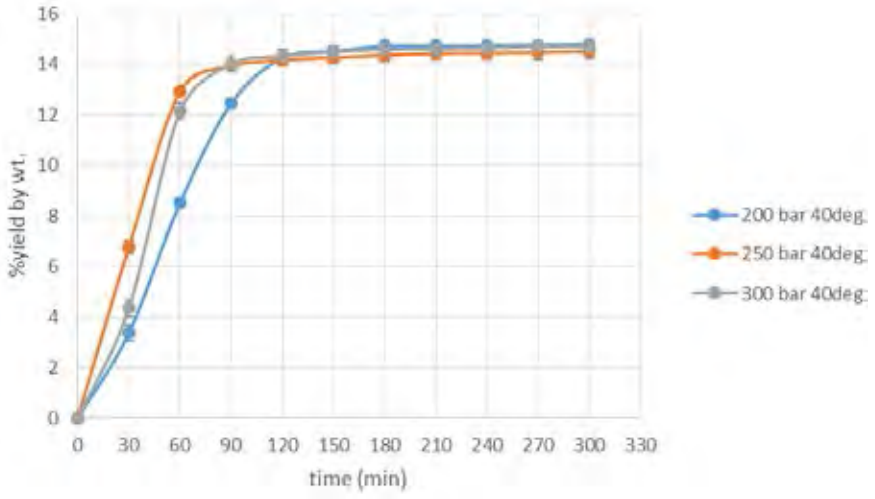
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงองค์ประกอบในการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากรูปที่ 4.3 การสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวจะได้น้ำมันดิบจากเมล็ดยางพาราที่มีสีเข้มอันเกิดจากการปนเปื้อนของเมล็ดขณะสกัดคิดเป็น 24.46% เป็นกากมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็กสีเข้มประมาณ 73.11% และเกิดการสูญหายซึ่งเกิดจากการติดอยู่ภายในเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 2.43% โดยจะนำกากจากเมล็ดยางพาราไปใช้ในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤติต่อ ในขั้นตอนนี้จะใช้กากจากเมล็ดยางพาราประมาณ 10 กรัม โดยจากผลการทดลองที่ดีที่สุดคือความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าได้น้ำมัน 15.96% ส่วนอื่นๆเป็นผงของกากที่มีสีอ่อนลงประมาณ 78.04% และจากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ามีการติดค้างอยู่ภายในเครื่องถึง 6.00% โดยผลที่ได้นี้จะสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยใช้ผลของการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตเป็นมาตรฐานในการคำนวณพบว่าการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการสกัดน้ำมัน 35.64% และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีประสิทธิภาพ 72.28%

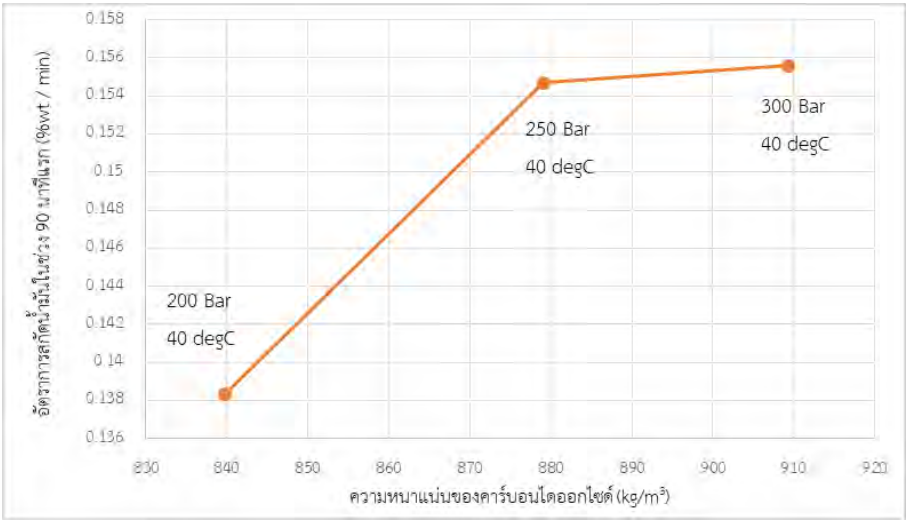
4.2.3.1 อิทธิพลของความดันต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความดันที่ 200 250 และ 300 บาร์ ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส ดังแสดงรูปที่ 4.4 พบว่าร้อยละผลได้สุดท้ายของน้ำมันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ ร้อยละ 14.77 ± 0.27 14.49 ± 0.53 และ 14.70 ± 0.35 โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 200 250 และ 300 บาร์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาช่วงการสกัดที่ 1 ถึง 2 ชั่วโมงแรก ที่ความดัน 200 บาร์ น้ำมันที่สกัดได้น้อยกว่าที่ 250 และ 300 บาร์ โดยพบว่าที่ความดัน 300 บาร์ มีอัตราการสกัดสูงที่สุด (ความชันสูงสุด) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการสกัดน้ำมัน (รูปที่ 4.5)

