การผลิตน้ำมันเมล็ดมะรุม *Moringa oleifera* โดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล

น.ส.พิชญา มั่นคง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Moringa oleifera SEED OIL PRODUCTION BY COMBINED SUPERCRITICAL CO_2 AND MECHANICAL EXTRACTION

Miss Pichaya Munkong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันเมล็ดมะรุม *Moringa oleifera* โดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล
โดย	น.ส.พิชญา มั่นคง
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

-- คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

-- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว)

-- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

-- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ศศิธร สรรพ่อค้า)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พิชญา มั่นคง : การผลิตน้ำมันเมล็ดมะรุม *Moringa oleifera* โดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล. (*Moringa oleifera* SEED OIL PRODUCTION BY COMBINED SUPERCRITICAL CO_2 AND MECHANICAL EXTRACTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

น้ำมันเมล็ดมะรุมเป็นแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวที่ดี และมีฤทธิ์ทางชีวภาพสูง งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมหลังการสกัดเชิงกลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยทำการทดลองในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส และ 150-300 บาร์ที่อัตราการไหลคงที่ 10 กรัมต่อนาที เป็นเวลา 300 นาที ในเครื่องสกัดขนาด 130 มิลลิลิตร ร้อยละผลได้น้ำมันของเมล็ดมะรุมโดยใช้เครื่องอัดสกรูเดี่ยว คือ ร้อยละ 12.50 กากเมล็ดมะรุมมีน้ำมันเหลือร้อยละ 12.31 จากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์แบบซอกห์เลต ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะต่าง ๆ และการสกัดด้วยตัวทำละลายมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน โดยมีกรดโอเลอิกปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดน้ำมันได้ร้อยละผลได้สูงสุด คือ ร้อยละ 10.46 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.97 ของปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดมะรุม และมีความสามารถในการละลาย คือ 9.59 กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบสูงสุด คือ ร้อยละ 91.02±0.62 และ 42.87±2.89 ตามลำดับ และมีปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลสูงสุด คือ 246.06 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา 2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ....

6072081323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORD:

Pichaya Munkong : *Moringa oleifera* SEED OIL PRODUCTION BY COMBINED SUPERCRITICAL CO_2 AND MECHANICAL EXTRACTION. Advisor: Prof. Somkiat Ngamprasertsith, Ph.D. Co-advisor: RUEANGWIT SAWANGKAEW, Ph.D.

Moringa oleifera seed oil is a good source of monounsaturated fatty acid and has high biological activities. In this study, the supercritical carbon dioxide ($SCCO_2$) extraction process for the *Moringa oleifera* seed cake, which was extracted by mechanical extraction, was investigated by performing experiments in the range of 40-70 ^{o}C and 150-300 bar at constant flow rate of 10 g/min for 300 min in the 130 mL extractor. The oil yield of *Moringa oleifera* seed by using a single-screw machine was 12.50%. The seed cake has 12.31% of remaining oil as received by the Soxhlet extraction using petroleum ether. The results showed that the fatty acid compositions of oils extracted by $SCCO_2$ and petroleum ether were very similar and contains over 80% of oleic acid. The optimum $SCCO_2$ extraction oil yield was 10.46% and the solubility was 9.59 g/kg CO_2 at 60 ^{o}C and 300 bar. The 84.97 % of remaining oil in the *Moringa oleifera* seed residue can be recovered by $SCCO_2$ extraction. In addition, the highest antioxidant and anti-inflammatory activities was 91.02±0.62 % and 42.87±2.89, respectively. The most abundant tocopherol content was 246.06 mg/100 g oil.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Chemical Technology		Student's Signature ....
Academic Year: 2018		Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือของศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ศรินทิพ สุกใส คุณศจี น้อยตั้ง คุณธนพร วิชัย คุณปภัสสรา แสงธนู และว่าที่ร้อยเอก วีระเดช สุขเอียด ที่กรุณาชี้แนะแนวทาง และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเสมอมา

ขอขอบพระคุณดร. วินัฏฐา ศักดาศรี และคุณจริพงศ์ เม่นหวา ที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือ และขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพ และวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาอำนวยความสะดวก และอบรมการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณทุนการศึกษา และทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) ที่สนับสนุนจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน

พิชญา มั่นคง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ... ง

กิตติกรรมประกาศ ... จ

สารบัญ ... ฉ

สารบัญรูป ... ฌ

สารบัญตาราง ... ฎ

บทที่ 1 บทนำ ... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ... 1

1.2 วัตถุประสงค์ ... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ... 2

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย ... 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 4

2.1 มะรุม ... 4

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะรุม ... 4

2.1.2 ประโยชน์ของต้นมะรุม ... 6

2.2 น้ำมันเมล็ดมะรุม ... 6

2.2.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุม ... 6

2.2.2 ประโยชน์ของน้ำมันเมล็ดมะรุม ... 9

2.3 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีดั้งเดิม ... 11

2.3.1 การสกัดด้วยแรงกล ... 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย 11

2.4 การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 12

2.4.1 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤตต่อการสกัด 14

2.4.2 ปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 14

2.4.3 ข้อดีของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในการสกัด 16

2.4.4 ภาวะการสกัดน้ำมันจากเมล็ดชนิดต่างๆ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 16

2.5 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีต่าง ๆ 18

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 22

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 22

3.1.1 อุปกรณ์ 22

3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมี 22

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง 23

3.2.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 24

3.2.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมด้วยตัวทำละลายโดยเครื่องซอกห์เลต 24

3.2.3 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 25

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ ฤทธิ์ทางชีวภาพ และปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดได้ 28

3.3.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดได้ 28

3.3.2 วิเคราะห์ฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 29

3.3.3 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 29

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 30

4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ 34
4.3 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 35
4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุม 35
4.3.2 ผลของความดันต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุม 37
4.3.3 ความสามารถในการละลายน้ำมันเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต38
4.3.4 ภาวะที่สกัดได้ปริมาณน้ำมันสูงสุด 42
4.4 องค์ประกอบกรดไขมันน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ 43
4.5 ฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 45
4.6 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล (α-tocopherol) ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) 46
4.7 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 51
5.1 สรุปผลการทดลอง 51
5.2 ข้อเสนอแนะ 51
บรรณานุกรม 52
ภาคผนวก 59
ประวัติผู้เขียน 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 เมล็ดมะรุม 1

รูปที่ 2.1 ต้นมะรุม 5

รูปที่ 2.2 ใบมะรุม 5

รูปที่ 2.3 ดอกมะรุม 5

รูปที่ 2.4 ฝักมะรุม 5

รูปที่ 2.5 เมล็ดมะรุม 6

รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระดีพีพีเอชกับสารต้านอนุมูลอิสระ 10

รูปที่ 2.7 เครื่องสกัดน้ำมันแบบเกลียวอัด 11

รูปที่ 2.8 เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต 12

รูปที่ 2.9 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ 13

รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์สู่ภาวะเหนือวิกฤต 13

รูปที่ 3.1 เมล็ดมะรุม 23

รูปที่ 3.2 เมล็ดมะรุมกระเทาะเปลือก 23

รูปที่ 3.3 เครื่องอัดสกรูเดี่ยว 24

รูปที่ 3.4 ชุดสกัดแบบซอกห์เลต 25

รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยแบบหมุน 25

รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 27

รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟรุ่น 7890B ของ Agilent Technologies........ 28

รูปที่ 4.1 ดุลมวลเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 30

รูปที่ 4.2 น้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 32

รูปที่ 4.3 น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 32

รูปที่ 4.4 น้ำมันเมล็ดมะรุมบริสุทธิ์หลังจากการกรอง 33

รูปที่ 4.5 กากเมล็ดมะรุมแบบกระเทาะเปลือกที่ติดภายในเครื่องอัดสกรูเดี่ยวหลังการบีบอัด 33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.6 น้ำมันเมล็ดมะรุมแบบกระเทาะเปลือกที่ติดภายในเครื่องอัดสกรูเดี่ยวหลังการบีบอัด....... 33

รูปที่ 4.7 น้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้จากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ 34

รูปที่ 4.8 น้ำมันกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันที่แตกต่างกัน 36

รูปที่ 4.9 น้ำมันกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 38

รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำมันกากเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบสารอาหารของเมล็ดมะรุม 6

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุม 7

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะรุม 8

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโทโคฟีรอลและสเตอรอลของน้ำมันเมล็ดมะรุม 8

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแก๊ส ของไหลภาวะเหนือวิกฤต และของเหลว 14

ตารางที่ 2.6 ร้อยละผลได้ของน้ำมัน และภาวะที่ใช้ในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ 16

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีต่าง ๆ 18

ตารางที่ 2.8 สรุปภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ 29

ตารางที่ 4.1 ดุลมวลเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว 31

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำมันของเมล็ดมะรุมและกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์. 34

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการละลายน้ำมันกากเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 39

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตน้ำมันของกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 42

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบกรดไขมันน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 44

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการยับยั้งสาร DPPH และร้อยละการยับยั้ง NO ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะที่แตกต่างกัน 46

ตารางที่ 4.7 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล (α-tocopherol) ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่แตกต่างกัน 47

ตารางที่ 4.8 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต 48

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบร้อยละผลได้ ภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ปริมาณกรดโอเลอิก ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล ร้อยละการยับยั้ง DPPH และ NO น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 49

ตาราง ก.1 ร้อยละผลได้น้ำมันจากเมล็ดมะรุมและกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์......... 60

ตาราง ก.2 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (150 บาร์)... 60

ตาราง ก.3 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (200 บาร์)... 62

ตาราง ก.4 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (250 บาร์)... 63

ตาราง ก.5 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (300 บาร์)... 65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะรุม (*Moringa oleifera* Lam.) จัดอยู่ในวงศ์ Moringaceae พบได้ทุกภาคในประเทศไทย โดยมีต้นกำเนิดแถบใต้เชิงเทือกเขาหิมาลัย ปัจจุบันมะรุมพบมากในตะวันออกกลาง ประเทศในแอฟริกา และเอเชีย (1, 2) มะรุมเป็นพืชที่ปลูกง่าย เนื่องจากสามารถปลูกได้ดีในดินทุกชนิด และมะรุมต้องการน้ำระดับปานกลาง นอกจากนี้มะรุมมีกลิ่นเฉพาะตัว ส่งผลให้มีแมลงศัตรูพืชรบกวนน้อย (2, 3)

มะรุม อาจเรียกว่า "The Miracle Tree" เนื่องจากทุกส่วนของมะรุมมีประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น ใบมะรุมนำไปทำเป็นยาพื้นบ้าน เนื่องจากอุดมไปด้วยโปรตีน เกลือแร่ สารประกอบแคโรทีน และสารต้านอนุมูลอิสระ (4) เมล็ดมะรุม (รูปที่ 1.1) มีปริมาณน้ำมันสูงที่สุดถึงร้อยละ 40 น้ำมันเมล็ดมะรุมเรียกว่า Ben Oil หรือ Behen Oil โดยมีกรดโอเลอิกมากกว่าร้อยละ 70 ใกล้เคียงกับน้ำมันมะกอก (1) น้ำมันเมล็ดมะรุมมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันคุณภาพสูงจึงเหมาะสำหรับการรับประทาน เนื่องจากช่วยลดคอเรสเทอรอลในเส้นเลือด และป้องกันโรคหัวใจ (2) น้ำมันเมล็ดมะรุมประกอบไปด้วยวิตามินเอ วิตามินซี สารต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังมีสมบัติต้านจุลินทรีย์ ฆ่าเชื้อ และต้านการอักเสบจึงใช้ในการรักษาโรคผิวหนังจากสมบัติ และองค์ประกอบน้ำมันจากเมล็ดมะรุมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ น้ำมันเมล็ดมะรุมจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และยา (5)

รูปที่ 1.1 เมล็ดมะรุม

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมแบบดั้งเดิมมี 2 วิธี ได้แก่ การบีบอัดเชิงกล การสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยทั่วไปร้อยละผลได้น้ำมันจากการบีบอัดเชิงกลต่ำ ในขณะที่การสกัดด้วยตัวทำละลาย

ร้อยละผลได้น้ำมันสูง แต่สารเคมีที่ใช้ในการสกัดตกค้าง ดังนั้นการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นการสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตต้องลดขนาดอนุภาคก่อนเข้าเครื่องสกัด ในงานวิจัยนี้สกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตจากกากเมล็ดมะรุมหลังสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว (screw-press) เพื่อลดขั้นตอนการลดขนาดอนุภาค ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่าย และลดเวลาในการสกัด โดยศึกษาผลของความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้น้ำมันสูงที่สุด รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบและฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่สกัดได้ จากงานวิจัยที่ผ่าน (6) มาพบว่าความดันส่งผลต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมากกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยแรงกล

1.2.2 ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

1.2.3 ศึกษาองค์ประกอบและฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้จากการสกัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เปรียบเทียบร้อยละผลได้ องค์ประกอบ และฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมหลังสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต และการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยตัวแปรที่ศึกษาในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ อุณหภูมิและความดัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล

1.4.2 ทราบองค์ประกอบ และฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัย

1.5.2 สกัดน้ำมันจากเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

1.5.3 สกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ในเครื่องสกัดซอกห์เลต โดยทำการสกัดที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

1.5.4 สกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตโดยศึกษาผลอุณหภูมิ และความดัน โดยสกัดภายใต้ความดันที่ 15 ถึง 30 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 10 กรัมต่อนาที และเวลาที่ใช้สกัด 300 นาที

1.5.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต และปิโตรเลียมอีเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

1.5.6 วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (diphenyl-picryhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay) และวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านการอักเสบด้วยวิธียับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ (Nitrite radical scavenging assay)

1.5.7 วิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

1.5.8 วิเคราะห์ สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะรุม

มะรุม (*Moringa oleifera*) เป็นสายพันธุ์มะรุมที่เป็นที่รู้จัก และปลูกมากที่สุดส่วนมากแพร่กระจายอยู่บริเวณเขตร้อน และกึ่งเขตร้อน ปัจจุบันสามารถพบได้มากในตะวันออกกลาง เอเชีย ประเทศในแอฟริกา และอเมริกากลาง (1, 7) มะรุมสามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วแม้ปลูกในดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์รวมทั้งมีความทนทานต่อความแห้งแล้ง (1, 8)

2.1.1 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของมะรุม

มะรุมเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ลำต้น (รูปที่ 2.1) เป็นพุ่มโปร่ง สูง 15-20 เมตร เปลือกลำต้นเป็นสีเทาอ่อน ผิวค่อนข้างเรียบ ใบ (รูปที่ 2.2) รูปไข่ปลายใบ และฐานใบมน ผิวใบสีเขียว สีผิวด้านล่างจะอ่อนกว่าด้านบน เป็นใบประกอบเหมือนขนนก ชนิดที่แตกใบย่อย 3 ชั้น ใบกว้าง 1-1.5 นิ้ว ยาว 20-40 เซนติเมตร ออกเรียงแบบสลับกัน ใบย่อยยาว 1-3 เซนติเมตร ดอก (รูปที่ 2.3) ออกเป็นช่อสีขาวอยู่ตามข้อ บริเวณยอดดอกมีสีเหลืองนวล กลีบดอกมี 5 กลีบ เกสรกลางดอกเป็นสีเหลืองเข้ม ผลหรือฝัก (รูปที่ 2.4) มีความยาว 20-50 เซนติเมตร เปลือกผลเป็นสีเขียว มีส่วนคอดและส่วนมนเป็นระยะตามความยาวของฝัก ฝักแก่ผิวเปลือกเป็นสีน้ำตาล เมล็ด (รูปที่ 2.5) มีเยื่อหุ้มกลมเป็นสีน้ำตาลรูปสามเหลี่ยม มีปีกบางหุ้ม 3 ปีก เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร (2, 9)

อาณาจักร : Plantae ชั้น : Magnoliopsida

อันดับ : Brassicales วงศ์ : Moringaceae

สกุล : Moringa สปีชีส์ : *Moringa oleifera*

ชื่อทวินาม : *Moringa oleifera* Lam.

