การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

OPTIMIZATION OF MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION OF PAPAYA SEED OIL BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

พรทิพย์ กาศสุวรรณ *กิตติชัย บรรจง**

Pontip Katsuwan, *Kittichai Banjong**

คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Faculty of Agro-industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

***Corresponding author, e-mail:** kittichai.ba@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองโดยออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตน้ำมัน 3 ปัจจัย คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (X_1) กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (X_2) และอัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย (X_3) ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ ใช้ระยะเวลาในการสกัด 2.32 นาที กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 800 วัตต์ และใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% ซึ่งในสภาวะดังกล่าวทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมัน 28% โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่าเท่ากับ 0.974 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าทิศทางของแนวโน้มมีความสอดคล้องกัน โดยมีความเที่ยงตรงของการทำนาย 86.2% ดังนั้นสมการถดถอยที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยได้ดีและใช้ทำนายปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอจากการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: การสกัดน้ำมัน เมล็ดมะละกอ การสกัดด้วยวิธีการใช้ไมโครเวฟช่วยสกัด วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

The purpose of this research was to optimize the condition for oil extraction from papaya seed by microwave-assisted extraction (MAE) was carried out using response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD) to achieve the highest extraction efficiency and reduce energy consumption. The three independent variables were extraction time (X_1), microwave power (X_2) and papaya seed to solvent ratio (X_3). The dependent (response) variable was oil extraction yield. Twenty experiments were performed according to the design. It was predicted that the optimum extraction conditions were extraction time of 2.32

minute, microwave power of 800 watts and papaya seed to solvent ratio of 7%, which resulted in an oil extraction yield of 28%. The coefficients of determination were found to be very high (R^2 = 0.974). Comparison of the experimental values with those of the predicted values was consistent. The accuracy of model predictions was 86.2%. Hence, the regression model derived from the experimental data adequately described the correlation among the three independent variables studied and provided accurate prediction of the papaya seed oil yield obtained by MAE.

Keywords: Oil Extraction, Papaya Seed, Microwave-Assisted Extraction, Response Surface Methodology

บทนำ

มะละกอ (Carica papaya L.) เป็นผลไม้พื้นเมืองที่เจริญเติบโตได้ในป่าเขตร้อน ผลของมะละกอคือส่วนที่สำคัญและเป็นวัตถุประสงค์หลักของการเพาะปลูก [1] ซึ่งมักจะถูกนำไปบริโภคเป็นผลไม้สดหรือผลิตเป็นน้ำผลไม้และแยม [2] เนื่องจากการบริโภคมะละกอที่สูงมากในแต่ละปี ทำให้มีเมล็ดมะละกอที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปซึ่งเป็นของเสียที่ต้องกำจัดทิ้ง [3] และมีปริมาณ 15-20% ของน้ำหนักผลไม้ [4] นอกจากนี้ภายในเมล็ดมะละกอยังมีน้ำมันอยู่ประมาณ 30-34% ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านคุณค่าทางโภชนาการและการทำงานคล้ายกับน้ำมันมะกอก [1, 5] แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ยืนยันว่าน้ำมันเมล็ดมะละกอสามารถบริโภคได้ [1] น้ำมันเมล็ดมะละกอมีคุณลักษณะเป็นกึ่งของเหลวที่มีสีเหลืองแดง เป็นน้ำมันที่อุดมไปด้วยไตรกลีเซอรอลที่มีประโยชน์ เช่น มีไตรโอเลอินมากกว่า 37% และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว เช่น กรดโอเลอิกมากกว่า 70% [6] ซึ่งน้ำมันที่มีสัดส่วนไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูงมักถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลผิวที่ทำให้ผิวนวล ครีมนวดผม และการแต่งหน้า คุณสมบัติเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดมะละกออาจมีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งน้ำมันโอเลอิกสูง สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารได้ นอกจากนี้น้ำมันเมล็ดมะละกอยังมีความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระมาก

จากการศึกษาก่อนหน้านี้มีวิธีการสกัดหลากหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการสกัดน้ำมันจากพืช เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การสกัดด้วย Soxhlet การใช้กระบวนการบีบอัด และการสกัดด้วยของไหลภายใต้สภาวะวิกฤติยวดยิ่ง [1, 5] เป็นต้น โดยเฉพาะการสกัดด้วย Soxhlet ที่ยังคงเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเป็นจำนวนมาก แต่ใน 10 ปีที่ผ่านมามีความต้องการเทคนิคการสกัดแบบใหม่ที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในการลดระยะเวลาการสกัดและปริมาณตัวทำละลายอินทรีย์ให้น้อยลง ซึ่งถือเป็นการลดมลพิษในห้องปฏิบัติการและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวอย่าง [7-8] ซึ่งในปัจจุบันไมโครเวฟช่วยสกัดได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการสกัดสารจากตัวอย่างของแข็งที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเทคนิคการสกัดแบบดั้งเดิม [9] เพราะว่าการสกัดแบบดั้งเดิมต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนผ่านภาชนะแล้วจึงถ่ายโอนเข้าสู่สารละลาย ในขณะที่ไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนแก่สารละลายได้โดยตรง [10]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด จากตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตน้ำมัน และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) และทวนสอบความเที่ยงตรงของสมการที่ได้

2. เพื่อวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่ระดับกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

นำเมล็ดมะละกอมาล้างทำความสะอาด นำไปทำให้แห้งโดยการนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าเมล็ดจะแห้งสนิท จากนั้นทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น (Blender) และนำมาร่อนโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.067 มิลลิเมตร และเก็บใส่ถุงที่ปิดสนิทและใส่โถดูดความชื้นเพื่อรอการสกัดต่อไป

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะละกอ

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ด้วยวิธี AOAC [11] วิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน (Oil Content) ของผงเมล็ดมะละกอ ด้วยวิธี AOAC [12] โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปของ %น้ำหนักเปียก

3. การออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) [13] ซึ่งมีตัวแปรที่มีอิทธิพลจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาการสกัด (X_1) กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ (X_2) และอัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อปริมาณตัวทำละลาย (X_3) แบ่งระดับปัจจัยเป็น 5 ระดับ โดยมีช่วงของปัจจัยตั้งแต่ $-\alpha$ ถึง $+\alpha$ เป็น 1.6-8.4 นาที 200-700 วัตต์ และ 1.6-18.4 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบแบบ Central Composite Design

ตัวแปร	ระดับ				
	$-1.682(-\alpha)$	-1	0	+1	$+1.682(+\alpha)$
เวลา (นาที)	1.6	3	5	7	8.4
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	200	300	450	600	700
อัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย (%)	1.6	5	10	15	18.4

4. การสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด

นำเมล็ดมะละกอบดใส่ขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมสารละลายเฮกเซนปริมาณ 150 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยไมโครเวฟดัดแปลง (ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME711K กำลังไฟเอาต์พุต (สูงสุด) 800 วัตต์) [14] โดยใช้ระยะเวลากำลังไฟฟ้าไมโครเวฟและปริมาณเมล็ดมะละกอตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 เมื่อครบเวลานำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อกรองแยกเมล็ดมะละกอบดออกจากสารละลายโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วย Rotary Evaporator ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสหรือจนกว่าเฮกเซนจะระเหยออกไปหมด นำน้ำมันที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณร้อยละผลผลิตน้ำมัน (Yield) ที่ได้จากการสกัด โดยใช้สูตรการคำนวณดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละผลผลิตน้ำมันที่ได้ (\%yield)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันจากเมล็ดมะละกอที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบ}} \times 100 \qquad (1)$$

5. การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและทวนสอบสมการ

ข้อมูลจากการสกัดในข้อ 4 จะถูกวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยสมการพหุนามกำลังสอง (Second-Order Polynomial Equation) ซึ่งจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง (ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ) ที่ได้จากการทำนายและค่าตัวแปรอิสระของการสกัด โดยที่สมการพหุนามกำลังสองดังกล่าวแสดงได้ตามสมการที่ 2 [15]

$$Y = \beta_0 + \Sigma\beta_i X_i + \Sigma\beta_{ij} X_i X_j + \Sigma\beta_{ii} X_i^2 \qquad (2)$$

โดยที่ Y คือ ร้อยละผลผลิตของน้ำมัน (%yield)
β_0 คือ สัมประสิทธิ์ของโมเดลทดลอง (ค่าคงที่)
β_i คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงของตัวแปร
β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
β_{ii} คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปร

การทวนสอบสมการทำได้โดยสุ่มการทดลอง 8 การทดลองจาก 15 การทดลอง ซึ่งคิดเป็น 53% ของการทดลองทั้งหมด เพื่อสร้างความแน่ใจในสมการว่ามีความเหมาะสมกับผลการทดลองจริง โดยการสร้างแผนภาพ Normal Plot เพื่อวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (Pearson Correlation) เทียบระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงและการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรจากสมการถดถอยและกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot)

6. การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยวิธีไมโครเวฟช่วยสกัด [16]

ทำการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานโดยนำมิเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีอัตราการหมุน 1200 รอบต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงมาต่อเข้ากับเครื่องไมโครเวฟใช้ระยะเวลาในการสกัดที่ 3, 5, 7 และ 10 นาที ที่ระดับกำลังไฟฟ้าทั้ง 5 ระดับ (300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์) ทำการนับจำนวนรอบการหมุนของมิเตอร์ไฟฟ้า โดยแต่ละสภาวะทำการวัด 3 ซ้ำ และคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากสูตรคำนวณดังสมการ (3)

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)} = \frac{\text{จำนวนรอบการหมุน}}{1200} \qquad (3)$$

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณได้ในแต่ละสภาวะจะถูกเฉลี่ยและนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้า (Q) และเวลา (t) เพื่อเพื่อสร้างสมการเส้นตรง (4) ของระดับกำลังไฟฟ้าที่ 300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์ ดังนี้

$$Q = a(t) \quad (4)$$

โดยที่ Q คือ พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
a คือ ความชัน
t คือ ระยะเวลาในการสกัดที่ทำให้ได้ Yield เป้าหมายที่เลือกไว้

ซึ่งจากสมการที่ (2) จะถูกนำมาคำนวณหาระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดที่ทำให้ได้ค่าผลผลิตเท่ากับค่าเป้าหมายที่เลือกไว้ โดยใช้ What-If Analysis [17-19] และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตามสมการเส้นตรง พร้อมทั้งเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าในการสกัดที่ได้ผลผลิตในปริมาณที่เท่ากันและสิ้นเปลืองน้อยที่สุด

จากการทดลองพบว่าเมล็ดมะละกอมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 7.2% และมีปริมาณน้ำมันในเมล็ดมะละกอเท่ากับ 28.1% โดยในตารางที่ 2 จะแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยของ Puangsri และคณะ [1] ซึ่งแสดงผลในรูปของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียกเช่นเดียวกัน และ Marfo และคณะ [20] แสดงผลในรูปเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะละกอ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดมะละกอในรูปเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก

องค์ประกอบทางเคมี	การทดลองนี้ (%น้ำหนักเปียก)	%โดยน้ำหนัก	
		Puangsri และคณะ **(2005)** [1]*	**Marfo** และคณะ **(1986)** [20]**
ความชื้น	7.2 ± 0.0	7.2 ± 0.0	6.2
น้ำมัน	28.1 ± 0.5	30.7 ± 0.7	28.2

* % โดยน้ำหนักเปียก

** % โดยน้ำหนักแห้ง

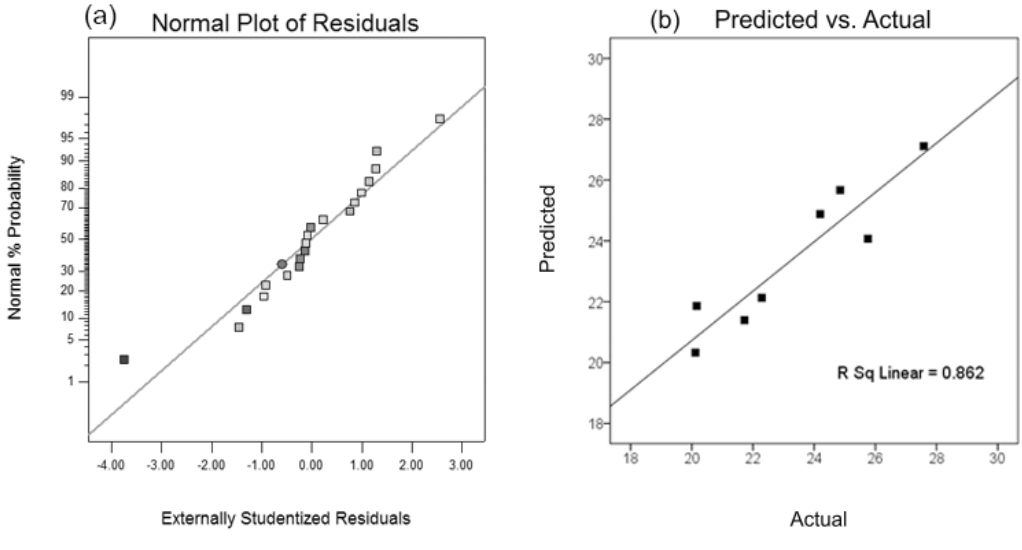
2. การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