พบว่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 839.70 เป็น 909.28 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้น้ำมันที่สกัดได้มีอัตราการสกัดมากขึ้นจากร้อยละ 0.1383 เป็นร้อยละ 0.1556 ต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำมันเพิ่มขึ้น น้ำมันจึงถูกสกัดออกมาได้มากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้สูงสุดความดัน 300 บาร์จึงถูกเลือกให้เป็นความดันที่เหมาะสมในการสกัด



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของความดันต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

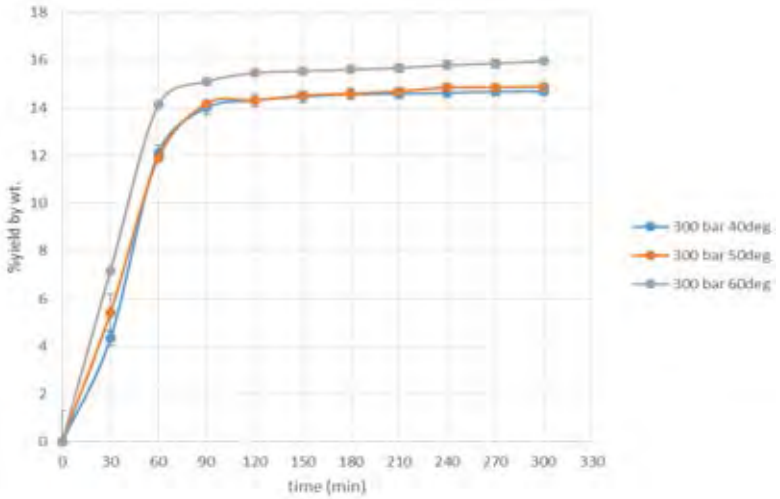


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการสกัดน้ำมัน

4.2.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

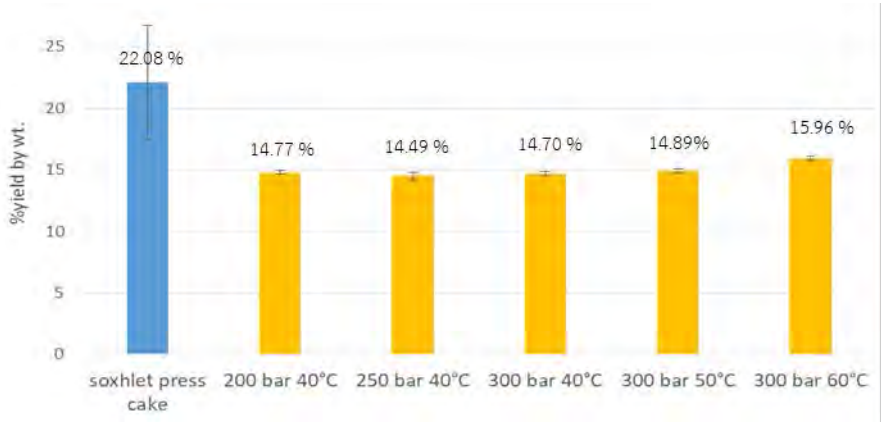
เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต งานวิจัยนี้จึงกำหนดอุณหภูมิที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดันคงที่ที่ 300 บาร์ ผลการสกัดแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าร้อยละผลได้สุดท้ายของน้ำมันที่มากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คือ 15.96 ± 0.38 โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลได้น้ำมันที่ใกล้เคียงกัน คือ 14.70 ± 0.35 และ 14.89 ± 0.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การสกัดดีขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิช่วยลดความหนืดและเพิ่มความดันไอของน้ำมัน จึงมีแนวโน้มให้น้ำมันถูกสกัดได้ง่ายมากขึ้น [21] แต่หากเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปจะส่งผลในทางตรงกันข้าม เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความ

หนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจึงทำให้ร้อยละผลได้ที่สกัดได้ลดลง [22] ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่ให้ร้อยละผลได้น้ำมันมากที่สุด คือ ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัดประมาณ 120 นาที ซึ่งได้ร้อยละผลได้น้ำมันสูงสุดประมาณร้อยละ 15.96 ± 0.38 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตพบว่าการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ร้อยละผลได้น้อยกว่าประมาณร้อยละ 6 ถึง 7 ดังรูปที่ 4.7

