

Research Article

การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันและบีตา-แคโรทีน จากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

Determination of optimum extraction condition for edible oil and β -carotene from carrot peel (*Daucus carota* L.) using supercritical carbon dioxide

สุธิดา อัครชนียากร^{1*}, ธนสิทธิ์ ตั้งไพบูลย์พงศา¹, มินตรา เชื้อคำ¹, ขวัญชนก ดาศิริ¹, ปัทมา ภาสุธาน¹ และ
นกรินทร์ มัททวิวงศ์²

Suthida Akkarachaneeyakorn^{1*}, Tanasith Tangpaiboonpongsa¹, Mintra Chuakam¹, Kwanchanok Dasiri¹,
Pattama Phasuthan¹ and Nakarin Mattaweewong²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

²กองพัฒนายาแผนไทยและสมุนไพร กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข อำเภอลองหลวง
จังหวัดปทุมธานี 12120

¹Department of Agro-Industrial, Food, and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of
Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

²Herb and Thai Traditional Medicine Development Division, Department for Development of Thai Traditional and Alternative
Medicine, Ministry of Public Health, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

*E-mail: suthida.a@sci.kmutnb.ac.th

Received: 26/02/2019; Revised: 12/11/2019; Accepted: 26/11/2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้วิธี
คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด และหาสมการคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพ
ในการสกัดน้ำมัน และปริมาณบีตา-แคโรทีน วางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลคอมโพสิต สำหรับ 2 ปัจจัย คือ
อุณหภูมิ (32 39 56 73 และ 80 องศาเซลเซียส) และความดัน (14.2 16.5 22.1 27.7 และ 30.0 เมกะปาสกาล) เพื่อ

หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน โดยพิจารณาจากปริมาณผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนสูงที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความดัน 14.2 เมกะปาสกาล และเมื่อเปรียบเทียบผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน (%D) น้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนได้เป็นอย่างดี และพบว่าน้ำมันจากเปลือกแครอทที่ได้จากการทดลองมีสีส้ม ค่า L^* a^* b^* C^* และ h^* เท่ากับ 33.35 26.08 42.28 48.53 และ 57.99° ตามลำดับ ปริมาณบีตา-แคโรทีน ค่าไอโอดีน และค่าความเป็นกรดของน้ำมัน เท่ากับ 0.27 mg/100mg db 116.75 mg iodine/100 g oil และ 2.43 mg KOH/g oil ตามลำดับ และสมบัติด้านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริกของสารต้านอนุมูลอิสระ (Ferric-reducing antioxidant power) มีค่าเท่ากับ 529.08 $\mu\text{MFe}^{2+}/\text{g}$

คำสำคัญ: ค่าความเป็นกรด, คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด, น้ำมันบริโภคร, บีตา-แคโรทีน, เปลือกแครอท

Abstract

The objectives of this research were to study the optimum condition for extracting oil from carrot peels using supercritical carbon dioxide and find mathematical equations to predict the percentage of oil yield, oil extraction efficiency, and beta-carotene content. Central composite design was performed for 2 factors, temperature (32, 39, 56, 73, and 80 °C) and pressure (14.2, 16.5, 22.1, 27.7, and 30.0 MPa), to determine the optimum oil extraction condition based on the highest value of oil yield, extraction efficiency, and beta-carotene content. It was found that the optimum condition was at 80 °C and 14.2 MPa and when comparing the oil yield, oil extraction efficiency, and beta-carotene content obtained from the experiment at the optimum condition to the values obtained from the prediction with the mathematical model, it was revealed that the deviation value (%D) was less than 10 percent, indicating that the obtained mathematical models could predict the percentage of oil yield, extraction efficiency, and beta-carotene content well. In addition, it was found that the oil from the carrot peels obtained from the experiment was orange with L^* a^* b^* C^* and h^* at 33.35 26.08 42.28 48.53 and 57.99° , respectively, beta-carotene content iodine value and oil acidity value were 0.27 mg/100mg db, 116.75 mg iodine/100 g oil, and 2.43 mg KOH/g oil, respectively and antioxidant properties based on the ferric-reducing antioxidant power assay was 529.08 $\mu\text{MFe}^{2+}/\text{g}$.

Keywords: acid value, supercritical carbon dioxide, edible oil, β -carotene, carrot peel

บทนำ

โดยทั่วไปวิธีการสกัดน้ำมันจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตสูง แต่อาจมีตัวทำละลายอินทรีย์ตกค้างในผลิตภัณฑ์ และใช้เวลาในการสกัดนาน (Zhao & Zhang, 2013a) เพื่อลดระยะเวลาในการสกัดจึงพัฒนาการสกัดโดยใช้วิธีตัวทำละลายร่วมกับความดัน แต่ได้ปริมาณผลผลิตต่ำ ส่วนการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด มีข้อดี คือ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารที่ไม่มีขั้ว สามารถใช้ร่วมกับตัวทำละลายร่วม (co-solvent) ชนิดอื่นได้ เช่น แอลกอฮอล์ อีเทอร์ แอลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น และมีอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตที่ต่ำ ($T_c = 31.3$ องศาเซลเซียส และ $P_c = 73$ atm) จึงสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารสกัดได้ง่าย โดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (Cheah et al., 2006) และข้อดีของวิธีใช้ของไหลวิกฤตยิ่งยวด คือ มีค่าความหนืดต่ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถซึมเข้าสู่ตัวถูกละลายได้ดี ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลดี ค่าความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลวิกฤตยิ่งยวดจะมีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลของตัวทำละลาย ทำให้ต้องมีการปรับสภาวะให้เหมาะสมเพื่อจะให้ได้สามารถสกัดสารที่ต้องการได้มากที่สุด

Tai & Kim (2014) สกัดน้ำมันจากเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่า (*Momordica cochinchinensis* Spreng) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด แปรผัน ความดัน 200 300 และ 400 บาร์ อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.83 1.17 และ 1.50 ลิตรต่อนาที พบว่า อุณหภูมิ และความดัน มีผลต่อผลผลิตที่ได้มากกว่าอัตราการไหลของตัวทำละลาย งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของสภาวะการสกัด ได้แก่ อุณหภูมิ และความดัน ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบิตา-แคโรทีน