ชื่อสามัญ (อังกฤษ) : Horse radish tree, Drumstick

ชื่อสามัญ (ไทย) : มะรุม (ภาคกลาง) บ่าค้อนก้อม มะค้อนก้อม (ภาคเหนือ) ผักเนื้อไก่ (ฉาน-แม่ฮ่องสอน) บักอีฮุม มักรุม (ภาคอีสาน) รุม (ภาคใต้) กาแน้งเดิง (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.1 ต้นมะรุม (10)

รูปที่ 2.2 ใบมะรุม (10)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.3 ดอกมะรุม (10)

รูปที่ 2.4 ฝักมะรุม (10)

รูปที่ 2.5 เมล็ดมะรุม (11)

2.1.2 ประโยชน์ของต้นมะรุม

ทุกส่วนของต้นมะรุมเหมาะแก่การนำมาบริโภค เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารสูง และมีสรรพคุณที่น่าสนใจ เช่น รากช่วยบำรุงไฟธาตุ และแก้อาการบวม เปลือกช่วยขับลม เปลือกสับให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ผ้าห่อทำเป็นลูกประคบนึ่งให้ร้อนนำมาใช้ประคบ แก้โรคปวดหลัง และปวดตามข้อ ใบมะรุมช่วยเพิ่มภูมิต้านทานให้ร่างกาย ช่วยแก้เลือดออกตามไรฟัน พอกแผลช่วยห้ามเลือด แก้อักเสบ ขับปัสสาวะ มีฤทธิ์เป็นยาระบายอ่อน ๆ มีสารต้านอนุมูลอิสระ แคลเซียม วิตามินซี และแร่ธาตุสูง ดอกขับน้ำตา ขับปัสสสาวะ ช่วยให้หลับสบาย และช่วยบำรุงร่างกาย ฝักแก้ไข้ และบำรุงร่างกาย เมล็ดรักษาโรคผิวหนัง แก้ผิวแห้ง รักษาโรคที่เกิดจากเชื้อรา แก้ไอ เพิ่มภูมิต้านทานให้แก่ร่างกาย และเมล็ดบดพวกแก้ปวดตามข้อ (12, 13)

2.2 น้ำมันเมล็ดมะรุม

2.2.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมล็ดมะรุมมีปริมาณน้ำมันประมาณร้อยละ 38.67±0.03 และโปรตีนมีปริมาณร้อยละ 35.97±0.19 โดยน้ำหนัก สารอาหารอื่น ๆ ของเมล็ดมะรุมแสดงในตารางที่ 2.1 ปริมาณสารอาหารต่าง ๆ ขึ้นกับที่ตั้ง ภูมิอากาศ และสิ่งแวดล้อม (14)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบสารอาหารของเมล็ดมะรุม (กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้ง) (14)

สารอาหาร	ปริมาณ
โปรตีน (กรัม)	35.97±0.19
ไขมัน (กรัม)	38.67±0.03
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	8.67±0.12
เส้นใย (กรัม)	2.87±0.03
วิตามินบี 1 (มิลลิกรัม)	0.05
วิตามินบี 2 (มิลลิกรัม)	0.06

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบสารอาหารของเมล็ดมะรุม (กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้ง) (14) (ต่อ)

สารอาหาร	ปริมาณ
วิตามินบี 3 (มิลลิกรัม)	0.2
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	4.5±0.17
วิตามินอี (มิลลิกรัม)	751.67±4.41
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	45
แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	635±8.66
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	75
ทองแดง (มิลลิกรัม)	5.20±0.15
ซัลเฟอร์ (มิลลิกรัม)	0.05

น้ำมันเมล็ดมะรุมเป็นของเหลวสีเหลืองทองหรือสีเหลืองอมเขียวที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.2 (1)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุม (1)

สมบัติ	ค่า
ความหนาแน่น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) (ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส)	0.881-0.920
ดัชนีการหักเหแสง (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)	1.455-1.470
สี	
หน่วยสีแดง	ND-2.2
หน่วยสีเหลือง	22.3-70.0
จุดเกิดควัน (องศาเซลเซียส)	198-204
ความหนืด (เซนติพอยซ์)	43.6-103.0
สภาพกรด (ร้อยละ)	0.32-4.00
ค่าสะพอนิฟิเคชัน (มิลลิกรัมของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมัน 1 กรัม)	178.1-199.3
ปริมาณไอโอดีน (กรัมของไอโอดีนต่อน้ำมัน 100 กรัม)	65.58-69.45

ND คือ ตรวจไม่พบ

องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะรุม มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลักโดยสูงถึงร้อยละ 75.2 และมีปริมาณโอเลอิกสูงถึงร้อยละ 70 นอกจากนี้ยังมีกรดไขมันอื่น ๆ (15) แสดงดังตารางที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะรุม (15)

ชนิดของกรดไขมัน	**ร้อยละ**
กรดไมริสติก (C14:0)	0.2
กรดปาล์มิติก (C16:0)	6.8
กรดปาล์มิโตเลอิก (C16:1)	2.9
กรดสเตียริก (C18:0)	6.5
กรดโอเลอิก (C18:1)	70
กรดไลโนเลอิก (C18:2)	0.9
กรดอะราคิดิก (C20:0)	4.2
กรดอีโคซีโนอิก(C20:1)	1.4
กรดเบเฮนนิก (C22:0)	5.8
กรดลิกโนซีริก (C24:0)	1.3
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	75.2
กรดไขมันอิ่มตัว	24.8

น้ำมันเมล็ดมะรุมมีโทโคฟีรอล และสเตอรอลเป็นองค์ประกอบ โดยปริมาณโทโคฟีรอล และสเตอรอลของน้ำมันเมล็ดมะรุมแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโทโคฟีรอลและสเตอรอลของน้ำมันเมล็ดมะรุม (16)

	ปริมาณ
โทโคฟีรอล (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
แอลฟา-โทโคฟีรอล (α-Tocopherol)	5.05-161.30
แกมมา-โทโคฟีรอล (γ-Tocopherol)	25.40-104.00
เดลตา-โทโคฟีรอล (δ-Tocopherol)	3.55-108.01
สเตอรอล (ร้อยละ)	
คอเลสเตอรอล (Cholesterol)	0.10-0.18
บลาสิกาสเตอรอล (Brassicasterol)	0.05-0.06
แคมเปสเตอรอล (Campesterol)	0.07-17.59
แคมเปสตานอล (Campestanol)	0.33-0.36
สติกมาสเตอรอล (Stigmasterol)	0.11-23.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโทโคฟีรอลและสเตอรอลของน้ำมันเมล็ดมะรุม (16) (ต่อ)

	ปริมาณ
เออร์โกสเตอรอล (Ergosterol)	0.30-0.36
เบต้า-ซิโตสเตอรอล (β-sitosterol)	0.23-50.07
เคลโรสเตอรอล (Clerosterol)	0.95-2.08
สติกมาสตานอล (Stigmastanol)	0.64-1.05
เดลตา-5-อะเวนาสเตียรอล (δ5-avenasterol)	8.46-12.79
เดลตา-7,14-สติกมาสตานอล (δ7,14-stigmastanol)	0.39-0.83
เดลตา-7-อะเวนาสเตียรอล (δ7-avenasterol)	0.53-1.62

วิตามินอี (โทโคฟีรอล) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระทำลายเซลล์ หรือเนื้อเยื่อ วิตามินอีละลายได้ดีในไขมัน และเป็นวิตามินที่ร่างกายจำเป็นต้องได้รับ โดยวิตามินอีจะช่วยป้องกันการเกิดลิ่มเลือด การอุดตันของเส้นเลือด การแตกของเม็ดเลือดแดง และลดการเกิดกระบวนการอักเสบในร่างกายที่อาจนำไปสู่การเกิดโรคต่าง ๆ (17)

แพลนท์สเตอรอล (Plant Sterol) หรือไฟโตสเตอรอล (Phytosterol) เป็นสเตอรอลที่ได้จากพืช น้ำมันเมล็ดมะรุมประกอบด้วย เบต้า-ซิโตสเตอรอล สติกมาสเตอรอล แคมเปสเตอรอล และเดลตา-5-อะเวนาสเตียรอล เป็นองค์ประกอบหลัก ไฟโตสเตอรอลช่วยลดระดับโคเลสเตอรอลในเลือด สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งและเซลล์เนื้องอกได้ ยับยั้งการเกิดการตายของเซลล์ (apoptosis) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และยังป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของน้ำมันเมื่อมีการให้ความร้อน (1, 18, 19)

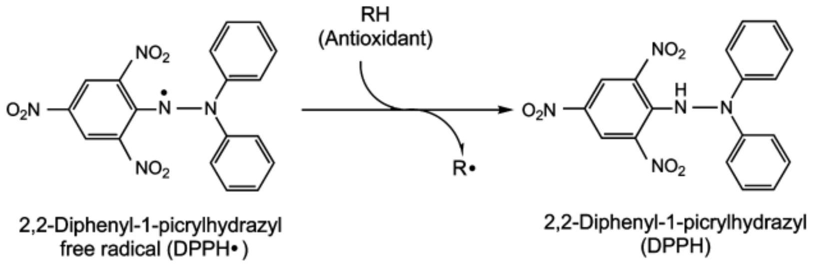
2.2.2 ประโยชน์ของน้ำมันเมล็ดมะรุม

น้ำมันเมล็ดมะรุม เรียกว่า “Ben oil” หรือ “Behen oil” มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันคุณภาพสูง โดยมีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งปริมาณกรดโอเลอิกที่พบในน้ำมันเมล็ดมะรุมใกล้เคียงกับน้ำมันมะกอก (1) น้ำมันเมล็ดมะรุมอุดมไปด้วยวิตามินเอ วิตามินซี และสารต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังมีสมบัติต้านจุลินทรีย์ ฆ่าเชื้อ และต้านการอักเสบจึงใช้ในการรักษาโรคผิวหนัง (5) น้ำมันเมล็ดมะรุมเหมาะสำหรับการรับประทาน เนื่องจากช่วยลดคอเรสเทอรอลในเส้นเลือด ป้องกันการเกิดโรคหัวใจ (2) ลดความดันโลหิต และลดระดับน้ำตาลในเลือด (20) จากสมบัติและองค์ประกอบ

ของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่กล่าวข้างต้น น้ำมันเมล็ดมะรุมจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และยา(5)

การวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH, diphenyl-picryhydrazyl radical scavenging assay) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารต้านอนุมูลจากธรรมชาติ โดยใช้สารดีพีพีเอชซึ่งเป็นสารอนุมูลอิสระสังเคราะห์ในรูปอนุมูลอิสระคงตัว มีสีม่วงและสามารถดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร เมื่ออนุมูลอิสระดีพีพีเอชทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายในแอลกอฮอล์ สารต้านอนุมูลอิสระจะให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระดีพีพีเอชทำให้ดีพีพีเอชไม่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระจนเปลี่ยนเป็นสีเหลือง จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง และนำมาคำนวณร้อยละการยับยั้งดีพีพีเอช ดังสมการที่ 2.1 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระนิยมแสดงในรูปความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ทำให้สารอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 50 (50 % of inhibitory concentration) หรือเรียกว่า IC_{50} (21-23)

ร้อยละการยับยั้ง DPPH = $((A_{control} - A_{\text{สารตัวอย่าง}}) / A_{control}) \times 100$ (2.1)
เมื่อ $A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่ไม่เติมตัวอย่าง
เมื่อ $A_{\text{สารตัวอย่าง}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ที่เติมตัวอย่าง



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระดีพีพีเอชกับสารต้านอนุมูลอิสระ (24)

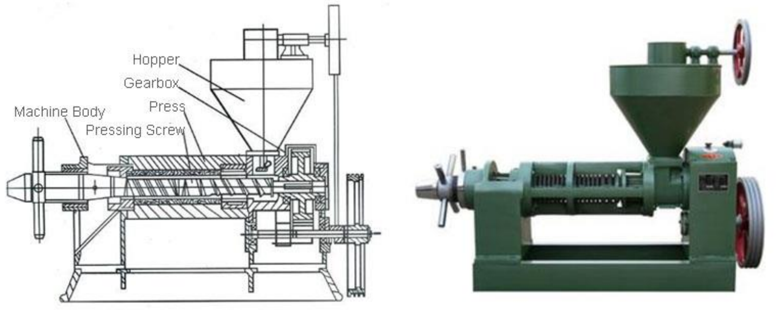
ฤทธิ์ต้านการอักเสบวิเคราะห์ด้วยวิธียับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ (Nitrite radical scavenging assay) โดยการตรวจวัดปริมาณไนตริกออกไซด์ ที่สร้างขึ้นจากสารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ (Sodium nitroprusside (SNP)) ในสารละลาย Griess สารสกัดที่แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จะทำให้ไนตริกออกไซด์ลดลง และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แสดงผลการยังยั้งเป็นร้อยละโดยเปรียบเทียบกับหลอดที่ไม่มีสารสกัด (22, 25)

2.3 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีดั้งเดิม

การสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน นิยมทำกันมาก โดยในการสกัดมะรุมมี 2 วิธีที่นิยม คือ การสกัดด้วยแรงกล และการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.3.1 การสกัดด้วยแรงกล

การสกัดด้วยแรงกลด้วยเครื่องสกัดน้ำมันแบบเกลียวอัด (รูปที่ 2.7) เหมาะกับพืชน้ำมันเปลือกแข็ง และมีปริมาณน้ำมันสูง วิธีการบีบอัดแบบเกลียวอัดสามารถสกัดปริมาณน้ำมันได้ประมาณร้อยละ 30-40 วิธีนี้ใช้หลักการบีบอัดโดยใช้ความดันอย่างต่อเนื่องจากสกรูไดรฟ์ (Screw Drive) และแรงเสียดทาน เมล็ดพืชจะถูกทำให้ผนังเซลล์แตก และบีบเอาน้ำมันออกมาด้วยแรงอัดเกิดขึ้นระหว่างเกลียวกับผนังกระบอก ในระหว่างการอัดจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างกระบอกกับเกลียวอัดจึงเกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานทำให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียสส่งผลให้สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ สารที่สกัดได้อาจไม่บริสุทธิ์จึงต้องนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง (26, 27)

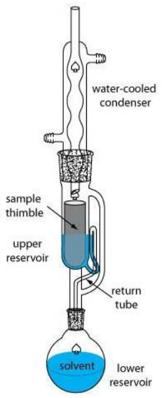


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.7 เครื่องสกัดน้ำมันแบบเกลียวอัด (28)

2.3.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมโดยใช้เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต (Soxhlet extractor) (รูปที่ 2.8) เป็นการสกัดแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมัน (29) โดยส่วนมากนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน และปิโตรเลียมอีเทอร์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ (30) โดยจะให้ความร้อนจนตัวทำละลายระเหย ขึ้นไปเจอระบบหล่อเย็นแล้วจึงควบแน่นกลั่นลงมาผ่านตัวอย่างซึ่งบรรจุในเซลลูโลสทิมเบอร์ เมื่อสารที่สกัดได้สูงถึงระดับกาลักน้ำ สารสกัดจะไหลกลับลงมาในขวดก้นกลม วนจนกระบวนการสกัดสมบูรณ์ โดยสามารถสังเกตจากสีของตัวทำละลาย วิธีนี้อาจเกิดการสลายตัวของสารเนื่องจากความร้อน (29, 31)