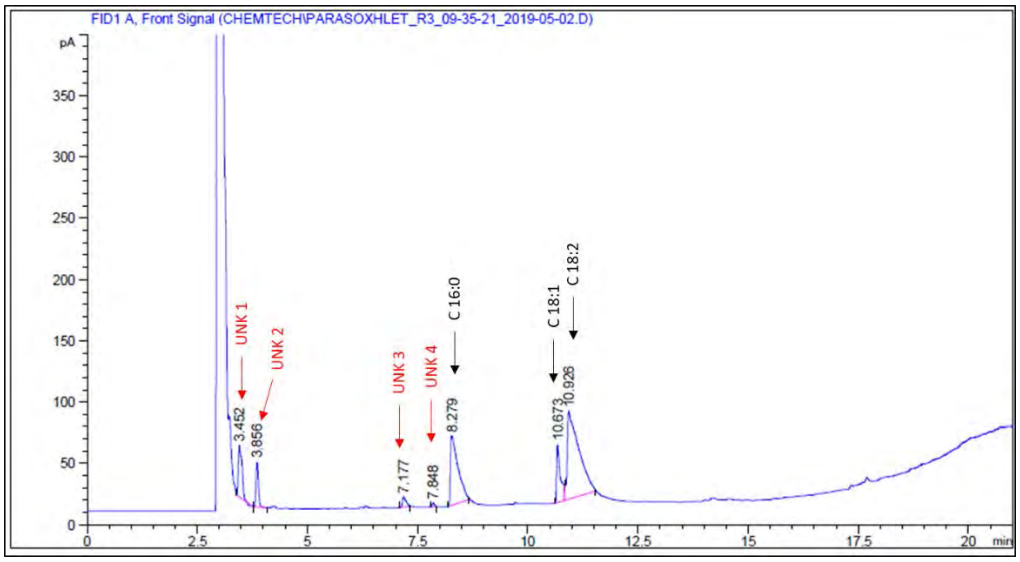


รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างน้ำมันเมล็ดยางพาราใช้วิธี IUPAC 1989 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) แสดงดังรูปที่ 4.8 พบองค์ประกอบน้ำมันเมล็ดยางพาราดังนี้ กรดปาล์มิติก (C16:0) กรดโอเลอิก (C18:1) และ กรดไลโนเลอิก (C18:2) ตารางที่ 4.3 แสดงน้ำมันที่ได้จากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต เครื่องอัดสกรูเดี่ยว และคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต เครื่องอัดสกรูเดี่ยวและการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) ในช่วงร้อยละ 43.52 - 48.71 กรดโอเลอิก (Oleic acid) ในช่วงร้อยละ 24.22 - 27.72 และกรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดปาล์มิติก (Palmitic) ร้อยละ 10.41 - 14.20 แต่จากตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าน้ำมันจากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตมีจำนวนองค์ประกอบของกรดไขมันที่น้อยกว่าการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวและคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต เช่น กรดไลโนเลนิก (Linolenic acid) กรดปาล์มิโตเลอิก (Palmitoleic acid) กรดสเตียริก (Steric acid) และกรดไมริสติก (Myristic acid) น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันในแต่ละวิธีการสกัด แสดงดังตารางที่ 4.2

ดังนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าจากการพิจารณาองค์ประกอบของไขมันได้แก่ กรดปาล์มิติก (C16:0) กรดโอเลอิก (C18:1) และ กรดไลโนเลอิก (C18:2) จากตารางที่ 4.3 ทั้ง 3 วิธีการสกัดได้แก่การสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต เครื่องอัดสกรูเดี่ยวและการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ไม่มีผลต่อองค์ประกอบของกรดไขมันทั้ง 3 ชนิดนี้



รูปที่ 4.8 โครมาโตแกรมของน้ำมันจากเมล็ดยางพาราซึ่งไม่ถูกบีบอัดที่สกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต

สำหรับการเปรียบเทียบองค์ประกอบในน้ำมันในแต่ละสารตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.3 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันแต่ละชนิดที่สกัดด้วยวิธีต่างๆ

Type of fatty acid	% of Fatty acid in oil						
	Para rubber seed by soxhlet	Screw press	Supercritical carbon dioxide				
			200 bar 40°C	250 bar 40°C	300 bar 40°C	300 bar 50°C	300 bar 60°C
UNK 1	8.55	ND	ND	ND	ND	ND	ND
UNK 2	4.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C 14:0 (Myristic acid)	ND	0.12	0.16	ND	ND	ND	ND
UNK 3	1.84	ND	ND	ND	ND	ND	ND
UNK 4	0.46	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C 16:0 (Palmitic acid)	10.41	10.68	12.10	11.58	11.79	12.00	14.20
C 16:1 n7 (Palmitoleic acid)	ND	ND	0.44	0.36	0.41	0.43	0.38
UNK 5	ND	0.07	0.06	ND	0.06	0.06	ND
C 18:0 (Stearic acid)	ND	5.20	5.57	5.32	6.38	5.47	6.15
UNK 6	ND	1.40	ND	ND	ND	ND	ND
C 18:1 n9 (Oleic acid)	25.05	25.93	26.05	24.22	24.56	24.87	27.72
C 18:2 n6 (Linoleic acid)	48.71	43.52	44.53	45.75	45.34	46.05	46.13
C 18:3 n3 (Linolenic acid)	ND	13.08	11.09	12.77	11.46	11.12	5.41

หมายเหตุ Unk = unknown (ไม่สามารถระบุชนิดขององค์ประกอบได้), ND = not detected (ตรวจไม่พบ)

C x:y nz โดยที่ x = จำนวนคาร์บอน , y = จำนวนพันธะคู่ , z = ตำแหน่งพันธะคู่)

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน

วิธีการสกัดน้ำมัน	**น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)**
เครื่องซอกห์เลต	858.69
เครื่องอัดสกรูเดี่ยว	872.81
คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ 200 บาร์ 40 ℃	871.66
คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ 250 บาร์ 40 ℃	872.10
คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ 300 บาร์ 40 ℃	872.13
คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ 300 บาร์ 50 ℃	871.89
คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ 300 บาร์ 60 ℃	870.95