2.1 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองเพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่ารูปแบบกำลังสอง (Quadratic) ได้รับการยอมรับให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 ค่า p-value ของรูปแบบสมการมีความเหมาะสม (Model Fit) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ความไม่สมรูปของข้อมูล (Lack-of-Fit) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง (R^2 = 0.974) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบกำลังสอง (Quadratic Model) ดังแสดงในสมการที่ 2 มีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวแบบจำลองที่จะใช้ในการทำนายปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดและสามารถนำมาเขียนเป็นสมการถดถอยเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ กับค่าผลตอบสนอง หลังจากตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติออกได้ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$Y = 36.76 - 1.70X_1 - 0.04X_2 - 0.99X_3 + 0.002X_1X_2 + 0.20X_1^2 + 0.00005X_2^2 + 0.06X_3^2 \quad (5)$$

2.2 การทวนสอบความเที่ยงตรงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



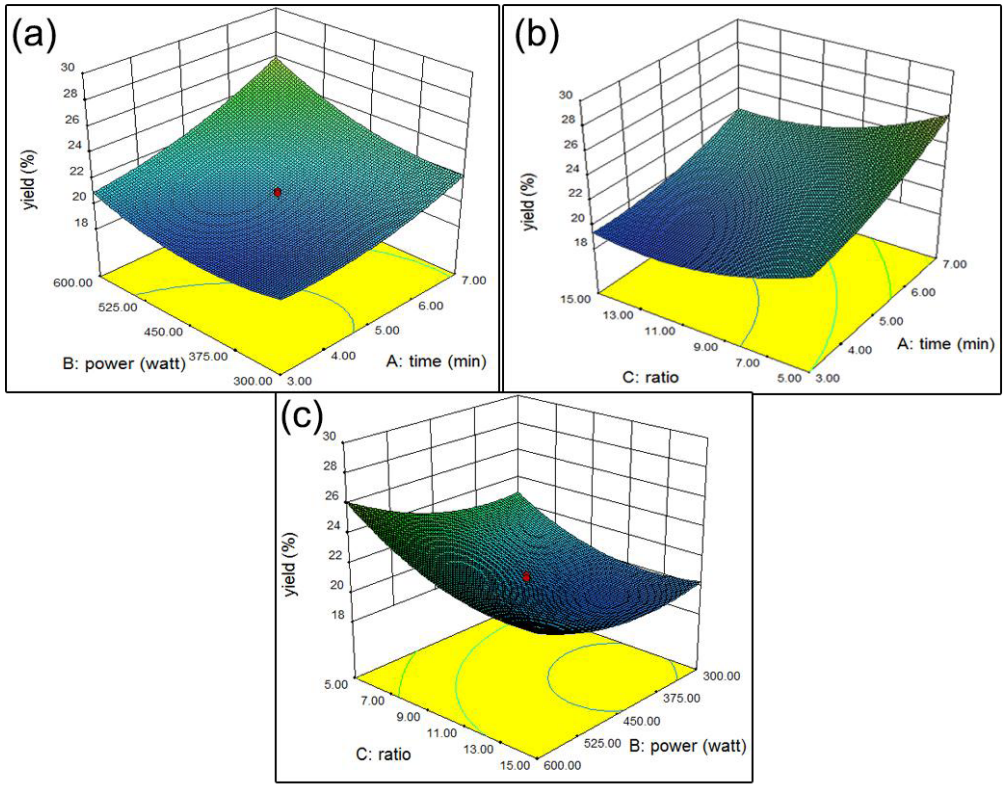
ภาพที่ 1 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย

ภาพที่ 1(a) แสดงการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบค่าส่วนตกค้างปกติ พบว่าข้อมูลค่าความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability) มีลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเส้นตรงและใกล้เคียงกับค่าของเส้นตรง จึงสรุปได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติและไม่มีชุดการทดลองที่แสดงค่าความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ ภาพที่ 1(b) แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จาก

การทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายของการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด จะเห็นว่าปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันแนวโน้มเข้าใกล้กับแนวของเส้นทแยงมุม ซึ่งบ่งบอกว่าช่วงของตัวแปรอิสระที่เลือกมาในการศึกษานี้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มีค่าถึง 0.862