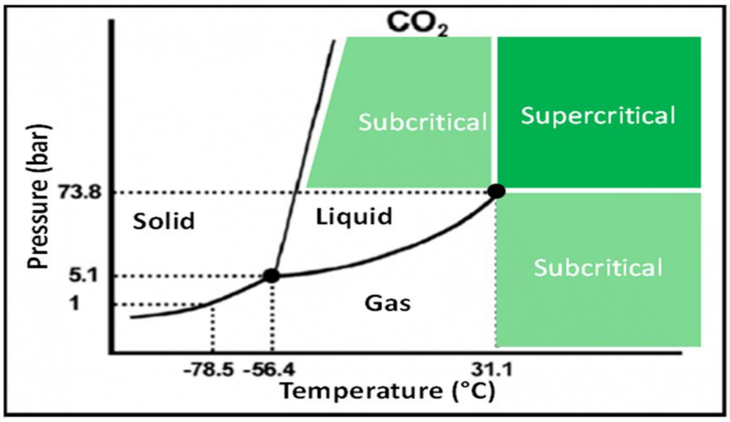
รูปที่ 2.8 เครื่องสกัดแบบซอกห์เลต (32)

ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลายโดยการเลือกชนิดตัวทำละลายอาศัยหลักการ Like dissolve like ปริมาตรตัวทำละลายที่ใช้สกัดต้องมีมากเกินพอ เพื่อทำให้การสกัดเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเฉพาะการสกัดแบบซอกห์เลต เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนกับตัวทำละลาย ตัวทำละลายบางส่วนระเหยขึ้นไป ขณะที่ระดับตัวทำละลายต่ำกว่าระดับกาลักน้ำ ขวดก้นกลมต้องมีตัวทำละลายเหลืออยู่ ตัวทำละลายที่มากเกินพอสามารถระเหยออกด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน เวลาที่สกัดต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากตัวทำละลายเป็นของเหลวจะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของแข็งได้ช้า จึงใช้เวลาในการสกัดนาน เพื่อให้เกิดการรีฟลักซ์ (reflux) ซ้ำของตัวทำละลายหลายครั้ง ทำให้สามารถสกัดสารออกมาได้มากที่สุด และการลดขนาดอนุภาคตัวอย่างจะเป็นการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสกับการละลาย ทำให้สามารถสกัดสารออกมาได้สูงขึ้น (30, 31)

2.4 การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

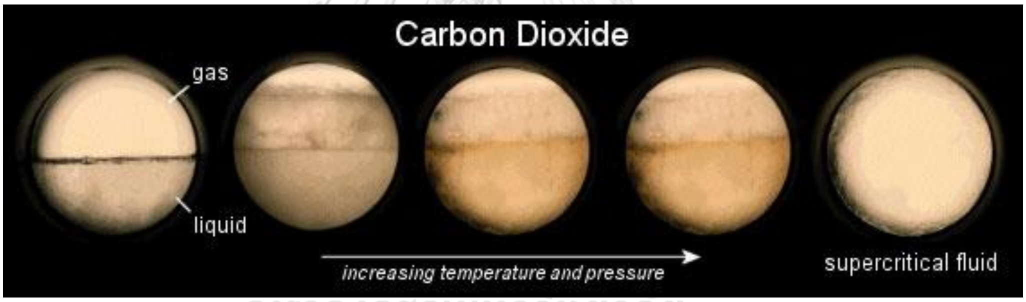
ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (supercritical fluid) หมายถึง ของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันที่อยู่เหนือจุดวิกฤตของของไหล เป็นภาวะที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าอยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว อธิบายได้จากแผนภาพความดัน-อุณหภูมิ รูปที่ 2.9 แสดงถึงภาวะที่สสารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีเส้นหลอมเหลว (fusion line) แบ่งขอบเขตระหว่างของแข็งกับของเหลว และ เส้นความดันไอ (vapor pressure line หรือ boiling line) จะเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระหว่างของเหลวและแก๊ส จุดที่อยู่ระหว่างทั้งสามสถานะเรียกว่า จุดร่วมสาม (triple point) สำหรับจุดวิกฤต (critical point) คือ จุดที่สูงสุดที่แก๊สสามารถกลับมาเป็นของเหลวได้โดยการควบแน่น โดยเรียกอุณหภูมิ และความดันที่จุดนี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤต ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ และเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสาร ของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันสูงกว่าความดันวิกฤต

เรียกว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต คาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤต คือ 31.1 องศาเซลเซียส และ 73.8 บาร์ตามลำดับ (30)



รูปที่ 2.9 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ (33)

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิไปจนสูงกว่าจุดวิกฤติจะไม่สามารถจำแนกสถานะได้ว่าเป็นของเหลวหรือแก๊ส



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์สู่ภาวะเหนือวิกฤต (34)

จากตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติทางเคมีฟิสิกส์อยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว ความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตใกล้เคียงกับความหนาแน่นของของเหลว จึงทำให้ความสามารถในการละลายดี ส่วนความหนืด (viscosity) และสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) มีค่าใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแพร่แทรกเข้าไปในโครงสร้างของของแข็งได้ดี (30)

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแก๊ส ของไหลภาวะเหนือวิกฤต และของเหลว (35)

สถานะ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด (μPa-s)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (mm^2/s)
แก๊ส	1	10	1-10
ของไหลภาวะเหนือวิกฤต	100-1,000	50-100	0.01-0.1
ของเหลว	1,000	500-1,000	0.001

2.4.1 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤตต่อการสกัด

2.4.1.1 สมบัติการถ่ายโอน (Transport property)

ของไหลภาวะเหนือวิกฤตจะสามารถสกัดได้ดีเมื่อ มีความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การแพร่สูง และระยะทางในการแพร่สั้น เนื่องจากส่งผลให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตสามารถกระจายตัวเข้าโครงสร้างของแข็งได้ดี โดยอัตราการถ่ายโอนมวล ความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน ส่วนระยะทางในการแพร่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค (30)

2.4.1.2 สมบัติในการละลายของตัวทำละลาย (Solvent power)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความดันไอตัวถูกละลายสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น แต่ความหนาแน่นลดลง ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต และตัวถูกละลายมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของสารที่ต้องการสกัดลดลง ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความดันให้สูงเพียงพอกับความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่เหมาะสม ดังนั้นความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (30)

2.4.1.3 สมบัติในการเลือกสกัด (Selectivity property)

สมบัติที่ดีอีกข้อหนึ่งของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ การเลือกสกัด ทำได้โดยการปรับความดัน และอุณหภูมิ เพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการสกัด และให้สารที่ไม่ต้องการสกัดถูกสกัดออกมาปริมาณน้อยที่สุด (30)

2.4.2 ปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ปัจจัยและตัวแปรที่ส่งผลต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตต่อร้อยละผลได้ของสารสกัดแสดงดังต่อไปนี้

2.4.2.1 ความดัน

ที่อุณหภูมิคงที่ การปรับความดันส่งผลต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต เมื่อเพิ่มความดันความหนาแน่นของตัวทำละลายจะสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลลดลง และอันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต และสารที่ต้องการถูกละลายสูงขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มความดันส่งผลให้ความดันไอของสารที่ต้องการสกัดลดลง ทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนมวลลดลง (6, 36)

2.4.2.2 อุณหภูมิ

ที่ความดันคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตลดลง แต่ความดันไอสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่อการสกัดทั้งทางบวกหรือทางลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าที่ภาวะนั้นความหนาแน่น หรือความดันไอส่งผลต่อการสกัดมากกว่า (36)

2.4.2.3 ตัวทำละลายร่วม

ตัวทำละลายร่วม เช่น เอทานอล เพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดดีขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต และเพิ่มความมีขั้วทำให้สามารถสกัดสารที่มีขั้วได้ การเติมตัวทำละลายร่วมสามารถลดความดันที่เหมาะสมในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ ส่งผลให้ราคาของเครื่องสกัดลดลงเนื่องจากราคาของถังสกัดขึ้นกับความดันที่เหมาะสมในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (6)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.2.4 ขนาดอนุภาค

การลดขนาดอนุภาคส่งผลให้ปริมาณสารที่สกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กระยะทางในการแพร่ลดลง และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายสูงขึ้น นอกจากนี้การบดอาจทำให้ผนังเซลล์พืชแตก ดังนั้นความต้านทานการถ่ายโอนมวลจึงลดลง และตัวทำละลายเข้าถึงได้ง่ายขึ้น (6)

2.4.2.5 อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

การเพิ่มอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ทำให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลลดลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้สูงขึ้น และลดระยะเวลาในการสกัด อย่างไรก็ตามการใช้อัตราการ

ไหลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไปทำให้อุณหภูมิที่ขาออกของเครื่องสกัดลดลงอย่างรวดเร็ว อาจทำให้เกิดการอุดตันของน้ำแข็งแห้งได้ (6)

2.4.3 ข้อดีของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในการสกัด

ข้อดีของการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ ไม่มีความเป็นพิษ เป็นแก๊สเฉื่อย ไม่ไวไฟ ไม่มีกลิ่น ราคาถูก สามารถหาได้ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นแก๊สที่ภาวะบรรยากาศ จึงทำให้ไม่มีตัวทำละลายตกค้างในสารที่สกัดได้ นอกจากนี้อุณหภูมิภาวะเหนือวิกฤตมีค่าต่ำ จึงสามารถป้องกันการสลายตัวขององค์ประกอบของสารได้ (30)

2.4.4 ภาวะการสกัดน้ำมันจากเมล็ดชนิดต่างๆ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต เป็นวิธีการสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืช การสกัดด้วยวิธีนี้สารที่สกัดได้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากความร้อน และไม่มีการตกค้างของตัวทำละลายและสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยที่ศึกษาการสกัดน้ำมันพืชด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (37) แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ร้อยละผลได้ของน้ำมัน และภาวะที่ใช้ในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตของเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ

เมล็ดพืช	ผู้เขียน	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)	ร้อยละผลได้น้ำมัน
อัลมอนด์	(38)	330	50	20-40	N/R	1.1-5.5	15.5-64.3
	(39)	350	40	0.73-1.43	0.30-1.9	N/R	54.0
	(40)	350-550	35-50	10-30	0.5-8.0	N/R	45.0-60.0
เมล็ดโบราจ	(41)	200-300	10-55	7.5-12.0	N/R	6.6	31.0
	(42)	200-300	40-60	0.20	1.125	7.99	31.0
	(43)	100-350	40	30 L/h	N/R	N/R	30.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมล็ดพืช	ผู้เขียน	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)	ร้อยละผลได้น้ำมัน
จมูกข้าวโพด	(44)	300	42	N/R	N/R	N/R	45.0-55.0
เมล็ดองุ่น	(45)	280-550	40	0.36	0.39-0.97	3.9	10.0
	(46)	100-500	40-60	N/R	N/R	N/R	12.0
เมล็ดอีฟนิงพริมโรส	(42)	200-300	40-60	0.17	0.63	N/R	28.0
เฮเซลนัท	(47)	150-600	40-60	0.12 L/h	1.0-2.0	N/R	56.0-60.0
	(48)	300-450	40-60	0.06-0.3	0.85-1.00	N/R	60.0
เมล็ดลินิน	(49)	300-500	47-52	8.8	0.16-2.00	N/R	35.0-45.0
เมล็ดฟักทอง	(50)	150-300	40-60	0.20	0.50-0.63	N/R	42.0-54.0
วอลนัท	(51)	180-234	35-48	4 L/h	0.01-0.50	N/R	65.0
	(52)	200-400	25-70	10.5	1.2-2.4	2.5-7.5	74.0
จมูกข้าวสาลี	(53)	200-350	40-60	15-25 L/h	N/R	N/R	8.0-14.0
	(54)	200-300	40	N/R	N/R	N/R	11.0

N/R ไม่รายงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 2.6 จะเห็นว่าภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันพืชด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตอยู่ในช่วงความดัน 100-600 บาร์ และอุณหภูมิ 35-70 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้น้ำมันขึ้นกับชนิดของเมล็ดพืช โดยพืชตระกูลถั่ว เช่น อัลมอนด์ เฮเซลนัท และวอลนัท มีร้อยละผลได้น้ำมันสูงที่สุด

2.5 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีต่าง ๆ

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีต่าง ๆ มีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการสกัด	ข้อดี	ข้อเสีย
การบีบอัดเชิงกล	ไม่ใช้สารเคมี (55) สามารถทำได้ง่าย (26) ต้นทุนต่ำ (26)	ร้อยละผลได้น้ำมันต่ำ (5) เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (27) ไม่บริสุทธิ์ (26)
การสกัดด้วยตัวทำละลาย	ร้อยละผลได้ของน้ำมันสูง (5)	สารเคมีที่ใช้ในการสกัดตกค้าง (5) ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (30) ใช้เวลาในการสกัดนาน (30) เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (55)
การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต	การถ่ายโอนมวลสารสูง (6) ตัวทำละลายไม่ตกค้างในสารที่สกัดได้ (36) ไม่เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (36)	สารสกัดที่ได้ส่วนมากเป็นสารไม่มีขั้ว (56) เครื่องมือราคาแพง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในปัจจุบันน้ำมันเมล็ดมะรุมที่จำหน่ายในท้องตลาดผลิตด้วยวิธีบีบอัดเชิงกลเรียกว่า การสกัดเย็นที่อุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส เมล็ดมะรุมที่นำมาสกัดเย็นต้องไม่ผ่านสารเคมีหรือความร้อนก่อนการสกัด น้ำมันที่ได้หลังการบีบเย็นต้องผ่านการกรองเพื่อทำให้น้ำมันใส การสกัดเย็นมีข้อดี คือ

มีต้นทุนต่ำ เป็นการสกัดที่ไม่ยุ่งยากสามารถทำได้ภายในครัวเรือน เครื่องบีบเย็นมีราคาไม่แพงทำให้เกษตรกรสามารถจัดหาไว้แปรรูปผลผลิตทางการเกษตรได้ นอกจากเมล็ดมะรุมแล้วเครื่องบีบเย็นสามารถสกัดน้ำมันจากพืชชนิดอื่นได้ เช่น ถั่วลิสง ทานตะวันและรำข้าว เป็นต้น (26, 57)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ruttarattanamongkol และคณะ (5) ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตและกึ่งวิกฤต และการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม ภายใต้ความดันที่ 15 ถึง 35 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเวลาที่ใช้สกัด 300 นาที พบว่าเมื่อสกัดที่ความดันสูงได้ร้อยละผลได้น้ำมันสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างของเมล็ดมะรุม แต่ลดความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละผลได้น้ำมันสูงสุด คือ ร้อยละ 75.27 ของน้ำมันในเมล็ดมะรุมทั้งหมด โดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะกึ่งวิกฤตที่ความดัน 35 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดโอเลอิกมากที่สุดที่ความดัน 15 เมกะพาสคัล และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตและกึ่งวิกฤตไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม

Rai และคณะ (6) ศึกษาการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน ขนาดอนุภาค อัตราการไหล และตัวทำละลายร่วม โดยการทดลองในช่วง 333 ถึง 373 เคลวิน 20 ถึง 40 เมกะพาสคัล 0.50 ถึง 1.00 มิลลิเมตร 0.83×10^{-4} ถึง 2.50×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที และการเติมเอทานอล ร้อยละ 0 ถึง 10 ในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ข้อมูลในการสกัดได้รับการจำลองที่สำเร็จด้วยแบบจำลองขยายของ Lack และทราบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบกล่อง (the Box global optimization technique) โดยจะได้การสกัดน้ำมันสูงสุด คือ การสกัดน้ำมันสูงสุด 0.3341 กิโลกรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 40 เมกะพาสคัล 353 เคลวิน ขนาดอนุภาค 0.75 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1.67×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที กับ ตัวทำละลายร่วม (เอทานอล) ร้อยละ 5 ในทำนองเดียวกันการสกัดได้น้ำมันต่ำสุด คือ 0.0676 กิโลกรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 20 เมกะพาสคัล 353 เคลวิน ขนาดอนุภาค 0.75 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1.67×10^{-4} กิโลกรัมต่อวินาที กับ ร้อยละ 5 ของตัวทำละลายร่วม สำหรับการทดลอง 250 นาที ผลจากการทดลองแสดงอย่างชัดเจนว่า ความดันส่งผลต่อการสกัดมากกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น

Zhao และคณะ (36) ศึกษาการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล และเวลาในการสกัดต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดัน เวลาในการสกัด และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับความดัน นอกจากนี้เมื่ออนุภาคเล็กลง ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตน้อยกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายเล็กน้อย และเมื่อนำน้ำมันที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟ และวิธีสเปกโทรสโกปีพบว่า มีองค์กระกอบของน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตคล้ายกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย

Nguyen และคณะ (55) ศึกษาการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับเอทานอล โดยศึกษาผลของความดัน (15 ถึง 20 เมกะพาสคัล) อุณหภูมิ (35 ถึง 60 องศาเซลเซียส) และขนาดของเมล็ดมะรุม (0.16 ถึง 1.12 มิลลิเมตร) ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเติมเอทานอล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับเอทานอล และการสกัดด้วยเฮกเซน พบว่ามีองค์ประกอบของกรดไขมันคล้ายกัน จากผลการทดลองพบว่า ความดันส่งผลต่อการสกัดมากที่สุด โดยร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงสุดคือร้อยละ 37.84 ที่ 28.97 เมกะพาสคัล 44.30 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาค 0.54 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Zhao และคณะ (58) ศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันจากเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของอัตราการไหล ความดัน และอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลไม่มีผลต่อความสามารถในการละลาย เมื่อเพิ่มความดันที่อุณหภูมิคงที่ความสามารถในการละลายจะสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของอุณหภูมิแสดงแนวโน้มที่แตกต่างกันโดยขึ้นกับความดัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสามารถสรุปภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ดังตารางที่ 2.8 โดยงานวิจัยทั้งหมดใช้ตัวอย่างเป็นเมล็ดใน (kernel) มะรุมซึ่งมีปริมาณน้ำมันสูงประมาณร้อยละ 35-40

ตารางที่ 2.8 สรุปภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้เขียน	(5)	(6)	(36)	(55)
ความดัน (เมกะพาสคัล)	15-35	20-40	20-60	15-30
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25-35	60-100	40-120	35-60
อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	20	0.30-0.90	0.11-0.55	0.45
ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	<1	0.50-1.00	<1	0.16-1.12
ร้อยละของเอทานอล	-	0-10	-	10
เวลาในการสกัด (นาที)	300	250	30-150	420
ปริมาณเมล็ดมะรุม (กรัม)	850	50	10	N/R
ภาวะที่เหมาะสมในการสกัด	35 MPa 30 °C	40 MPa 80 °C 0.60 kg/h 0.75 mm 250 min 5% เอทานอล	50 MPa 100 °C 0.44 kg/h 120 min	28.97 MPa 44.30 °C 0.54 mm
ร้อยละผลได้	28.87	N/R	37.12	37.84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่องอัดสกรูเดี่ยว (Single screw press)
- ชุดสกัดด้วยตัวทำละลายแบบซอกห์เลต (Soxhlet extraction apparatus)
- ชุดสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical carbon dioxide extraction apparatus)
- เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
- เตาหลุมให้ความร้อน (Heating mantle)
- เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)
- ตู้อบ (Oven)
-เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
-เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph : GC)
-เครื่องอ่านปฏิกิริยาไมโครเพลต (Microplate reader)
-เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatograph : HPLC)

3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- เมล็ดมะรุม (*Moringa oleifera* seed) : เมล็ดมะรุมแห้งแบบกระเทาะเปลือก และไม่กระเทาะเปลือกจากเกษตรกร จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย โดยเก็บตัวอย่างไว้ในห้องเย็นที่ 4 องศาเซลเซียส
- ปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether) : เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ของบริษัท Fisher Scientific Co, Ltd.
- คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) : ร้อยละ 99.9 เกรดอาหาร (Food grade) ของบริษัท Praxair (Thailand) Co, Ltd.
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
- เฮปเทน (n-Heptane, C_7H_{16}) : เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ของบริษัท Mallinckrodt Baker, Inc

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) : เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ของ Merck ประเทศเยอรมัน

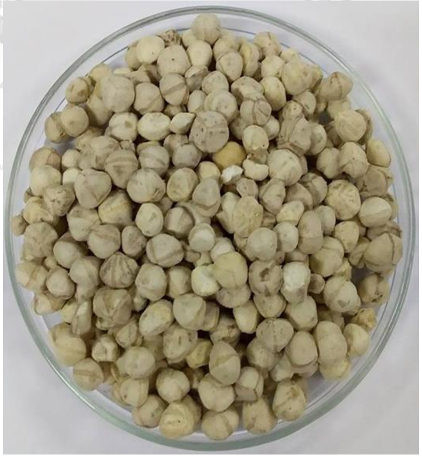
- เมทานอล (CH_3OH) : เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ของ Merck ประเทศเยอรมัน

- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) : เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ของบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd

- สารมาตรฐานกรดไขมัน ของ Supelco

รูปถ่ายตัวอย่างเมล็ดมะรุมและเมล็ดมะรุมกระเทาะเปลือกแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

รูปที่ 3.1 เมล็ดมะรุม



รูปที่ 3.2 เมล็ดมะรุมกระเทาะเปลือก

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตร่วมกับการสกัดด้วยแรงกล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะ

เหนือวิกฤต รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบและฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่สกัดได้ โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

3.2.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

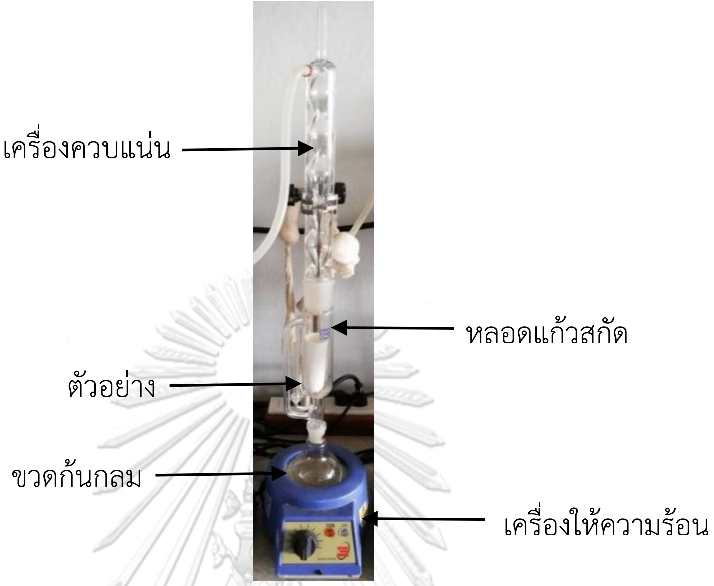
นำเมล็ดมะรุม และเมล็ดมะรุมกระเทาะเปลือกตัวอย่างละ 4 กิโลกรัม มาบีบด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว (Single screw press) รุ่น Model YZYX70-ZWY ของ Miangyang Guang Xin Machinery Factory Co, Ltd. ดังรูปที่ 3.3 ที่ความเร็วรอบของสกรู 25 รอบต่อนาที อัตราการป้อนเมล็ดมะรุมและเมล็ดมะรุมกระเทาะเปลือก คือ 3.6 และ 1.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยทำการบีบอัดทั้งหมด 2 ครั้ง น้ำมันที่ได้จากการสกัดนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง รุ่น Model 6500 ของ KUBOTA ประเทศญี่ปุ่นที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำน้ำมันที่ได้กรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศรุ่น R-300 ของ Boeco ประเทศเยอรมัน และชุดกรองบุชเนอร์ (Büchner funnel)

รูปที่ 3.3 เครื่องอัดสกรูเดี่ยว

3.2.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมด้วยตัวทำละลายโดยเครื่องซอกห์เลต

ใส่ปิโตรเลียมอีเทอร์ 200 มิลลิลิตรลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ชั่งตัวอย่างมะรุม 2 กรัม ใส่ในกระดาษกรอง แล้วนำไปใส่ในเซลลูโลสทิมเบิล จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องสกัดซอกห์เลต แล้วตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 3.4 โดยสกัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องทำความร้อนรุ่น Model EM0250/CE ของ Electrothermal และเปิดระบบหล่อเย็น โดยใช้เครื่องทำความเย็นรุ่น CA-101

ของ EYELA ทำการสกัดเป็นเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไประเหยปิโตรเลียมอีเทอร์ออกด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนรุ่น RE52 ของ YAMATO (รูปที่ 3.5) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และอัตราการหมุน 80 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.4 ชุดสกัดแบบซอกห์เลต

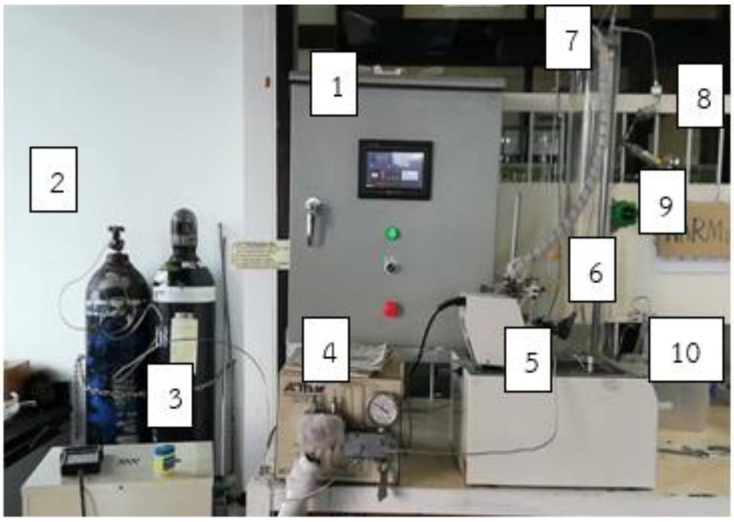
รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยแบบหมุน

3.2.3 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

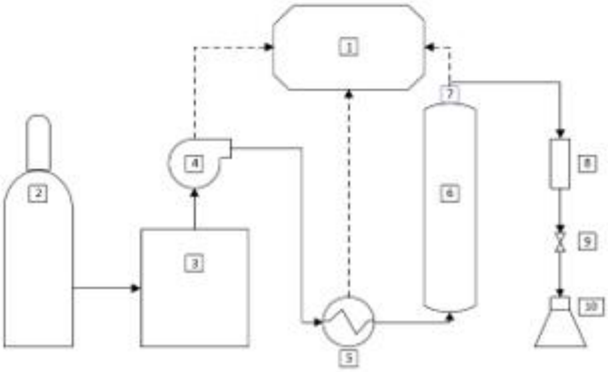
ภาพถ่ายและแผนผังของเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตแสดงดังรูปที่ 3.6 (ก) และ 3.6 (ข) ตามลำดับ สกัดกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ใช้ตัวอย่างกากเมล็ดมะรุมที่บด และผ่านตะแกรงขนาด 1.18 มิลลิเมตรจำนวน 10 กรัม ใส่ตัวอย่างลงใน

เครื่องสกัด (หมายเลข 6) เครื่องสกัดมีปริมาตร 130 มิลลิลิตร ก่อนทำการสกัดปิดวาล์วควบคุมความดัน (Back-pressure regulator) ของ Swagelok จากประเทศอังกฤษ (หมายเลข 9) และเปิดระบบหล่อเย็น รุ่น model RH165VHET ของ MITSUBISHI ประเทศญี่ปุ่น (หมายเลข 3) เพื่อทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลวที่ 4 องศาเซลเซียส ปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเครื่องสกัด (หมายเลข 6) ด้วยปั๊มแรงดันสูง รุ่น model P-50 ของ Thar จากประเทศสหรัฐอเมริกา (หมายเลข 4) ซึ่งปั๊มแรงดันสูงนี้สามารถทำความดันได้สูงสุดถึง 1000 บาร์ จากนั้นปรับความดันด้วย Back-pressure regulator อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดควบคุมโดยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (หมายเลข 5) ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องทำความร้อน รุ่น HWT100 และอ่างน้ำ รุ่น OBN 18 ของ Heto จากประเทศเดนมาร์ก วัดอุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการสกัดด้วยอาร์ทีดีชนิดพีที 100 (RTD PT100, หมายเลข 7) และทรานสดิวเซอร์ใช้วัดความดัน (Pressure transducers) รุ่น PCE-28 ของ APLISENS S.A. จากประเทศโปแลนด์ (หมายเลข 8) ค่าอุณหภูมิ และความดันจะแสดงผลที่จอควบคุมของเครื่องควบคุม รุ่น PM-0245-5 ของ WEINVIEW จากประเทศจีน (หมายเลข 1) เมื่อถึงความดัน และอุณหภูมิที่ต้องการจึงเริ่มจับเวลา โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที (หมายเลข 10) เป็นเวลา 300 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



(ก)



(ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

Chulalongkorn University

(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ข) แผนภาพ

1. เครื่องควบคุม 2. ท่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3. ระบบหล่อเย็น 4. ปั๊มแรงดันสูง 5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ 6.เครื่องสกัด 7. เทอร์โมคัปเปิล 8. ทรานสดิวเซอร์ใช้วัดความดัน 9.วาล์วควบคุมความดัน 10.ขวดเก็บตัวอย่าง

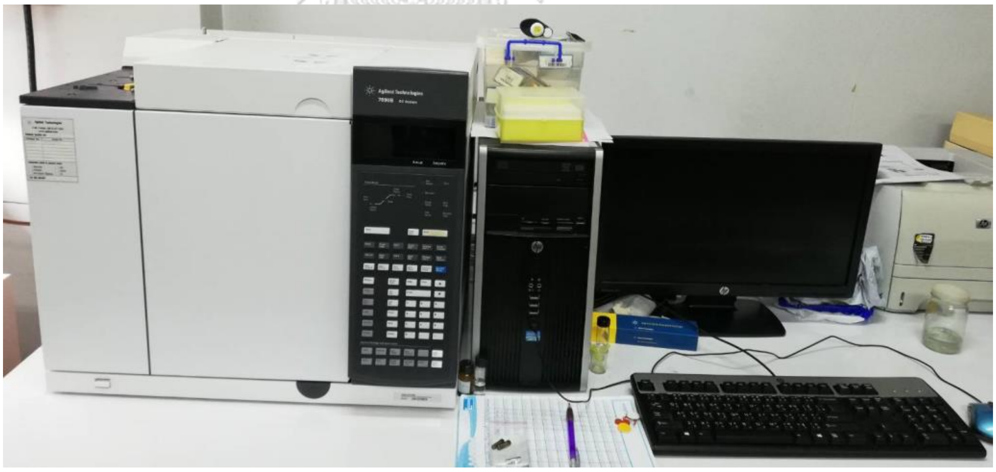
ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันช่วง 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส และ 150 ถึง 300 บาร์ ตามลำดับ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ 10 กรัมต่อนาที ใช้ระยะเวลาสกัดทั้งหมดการทดลองละ 300 นาที

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ ฤทธิ์ทางชีวภาพ และปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดได้