เปลือกแครอทจัดเป็นขยะอินทรีย์ ซึ่งในปี 2561 มีปริมาณขยะอินทรีย์ ประมาณ 17 ล้านตัน ทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร หรือแหล่งการค้าต่าง ๆ มีการใช้งบประมาณในการจัดการขยะอินทรีย์ประมาณ 460 ล้านบาท (Pollution Control Department, 2019) นอกจากนี้เปลือกแครอทอุดมไปด้วยสารบิตา-แคโรทีน ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ และสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอปริมาณสูงได้ (Sharma et al., 2012) เพื่อเป็นการลดปัญหาการกำจัดขยะ และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียเหลือทิ้งได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเปลือกแครอทมาทำการสกัดน้ำมันและบิตา-แคโรทีน ซึ่งสามารถผลิตเป็นสารให้สีธรรมชาติในอุตสาหกรรมอาหารได้ หรืออาจนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันและบิตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด โดยพิจารณาจากปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และบิตา-แคโรทีนที่มีค่าสูงสุด แล้วหาสมการทำนายร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบิตา-แคโรทีนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดัน และศึกษาสมบัติด้านเคมีกายภาพ และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอทจากสภาวะการสกัดที่เหมาะสมที่สุด โดยประโยชน์จากงานวิจัยนี้ คือ ทำให้

ทราบสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันและบีตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด เพื่อสามารถนำไปปรับใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

เปลือกแครอทได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ฟู้ดแพชชั่น จำกัด ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่งที่ 4 องศาเซลเซียส และเก็บเปลือกแครอทในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และคัดเลือกเปลือกแครอทที่มีลักษณะเป็นสีส้ม ไม่มีเมือก ไม่มีจุดสีดำ เพื่อใช้ทดลอง

2. การเตรียมผงเปลือกแครอทอบแห้ง

หั่นเปลือกแครอทเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความยาวด้านละ 2 เซนติเมตร จากนั้นนำไปลวกที่อุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เพื่อยับยั้งเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส เป็นการป้องกันการสูญเสียบีตา-แคโรทีนระหว่างอบแห้ง (Gonçalves et al., 2010) และช่วยลดเวลาที่ใช้ในการทำแห้งด้วยลมร้อนลง (Chantaro et al., 2008) หลังจากนั้นทำให้เย็นโดยจุ่มน้ำผสมน้ำแข็ง เป็นเวลา 2 นาที ทำให้สะเก็ดน้ำ เรียงเปลือกแครอทลงในถาด อบในตู้อบลมร้อนแบบถาด (UF 260 ยี่ห้อ Memmert, ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (Chantaro et al., 2008) จนมีความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยการทำแห้งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำมัน ข้อดีของตู้อบลมร้อน คือ สามารถใช้อบได้ครั้งละปริมาณมาก สามารถกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอ และต้นทุนต่ำ จากนั้นบดเปลือกแครอทอบแห้งด้วยเครื่องบด (รุ่น WF-04, ประเทศไต้หวัน) เป็นเวลา 2 นาที ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 mesh (297 ไมครอน) (Cheah et al., 2006) เก็บในขวดแก้ว ห่อด้วยฟอยล์เพื่อป้องกันแสงและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากนั้นนำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

3. การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

นำผงเปลือกแครอทอบแห้ง ปริมาณ 520 กรัม ใส่ลงในถังสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤต (รุ่น 24L-SFE, ประเทศจีน) ปรับความดัน และอุณหภูมิ ตามสถานะที่กำหนดในตารางที่ 1 อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมต่อนาที สกัดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เก็บน้ำมันที่สกัดได้ในขวดแก้ว ห่อฟอยล์ ปิดฝาให้สนิท และเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันแสงและปฏิกิริยาออกซิเดชัน คำนวณผลผลิตที่ได้ ประสิทธิภาพการสกัด และวัดปริมาณบีตา-แคโรทีน ดังแสดงรายละเอียดด้านล่างข้อที่ 3.1-3.3 พิจารณาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด โดยพิจารณาจากค่าปริมาณร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนสูงสุด

3.1 ปริมาณร้อยละผลผลิต

คำนวณร้อยละผลผลิต ดังสมการที่ (1)

$$\text{ผลผลิต (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด}}{\text{น้ำหนักผงเปลือกแครอทอบแห้ง}} \times 100 \quad (1)$$

3.2 ประสิทธิภาพการสกัด

ประสิทธิภาพการสกัด คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดลบด้วยความชื้นต่อน้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้จากวิธีชอกเลต โดยการวัดความชื้นของน้ำมันที่ได้ ใช้ตามวิธี AOCS (1997) โดยใช้ตัวอย่างน้ำมัน 5 ± 0.05 กรัม ใส่ลงในจานวัดความชื้น นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำจานออกมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก อบจนกระทั่งน้ำหนักต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.05 หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาความชื้น วัดปริมาณน้ำมันทั้งหมดจากเปลือกแครอทด้วยวิธีชอกเลต โดยใช้เครื่องสกัดไขมัน (BUCHI B-811, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) โดยใช้ตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ในถ้วยกระดาษ (cellulose thimble) และวางในเครื่องสกัด เดิมเฮกเซน และต่อเข้าไปในชุดสกัด อุณหภูมิที่ใช้สกัด 145 องศาเซลเซียส เวลาในการสกัด 120 นาที เวลาในการชะไขมันที่เหลืออยู่ 20 นาที และการทำแห้งภาชนะอุณหภูมิที่บรรจุน้ำมันจากการสกัด 20 นาที ตัวอย่างจะถูกทำแห้งในเครื่องอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักน้ำมันที่ได้ คำนวณประสิทธิภาพการสกัดดังสมการที่ (2)

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัด} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด} - \text{ความชื้น}}{\text{น้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้จากวิธีชอกเลต}} \times 100 \quad (2)$$

3.3 ปริมาณบิตา-แคโรทีน

วัดปริมาณบิตา-แคโรทีนตามงานวิจัย Nagata & Yamashita (1992) โดยเติมตัวทำละลายผสมระหว่าง acetone:hexane อัตราส่วน 4:6 (v/v) ในตัวอย่างน้ำมันปริมาณ 0.1 กรัม และนำไป vortex 1 นาที หลังจากนั้นนำมาเจือจาง 10 เท่า และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- visible spectrophotometer (Genesys 20, ประเทศเยอรมนี) ที่ความยาวคลื่น 663 645 505 และ 453 นาโนเมตร โดยใช้ acetone:hexane อัตราส่วนเท่ากับ 4:6 (v/v) เป็นแบลนด์ แล้วนำไปคำนวณปริมาณบิตา-แคโรทีนดังสมการที่ (3)

$$\text{บิตา-แคโรทีน (มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม db)} = 0.216A_{663} - 1.22A_{645} - 0.304A_{505} + 0.452A_{453} \quad (3)$$

4. การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันจากเปลือกแครอทที่สกัดได้จากสภาวะที่เหมาะสม

ทำการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของน้ำมันจากเปลือกแครอทที่สกัดได้จากสภาวะที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

4.1 ปริมาณร้อยละผลผลิต คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ดังแสดงในสมการที่ (1)

4.2 ประสิทธิภาพการสกัด คำนวณประสิทธิภาพการสกัดดังแสดงในสมการที่ (2)

4.3 การวัดสี โดยใช้ hunter lab (colorquest 450, Color global) โดยใช้ระบบ CIE lab รายงานค่าเป็น $L^* a^* b^* C^*$ และ h^* เตรียมตัวอย่างน้ำมันจากเปลือกแครอทปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ตัวอย่างในถ้วยวัดสี ทำการวัด 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

4.4 การวิเคราะห์หีตา-แคโรทีน ตามวิธีของ Nagata & Yamashita (1992) กำหนดปริมาณหีตา-แคโรทีนดังแสดงในสมการที่ (3)

4.5 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน (Iodine value) ตามวิธี AOCS (1997) โดยนำตัวอย่างน้ำมันจากเปลือกแครอท 0.2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ 500 มิลลิลิตร เติม cyclohexane:acetic acid อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 ปริมาตร 15 มิลลิลิตร เขย่าให้ผสมกัน เติมสารละลาย Wijs 25 มิลลิลิตร (เตรียมสารละลาย Wijs โดยชั่ง Iodine monochloride 16.5 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรและปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรด้วย glacial acetic acid เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา และในที่เย็น) ปิดฝาให้สนิท เก็บไว้ที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารละลาย KI ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้ผสมกัน เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรไทเทรตด้วยสารละลาย Sodium thiosulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติมสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายสีไม่มีสี การคำนวณค่าไอโอดีน ดังสมการที่ (4)

$$\text{ค่าไอโอดีน (\%)} = (B - S) \times N_s \times 12.69 \quad (4)$$

โดยที่ B = ปริมาตรของ Sodium thiosulfate ที่ใช้ในการไทเทรตแบล็ก (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของ Sodium thiosulfate ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N_s = ความเข้มข้นของ Sodium thiosulfate (นอร์มอล)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

4.6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมัน (acid value) ทำตามวิธี AOCS (1997) โดยชั่งตัวอย่างน้ำมัน 0.1 กรัม ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร เติม isopropyl:toluene อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติม phenolphthalein 1 มิลลิลิตร ค่อย ๆ หยด KOH 0.001 นอร์มอล จนเกิดสีชมพู เขย่าสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน ไทเทรตด้วยสารละลาย KOH 0.001 นอร์มอล จนเกิดสารละลายสีชมพู กำหนดค่ากรดไขมันดังสมการที่ (5)

$$\text{Acid value (mg KOH/g of sample)} = A \times N_p \times 56.1 \quad (5)$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ Potassium hydroxide (KOH) ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N_p = ความเข้มข้นของ Potassium hydroxide (นอร์มอล)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

4.7 การวิเคราะห์ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี Ferric-reducing antioxidant power (FRAP) การเตรียมตัวอย่างสารละลาย FRAP โดยใช้ acetate buffer (pH 3.6), TPTZ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ใน HCl เข้มข้น

40 มิลลิโมลาร์ และสารละลาย Ferric chloride เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วน 10:1:1 (ร้อยละโดยปริมาตร) ตามลำดับ สารละลาย FRAP จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งานและนำไปอุ่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำมาใช้ นำสารสกัดปริมาตร 50 ไมโครลิตร แล้วเติมสารละลาย FRAP 1.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่มืดเป็นระยะเวลา 4 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร โดยทำการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลาย Ferrous sulfate ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 50-1,200 ไมโครโมลาร์ โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำและหาค่าเฉลี่ย และรายงานออกมาเป็นค่า FRAP value (ไมโครโมลาร์เฟอรัสไอออนต่อกรัม)

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยวิธีการสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด วางแผนการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ด้วยวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต ที่มี 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และมีการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 3 ครั้ง จึงมีการทดลองทั้งหมด 11 การทดลอง ดังตารางที่ 1 โดยมีค่าตอบสนอง (Y) ได้แก่ ปริมาณร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณสารบีตา-แคโรทีน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 16.2.2.0 (Minitab, Inc., Pennsylvania, USA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เปลือกแครอทมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 88.19 ± 1.12 (โดยน้ำหนักเปียก) เมื่อนำไปอบแห้งและบดเป็นผง พบว่ามีปริมาณผลผลิตและความชื้นเท่ากับร้อยละ 8.13 ± 0.28 6.73 ± 0.07 (โดยน้ำหนักเปียก) ตามลำดับ โดยความชื้นที่เหมาะสมในการสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ควรจะต่ำกว่าร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักแห้ง) เพื่อสกัดน้ำมันให้ง่ายขึ้น (Cheah et al., 2006) อีกทั้งยังอยู่ในช่วงตามประกาศ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง ผักและผลไม้แห้ง ฉบับที่ 136 พ.ศ. 2558 ที่กำหนดค่าความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (Thai Industrial Standards Institute, 2015)

1. ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ซึ่งวางแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต สำหรับ 2 ปัจจัย ใช้พื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อหาความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนที่มีค่ามากที่สุด จากผลการทดลอง พบว่าผลผลิตน้ำมันที่สกัดได้จากผงเปลือกแครอทด้วยวิธีซอกเลต เท่ากับร้อยละ 1.57 ซึ่งมีค่ามากกว่าการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05-1.07 (ตารางที่ 1) โดยการสกัดด้วยวิธีซอกเลต เป็นการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน อาจมีสารเคมีตกค้างในน้ำมันที่สกัดได้ และพบว่าผลผลิตน้ำมันที่สกัดได้ด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดจากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Sun & Temelli (2002) ซึ่งได้สกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดจากเนื้อแครอทที่

ความดัน 27.6-55.1 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณผลผลิตเท่ากับร้อยละ 1.83-2.69 เนื่องจากในเปลือกแครอทมีส่วนประกอบของเพอริเดิร์ม (periderm) ทำหน้าที่ปกป้องบริเวณภายในของแครอท (Ahmad et al., 2019) จึงขัดขวางการละลายออกมาของน้ำมัน ทำให้ปริมาณร้อยละผลผลิตที่สกัดจากเปลือกแครอทต่ำกว่าเนื้อแครอท และมีค่าที่น้อยกว่างานวิจัยของ Ghafoor et al. (2010) ซึ่งได้สกัดน้ำมันจากเปลือกองุ่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ที่ความดัน 13.73-16.67 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 37-46 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณผลผลิตเท่ากับร้อยละ 6.78-13.22 ปริมาณผลผลิตน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอทต่ำกว่าที่สกัดจากเปลือกองุ่น เนื่องจากธรรมชาติของวัตถุดิบ และปริมาณองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ที่มีอยู่ในวัตถุดิบไม่เท่ากัน โดยเปลือกองุ่นจะสกัดน้ำมันออกมาได้ง่ายและมีปริมาณน้ำมันที่สูงกว่าเปลือกแครอท ส่วนประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอท มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.66-13.07 (ตารางที่ 1) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Moura et al. (2012) ที่สกัดน้ำมันจากใบฝรั่งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ความดัน 10-30 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 35-55 องศาเซลเซียส ได้ประสิทธิภาพการสกัดเท่ากับร้อยละ 7.14-13.76 และพบว่าปริมาณบีตา-แคโรทีนในน้ำมันจากเปลือกแครอท มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.013-0.313 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 1) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานวิจัยของ Sun & Temelli (2002) ที่ได้สกัดน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดจากเนื้อแครอทที่ความดัน 27.6-55.1 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณบีตา-แคโรทีนเท่ากับ 0.3337-0.9000 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากในเปลือกแครอทมีส่วนประกอบของเพอริเดิร์ม ทำหน้าที่ปกป้องบริเวณภายในของแครอท (Ahmad et al., 2019) จึงไปขัดขวางการละลายออกมาของบีตา-แคโรทีน ทำให้ในน้ำมันจากเปลือกแครอทมีปริมาณบีตา-แคโรทีนต่ำกว่าในเนื้อแครอท และมีค่าที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Hiranvarachet et al. (2013) ที่ได้สกัดน้ำมันจากเนื้อแครอทด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 58 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณบีตา-แคโรทีนเท่ากับ 0.0292 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง

2. สมการทำนายร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดัน สำหรับกระบวนการสกัดน้ำมัน และบีตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

2.1 สมการทำนายร้อยละผลผลิตจากเปลือกแครอทด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

การหาสมการทำนายปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Y_p) ดังตารางที่ 2 จะต้องพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย โดยพิจารณาจาก (1) ค่า P-value ของสมการถดถอย (regression equation) มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ที่ว่าไม่มีตัวแปรอิสระใด ๆ ที่สามารถอธิบายความเป็นไปได้ของค่าผลตอบสนองได้ (2) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) จากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณร้อยละผลผลิต มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.32 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 หมายความว่า ตัวแปรอิสระ คือ ความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด สามารถอธิบายความ

ตารางที่ 1. ปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนของน้ำมันจากเปลือกแครอท โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดสกัดที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ

การทดลอง	ความดัน ค่าจริง (MPa) (ค่า code)	อุณหภูมิ ค่าจริง (°C) (ค่า code)	ความหนาแน่นของ คาร์บอนไดออกไซด์ วิกฤตยิ่งยวด ^a (g/cm ³)	ปริมาณผลผลิต (%)	ประสิทธิภาพ การสกัด (%)	ปริมาณบีตา-แคโรทีน (mg/100mg db)
1	16.5 (-1)	73 (1)	0.541	1.07	13.07	0.151±0.008
2	14.2 (-1.4142)	56 (0)	0.615	0.37	4.51	0.053±0.003
3	22.1 (0)	56 (0)	0.776	0.38	4.58	0.109±0.005
4	22.1 (0)	56 (0)	0.776	0.36	4.40	0.144±0.020
5	27.7 (1)	73 (1)	0.753	0.47	5.74	0.258±0.012
6	22.1 (0)	56 (0)	0.776	0.32	3.86	0.103±0.008
7	30.0 (1.4142)	56 (0)	0.846	0.17	2.07	0.256±0.004
8	22.1 (0)	80 (1.4142)	0.639	0.99	12.06	0.313±0.030
9	27.7 (1)	39 (-1)	0.901	0.15	1.81	0.259±0.020
10	22.1 (0)	32 (-1.4142)	0.896	0.24	2.94	0.025±0.000
11	16.5 (-1)	39 (-1)	0.808	0.05	0.66	0.013±0.016

ที่มา : ^a Span & Wagner (1996)

แปรผัน หรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม คือ ปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมันได้ และ (3) การขาดความเหมาะสมของสมการ (lack of fit) โดยพิจารณาค่า P-value ของ lack of fit มีค่าเท่ากับ 0.156 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งไม่มีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) จึงสามารถสรุปได้ว่า สมการถดถอยสามารถทำนายค่าปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมันได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม รูปที่ 1a แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติ แสดงปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอต ที่แปรผันตามความดันและอุณหภูมิ ที่ระดับต่าง ๆ จากรูปที่ 1a และจากตารางที่ 1 การทดลองที่ 1 กับ 11 หรือการทดลองที่ 5 กับ 9 พบว่าเมื่อความดันคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการใช้ความร้อนเข้าไปแทรกซึมในเนื้อของตัวอย่างได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้สกัดน้ำมันออกมาได้ปริมาณมากขึ้น (Zhao & Zhang, 2013a) และการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของตัวทำละลาย ซึ่งส่งผลให้เพิ่มการละลายของน้ำมันได้ จากงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณร้อยละผลผลิตมากกว่าความดัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ดังตารางที่ 1 ทำให้ปริมาณร้อยละผลผลิตลดลง ดังนั้นการควบคุมความดันและอุณหภูมิให้เหมาะสม จะส่งผลให้ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมันสูงสุด (Sun & Tamelli, 2002)