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าการสกัดน้ำมันด้วยวิธีการใช้เครื่องอัดสกรูเดี่ยวร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ได้เริ่มจากการสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวให้ร้อยละผลได้ 17.80 แต่เกิดการปนเปื้อนของเปลือกจึงทำให้น้ำมันมีสีคล้ำ นอกจากนี้กากของเมล็ดยางพาราที่ผ่านการบีบอัดยังคงมีน้ำมันเหลืออยู่ประมาณ 22.08 ± 2.30 จึงนำกากที่เหลือจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวไปสกัดด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ได้ทำการทดลองทั้งหมด 5 ภาวะได้แก่ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 200 250 และ 300 บาร์ และที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือ ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลได้มากที่สุดคือ 15.9587 ± 0.3784 นอกจากนี้เมื่อนำน้ำมันที่ได้ไปตรวจวัดองค์ประกอบในน้ำมัน พบว่าวิธีการทั้ง 3 วิธีได้แก่ การสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลต เครื่องอัดสกรูเดี่ยว และคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิฤต พบองค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบ ได้แก่ กรดปาล์มิติก (10.41 – 12.40%), กรดโอเลอิก(24.22 - 27.22%) และกรดไลโนเลอิก (43.52 - 48.71 %) ในทั้ง 3 วิธีการสกัด และจากผลการทดลองพบว่าผลของภาวะการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลต่อองค์ประกอบไขมัน ได้แก่ กรดปาล์มมิติก (11.58 – 14.20%) กรดโอเลอิก (24.22 - 27.72%) และกรดไลโนเลอิก (44.53 - 46.53%)

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. การศึกษาภาวะการสกัดเพิ่มเติม เช่น ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันในการทดลอง

2. วิเคราะห์สมบัติของน้ำมันที่สกัดได้เพิ่มเติม เช่น ค่าไอโอดีน ค่าสะพอนิฟิเคชัน เป็นต้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำน้ำมันไปใช้ในประโยชน์ในอนาคต

3. สารที่ไม่สามารถระบุได้ (UNK1 และ UNK2) จากการสกัดด้วยเครื่องซอกห์เลตอาจเกิดจากการความผิดพลาดขณะเตรียมสาร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

	น้ำหนัก (กรัม)	ร้อยละผลได้
Oil	1,691.65	17.80
Precipitate	633.45	6.66
Pressed cake	6,948.92	73.11
Loss	231.00	2.43

ตารางที่ ก.2 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	5.09	2.06	40.47
2	5.06	3.01	59.49
เฉลี่ย	5.075	2.535	49.95 ± 9.36

ตารางที่ ก.3 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราหลังการบีบอัดโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	4.98	1.22	24.50
2	5.03	0.99	19.68
เฉลี่ย	5.005	1.105	22.08 ± 2.30

ตารางที่ ก.4 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	10.0042	1.4506	14.4999
2	10.0053	1.5047	15.0390
เฉลี่ย	10.0048	1.4776	14.7695 ± 0.2696

ตารางที่ ก.5 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	10.0018	1.3957	13.9545
2	10.0233	1.5059	15.0240
เฉลี่ย	10.0126	1.4508	14.4890 ± 0.5347

ตารางที่ ก.6 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	10.0022	1.4448	14.4448
2	10.0013	1.5055	15.0530
เฉลี่ย	10.0032	1.4752	14.2139 ± 0.3541

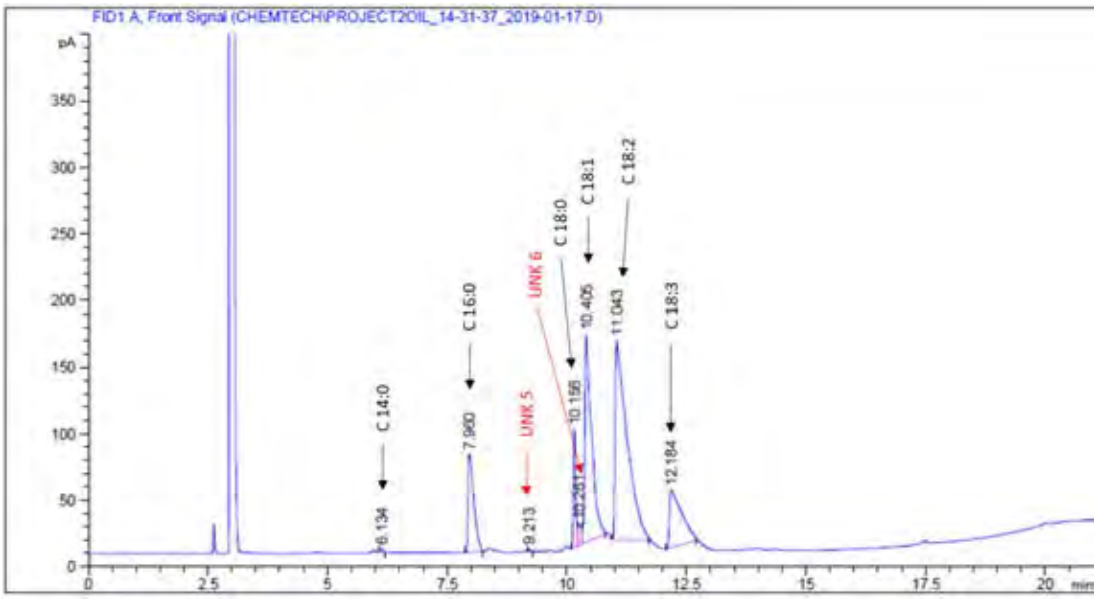
ตารางที่ ก.7 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	10.0045	1.5225	15.2182
2	10.0003	1.4571	14.5706
เฉลี่ย	10.0024	1.4898	14.8944 ± 0.3238