3.3.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดได้

การเตรียมตัวอย่างตามวิธีมาตรฐานของ IUPAC 1987 ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 0.1 กรัม ลงไปในหลอดทดลองฝาเกลียวขนาด 16x100 มิลลิเมตร เติมเฮปเทน 2 มิลลิลิตร นำไปกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer) รุ่น G560E ของ Scientific Industries เป็นเวลา 1 นาที เติม 0.2 มิลลิลิตร 2 นอร์มอล สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลแล้วกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 1 นาที ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เติมโซเดียมคลอไรด์เพื่อให้สามารถดูดส่วนใสด้านบนได้ง่ายขึ้น

วิเคราะห์หาองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมที่สกัดได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟรุ่น 7890B ของ Agilent Technologies แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยใช้คอลัมน์ HP-INNOWAX ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร ใช้ดีเทกเตอร์ชนิด Flame ionization detector และใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟรุ่น 7890B ของ Agilent Technologies

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

Condition	Value
Gas Chromatography	Agilent Technologies 7890B
Column	HP-INNOWAX (30 m x 0.25 mm x 0.25µm)
Detector	Flame ionization detector
Carrier gas (He) flow rate	0.5 mL/min
Makeup gas (He) pressure	10.4 psi
Hydrogen Flow (FID)	30 mL/min
Air Flow (FID)	300 mL/min
Nitrogen Flow (FID)	25 mL/min
Detector Temperature (FID)	250 ˚C
Inject volume	0.1 µL

3.3.2 วิเคราะห์ฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้ำมันกากเมล็ดมะรุมด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (diphenyl-picryhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay) และฤทธิ์ต้านการอักเสบ (NO assay) ที่สถาบันวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องอ่านปฏิกิริยาไมโครเพลท (Microplate Reader) รุ่น Multiskan Go ในถาด 96 หลุม (96-well plate)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

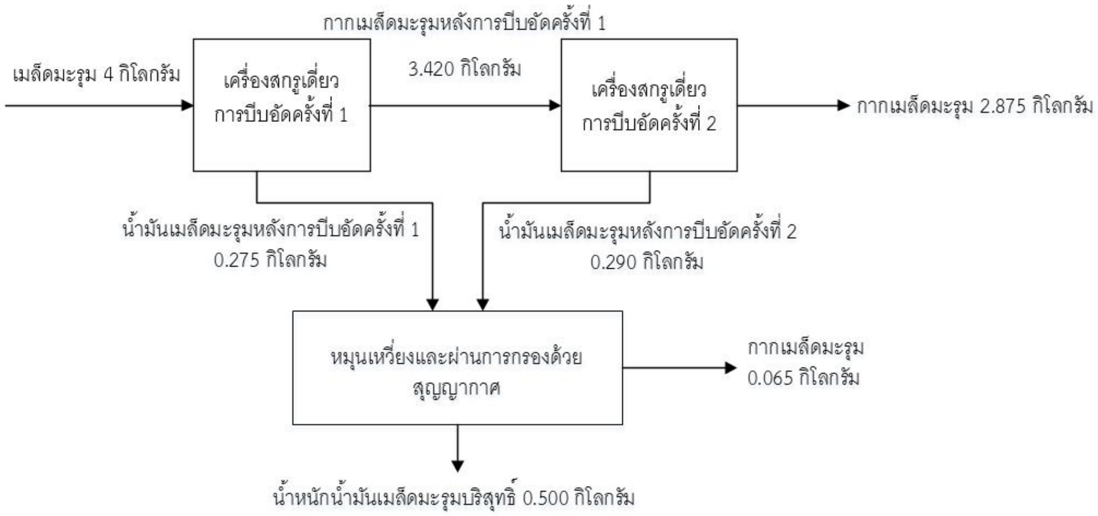
3.3.3 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลที่ห้องปฏิบัติการวิจัย และทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatograph : HPLC รุ่น Agilent 1100 series

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

การสกัดน้ำมันด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวจากเมล็ดมะรุมมีเปลือก (รูปที่ 4.1) และเมล็ดมะรุมกะเทาะเปลือก ตัวอย่างละ 4 กิโลกรัม พบว่ามะรุมมีเปลือกใช้เวลาในการสกัด 1 ชั่วโมง 8 นาที ดุลมวลเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าร้อยละผลได้ของการสกัดหลังนำไปหมุนเหวี่ยงและผ่านการกรองด้วยสุญญากาศ คือ ร้อยละ 12.50 ในขณะที่เมล็ดมะรุมกะเทาะเปลือกพบว่า น้ำหนักที่สูญเสียหลังการบีบอัดครั้งที่ 1 ปริมาณสูงมาก เนื่องจากเมล็ดมะรุมกะเทาะเปลือกมีลักษณะค่อนข้างอ่อนนิ่มทำให้แรงเสียดทานระหว่างกากมะรุมและสกรูไม่พอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบีบอัดลดลง



รูปที่ 4.1 ดุลมวลเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

ตารางที่ 4.1 ดุลมวลเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

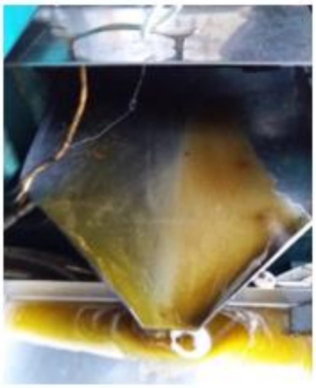
	เมล็ดมะรุม	เมล็ดมะรุมกะเทาะเปลือก
น้ำหนักเมล็ดมะรุม (กิโลกรัม)	4.000	4.000
น้ำหนักกากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 1 (กิโลกรัม)	3.420	1.940
น้ำหนักน้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้หลังการบีบอัดครั้งที่ 1 (กิโลกรัม)	0.275	0.270
น้ำหนักที่สูญเสียหลังการบีบอัดครั้งที่ 1 (กิโลกรัม)	0.305	1.790
น้ำหนักกากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 2 (กิโลกรัม)	2.875	N/R
น้ำหนักน้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้หลังการบีบอัดครั้งที่ 2 (กิโลกรัม)	0.290	N/R
น้ำหนักที่สูญเสียหลังการบีบอัดครั้งที่ 2 (กิโลกรัม)	0.255	N/R
น้ำหนักน้ำมันเมล็ดมะรุมทั้งหมดที่ได้หลังการบีบอัด (กิโลกรัม)	0.565	0.270
น้ำหนักที่สูญเสียทั้งหมดหลังการบีบอัด (กิโลกรัม)	0.560	1.790
ร้อยละผลได้น้ำมันเมล็ดมะรุม	14.13	6.75
น้ำหนักน้ำมันเมล็ดมะรุมบริสุทธิ์ (กิโลกรัม)	0.500	N/R
ร้อยละผลได้น้ำมันเมล็ดมะรุมบริสุทธิ์	12.50	N/R

N/R ไม่รายงาน

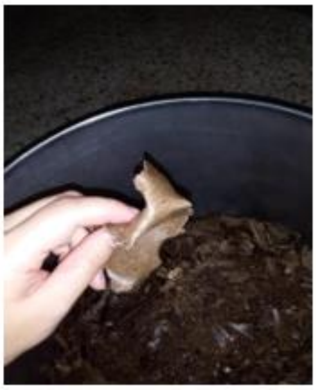
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ก)

(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 น้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว
(ก) น้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้หลังการบีบอัดครั้งที่ 1 (ข) กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 1
(ค) น้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้หลังการบีบอัดครั้งที่ 2 (ง) กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.3 น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการบีบอัดด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยว

รูปที่ 4.4 น้ำมันเมล็ดมะรุมบริสุทธิ์หลังจากการกรอง

รูปที่ 4.5 กากเมล็ดมะรุมแบบกระเทาะเปลือกที่ติดภายในเครื่องอัดสกรูเดี่ยวหลังการบีบอัด

รูปที่ 4.6 น้ำมันเมล็ดมะรุมแบบกระเทาะเปลือกที่ติดภายในเครื่องอัดสกรูเดี่ยวหลังการบีบอัด

4.2 การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุม และกากเมล็ดมะรุมด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ เพื่อหาปริมาณน้ำมันทั้งหมดของเมล็ดมะรุมและกากเมล็ดมะรุม จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า การสกัดด้วยการสกัดเชิงกลครั้งแรกเหลือน้ำมันในกากเมล็ดมะรุมร้อยละ 61.52 ของปริมาณน้ำมันเมล็ดมะรุม น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการบีบอัดครั้งแรกไม่สามารถออกมาจากเครื่องอัดสรูเดี่ยวได้ทั้งหมด จึงต้องทำการบีบอัดครั้งที่สองเพื่อนำน้ำมันที่อยู่ในเครื่องอัดสกรูเดี่ยวออกมา แต่การบีบอัดครั้งที่ 2 ไม่ทำให้น้ำมันที่เหลือในกากเมล็ดมะรุมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำมันของเมล็ดมะรุมและกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำมัน (ร้อยละ)
เมล็ดมะรุม	25.39
กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 1	15.62
กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 2	12.31

รูปที่ 4.7 น้ำมันเมล็ดมะรุมที่ได้จากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

4.3 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

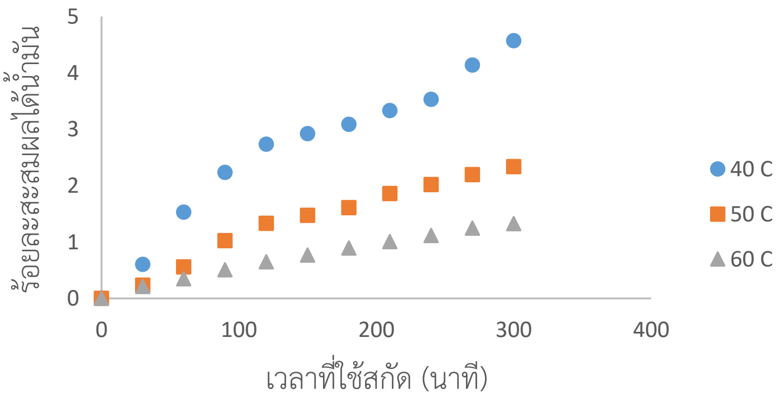
ศึกษาผลของความดัน และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อร้อยละสะสมผลได้ของน้ำมันของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาความดันในช่วง 150-300 บาร์ และอุณหภูมิช่วง 40-70 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ 10 กรัมต่อนาที ใช้เวลาในการสกัด 300 นาที

4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุม

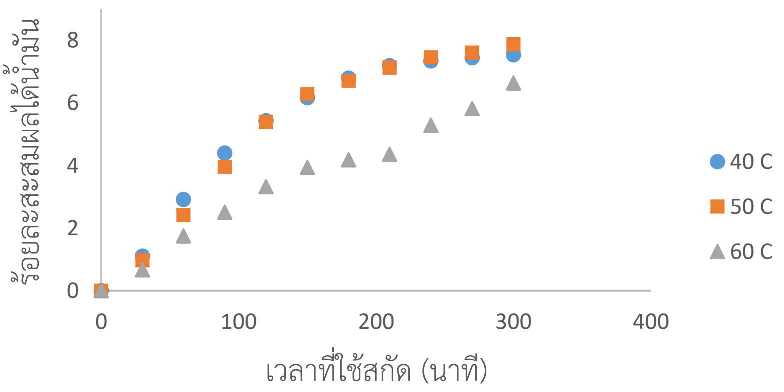
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละสะสมผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่ระดับความดันที่แตกต่างกัน แสดงดังรูป 4.8 (ก)-(ง) ที่ความดัน 150 บาร์ (รูป 4.8 (ก)) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตลดลง นอกจากนี้แนวโน้มกราฟของการสกัดเป็นเส้นตรง แสดงว่าไม่สามารถสกัดน้ำมันได้หมดภายในเวลา 300 นาที ที่ความดัน 200 บาร์ (รูป 4.8 (ข)) และที่ความดัน 250 บาร์ (รูป 4.8 (ค)) จากรูปแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียสเป็น 60 องศาเซลเซียสร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุมลดลง อย่างไรก็ตามที่ความดัน 300 บาร์ (รูป 4.8 (ง)) ที่ 60 องศาเซลเซียสสามารถสกัดน้ำมันออกมาได้สูงสุด เนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีค่ามากเพียงพอในการสกัด และความสามารถในการแพร่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส พบว่าการสกัดลดลงเล็กน้อย ร้อยละสะสมผลได้น้ำมันคงที่ตั้งแต่ 150–200 นาทีของการสกัด เมื่อเปรียบเทียบรูป4.8 (ค) และ 4.8 (ง) กับรูป 4.8 (ก) และ 4.8 (ข) พบว่าร้อยละสะสมผลได้น้ำมันที่ความดัน 250 บาร์ และ 300 บาร์ คงที่ที่เวลาการสกัดน้อยกว่าอย่างชัดเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

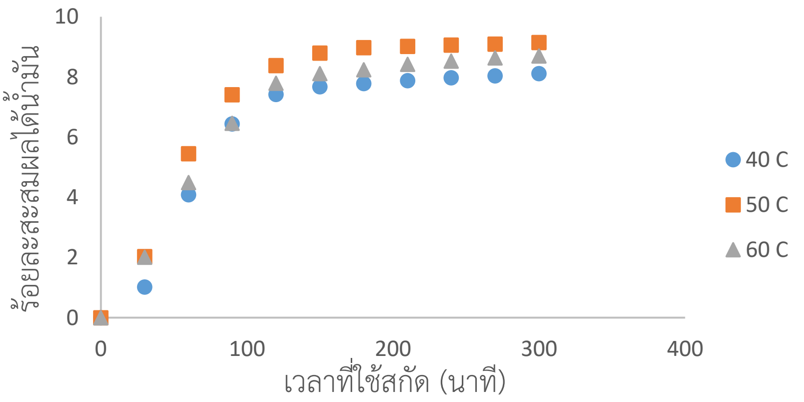
(ก)



(ข)

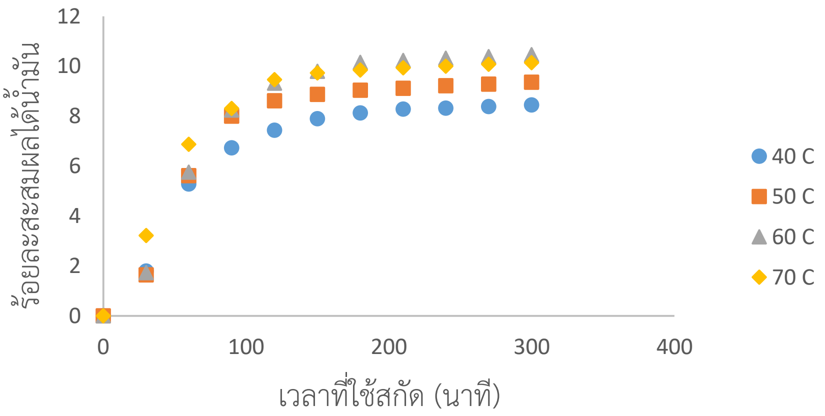


(ค)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ง)

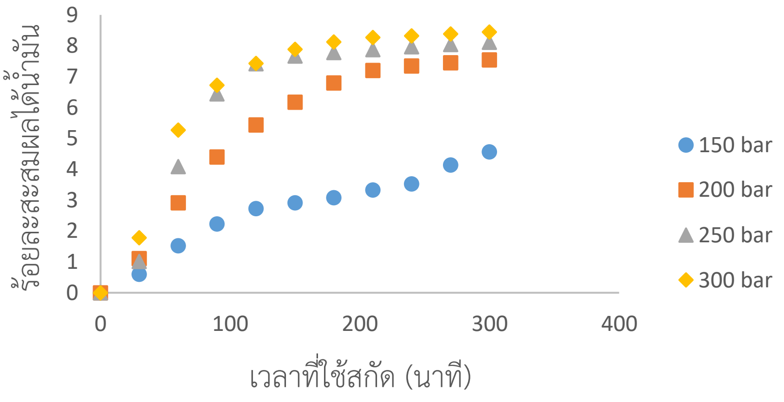


รูปที่ 4.8 น้ำมันกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันที่แตกต่างกัน (ก) 150 บาร์ (ข) 200 บาร์ (ค) 250 บาร์ (ง) 300 บาร์