2.2 สมการทำนายประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

สมการทำนายประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย (coefficient of regression equation) ของประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอตที่สกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด มาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการดังตารางที่ 2 และจากรูปที่ 1b แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติของประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอต ที่แปรผันตามความดันและอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ พบว่าที่ความดัน 14.2 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันมีค่าสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 17.52 โดยประสิทธิภาพการสกัดจากเปลือกแครอตมาจากการนำร้อยละของผลผลิตที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดเปรียบเทียบกับร้อยละของผลผลิตที่ได้จากการสกัดด้วยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งเป็นวิธีที่สกัดแล้วทำให้ได้ร้อยละผลผลิตน้ำมันสูงที่สุด (Zaghdoudi et al., 2016) จากผลการทดลองผลผลิตที่ได้จากการสกัดด้วยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.57

2.3 สมการทำนายปริมาณบีตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

การหาสมการทำนายปริมาณบีตา-แคโรทีนในน้ำมันจากเปลือกแครอตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ดังตารางที่ 2 จะต้องพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า P-value ของสมการถดถอย (regression equation) มีค่าเท่ากับ 0.015 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 90.11 และค่า P-value ของ lack of fit มีค่าเท่ากับ 0.133 แสดงว่า สมการถดถอยสามารถทำนายปริมาณบีตา-แคโรทีนได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม รูปที่ 1c แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติแสดงปริมาณบีตา-แคโรทีนที่สกัดจากเปลือกแครอต ที่แปรผันตามความดันและอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ การเพิ่มความดันและอุณหภูมิส่งผลให้

ตารางที่ 2. สมการคณิตศาสตร์ R^2 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (%D) ของปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบิตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 14.20 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ค่า Y	แบบจำลอง	ค่าที่ได้จากการทำนาย	ค่าที่ได้จากการทดลอง	%D
ปริมาณผลผลิต (%)	$Y_1 = -0.00134663(X_1)^2 + 0.000451723(X_2)^2 + 0.143983(X_1) + 0.00730070(X_2) - 0.00182309(X_1)(X_2) - 1.74349$ $R^2 = 98.32$	1.43	1.32±0.02	8.7
ประสิทธิภาพการสกัด (%)	$Y_2 = -0.0164606(X_1)^2 + 0.00552166(X_2)^2 + 1.75998(X_1) + 0.0892405(X_2) - 0.0222846(X_1)(X_2) - 21.3116$ $R^2 = 98.32$	17.52	16.13±0.17	8.7
ปริมาณบิตา-แคโรทีน (mg/100mg db)	$Y_3 = 0.000645271(X_1)^2 + 0.0000953685(X_2)^2 + 0.00631346(X_1) + 0.00141061(X_2) - 0.000366775(X_1)(X_2) - 0.261081$ $R^2 = 90.11$	0.266	0.265±0.003	0.4

หมายเหตุ : ค่าที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ

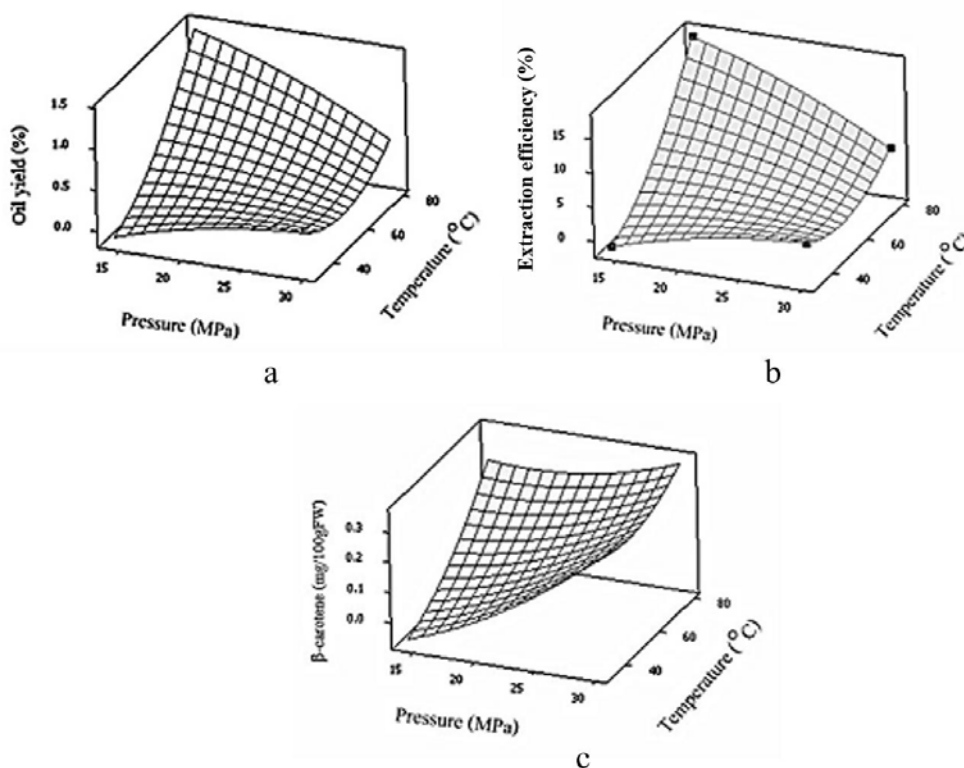
โดยที่ X_1 หมายถึง ความดัน มีค่า 14.2-30 เมกะปาสกาล

X_2 หมายถึง อุณหภูมิ มีค่า 32-80 องศาเซลเซียส

$\%D = [abs(\text{ค่าที่ได้จากการทำนาย} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}) / \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}] \times 100$

ปริมาณบิตา-แคโรทีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความดันจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของตัวทำละลาย ส่งผลให้สกัดบิตา-แคโรทีนได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saldaña et al. (2006) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดเพื่อสกัดบิตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทจาก 120 บาร์ เป็น 200 บาร์ ทำให้สกัดบิตา-แคโรทีนได้ปริมาณมากขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในวัตถุดิบและสกัดน้ำมันได้มากขึ้น ส่งผลให้สกัดบิตา-แคโรทีนออกมาได้มากขึ้น (Pourmortazavi & Hajimirsadeghi, 2007) อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเร่งการสกัดของน้ำมัน (Zhao & Zhang, 2013b) แต่การเพิ่มความดันและอุณหภูมิร่วมกัน กลับไม่ส่งผลให้ปริมาณบิตา-แคโรทีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Sun & Temelli,

2002) อาจเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการลดความหนาแน่นของตัวทำละลาย ทำให้เข้าไปสกัดบีตา-แคโรทีนได้น้อยลง ดังนั้นจึงควรควบคุมความดันและอุณหภูมิการสกัดให้เหมาะสม