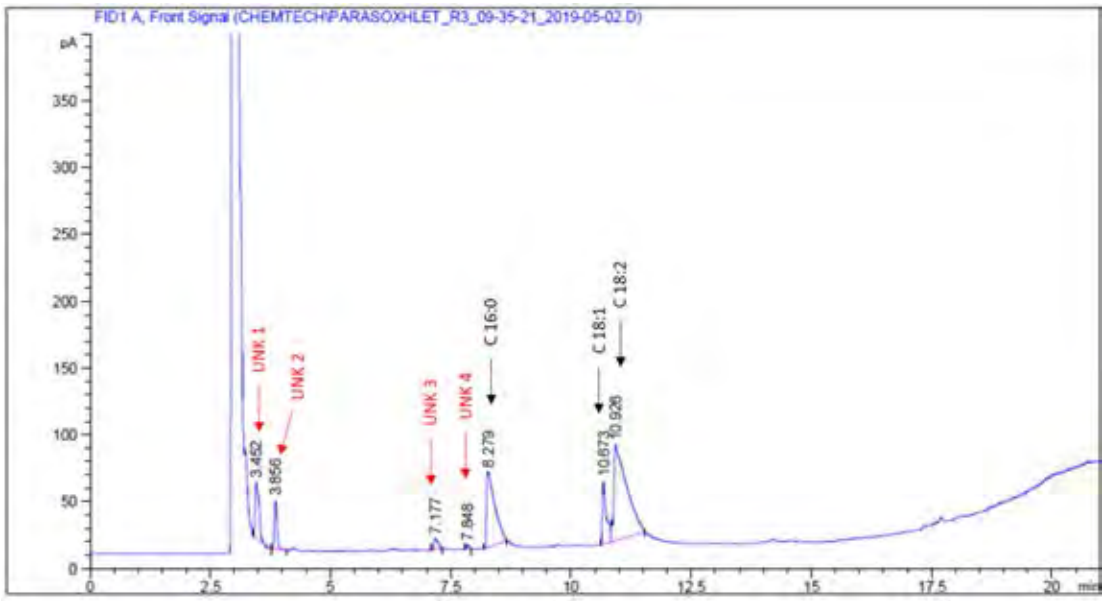
ตารางที่ ก.8 ผลได้ของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำหนักเมล็ดยางพารา (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ (กรัม)	ร้อยละผลได้
1	10.0024	1.5584	15.5803
2	10.0122	1.6357	16.3371
เฉลี่ย	10.0073	1.5971	15.9587 ± 0.3784

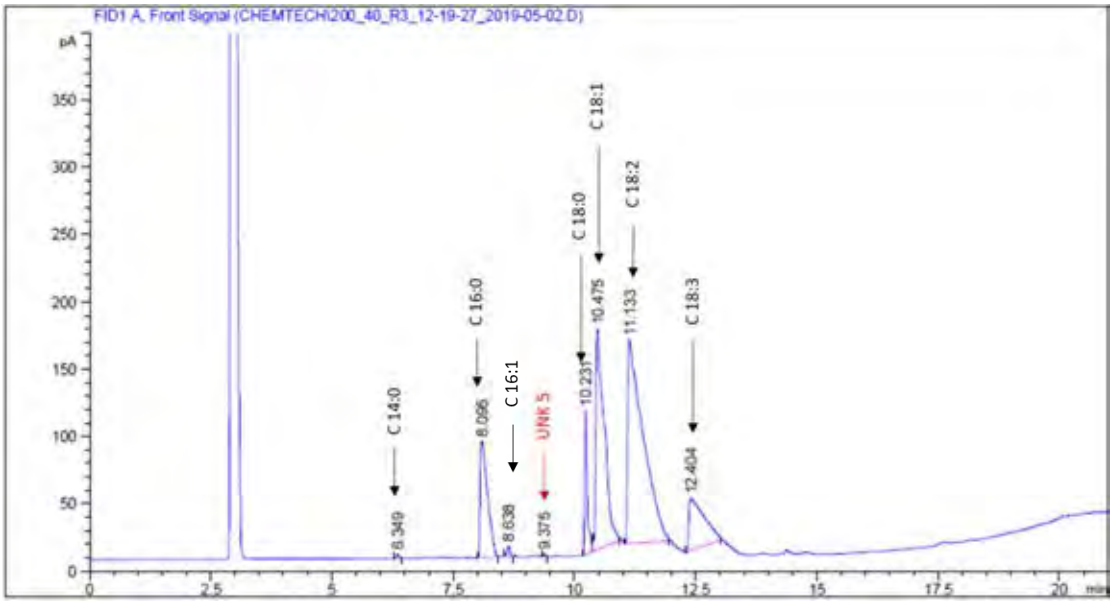
ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันที่สกัดได้