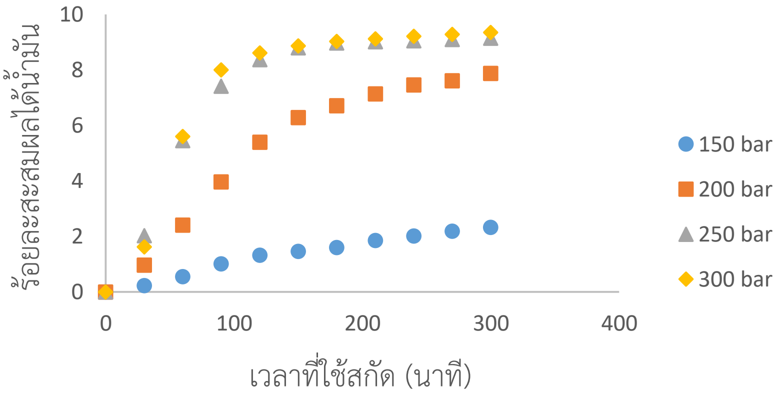
4.3.2 ผลของความดันต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุม

ผลของความดันต่อร้อยละสะสมผลได้ของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แสดงดังรูป 4.9 (ก)-(ค) พบว่าเมื่อเพิ่มความดันร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตและน้ำมันสูงขึ้น จากผลการศึกษานี้สันนิษฐานว่าที่ความดันสูงกว่า 300 บาร์ร้อยละผลได้ของการสกัดมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

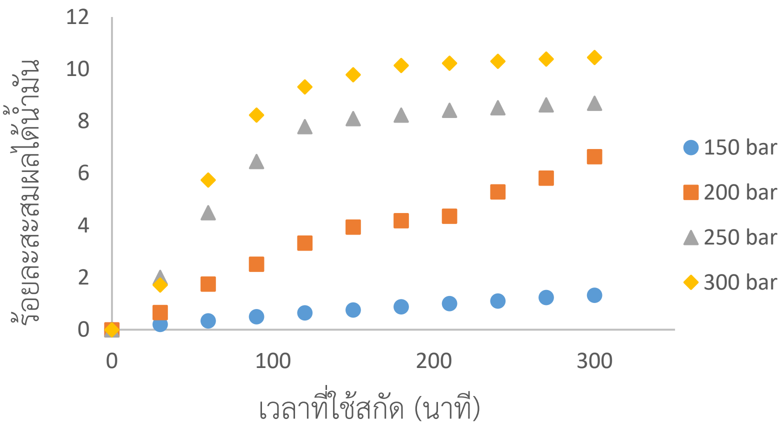
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.9 น้ำมันกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) 40 °C (ข) 50 °C (ค) 60 °C

4.3.3 ความสามารถในการละลายน้ำมันเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละสะสมผลได้และปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ไป หรือเส้นโค้งการสกัด (extraction curve) โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรกร้อยละสะสมผลได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเส้นตรง เมื่อการสกัดเข้าสู่ขั้นตอนที่สองที่ร้อยละสะสมผลได้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และในขั้นตอนที่สามร้อยละสะสมผลได้คงที่ แสดงถึงความสมบูรณ์ของกระบวนการ ความสามารถในการละลาย (solubility) ของน้ำมันเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะต่าง ๆ สามารถหาได้จากความชันในส่วนที่เป็นเส้นตรงของเส้นโค้งการสกัด (58) แสดงในตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการละลายน้ำมันกากเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ องศา) (เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) (59)	ความหนืด (ไมโครพาสคัลวินาที) (59)	ความสามารถในการละลาย (กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)
150	40	780.3	67.79	1.38
150	50	699.8	56.54	0.78
150	60	603.9	46.09	0.43
200	40	839.9	78.58	4.32
200	50	784.4	68.93	4.40
200	60	723.8	60.19	2.09
250	40	879.6	87.06	6.75
250	50	834.4	77.95	8.56
250	60	786.8	69.78	7.29
300	40	910.0	94.39	7.89
300	50	870.6	85.5	9.33
300	60	830.0	77.55	9.59
300	70	788.0	70.91	9.52

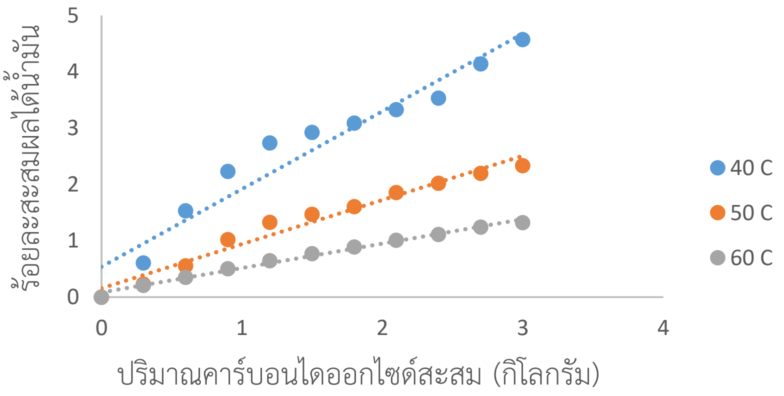
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลของความดันต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตแสดงดังตารางที่ 4.3 ที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มขึ้นของความดันส่งผลความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานโซลเวชัน (Solvation Energy) ของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตสูงขึ้น (58)

ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันคงที่แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่น และความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตลดลง ความหนืดที่ต่ำทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างของแข็งได้ดี (30) ที่ความดัน 150 บาร์ (รูป 4.10 (ก)) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตลดลง แสดงให้เห็น

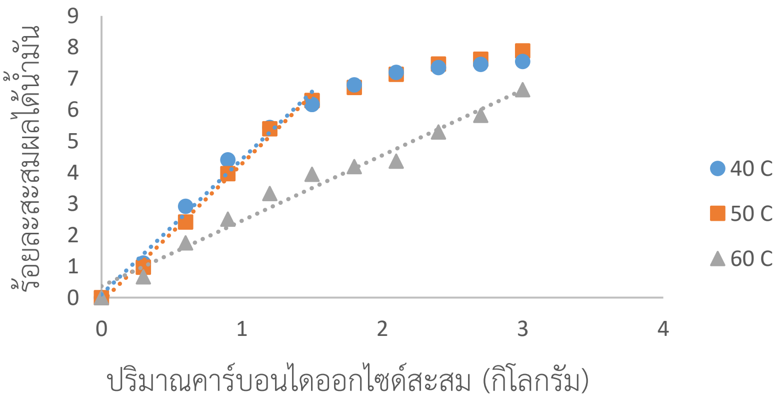
ว่าที่ความดันต่ำ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการละลายมากกว่าความหนืด อย่างไรก็ตามที่ความดัน 200 บาร์ (รูป 4.10 (ข)) และ 250 บาร์ (รูป 4.10 (ค)) การเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 องศาเซลเซียสเป็น 50 องศาเซลเซียส ทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ที่ความดัน 300 บาร์ (รูป 4.10 (ง)) การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความสามารถในการละลายของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสูงสุดพบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าที่ความดันสูง ความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตส่งผลต่อความสามารถในการละลายสูง จากตารางที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันคงที่มีความซับซ้อน เป็นผลจากความเหมาะสมระหว่างความหนาแน่น และความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

(ก)

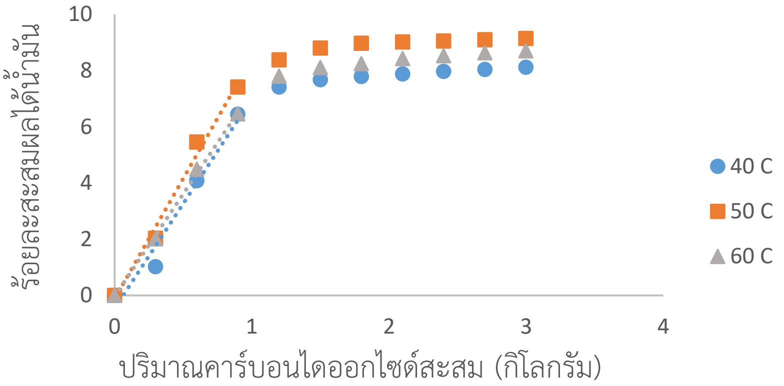


CHULALONGKORN UNIVERSITY

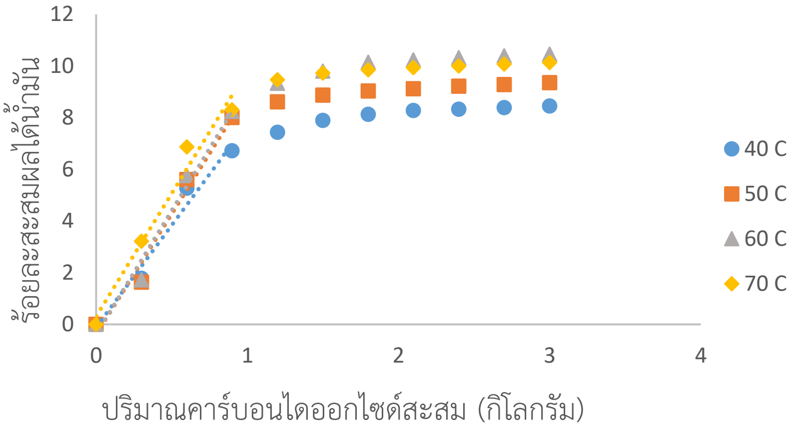
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำมันกากเมล็ดมะรุมในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (ก) 150 บาร์ (ข) 200 บาร์ (ค) 250 บาร์ (ง) 300 บาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.4 ภาวะที่สกัดได้ปริมาณน้ำมันสูงสุด

จากตารางที่ 4.4 การสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ ร้อยละผลได้น้ำมันสูงสุด คือ ร้อยละ 10.46 ที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดได้ร้อยละ 84.97 ของปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตน้ำมันของกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	ร้อยละผลได้น้ำมัน
40	150	4.57
50	150	2.34
60	150	1.32
40	200	7.55
50	200	7.88
60	200	6.64
40	250	8.12
50	250	9.15
60	250	8.70
40	300	8.45
50	300	9.35
60	300	10.46
70	300	10.14

4.4 องค์ประกอบกรดไขมันน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมมีกรดโอเลอิก (oleic acid) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 80 และกรดปาล์มิติก (palmitic acid) มีปริมาณรองลงมา เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดไขมันจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตพบว่า มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน และไม่ต่างจากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ งานวิจัยนี้พบว่ามีปริมาณกรดโอเลอิกสูงกว่าที่รายงานในงานวิจัย (5) (36) และ (55) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความแตกต่างของตัวอย่าง เช่น คุณภาพดิน ภาวะ และระยะเวลาการเก็บเมล็ดมะรุม และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดโอเลอิกของน้ำมันเมล็ดมะรุมกับน้ำมันมะกอก (ร้อยละ 64) และน้ำมันข้าวโพด (ร้อยละ 32.5) (58) พบว่าน้ำมันเมล็ดมะรุมมีปริมาณโอเลอิกสูงที่สุด ปริมาณกรดโอเลอิกที่สูงนี้ส่งผลให้สามารถแยกกรดโอเลอิกบริสุทธิ์ได้ดี พบว่าน้ำมันเมล็ดมะรุมมีปริมาณโอเลอิกสูงที่สุด ปริมาณกรดโอเลอิกที่สูงนี้ส่งผลให้สามารถแยกกรดโอเลอิกบริสุทธิ์ได้ดี กรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียวมี ความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง (oxidative stability) สูงเมื่อเทียบกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่หลายคู่ กรดโอเลอิกช่วยในการเก็บรักษาระยะยาว และในกระบวนการทอดที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้การบริโภคกรดโอเลอิกสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (58)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบกรดไขมันน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

องค์ประกอบกรดไขมัน (ร้อยละ)	ซอกห์เลต	การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต												
		150 บาร์			200 บาร์			250 บาร์			300 บาร์			
		40 °C	50 °C	60 °C	40 °C	50 °C	60 °C	40 °C	50 °C	60 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
กรดปาล์มิติก	6.01	7.71	7.58	5.68	8.84	7.59	7.96	7.07	7.13	7.17	7.13	6.78	7.55	6.23
กรดพาล์มิโทเลอิก	0.93	1.81	2.06	1.07	2.53	1.63	1.34	1.83	1.81	1.76	0.93	0.98	1.98	1.67
กรดสเตียริก	2.01	2.20	2.14	2.58	1.87	1.94	1.52	1.81	2.11	2.14	2.21	1.99	2.29	2.31
กรดโอเลอิก	81.59	81.73	81.77	81.69	81.52	83.95	80.05	82.12	81.33	80.99	82.92	82.97	81.34	80.83
กรดอะราคิดิก	1.87	2.16	1.51	2.02	1.52	1.10	2.02	2.21	2.15	2.13	1.69	1.18	2.31	2.45
กรดอีโคซีโนอิก	3.52	0.87	0.84	1.41	0.72	0.87	2.50	2.23	1.18	0.89	1.21	1.86	1.25	3.15
กรดเบฮินิก	4.06	3.52	4.09	5.56	3.00	2.93	4.61	2.74	4.30	4.92	3.91	4.26	3.29	3.36

4.5 ฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมโดยการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะที่แตกต่างกัน พบว่ามีร้อยละการยับยั้ง DPPH อยู่ในช่วง 47.39 ± 0.03 ถึง 91.02 ± 0.62 โดยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุดได้จากการสกัดที่ความดัน 300 บาร์ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร้อยละการยับยั้ง DPPH 91.02 ± 0.62 จะเห็นได้ว่าน้ำมันกากเมล็ดมะรุมมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง และเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการยับยั้ง DPPH ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม และกิ่งของชาเล็บรอก (ร้อยละการยับยั้ง 64.86) (60) พบว่าร้อยละการยับยั้ง DPPH ของน้ำมันกากเมล็ดมะรุมมีค่าสูงกว่าชาเล็บรอก ชาเล็บรอกนิยมรับประทานมากในภาคใต้ของประเทศไทย แต่ยังไม่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป มีสรรพคุณช่วยลดไขมันในเส้นเลือด

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านการอักเสบ (NO assay) แสดงตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าร้อยละการยับยั้ง NO ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะที่แตกต่างกัน อยู่ในช่วงร้อยละ 20.11 ± 0.34 ถึง 42.87 ± 2.89 โดยมีฤทธิ์ต้านการอักเสบสูงสุดที่ความดัน 300 บาร์ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร้อยละการยับยั้ง NO 42.87 ± 2.89 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการยับยั้ง NO ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม และสารสกัดจากกิ่งลำไย (ร้อยละการยับยั้ง NO 45.5-92.2) (61) พบว่าร้อยละการยับยั้ง NO ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมมีค่าน้อยกว่าสารสกัดจากกิ่งลำไย สารสกัดจากกิ่งลำไยมีฤทธิ์ลดการอักเสบได้ทั้งในเซลล์เพาะเลี้ยงและสัตว์ทดลอง (62)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการยับยั้งสาร DPPH และร้อยละการยับยั้ง NO ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	ร้อยละการยับยั้ง	
		DPPH	NO
40	200	57.75 ± 0.64	21.77 ± 0.63
50	200	59.89 ± 0.29	22.06 ± 0.16
60	200	80.37 ± 0.13	22.61 ± 0.06
40	250	47.39 ± 0.03	25.65 ± 0.98
50	250	74.95 ± 0.05	20.11 ± 0.34
60	250	79.61 ± 0.08	33.36 ± 0.15
40	300	75.33 ± 0.12	34.85 ± 1.20
50	300	78.93 ± 0.75	34.74 ± 1.80
60	300	91.02 ± 0.62	42.87 ± 2.89
70	300	85.92 ± 0.55	36.78 ± 2.25