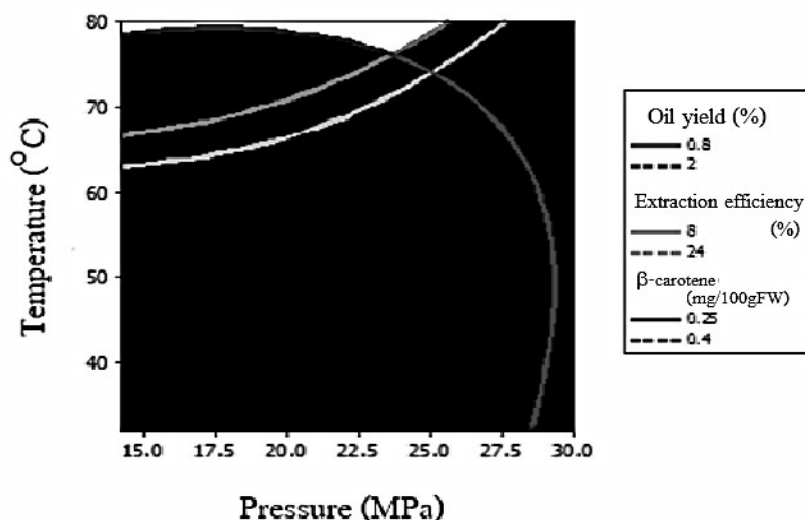


รูปที่ 1. กราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติแสดง a) ปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมัน b) ประสิทธิภาพการสกัดน้ำมัน c) ปริมาณบีตา-แคโรทีน ที่สกัดจากเปลือกแครอทที่แปรผันตามความดัน (X_1) และอุณหภูมิ (X_2) ที่ระดับต่าง ๆ

3. ผลของการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

การหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนสูงสุด โดยใช้โปรแกรม Minitab ฟังก์ชัน Overlaid Contour Plot ทำการกำหนดค่าที่ต้องการ คือ ร้อยละผลผลิตระหว่าง 0.80-2.00 ประสิทธิภาพการสกัดมีค่าระหว่างร้อยละ 8.00-24.00 และปริมาณบีตา-แคโรทีนระหว่าง 0.25-0.40 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากรูปที่ 2 พื้นที่สีขาวเป็นความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะส่งผลให้ได้ค่าปริมาณร้อยละผลผลิตน้ำมัน ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งมีหลายค่า ดังนั้นการหาความดัน และอุณหภูมิที่

เหมาะสมจึงใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อหาความดันและอุณหภูมิที่ทำให้ได้ค่าปริมาณผลผลิตน้ำมันประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบิตา-แคโรทีนสูงที่สุด นั่นคือที่ความดัน 14.2 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2. กราฟสองมิติแสดงสถานะที่เหมาะสม (ที่อยู่ในช่วงค่าตอบสนองที่กำหนด) ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

Optimal D 0.85132	High Cur Low	pressure 30.0 [14.20] 14.20	temperat 80.0 [80.0] 32.0
Composite Desirability 0.85132			
Oil yield (%) Maximum y = 1.4336 d = 1.0000			
Extraction efficiency(%) y = 17.5236 d = 1.0000			
β-carotene Maximum y = 0.2660 d = 0.61698			

รูปที่ 3. ผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดโดยใช้ค่าจริง

4. ผลของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพการสกัด ปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพในการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ดังตารางที่ 2 ที่สภาวะการสกัด ความดัน 14.20 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ ปริมาณผลผลิต ร้อยละ 1.43 ประสิทธิภาพในการสกัดร้อยละ 17.52 และปริมาณบีตา-แคโรทีน 0.27 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้โปรแกรม Minitab ฟังก์ชัน Response Optimizer ดังรูปที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการสกัดเดียวกัน คือ ความดัน 14.20 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (%D) พบว่าค่า %D ของปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด ปริมาณบีตา-แคโรทีน ได้อย่างถูกต้อง

5. การศึกษาสมบัติของน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ณ สภาวะการสกัดที่เหมาะสม

ทำการสกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความดัน 14.2 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทั้งหมด 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำน้ำมันไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อใช้พิจารณานำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไป

5.1 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดลองวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่ามีปริมาณผลผลิตร้อยละ 1.32 ± 0.01 ซึ่งสกัดที่ความดัน 14.2 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยของ Sun & Temelli (2002) ซึ่งได้สกัดน้ำมันจากแครอทด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่ความดัน 27.6 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลผลิตน้ำมันเท่ากับร้อยละ 2.5 ซึ่งมากกว่าน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอท เนื่องจากในเปลือกแครอทจะมีส่วนประกอบของเพอริเดิร์ม ทำหน้าที่ปกป้องบริเวณภายในของแครอท (Ahmad et al., 2019) ขัดขวางการสกัดของน้ำมัน จากงานวิจัยของ Carvalho et al. (2005) ได้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากโรสแมรี่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่ความดัน 30 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลผลิตน้ำมันเท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งมากกว่าน้ำมันที่สกัดจากเปลือกแครอท เนื่องจากธรรมชาติและปริมาณองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ในโรสแมรี่และเปลือกแครอทแตกต่างกัน ในเปลือกแครอทมีเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ปริมาณสูงกว่าโรสแมรี่ ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีความ

แข็งแรง (rigid structure) จึงทำให้สกัดน้ำมันออกมาได้น้อยกว่า (Lima et al., 2018) และจากปริมาณร้อยละผลผลิตจะคำนวณออกมาเป็นประสิทธิภาพการสกัดได้ร้อยละ 16.13 ± 0.17