2.3 สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 5) สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองเพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ ดังแสดงในภาพที่ 2(a-c)



ภาพที่ 2 แผนภาพพื้นผิวตอบสนองแสดงผลของระยะเวลาในการสกัดและกำลังไฟฟ้า (a) ผลของระยะเวลาและอัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย (b) และผลของกำลังไฟฟ้าและอัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย (c)

จากภาพที่ 2(a) กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการสกัดและกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ โดยกำหนดให้ระดับของอัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลายอยู่ที่ระดับกลาง พบว่าการใช้เวลาในการสกัดนานจะทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการสกัดมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่สกัดได้ โดยมีค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับของตัวแปรทั้งสองที่ค่าสูงๆ จะให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรคือระยะเวลาในการสกัดและกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ภาพที่ 2(b) กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการสกัดและอัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย โดยกำหนดให้ระดับของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ระดับกลาง พบว่าการใช้เวลาในการสกัดนานจะทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย พบว่าการใช้อัตราส่วนที่ต่ำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่สูงกว่าการใช้อัตราส่วนที่สูงและภาพที่ 2(c) กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟและอัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย โดยกำหนดให้ระดับของระยะเวลาในการสกัดอยู่ที่ระดับกลาง พบว่าการใช้กำลังไฟฟ้าสูงจะทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงขึ้นและการใช้อัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลายต่ำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่สูง

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอมากที่สุด โดยการนำสมการถดถอยกำลังสอง (สมการที่ 5) มาคำนวณพบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด คือ การสกัดโดยใช้ระยะเวลาในการสกัดเท่ากับ 7 นาที ใช้กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ 600 วัตต์ และใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ 28% โดยมีค่าความพึงพอใจของผลลัพธ์ (Desirability) เท่ากับ 1.000 ถึงแม้สภาวะที่ได้นี้จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอมากที่สุด แต่จะเห็นได้ว่าต้องใช้เวลาในสกัดนานถึง 7 นาที กับการสกัดตัวอย่างปริมาณน้อย (อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซน 7 %w/v) ซึ่งถือว่าสิ้นเปลืองพลังงานและตัวทำละลายมาก

2.4 สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด

สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 2.3 เป็นสภาวะที่ใช้ในการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ทำให้ได้ผลผลิตมากที่สุด แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อมูลปริมาณน้ำมันเมล็ดมะละกอจึงได้ถูกเลือกมาเป็นปริมาณผลผลิตเป้าหมาย (28%) เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดที่จะสามารถสกัดได้จากการทดลอง (ตารางที่ 2) และได้ใช้สมการที่ 5 ในการคำนวณหาความแตกต่างของระยะเวลาในการสกัดจากการกำหนดให้ใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นร่วมกับการใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนต่ำ (7 %w/v) ซึ่งได้แสดงผลในตารางที่ 3 พบว่าการสกัดที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ใช้เวลาในการสกัดน้อยกว่าการสกัดที่กำลังไฟฟ้า 600 และ 700 วัตต์ ถึง 280 และ 180 วินาที ตามลำดับ แสดงว่าการใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ใช้ระยะเวลาในการสกัดน้อยลง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายลดลง เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงโดยจะอภิปรายต่อไปในหัวข้อที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระยะเวลาในการสกัดเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่างกันเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอเท่ากัน

เวลา (นาที)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	อัตราส่วน (%)	Yield (%)
2.32	800	7	28
5.32	700	7	28
6.99	600	7	28

สำหรับอัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย ที่แผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (ภาพที่ 2) แสดงผลว่าการใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนต่ำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงกว่า แต่การใช้อัตราส่วนเมล็ดต่ำ เป็นการสิ้นเปลืองการใช้เฮกเซน เนื่องจากใช้ปริมาณของเฮกเซนเท่ากันในการสกัดทุกครั้ง คือ 150 มิลลิลิตร แต่สกัดวัตถุดิบได้น้อยกว่า ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณหาระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจากการใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นร่วมกับการใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนสูง (15 %w/v) ด้วยสมการที่ 5 พบว่าการสกัดโดยใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซน 15 %w/v สามารถให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันตามเป้าหมาย (28 %) ได้เช่นเดียวกันกับการสกัดที่ใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนต่ำ (7 %w/v) แต่ระยะเวลาในการสกัดของการใช้อัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนสูง (15 %w/v) มากกว่าอัตราส่วนเมล็ดต่อเฮกเซนต่ำ (7 %w/v) อยู่ถึง 156 วินาทีหรือคิดเป็น 2.6 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดคือ การสกัดโดยใช้ระยะเวลาในการสกัดเท่ากับ 2.32 นาที ใช้กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ 800 วัตต์ และใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ 28% โดยมีค่าความพึงพอใจของผลลัพธ์ (Desirability) เท่ากับ 1.000

2.5 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการนำสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปทำการทดลองจริง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง การทดลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอจากผลการทดสอบซ้ำเท่ากับ 27.29% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จากการทำนาย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าอคติพบว่ามีค่าเป็น 2.55% ซึ่งค่าอคติที่ยอมรับได้ไม่ควรมากเกิน 5% แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและอนุมานได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5 เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอจากการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

สภาวะที่เหมาะสม		ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ (%)		ค่าอคติ[2] (Bias)
		ค่าที่ได้จากการทดลอง[1]	ค่าที่ได้จากแบบจำลอง	
ระยะเวลาในการสกัด	2.32 นาที	27.29 ± 0.58	28	2.55
กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ	800 วัตต์			
อัตราส่วนเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย	7 %			

[1] ค่าที่ได้จากการทดลองเฉลี่ย จำนวน 3 ครั้งการทดลอง

[2] Bias คำนวณได้จาก [(ค่าที่ได้จากการทำนาย-ค่าที่ได้จากการทดลอง)/ค่าที่ได้จากการทำนาย] X 100

3. การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานของการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด

นำวิธีการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดมาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานของการสกัดที่ระดับกำลังไฟฟ้า 5 ระดับ คือ 300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์ จากข้อมูลในตารางที่ 5 สามารถนำมาสร้างรูปแบบสมการเส้นตรง (สมการที่ 4) ที่ใช้วิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับระยะเวลา โดยในตารางที่ 5 จะแสดงค่าพารามิเตอร์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการในแต่ละระดับกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการเส้นตรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงาน

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ค่าพารามิเตอร์	
	a	R^2
300	0.0053	0.9975
450	0.0084	0.9997
600	0.0119	0.9979
700	0.0148	0.9994
800	0.0184	0.9984

ในการศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดได้กำหนดค่าปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอเท่ากับ 28% มาเป็นค่าเป้าหมายสำหรับเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของการสกัดทั้ง 5 ระดับกำลังไฟฟ้า (300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์) โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดด้วยไมโครเวฟช่วยสกัด (สมการที่ 5) มาใช้ทำนายระยะเวลาในการสกัด โดยใช้ What-If Analysis และนำระยะเวลาที่คำนวณได้นี้ไปคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าโดยใช้สมการเส้นตรงของแต่ละระดับกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าของการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอให้ได้ตามค่าเป้าหมาย

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ (28%)	
	เวลา (นาที)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
300	9.21	0.0488
450	8.52	0.0716
600	6.99	0.0832
700	5.32	0.0787
800	2.32	0.0427

จากตารางที่ 6 แสดงผลการคำนวณระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการเส้นตรง พบว่าการสกัดน้ำมันเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดเพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ 28% ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 5 ระดับ คือ 300, 450, 600, 700 และ 800 วัตต์ จะใช้ระยะเวลาในการสกัดลดลงตามระดับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่วนการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าพบว่าที่ระดับกำลังไฟฟ้า 300, 450, และ 600 วัตต์ มีค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่ 700 และ 800 วัตต์มีค่าพลังงานไฟฟ้าลดลงและมีค่าน้อยกว่าที่ระดับกำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าผลการคำนวณในขั้นตอนนี้มีความสอดคล้องกับสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันตามเป้าหมายที่ได้จากในข้อที่ 2.4 คือการสกัดโดยใช้ระยะเวลาในการสกัดเท่ากับ 2.32 นาที ใช้กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ 800 วัตต์ และใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% เพราะนอกจากที่ระดับกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ จะใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่าที่ระดับกำลังไฟฟ้าทุกระดับแล้วยังใช้ระยะเวลาโดยประมาณในการสกัดที่น้อยกว่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ 600 และ 700 วัตต์ ถึง 280 และ 180 วินาที ตามลำดับ

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายและหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันเมล็ดมะละกอสูงที่สุดคือ ใช้เวลาในการสกัด 2.32 นาที ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ด้วยอัตราส่วนระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% จะได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ 28% ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าพบว่าที่ระดับกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นอกจากจะใช้ระยะเวลาในการสกัดน้อยกว่าแล้วยังใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าอีกด้วย และจากการทำการทดลองซ้ำเพื่อทวนสอบความเที่ยงตรงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงและสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานจริงได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2560 คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง

[1] Puangsri, T.; Abdulkarim, S.M.; and Ghazali, H.M. (2005). Properties of *carica papaya l.* (papaya) seed oil following extractions using solvent and aqueous enzymatic methods. *Journal of Food Lipids.* 12(1): 62–76.

[2] Chielle, D.P.; Bertuol, D.A.; Meili, L.; Tanabe, E.H.; and Dotto, G.L. (2016). Convective drying of papaya seeds (Carica papaya L.) and optimization of oil extraction. *Industrial Crops and Products.* 85: 221–228.

[3] Samaram, S.; Mirhosseini, H.; Tan, C.P.; Ghazali, H.M.; Bordbar, S.; and Serjouie, A. (2015). Optimisation of ultrasound-assisted extraction of oil from papaya seed by response surface methodology: Oil recovery, radical scavenging antioxidant activity, and oxidation stability. *Food Chemistry.* 172: 7–17.

[4] Samaram, S.; Mirhosseini, H.; Tan, C.P.; and Ghazali, H.M. (2014). Ultrasound-assisted extraction and solvent extraction of papaya seed oil: Crystallization and thermal behavior, saturation degree, color and oxidative stability. *Industrial Crops and Products.* 52: 702–708.

[5] Lee, W.-J.; Lee, M.-H.; and Su, N.-W. (2011). Characteristics of papaya seed oils obtained by extrusion-expelling processes. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 91(13): 2348–2354.

[6] Samaram, S.; Mirhosseini, H.; Tan, C.; and Ghazali, H. (2013). Ultrasound-assisted extraction (UAE) and solvent extraction of Papaya seed oil: Yield, fatty acid composition and Triacylglycerol profile. *Molecules.* 18(10): 12474–12487.

[7] Wan, H.B.; and Wong, M.K. (1996). Minimization of solvent consumption in pesticide residue analysis. *Journal of Chromatography A.* 754(1-2): 43–47.

[8] Poole, C.F.; and Poole, S.K. (1996). Highlight. Trends in extraction of semi-volatile compounds from solids for environmental analysis. *Analytical Communications.* 33(7): 11H.

[9] Camel, V. (2000). Microwave-assisted solvent extraction of environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry.* 19(4): 229–248.

[10] Sparr Eskilsson, C.; and Bjɔrklund, E. (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. *Journal of Chromatography A.* 902(1): 227–250.

[11] AOAC. (1999). *Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists.* 16th Washington, D.C.

[12] AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists*. 17th Volume I. USA.

[13] Subseree, J. (2009). *DOE Central Composite Design*. Retrieved June 4, 2016, from http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ145_p72-74.pdf

[14] Plohtpleuang, R. (2014). *Factors Affecting Microwave-Assisted Extraction of Antioxidant From Red Grape Promace*. Master's Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

[15] Ziegel, E.R.; Khuri, A.; and Cornell, J. (1997). Response surfaces: Designs and analyses. *Technometrics*. 39(3): 342.

[16] Boonyanuch, C.; and Kittichai, B. (2016). Kinetics Study of Grape Seed Oil Microwave-Assisted Solvent Extraction. In *Proceeding of Food Innovation Asia Conference 2016*. pp. 442-448. Bangkok. Thailand.

[17] Golfarelli, M.; Rizzi, S.; and Proli, A. (2006). Designing what-if analysis: towards a methodology. In *Proceedings of the DOLAP*. Arlington, VA. pp. 51–58.

[18] Kleijnen, J.P.C. (1995). Sensitivity analysis and optimization in simulation models: design of experiments and case studies. In *Proceeding Winter Simulation Conference*. n.p.

[19] Ozturk, E. (2012). "What if" Analyses: Ways to Interpret Statistical Significance Test Results using EXCEL or "R". In *the annual meeting of the Southwest Educational Research Association*. n.p.

[20] Marfo, E.K.; Oke, O.L.; and Afolabi, O.A. (1986). Chemical composition of papaya (Carica papaya) seeds. *Food Chemistry*. 22(4): 259–266.