4.6 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล (α-tocopherol) ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC)

วิตามินอี (α-tocopherol) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ พบมากในน้ำมันพืช จากตารางที่ 4.7 ปริมาณวิตามินอีของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณวิตามินอีอยู่ในช่วง 143.70 ถึง 246.06 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน ปริมาณวิตามินอีสูงสุดที่ความดัน 300 บาร์ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คือ 246.06 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน งานวิจัยนี้พบว่ามีปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลสูงกว่าที่รายงานในงานวิจัย (5) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความแตกต่างของตัวอย่าง เช่น สายพันธุ์ของมะรุม ภาวะ และระยะเวลาการเก็บเมล็ดมะรุม และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชอื่น ๆ เช่น วีทเจิร์ม (27.36 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) เมล็ดกระบก (22.57 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) งาดำ (22.43 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) ถั่วดำ (20.18 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) งาขาว (19.61 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) เมล็ดถั่วลิสง (18.36 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) และรำข้าวอ่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(17.70 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) (63) พบว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมมีค่าสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นมากประมาณ 10 เท่า

ตารางที่ 4.7 ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล (α-tocopherol) ของน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	α-tocopherol (มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน)
40	200	153.23
50	200	179.71
60	200	164.75
40	250	192.42
50	250	172.54
60	250	160.34
40	300	155.07
50	300	143.70
60	300	246.06
70	300	152.41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.7 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากตารางที่ 4.8 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดน้ำมันได้ร้อยละผลได้สูงสุด คือ ร้อยละ 10.46 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.97 ของปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดมะรุม นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบสูงที่สุด คือ ร้อยละ 91.02 ± 0.62 และ 42.87 ± 2.89 ตามลำดับ ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลมากที่สุดคือ 246.06 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน และมีปริมาณกรดโอเลอิกสูงถึงร้อยละ 81.34

ตารางที่ 4.8 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ตัวแปร	สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต
อัตราการไหล (กรัมต่อนาที)	10
ความดัน (บาร์)	300
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที)	180

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละผลได้และภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเห็นว่างานวิจัยนี้มีร้อยละผลได้ต่ำสุด เนื่องจากใช้กากเมล็ดมะรุมเป็นวัตถุดิบซึ่งมีปริมาณน้ำมันต่ำกว่าเมล็ดใน (kernel) มะรุม งานวิจัยนี้สามารถสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมได้ร้อยละ 84.97 ของปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดมะรุม เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดโอเลอิก ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล ร้อยละการยับยั้ง DPPH และ NO น้ำมันเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้พบว่ามีปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลสูงกว่าที่รายงานในงานวิจัย (5) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความแตกต่างของตัวอย่าง เช่น สายพันธุ์ของมะรุม ที่ตั้ง ภูมิอากาศ และสิ่งแวดล้อม ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลส่งผลให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงตามไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบร้อยละผลได้ ภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ปริมาณกรดโอเลอิก ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล ร้อยละการยับยั้ง DPPH และ NO น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้เขียน	งานวิจัยนี้	(5, 64)	(6)	(36)	(55)
ตัวอย่าง	กากเมล็ดมะรุม	เมล็ดในมะรุม	เมล็ดในมะรุม	เมล็ดในมะรุม	เมล็ดในมะรุม
ความดัน (เมกะพาสคัล)	15-30	15-35	20-40	20-60	15-30
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	40-70	25-35	60-100	40-120	35-60
อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	0.60	20	0.30-0.90	0.11-0.55	0.45
ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	<1.18	<1	0.50-1.00	<1	0.16-1.12
ร้อยละของเอทานอล	-	-	0-10	-	10
เวลาในการสกัด (นาที)	300	300	250	30-150	420
ปริมาณเมล็ดมะรุม (กรัม)	10	850	50	10	N/R
ภาวะที่เหมาะสมในการสกัด	30 MPa 60 $^{\circ}$C 180 min	35 MPa 30 $^{\circ}$C	40 MPa 80 $^{\circ}$C 0.60 kg/h 0.75 mm 5% เอทานอล	50 MPa 100 $^{\circ}$C 0.44 kg/h 120 min	28.97 MPa 44.30 $^{\circ}$C 0.54 mm
ร้อยละผลได้	10.46	28.87	N/R	37.12	37.84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบร้อยละผลได้ ภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ปริมาณกรดโอเลอิก ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล ร้อยละการยับยั้ง DPPH และ NO น้ำมันเมล็ดมะรุมจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้เขียน	งานวิจัยนี้	(5, 64)	(6)	(36)	(55)
ร้อยละผลได้ (เทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย)	84.97	75.27	N/R	92.57	100.0
ปริมาณกรดโอเลอิก (ร้อยละ)	80.05-83.95	72.26-74.72	-	66.69	69.38-70.16
ปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอล (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำมัน)	143.70-246.06	13.79-23.03	-	-	-
ร้อยละการยับยั้ง DPPH	47.36-91.64	DPPH scavenging activity 4.89-12.09 %	-	-	-
ร้อยละการยับยั้ง NO	19.77-45.76	-	-	-	-

N/R ไม่รายงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสกัดน้ำมันเมล็ดมะรุมด้วยเครื่องอัดสกรูเดี่ยวพบว่าได้น้ำมันร้อยละ 12.50 ปริมาณน้ำมันเหลือในกากเมล็ดมะรุมร้อยละ 12.31 เมื่อนำกากมะรุมมาทำการสกัดน้ำมันที่เหลืออยู่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตพบว่า เมื่ออุณหภูมิคงที่การเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับความดันที่ใช้ในการสกัด ที่ความดันสูงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันสูงขึ้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่นสูง ในทางกลับกันที่ความดันต่ำการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันลดลง ส่วนองค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันเมล็ดมะรุมที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะต่าง ๆ และการสกัดด้วยตัวทำละลายพบว่ามีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน โดยมีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 นอกจากนี้น้ำมันเมล็ดมะรุมยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และยา ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต คือ ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ภาวะนี้สามารถสกัดน้ำมันได้ร้อยละผลได้สูงสุด คือ ร้อยละ 10.46 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.97 ของปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากเมล็ดมะรุม นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบสูงสุด คือ ร้อยละ 91.02 ± 0.62 และ 42.87 ± 2.89 ตามลำดับ และมีปริมาณแอลฟา-โทโคฟีรอลสูงสุด คือ 246.06 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมันซึ่งมีปริมาณสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ เช่น วีทเจิร์ม (27.36 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) เมล็ดกระบก (22.57 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) งาดำ (22.43 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) ถั่วดำ (20.18 มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำมัน) (63) ประมาณ 10 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

กากเมล็ดมะรุมหลังการสกัดมีปริมาณโปรตีนมาก ซึ่งเหมาะแก่การนำไปทำเป็นอาหารเสริมเนื่องจากประกอบไปด้วยกรดอะมิโนจำเป็น อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากเป็นสารธรรมชาติที่ช่วยในกระบวนการตกตะกอน และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้กากเมล็ดมะรุมยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของดิน เนื่องจากกากเมล็ดมะรุมประกอบด้วยธาตุอาหารพืชที่จำเป็นเช่น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัส เป็นต้น (65, 66)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Leone A, Spada A, Battezzati A, Schiraldi A, Aristil J, Bertoli S. Moringa oleifera seeds and oil: Characteristics and uses for human health. International Journal of Molecular Sciences. 2016;17(12):2141.

2. รัฐศักดิ์ พลสิงห์. มะรุมพืชมหัศจรรย์สมุนไพรครอบจักรวาล. กสิกร. 2552. มีนาคม-เมษายน

3. สุวิมล โต่นวุธ. กินมะรุม ลืมมะเร็ง. 2558 [cited 10 มีนาคม 2562]. [Available from: http://fpolib.fpo.go.th:8181/elib/Document/Elibser/4/4.25.pdf.

4. Moringa Seed Oil [cited 10 september 2018]. [Available from: http://www.botanicessence.com/essential-oil/home/profiles/carrier_oil/Moringa.jsp.

5. Ruttarattanamongkol K, Siebenhandl-Ehn S, Schreiner M, Petrasch AM. Pilot-scale supercritical carbon dioxide extraction, physico-chemical properties and profile characterization of Moringa oleifera seed oil in comparison with conventional extraction methods. Industrial Crops. 2014;58:68-77.

6. Rai A, Mohanty B, Bhargava R. Experimental modeling and simulation of supercritical fluid extraction of moringa oleifera seed oil by carbon dioxide. Chemical Engineering Communications. 2017;204(8):957-64.

7. Raman JK, Alves CM, Gnansounou E. A review on moringa tree and vetiver grass–Potential biorefinery feedstocks. Bioresource technology. 2018;249:1044-51.

8. Mariod AA, Saeed Mirghani ME, Hussein I. Chapter 35 - Moringa oleifera Seed Oil. In: Mariod AA, Saeed Mirghani ME, Hussein I, editors. Unconventional Oilseeds and Oil Sources: Academic Press; 2017. p. 233-41.

9. ศูนย์สนเทศภาคเหนือ สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. มะรุม [cited 10 มีนาคม 2562]. [Available from: http://library.cmu.ac.th/ntic/lannafood/detail_ingredient.php?id_ingredient=327.

10. มะรุม สรรพคุณทางยาประโยชน์และผลข้างเคียงจากงานวิจัย ม.มหิดล [cited 10 มีนาคม 2562]. [Available from: http://siamherbs.blogspot.com/2014/09/moringa.html.

11. Robar M. Top 12 health benefits of moringa oleifera seeds [cited 31 january 2019]. [Available from: https://holistikhealth.com/top-12-health-benefits-of-moringa-oleifera-seeds/.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

12. คณาจารย์คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. มะรุม พืชที่ทุกคนอยากรู้ [cited 10 มีนาคม 2562]. [Available from: https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/8/%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%A3%E0%B8%B8%E0%B8%A1-%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%97%E0%B8%B8%E0%B8%81%E0%B8%84%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89/.

13. ดวงจันทร เฮงสวัสดิ์. มะรุม...พืชมหัศจรรย์. Food. 2554;41(2):134-9.

14. Gopalakrishnan L, Doriya K, Kumar DS. Moringa oleifera: A review on nutritive importance and its medicinal application. Food Science Human Wellness. 2016;5(2):49-56.

15. Ghazali HM, Mohammed AS. Moringa (Moringa oleifera) seed oil: composition, nutritional aspects, and health attributes. Nuts and seeds in health and disease prevention: Elsevier; 2011. p. 787-93.

16. Özcan M.M. Moringa spp: Composition and bioactive properties. South African Journal of Botany. 2018.

17. ทศพล จันทร์ดี. วิตามินอี (Vitamin E) ดี โทษ อย่างไร [cited 21 มิถุนายน 2562]. [Available from: https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/dic/knowledge_full.php?id=33.

18. กิตติ เจริญโต, สิทธิพงษ์ ลิวนานนท์ชัย [cited 21 มิถุนายน 2562]. การศึกษาหาปริมาณไฟโตสเตอรอลในผักและถั่วเมล็ดแห้ง. 2552. [Available from: https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/service-research-special-abstract.php?num=49&year=2552.

19. ประวิทย์ สันติวัฒนา, รัชนี สมสวัสดิ์. ไฟโตสเตอรอล...ไฟโตนิวเทรียนท์ในน้ำมันรำข้าว. Food. 2556;43(1):28-32.

20. Ghazali Q, Yasin NHM, editors. The effect of organic solvent, temperature and mixing time on the production of oil from Moringa oleifera seeds. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2016: IOP Publishing.

21. การทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพและปริมาณสารสำคัญของสมุนไพรด้วยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี [cited 1 มิถุนายน 2562]. [Available from: http://kpi.msu.ac.th/upload/ag_tor_ref_byval/ag_16_in_1.2.7_99(2559).pdf.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

22. Prakot P, Chaitanawisuti N, Sangtanoo P, Saisavoey T, Karnchanatat A. Inhibitory activities of protein hydrolysates from spotted babylon snails on tyrosinase and melanogenesis. Journal of Aquatic Food Product Technology. 2018;27(7):811-29.

23. ปวีณา พันทอง. การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี CUPRAC โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2559.

24. Moon J-K, Shibamoto T. Antioxidant assays for plant and food components. Journal of agricultural food chemistry. 2009;57(5):1655-66.

25. นรินทร์เจริญพันธ์, วิยดา กวานเหียน. ผลของแป้งจากเศษเหลือทิ้งของทุเรียนต่อคุณภาพของพาสต้าปราศจากกลูเตน. 2560.

26. วิภาวรรณ นีละพงษ์, บุษบา ผลโยธิน, วันเช็ง สิทธิโยธิน. การสกัดสารสำคัญจากสมุนไพรไทย: แบบผงแห้งและแบบสกัด. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2562;29(1).

27. สาทิป รัตนภาสกร อค. การศึกษาและพัฒนาเครื่องบีบอัดน้ำมันแบบเกลียวอัดสำหรับเมล็ดมะรุม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2554.

28. Screw oil press [cited 1 May 2019]. [Available from: http://www.smalloilpress.com/screw-oil-press/index.html.

29. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนาปนนท์. Soxhlet extraction [cited 10 พฤษภาคม 2562]. [Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2864/soxhlet-extraction-.

30. สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, อาทิตย์ รังสีสันติวานนท์. การสกัดสารด้วยของไหลวิกฤติยิ่งยวด. วารสารศูนย์บริการวิชาการ. 2546;11(2):31-42.

31. เทคนิคการสกัดแบบซอกห์เลต [cited 10 มีนาคม 2562]. [Available from: http://u8.psu.ac.th/blog/sci-discus/18284.

32. Soxhlet device [cited 11 May 2019]. [Available from: https://www.manischemicals.com/en/soxhlet-device/750-soxhlet-device.html.

33. Pressure-Temperature phase diagram of CO_2 [cited 11 May 2019]. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Pressure-Temperature-phase-diagram-of-CO2_fig1_279830372.

34. Supercritical CO_2 [cited 15 May 2019]. [Available from: http://www.separeco.com/index.php/en/m.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

35. Development of a realistic approach for the modelling of various extraction methods of plants [cited 15 May 2019]. [Available from: http://sfe.kkft.bme.hu/en/current-research.html.

36. Zhao S, Zhang D. A parametric study of supercritical carbon dioxide extraction of oil from Moringa oleifera seeds using a response surface methodology. Separation Purification Technology. 2013;113:9-17.

37. Sovilj MN. Critical review of supercritical carbon dioxide extraction of selected oil seeds. Acta Per Technol. 2010;41:105-20.

38. Femenia A, García-Marín M, Simal S, Rosselló C, Blasco M. Effects of supercritical carbon dioxide (SC-CO_2) oil extraction on the cell wall composition of almond fruits. Journal of agricultural food chemistry. 2001;49(12):5828-34.

39. Marrone C, Poletto M, Reverchon E, Stassi A. Almond oil extraction by supercritical CO_2: experiments and modelling. Chemical Engineering Science. 1998;53(21):3711-8.