จากผลการทดลอง ค่าสีจากเปลือกแครอทสดมีค่า L^* a^* b^* C^* และ h^* เท่ากับ 43.80 ± 3.04 33.84 ± 1.53 39.91 ± 1.15 52.60 ± 1.68 และ $49.71 \pm 1.37^\circ$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสีของผงเปลือกแครอท พบว่ามีค่า L^* a^* b^* C^* และ h^* เท่ากับ 36.53 ± 1.40 18.58 ± 1.68 28.19 ± 1.58 35.66 ± 2.21 และ $56.65 \pm 0.97^\circ$ ตามลำดับ จากการพิจารณาค่าสีของผงเปลือกแครอท พบว่ามีเม็ดสีน้ำตาลเข้มกว่าค่าสีของเปลือกแครอทสด เนื่องจากผงเปลือกแครอทผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และจากการวัดค่าสีจากน้ำมันที่สกัดจากผงเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดพบว่ามีค่า L^* a^* b^* C^* และ h^* เท่ากับ 33.35 ± 1.67 26.08 ± 1.86 42.28 ± 5.13 48.53 ± 0.99 และ $57.99 \pm 2.47^\circ$ ตามลำดับ จะพบว่าในน้ำมันมีค่า b^* มากกว่าเปลือกแครอทสดและผงจากเปลือกแครอท เนื่องจากการสกัดเป็นการแยกให้สารบีตา-แคโรทีนมีความเข้มข้นสูงขึ้น จึงทำให้มีค่า b^* ที่ได้เพิ่มขึ้น และในน้ำมันมีค่า L^* ต่ำกว่า เนื่องจากการสกัดใช้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้มีค่า L^* ลดลง

5.2 สมบัติทางเคมี

ปริมาณบีตา-แคโรทีนในเปลือกแครอทมีปริมาณ 0.27 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง จากงานวิจัยของ Barth et al. (1995) ซึ่งได้สกัดน้ำมันจากแครอทด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดที่ความดัน 30.40 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และใช้อีทานอลเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นตัวทำละลายร่วม ได้ปริมาณบีตา-แคโรทีนเท่ากับ 0.485 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง และ Hiranvarachath & Devahastin (2014) สกัดน้ำมันจากเปลือกแครอทด้วยตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้ไมโครเวฟในการช่วยสกัด ที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ ตัวทำละลายปริมาตร 150 มิลลิลิตร และอัตราส่วนช่วงเวลาเปิดไมโครเวฟต่อช่วงเวลาปิดไมโครเวฟ (intermittency ratio) เท่ากับ 1:4 ได้ปริมาณบีตา-แคโรทีนเท่ากับ 0.136 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณบีตา-แคโรทีนที่สกัดได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบ วิธีการสกัด และสภาวะการสกัด เช่น การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม จะส่งผลให้สกัดบีตา-แคโรทีนออกมาได้ปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้การใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดจะได้ปริมาณบีตา-แคโรทีนที่สูงกว่าการใช้ตัวทำละลาย เนื่องจากมีสมบัติในการเลือกสกัดมากกว่าวิธีใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (Cheah et al., 2006; Ranalli et al., 2004)

ค่าของไอโอดีน (Iodine value) คือ ค่าที่บ่งชี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ถ้าค่าไอโอดีนสูง แสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งค่าของไอโอดีนของน้ำมันจากเปลือกแครอทวัดได้เท่ากับ 116.75 ± 8.32 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อ 100 กรัมไขมัน ในงานวิจัยของ Dutta et al. (2005) พบว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากในเนื้อเยื่อแครอท ประกอบด้วย กรดลิโนเลอิก กรดปาล์มมิก กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก (Ranalli et al., 2004)

ค่าความเป็นกรด (acid value) ของน้ำมันจากเปลือกแครอทวัดได้เท่ากับ 2.43 ± 0.16 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ 100 กรัม น้ำมัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 205 พ.ศ. 2543 เรื่อง น้ำมันและไขมัน ที่ได้กำหนดค่าความเป็นกรดของน้ำมันที่ทำโดยวิธีธรรมชาติและใช้เป็นอาหาร จะต้องไม่เกิน 4.00 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ น้ำมัน 1 กรัม (Bureau of food, 2000)

ค่าของเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value) คือ ค่าที่ใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของลิปิด (Lipid oxidation) ซึ่งตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 205 พ.ศ. 2543 เรื่อง น้ำมันและไขมัน ได้กำหนดค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่ทำโดยวิธีธรรมชาติและใช้เป็นอาหารจะต้องมีค่าไม่เกิน 10 มิลลิกรัมสมมูล ต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม (Bureau of food, 2000) ซึ่งค่าของเพอร์ออกไซด์ในน้ำมันจากเปลือกแครอทมีปริมาณที่ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากในน้ำมันเปลือกแครอทมีวิตามินอี และบีตา-แคโรทีนที่จะยับยั้งการเกิดของสารประกอบเพอร์ออกไซด์และป้องกันความหืนของน้ำมัน (Goulson & Warthesen, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Ranalli et al. (2004) พบว่า น้ำมันจากแครอทที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดมีปริมาณวิตามินอี 160.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 14.6 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายโมเลกุลร้อยละ 65

ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันจากเปลือกแครอท พบว่าค่า FRAP เท่ากับ 529.08 ± 2.89 ไมโครโมลาร์เฟอรูลิออสต่อกรัม

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันและบีตา-แคโรทีนจากเปลือกแครอทด้วยวิธีคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด คือ ความดันและอุณหภูมิเท่ากับ 14.2 เมกะปาสกาล และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากสมการคณิตศาสตร์ ทำนายปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน เท่ากับ ร้อยละ 1.43 17.52 และ 0.27 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง และเมื่อนำเปลือกแครอทไปสกัดที่สภาวะดังกล่าวทำให้ได้ปริมาณร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน เท่ากับ ร้อยละ 1.32 ± 0.02 16.13 ± 0.17 และ 0.27 ± 0.00 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ค่าไอโอดีน 116.75 ± 8.32 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อ 100 กรัม น้ำมัน ค่าของกรด 2.43 ± 0.16 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ 100 กรัม น้ำมัน และสมบัติด้านฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ วิเคราะห์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริกของสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP) มีค่าเท่ากับ 529.08 ± 2.89 ไมโครโมลาร์เฟอรูลิออสต่อกรัม ค่าสีของน้ำมันจากเปลือกแครอทที่สกัดได้ มีค่า L^* เท่ากับ 33.35 ± 1.67 a^* เท่ากับ 26.08 ± 1.86 b^* เท่ากับ 42.28 ± 5.13 C^* เท่ากับ 48.53 ± 0.99 และค่า h^* เท่ากับ $57.99 \pm 2.47^\circ$ และพบว่า %D ของปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน ที่ได้จากการทำนายและการทดลอง น้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและเหมาะสมที่จะใช้ทำนายปริมาณผลผลิต ประสิทธิภาพการสกัด และปริมาณบีตา-แคโรทีน ได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ประจำปี 2561 เลขที่สัญญารับทุน 6144102 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณบริษัท ฟู้ดแพชชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เปลือกแครอทสดเพื่อใช้สำหรับทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Tariq, R. M. S., et al. (2019). Phytochemicals in *Daucus carota* and their health benefits-Review article. *Foods*, 8, 424, 21 pp. doi: 10.3390/foods8090424
- American Oil Chemists' Society (AOCS) (1997) *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*. Champaign: AOCS Press.
- Barth, M. M., Zhou, C., Kute, K. M. & Rosenthal, G. A. (1995). Determination of optimum conditions for supercritical fluid extraction of carotenoids from carrot (*Daucus carota* L.) tissue. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(11): 2876-2878. doi: 10.1021/jf00059a019
- Bureau of food. (2000). *Notification of the Ministry of Public Health (No. 205): Oil and Fat B.E. 2543*. Food and Drug Administration, Ministry of Public Health. (in Thai).
- Carvalho, R. N., Moura, L. S., Rosa, P. T. & Meireles, M. A. A. (2005). Supercritical fluid extraction from rosemary (*Rosmarinus officinalis*): kinetic data, extract's global yield, composition, and antioxidant activity. *The Journal of Supercritical Fluids*, 35(3): 197-204. doi: 10.1016/j.supflu.2005.01.009
- Chantaro, P., Devahastin, S. & Chiewchan, N. (2008). Production of antioxidant high dietary fiber powder from carrot peels. *LWT-Food Science and Technology*. 41(10): 1987-1994. doi: 10.1016/j.lwt.2007.11.013
- Cheah, E. L. C., Chan, L. W. & Heng, P. W. S. (2006). Supercritical carbon dioxide and its application in the extraction of active principles from plant materials. *Asian Journal of Pharmaceutical*. 1: 59-71.
- Dutta, D., Raychaudhuri, U. & Chakraborty, R. (2005). Retention of beta-carotene in frozen carrots under varying conditions of temperature and time of storage. *African Journal of Biotechnology*. 4(1): 102-108.
- Ghafoor, K., Park, J. & Choi, Y. H. (2010). Optimization of supercritical fluid extraction of bioactive compounds from grape (*Vitis labrusca* B.) peel by using response surface methodology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 11(3): 485-490. doi: 10.1016/j.ifset.2010.01.013
- Gonçalves, E. M., Pinheiro, J., Breu, M., Brandão, T. R. S. & Silva, C. L. M. (2010). Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. *Journal of Food Engineering*. 97(4): 574-581. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.12.005

- Goulson, M. J. & Warthesen, J. J. (1999). Stability and antioxidant activity of beta-carotene in conventional and high oleic canola oil. *Journal of Food Science*. 64(6): 996-999. doi: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb12267.x
- Hiranvarachat, B. & Devahastin, S. (2014). Enhancement of microwave-assisted extraction via intermittent radiation: extraction of carotenoids from carrot peels. *Journal of Food Engineering*. 126: 17-26. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.10.024
- Hiranvarachat, B., Devahastin, S., Chiewchan, N. & Raghavan, G. S .V. (2013). Structural modification by different pretreatment methods to enhance microwave-assisted extraction of beta-carotene from carrots. *Journal of Food Engineering*. 115: 190-197. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.012
- Lima, M. A., Charalampopoulos, D. & Chatzifragkou, A. (2018). Optimisation and modelling of supercritical CO₂ extraction process of carotenoids from carrot peels. *The Journal of Supercritical Fluids*. 133: 94-102. doi: 10.1016/j.supflu.2017.09.028
- Moura, P. M., Prado, G. H. C., Meireles, M. A. A. & Pereira, C. G. (2012). Supercritical fluid extraction from Guava (*Psidium guajava*) leaves: global yield, composition and kinetic data. *The Journal of Supercritical Fluids*. 62: 116-122. doi: 10.1016/j.supflu.2011.11.014
- Nagata, M. & Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *The Japanese Society for Food Science and Technology*. 39: 925-926.
- Pollution Control Department. (2019). *Booklet on Thailand State of pollution 2018*. Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok, Thailand: S.Mongkon Press Limited Partnership (in Thai)
- Pourmortazavi, S. M. & Hajimirsadeghi, S. S. (2007). Supercritical fluid extraction in plant essential and volatile oil analysis. *Journal of Chromatography*. 1163(1): 2-24. doi: 10.1016/j.chroma.2007.06.021
- Ranalli, A., Contento, S., Lucera, L., Pavone, G., Di Giacomo, G., Aloisio, L., et al. (2004). Characterization of carrot root oil arising from supercritical fluid carbon dioxide extraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52(15): 4795-801. doi: 10.1021/jf049713h
- Saldaña, M. D. A., Sun, L., Guigard, S. E. & Temelli, F. (2006). Comparison of the solubility of β-carotene in supercritical CO₂ based on a binary and a multicomponent complex system. *The Journal of Supercritical Fluids*. 37: 342-349. doi: 10.1016/j.jct.2012.06.016
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S. & Pessarakil, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, Article ID 217037, 26 pp. doi:10.1155/2012/217037

- Span, R. & Wagner, W. (1996). A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100K at pressures up to 800 MPa, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25(6): 1509-1596. doi: 10.1063/1.555991
- Sun, M. & Temelli, F. (2002). Supercritical CO₂ extraction of carotenoids from carrots and evaluation of products. *Journal of Supercritical Fluids*, 37(3): 397-408.
- Tai, H. P. & Kim, K. P. T. (2014). Supercritical carbon dioxide extraction of gac oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, 95: 567-571. doi: 10.1016/j.supflu.2014.09.005
- Thai Industrial Standards Institute. (2015). *Thai Community Products Standard: Dried Fruits and Vegetables (TCPS. 136/2015)*. Bangkok, Thailand: Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. (in Thai)
- Zaghdoudi, K., Framboisier, X., Frochot, C., Vanderesse, R., Barth, D., Kalthoum-Cherif, J., et al. (2016). Response surface methodology applied to supercritical fluid extraction (SFE) of carotenoids from Persimmon (*Diospyros kaki* L.). *Food Chemistry*, 208: 209-219. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.03.104
- Zhao, S. & Zhang, D. (2013a). Supercritical fluid extraction and characterization of *Moringa oleifera* leaves oil. *Separation and Purification Technology*, 118: 497-502. doi: 10.1016/j.seppur.2013.07.046
- Zhao, S. & Zhang, D. (2013b). A parametric study of supercritical carbon dioxide extraction of oil from *Moringa oleifera* seeds using a response surface methodology. *Separation and Purification Technology*, 113: 9-17. doi: 10.1016/j.seppur.2013.03.041