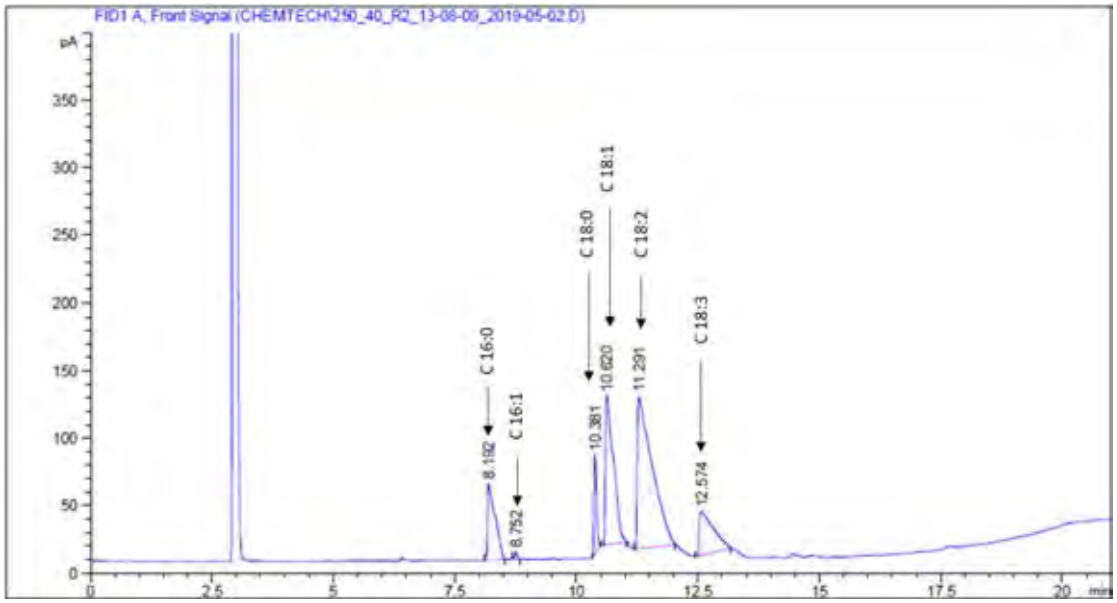
รูปที่ ก.1 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว



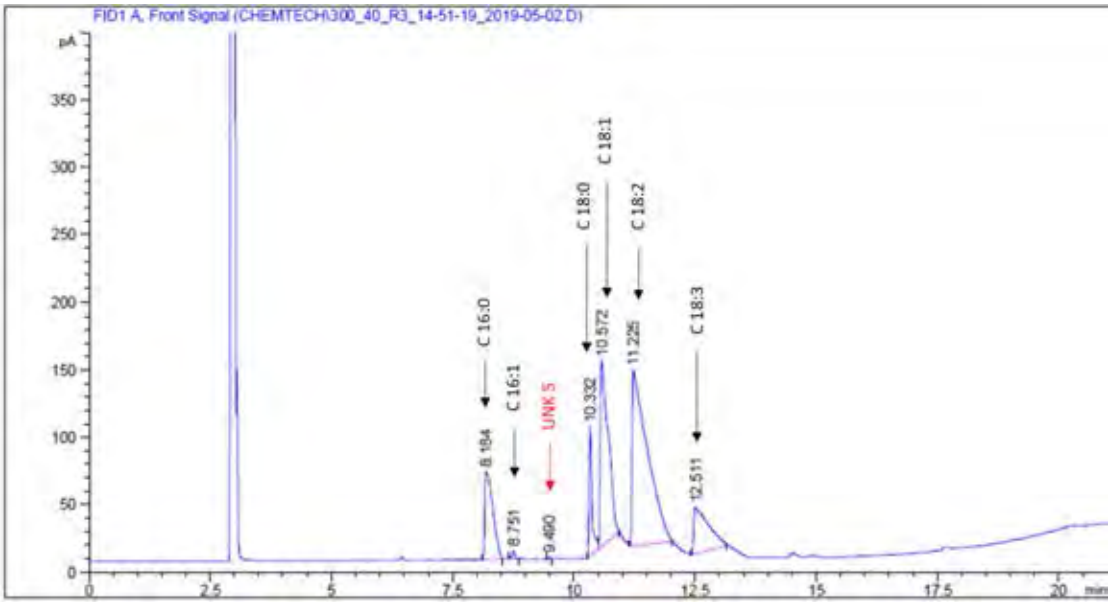
รูปที่ ก.2 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน



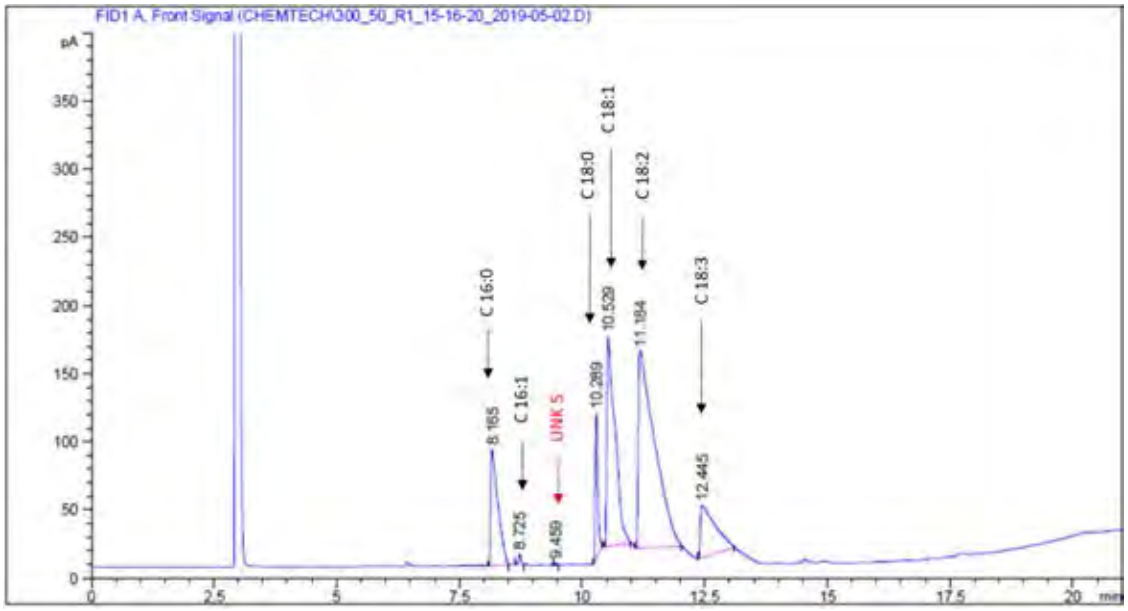
รูปที่ ก.3 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



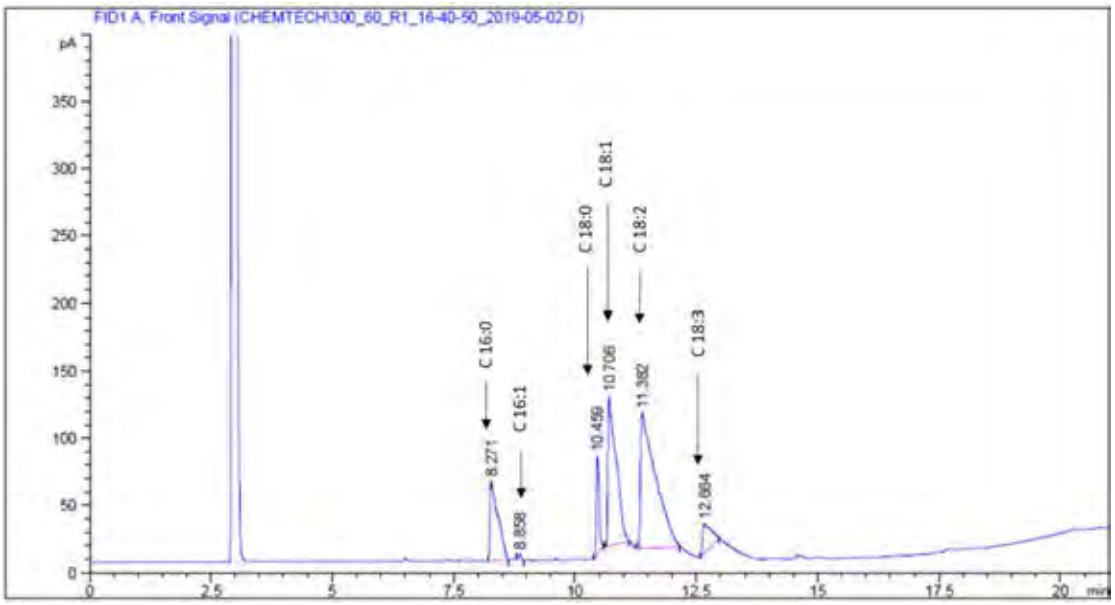
รูปที่ ก.4 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 250 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.5 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.6 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ ก.7 โครมาโตแกรมของน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

บรรณานุกรม

[1] การยางแห่งประเทศไทย. น้ำมันจากเมล็ดยางพารา.[Online]. Available from: http://rubber.-oie.go.th/ [Accessed 2019, Mar 5].

[2] สุภิญญา ชูใจ และคณะ. (2554). ผลของระดับเนื้อในเมล็ดยางพาราและกากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมันในสูตรอาหารข้นต่อปริมาณการกินได้และกระบวนการหมักในกระเพาะรูเมนในแพะที่ได้รับหญ้าซิกแนลแห้งเป็นอาหารหลัก. แก่นเกษตร, (49) 43-54.

[3] เมล็ดยางพารา [online] Available from: https://thai.alibaba.com/product-detail/vietnam-rubber-seeds-50023038341.html. [Accessed 2019, Mar 5].

[4] Orasiri. 2009. ยางพารา พืชเศรษฐกิจไทย ใส่ใจโลกร้อน. [Online]. Available from: http://orasirii.blogspot.com/ [Accessed 2019, Mar 5].

[5] จตุโชค จันทรภูมี. กำจัดโรคในสวนยางพาราแบบปลอดสารพิษ. [Online]. Available from: https://www.thaigreenagro.com/กำจัดโรคในสวนยางพาราแบ/ [Accessed 2019, Mar 5].

[6] ชนะ วันหนุน. ยางพารา. [Online]. Available from: http://botanykuszone1.weebly.com/36183634359136 14363436193634.html. [Accessed 2019, Mar 5].

[7] เดลินิวส์. 2015. เมล็ดยางพารา-เรื่องน่ารู้. [Online]. Available from: https://www.dailynews.co.th/agriculture /348826. [Accessed 2019, Mar 5].

[8] Kittigowittana K., Wongsakul S., Krisdaphong P., Jimtaisong A., Saewan N., Fatty acid composition and biological activities of seed oil from rubber (Hevea brasiliensis) cultivar RRIM 600. International of journalof applied research in natural product. 2008. 6(2): 1-7.

[9] Asuquo J. E., Anusiem A. C. I., Etim E. E., Extraction and Characterization of Rubber Seed Oil. InternationalJournal of Modern Chemistry, 2012. 1(3): 109-115.

[10] Savoire R., Lanoisellé J. L., Vorobiev E., Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds. Food andBioprocess Technology. 2013. 6(1): 1-16.

[11] ดารณี เจริญสุข. น้ำมันเมล็ดยางพารากับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. 2011. 5(3): 25.

[12] ศศิกัญญา ดอนดีไพร. การสกัดด้วยตัวทำละลาย. [Online]. Available from: https://www.slideshare.net/jub21 /ss-8396895. [Accessed 2019, Mar 6].

[13] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. การสกัดด้วยตัวทำละลาย. [Online]. Available from: http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/chapter8.pdf. [Accessed 2019, Mar 6].

[14] ผศ.ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ศาสตราจารย์ เกียรติคุณ และ ดร. นิธิยา รัตนาปนนท์. การสกัดด้วยซอกห์เลต. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร ครบวงจร. [Online]. Available from http://www.foodnetworksolution.com/ wiki/word/2864/soxhlet-extraction- [Accessed 2019, Mar 6].

[15] สุรัตน์วดี จิวะจินดา มณี ตันติรุ่งกิจ มณฑา วงศ์มณีโรจน์ และ อุดม แก้วสุวรรณ์. การสกัดสารหอมจากดอกไม้ไทย. [Online]. Available from: http://www.ku.ac.th/e-magazine/dec51/agri/agri1.htm. [Accessed 2019, Mar 6].

[16] Soxhlet extraction. [Online]. Available from: http://keywordsuggest.org/gallery/1016728.html. [Accessed 2019, Mar 6].

[17] Current research. Supercritical fluid. [Online] Available from http://sfe.kkft.bme.hu/en/current-research. html. [Accessed 2019, Mar 6].

[18] Supercritical Fluid Technology - Taiwan Supercritical Technologies Co., Ltd. [Online] Available from: http://www.tst.tw/en/technology-more.php?Key=1.[Accessed 2019, Mar 6].

[19] สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม และอาทิตย์ รังสีสันติวานนท์. (). การสกัดสารด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวด. วารสารศูนย์บริการวิชาการ. 2003. 2: 40.

[20] Mhemdi H., Rodier E., Kechaou N., Fages J., A supercritical tuneable process for the selective extraction of fats and essential oil from coriander seeds. Journal of Food Engineering. 2011. 105: 609-616.

[21] Lee, N. Y., Setapar, S., Sharif, N., Ahmad, A., Khatoon, A., Azizi, C. M., & Idayu, M. I., Extraction of rubber (Hevea brasiliensis) seed oil using supercritical carbon dioxide and soxhlet extraction. Research Journal of Chemistry and Environment. 2013. 17: 46-52.

[22] Koubaa M., Barba F.J., Mhemdi H., Grimi N., Koubaa W., Vorobiev E., Gas Assisted Mechanical Expression (GAME) as a promising technology for oil and phenolic compound recovery from tiger nuts. Food Sci. 2015a. 32: 172-180.

[23] อติพร พิพัฒน์ธาดานุกูล และเบญจวรรณ สุระเรืองชัย. การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไวด์ภาวะเหนือวิกฤต. การสกัดสารมีค่าจากเศษพืชด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต, หน้า 9.

[24] ศจี น้อยเขียว และ ศรินทิพ สุกใส. การผลิตกรดไขมันเพื่อใช้เป็นสารมาตรฐานในการศึกษาแบบแผนชนิดของกรดไขมันด้วยก๊าซโครมาโตกราฟี. สถาบันเทคโนโลชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 13-14.