40. Leo L, Rescio L, Ciurlia L, Zacheo G. Supercritical carbon dioxide extraction of oil and α-tocopherol from almond seeds. Journal of the Science of Food Agriculture. 2005;85(13):2167-74.

41. Lu T, Gaspar F, Marriott R, Mellor S, Watkinson C, Al-Duri B, et al. Extraction of borage seed oil by compressed CO_2: effect of extraction parameters and modelling. The Journal of Supercritical Fluids. 2007;41(1):68-73.

42. Kotnik P, Škerget M, Knez Ž. Kinetics of supercritical carbon dioxide extraction of borage and evening primrose seed oil. European journal of lipid science technology. 2006;108(7):569-76.

43. Daukšas E, Venskutonis PR, Sivik B. Supercritical fluid extraction of borage (Borago officinalis L.) seeds with pure CO_2 and its mixture with caprylic acid methyl ester. The Journal of supercritical fluids. 2002;22(3):211-9.

44. Rónyai E, Simándi B, Tömösközi S, Deák A, Vigh L, Weinbrenner Z. Supercritical fluid extraction of corn germ with carbon dioxide–ethyl alcohol mixture. The Journal of Supercritical Fluids. 1998;14(1):75-81.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

45. Fiori L. Grape seed oil supercritical extraction kinetic and solubility data: critical approach and modeling. The Journal of Supercritical Fluid. 2007;43(1):43-54.

46. Murga R, Sanz MaT, Beltrán S, Cabezas JL. Solubility of some phenolic compounds contained in grape seeds, in supercritical carbon dioxide. The Journal of supercritical fluids. 2002;23(2):113-21.

47. Özkal S, Salgın U, Yener M. Supercritical carbon dioxide extraction of hazelnut oil. Journal of Food Engineering. 2005;69(2):217-23.

48. Özkal S, Yener M, Salgın U, Mehmetoğlu Ü. Response surfaces of hazelnut oil yield in supercritical carbon dioxide. European Food Research Technology. 2005;220(1):74-8.

49. Nikolovski BG, Sovilj MN, Đokić MZ, Vidović SS. Kinetics and modeling of the extraction of flax seed oil (Linum usitatissimum L.) by supercritical carbon dioxide. Hemijska industrija. 2008;62(5):283-92.

50. Sovilj MN, Barjaktarović BG. Kinetics of the extraction of pumpkin seed oil (Cucurbita pepo L.) by supercritical CO_2. Hemijska industrija. 2005;59(9-10):238-42.

51. Oliveira R, Fátima Rodrigues M, Gabriela Bernardo-Gil M. Characterization and supercritical carbon dioxide extraction of walnut oil. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2002;79(3):225-30.

52. Martínez ML, Mattea MA, Maestri DM. Pressing and supercritical carbon dioxide extraction of walnut oil. Journal of food engineering. 2008;88(3):399-404.

53. Shao P, Sun P, Ying Y. Response surface optimization of wheat germ oil yield by supercritical carbon dioxide extraction. food bioproducts processing. 2008;86(3):227-31.

54. Piras A, Rosa A, Falconieri D, Porcedda S, Dessì M, Marongiu B. Extraction of oil from wheat germ by supercritical CO_2. Molecules. 2009;14(7):2573-81.

55. Nguyen HN, Pag-asa DG, Maridable JB, Malaluan RM, Hinode H, Salim C, et al. Extraction of oil from Moringa oleifera kernels using supercritical carbon dioxide with ethanol for pretreatment: Optimization of the extraction process. Chemical Engineering Processing: Process Intensification. 2011;50(11-12):1207-13.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

56. Zhao S, Zhang D. Supercritical CO_2 extraction of Eucalyptus leaves oil and comparison with Soxhlet extraction and hydro-distillation methods. Separation Purification Technology. 2014;133:443-51.

57. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). การสกัดเย็น คืออะไร [cited 31 พฤษภาคม 2562]. [Available from: https://www.nstda.or.th/th/vdo-nstda/science-day-techno/4072-pure-virgin-oils.

58. Zhao S, Zhang D. An experimental investigation into the solubility of Moringa oleifera oil in supercritical carbon dioxide. Journal of Food Engineering. 2014;138:1-10.

59. Calculation of thermodynamic state variables of carbon dioxide [cited 21 June 2019]. [Available from: http://www.peace-software.de/einigewerte/co2_e.html?fbclid=IwAR07GvpRAcFWqknXIuDlyivZcIrt1_HDH2XTW1E8CC1Xkkviz17TM5p-lwY.

60. บุษราคัม สิงห์ชัย, จันทร์จิรา ขอจุลซ้วน, ปาริฉัตร ด้วงทอง. พฤกษเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของชาเล็บรอก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;25(5).

61. ฤทธิ์ของสารสกัดจากกิ่งลำไยในการต้านการก่อกลายพันธุ์ และยับยั้งการสร้างไนตริกออกไซด์ [cited 31 พฤษภาคม 2562]. [Available from: http://medplant.mahidol.ac.th/active/shownews.asp?id=841&fbclid=IwAR3LAyT06jzQMc8xMKF2qIjHjB8sTAXEkE0MAX-6X8WvfwptaAEymwCu0MY.

62. อรัญญา ศรีบุศราคัม. ลำไย...คุณค่าที่มากกว่าความหวาน [cited 31 พฤษภาคม 2562]. [Available from: https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/407/%E0%B8%A5%E0%B8%B3%E0%B9%84%E0%B8%A2/

63. ไมตรี สุทธิจิตต์, ศิริวรรณ สุทธจิตต์. ปริมาณวิตามินอีในเมล็ดพืช ผลิตภัณฑ์จากเมล็ดและน้ำมันพืช. อาหาร. 2538;25(2):117-23.

64. Ruttarattanamongkol K, Petrasch A. Oxidative Susceptibility and Thermal Properties of M oringa Oliefera Seed Oil Obtained by Pilot-Scale Subcritical and Supercritical Carbon Dioxide Extraction. Journal of food process Engineering. 2016;39(3):226-36.

65. Moringa seed cake [cited 17 May 2019]. [Available from: http://www.buymoringaplantproducts.com/moringa-seed-cake/.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

66. Moringa oleifera seeds powder or moringa seed cake powder [cited 17 May 2019]. Available from: http://www.moringa-drumstick.com/moringa-seed-powder.html.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดลอง

ตาราง ก.1 ร้อยละผลได้น้ำมันจากเมล็ดมะรุมและกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (ชั่วโมง)	ร้อยละผลได้น้ำมัน				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
เมล็ดมะรุม	65	7	25.32	25.08	25.76	25.39	0.34
กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 1	65	7	15.75	15.61	15.49	15.62	0.13
กากเมล็ดมะรุมหลังการบีบอัดครั้งที่ 2	65	7	12.25	12.54	12.14	12.31	0.21

ตาราง ก.2 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (150 บาร์)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
40	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	0.76	0.73	0.31	0.60	0.25
	60	0.6	1.63	1.70	1.27	1.53	0.23
	90	0.9	2.42	2.48	1.80	2.23	0.38
	120	1.2	2.52	3.04	2.65	2.74	0.27
	150	1.5	2.62	3.20	2.96	2.92	0.29
	180	1.8	2.83	3.37	3.07	3.09	0.27
	210	2.1	3.27	3.47	3.24	3.33	0.13
	240	2.4	3.49	3.69	3.42	3.53	0.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
40	270	2.7	4.86	3.98	3.58	4.14	0.65
	300	3.0	5.21	4.31	4.20	4.57	0.55
50	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	0.15	0.31	0.23	0.23	0.08
	60	0.6	0.45	0.78	0.43	0.56	0.20
	90	0.9	0.92	1.23	0.93	1.02	0.18
	120	1.2	1.06	1.67	1.26	1.33	0.31
	150	1.5	1.17	1.83	1.42	1.47	0.33
	180	1.8	1.26	1.98	1.58	1.61	0.36
	210	2.1	1.43	2.18	1.97	1.86	0.38
	240	2.4	1.58	2.31	2.16	2.02	0.39
	270	2.7	1.91	2.41	2.27	2.20	0.26
	300	3.0	2.10	2.56	2.35	2.34	0.23
60	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	0.21	0.22	0.20	0.21	0.01
	60	0.6	0.40	0.35	0.30	0.35	0.05
	90	0.9	0.59	0.51	0.42	0.51	0.09
	120	1.2	0.75	0.65	0.55	0.65	0.10
	150	1.5	0.86	0.77	0.69	0.77	0.08
	180	1.8	0.94	0.95	0.78	0.89	0.09
	210	2.1	1.04	1.13	0.85	1.01	0.14
	240	2.4	1.14	1.26	0.93	1.11	0.17
	270	2.7	1.24	1.47	1.02	1.24	0.23
	300	3.0	1.38	1.58	1.02	1.32	0.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.3 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (200 บาร์)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
40	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	2.42	0.18	0.72	1.11	1.17
	60	0.6	5.19	0.90	2.66	2.92	2.16
	90	0.9	5.94	2.80	4.46	4.40	1.57
	120	1.2	6.42	3.95	5.95	5.44	1.31
	150	1.5	6.65	5.52	6.36	6.18	0.59
	180	1.8	6.91	6.83	6.66	6.80	0.12
	210	2.1	7.03	7.73	6.84	7.20	0.47
	240	2.4	7.10	7.97	6.97	7.35	0.55
	270	2.7	7.16	8.14	7.06	7.46	0.60
	300	3.0	7.24	8.28	7.13	7.55	0.64
50	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	1.34	0.22	1.36	0.97	0.65
	60	0.6	3.03	1.04	3.17	2.42	1.19
	90	0.9	4.47	2.33	5.10	3.97	1.45
	120	1.2	6.08	3.50	6.62	5.40	1.66
	150	1.5	6.60	5.13	7.15	6.29	1.04
	180	1.8	6.75	5.97	7.43	6.72	0.73
	210	2.1	6.97	6.78	7.66	7.14	0.46
	240	2.4	7.49	7.07	7.82	7.46	0.38
	270	2.7	7.63	7.25	7.97	7.62	0.36
	300	3.0	7.98	7.58	8.09	7.88	0.27
60	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	1.26	0.43	0.31	0.67	0.52
	60	0.6	2.58	1.28	1.40	1.75	0.72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
60	90	0.9	3.42	2.05	2.07	2.51	0.79
	120	1.2	3.94	2.89	3.16	3.33	0.55
	150	1.5	4.06	3.64	4.14	3.94	0.27
	180	1.8	4.24	4.03	4.31	4.19	0.14
	210	2.1	4.36	4.21	4.52	4.36	0.15
	240	2.4	6.07	5.08	4.75	5.30	0.69
	270	2.7	6.47	6.06	4.94	5.82	0.79
	300	3.0	7.15	7.15	5.63	6.64	0.88

ตาราง ก.4 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (250 บาร์)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
40	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	1.56	0.70	0.81	1.03	0.47
	60	0.6	4.39	3.88	4.00	4.09	0.27
	90	0.9	5.92	6.69	6.72	6.44	0.45
	120	1.2	6.26	7.66	8.34	7.42	1.06
	150	1.5	6.40	7.85	8.78	7.67	1.20
	180	1.8	6.47	7.98	8.93	7.79	1.24
	210	2.1	6.53	8.10	9.02	7.88	1.26
	240	2.4	6.61	8.22	9.10	7.98	1.26
	270	2.7	6.67	8.30	9.17	8.05	1.27
	300	3.0	6.75	8.38	9.23	8.12	1.26
50	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
50	30	0.3	2.22	2.22	1.67	2.04	0.32
	60	0.6	6.04	5.46	4.88	5.46	0.58
	90	0.9	7.34	7.38	7.53	7.42	0.10
	120	1.2	7.87	8.49	8.79	8.38	0.47
	150	1.5	7.97	9.11	9.32	8.80	0.72
	180	1.8	7.97	9.45	9.51	8.98	0.87
	210	2.1	7.98	9.50	9.58	9.02	0.90
	240	2.4	7.99	9.53	9.65	9.06	0.92
	270	2.7	8.00	9.57	9.72	9.10	0.95
	300	3.0	8.00	9.64	9.80	9.15	0.99
60	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	1.54	2.00	2.50	2.02	0.48
	60	0.6	4.52	4.22	4.76	4.50	0.27
	90	0.9	6.15	6.50	6.75	6.46	0.30
	120	1.2	6.63	8.36	8.41	7.80	1.02
	150	1.5	6.76	8.79	8.78	8.11	1.17
	180	1.8	6.80	9.02	8.91	8.24	1.25
	210	2.1	6.87	9.14	9.28	8.43	1.35
	240	2.4	6.95	9.21	9.43	8.53	1.37
	270	2.7	6.99	9.32	9.59	8.63	1.43
	300	3.0	7.04	9.39	9.66	8.70	1.44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.5 ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุมสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต (300 บาร์)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
40	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	1.51	0.22	3.62	1.78	1.72
	60	0.6	5.18	2.98	7.66	5.27	2.34
	90	0.9	6.67	5.48	8.03	6.72	1.28
	120	1.2	6.83	7.37	8.09	7.43	0.63
	150	1.5	6.86	8.68	8.13	7.89	0.93
	180	1.8	6.89	9.32	8.18	8.13	1.22
	210	2.1	6.93	9.67	8.23	8.28	1.37
	240	2.4	6.95	9.75	8.26	8.32	1.40
	270	2.7	6.99	9.87	8.30	8.39	1.44
	300	3.0	7.04	9.97	8.34	8.45	1.47
50	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	2.81	0.96	1.12	1.63	1.02
	60	0.6	7.38	4.73	4.71	5.61	1.54
	90	0.9	9.34	7.32	7.34	8.00	1.16
	120	1.2	9.45	8.40	7.99	8.61	0.75
	150	1.5	9.55	8.87	8.19	8.87	0.68
	180	1.8	9.64	9.11	8.35	9.03	0.65
	210	2.1	9.73	9.15	8.48	9.12	0.62
	240	2.4	9.84	9.21	8.59	9.21	0.63
	270	2.7	9.91	9.27	8.67	9.29	0.62
	300	3.0	9.98	9.32	8.76	9.35	0.61
60	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	2.07	0.81	2.29	1.72	0.80
	60	0.6	7.47	4.39	5.40	5.75	1.57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาสกัด (นาที)	คาร์บอนไดออกไซด์สะสม (กิโลกรัม)	ร้อยละผลได้น้ำมันจากกากเมล็ดมะรุม				
			รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
60	90	0.9	9.91	6.75	8.08	8.24	1.59
	120	1.2	10.19	8.34	9.44	9.32	0.93
	150	1.5	10.25	9.06	10.08	9.79	0.64
	180	1.8	10.39	9.54	10.52	10.15	0.53
	210	2.1	10.45	9.65	10.61	10.23	0.52
	240	2.4	10.51	9.72	10.70	10.31	0.52
	270	2.7	10.57	9.81	10.78	10.39	0.51
	300	3.0	10.62	9.91	10.83	10.46	0.48
70	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.3	3.85	3.24	2.54	3.21	0.65
	60	0.6	7.09	7.59	5.93	6.87	0.85
	90	0.9	7.97	9.25	7.70	8.30	0.83
	120	1.2	9.66	9.65	9.08	9.46	0.33
	150	1.5	9.85	9.74	9.60	9.73	0.12
	180	1.8	9.90	9.83	9.80	9.84	0.05
	210	2.1	9.94	9.93	9.92	9.93	0.01
	240	2.4	9.98	10.03	10.00	10.00	0.03
	270	2.7	10.02	10.11	10.09	10.07	0.05
	300	3.0	10.06	10.18	10.17	10.14	0.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิชญา มั่นคง
วัน เดือน ปี เกิด	6 ตุลาคม 2537
สถานที่เกิด	นนทบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2559)
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2019) เมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY