



ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (โรบัสต้า/อะราบิก้า) ด้วยเฮกเซน โดยใช้วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง

อาภาภรณ์ จันทร์ปรีกษ์* พัทธภรณ์ ดำนิล และ อมรรัตน์ หงษ์ผ่วย

สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-5596-4205 อีเมล: arphaphonc@nu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.06.009

รับเมื่อ 4 กรกฎาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 30 มกราคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 20 มิถุนายน 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (Spent Coffee Grounds; SCG) ของพันธุ์โรบัสต้า (*Coffea canephora* var. *robusta*) และอะราบิก้า (*Coffea arabica*) ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน โดยวิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) และการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ผ่านการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Minitab R.17 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (4 : 1-8 : 1 มล./ก.) อุณหภูมิในการสกัด (35-45°C) และเวลาในการสกัด (15-45 นาที) โดยในแต่ละปัจจัยมี 5 ระดับรอบ CCD จำนวนเงื่อนไขในการทดลองเท่ากับ 20 การทดลอง ข้อมูลเหล่านี้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสหสัมพันธ์กำลังสองไม่เป็นเส้นตรง ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีสหสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 8.14 มล./ก. อุณหภูมิในการสกัด 46.97°C เวลาในการสกัด 27.22 นาที และค่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สูงสุดร้อยละ 13.04 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำสภาวะเหล่านี้ไปทำการทดลองจึงพบว่า ค่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 13.08±0.20 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและมีความแม่นยำสูงกับค่าทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ (กรดไขมันอิสระ ความหนืด และความหนาแน่น) ค่ากรดไขมันของน้ำมันกาแฟประมาณ 3.70 mg_{NaOH}/g_{Oil} แสดงว่าเหมาะสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และน้ำมันกาแฟมีความหนืด 49.65 cP ที่ 40°C และค่าความหนาแน่น 948 กก./ม.³ ที่ 15°C

คำสำคัญ: กากกาแฟ, เฮกเซน, การสกัดน้ำมัน, วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง, การออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

การอ้างอิงบทความ: อาภาภรณ์ จันทร์ปรีกษ์ พัทธภรณ์ ดำนิล และ อมรรัตน์ หงษ์ผ่วย, “ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ (โรบัสต้า/อะราบิก้า) ด้วยเฮกเซนโดยใช้วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 799-811, ต.ค.-ธ.ค. 2561.

Optimization of Oil Extraction from Spent Coffee Grounds (*Coffea canephora* var. *robusta* /*Coffea arabica*) by Hexane Using Response Surface Methodology

Arphaphon Chanpirak*, Patcharaporn Dumnin and Amornrat Hongpuay

Division of Chemical Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Pitsanulok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-5596-4205, E-mail: arphaphonc@nu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.06.009

Received 4 July 2017; Accepted 30 January 2018; Published online: 20 June 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this study was to examine the optimum conditions for coffee oil extraction from Used Coffee Grounds (UCG) of *Coffea canephora* var. *robusta* and *Coffea arabica* with hexane solvent through response surface methodology. The operating variables of the extraction process were optimized by Central Composite Design (CCD), a subset of Response Surface Methodology (RSM), and it was analyzed by Minitab R.17 software. The factors in this study including solvent to solid ratio (4 : 1–8 : 1 mL/g), extraction temperature (35–45°C) and extraction time (15–45 min), a five-level rotatable CCD were used for experimental design. A total of experimental conditions was 20 experiments. These data were analyzed by non-linear quadratic correlation model. The experimental results showed that each factor was correlated significantly with the other factors. The optimum variables of extraction were as follows: solvent to solid ratio of 8.14 mL/g, extraction temperature of 46.97°C and extraction time of 27.22 minutes, and the maximum oil yielded under these conditions was 13.04%. The experiments performed under these conditions showed that the extracted oil yield was up to 13.08±0.20%, which related accurately with the prediction value. The extracted coffee oil was characterized for their properties of free fatty acids, density, and viscosity. The acid value of the extracted oil was about 3.70 mg_{NaOH}/g_{Oil} suitable for esterification process. The oil properties revealed the viscosity (49.65 cP at 40°C) and the density of about 948 kg/m³.at 15°C.

Keywords: Spent Coffee Ground, Oil Extraction, Hexane, Response Surface Methodology, Central Composite Design

Please cite this article as: A. Chanpirak, P. Dumnin, and A. Hongpuay, "Optimization of oil extraction from spent coffee grounds (*Coffea canephora* var. *Robusta*/*Coffea arabica*) by hexane using response surface methodology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 799–811, Oct.–Dec. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

น้ำมันกาแฟ (Coffee Oil) ได้จากการสกัดกาแฟบด (Coffee Grounds) เมล็ดกาแฟมีตำหนิ (Defective Coffee Beans) และกากกาแฟ จัดเป็นน้ำมันที่คุณภาพสูง งานวิจัยจำนวนหนึ่งประเมินความเป็นไปได้ของน้ำมันกาแฟในการเป็นตัวตั้งต้นผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพ [1]-[3] ด้วยมีส่วนประกอบของแอนดริกแอซิดสูงที่เป็นสารกันเสียตามธรรมชาติให้กับไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ไบโอดีเซลมีความคงทนจากการสลายตัวของน้ำมันได้ดีกว่าจากแหล่งอื่น เกิดสaponification ไม่ทำให้เป็นวุ้นได้ง่าย และกลิ่นดี [4], [5] พร้อมทั้งข้อดีด้านราคา การใช้ประโยชน์ของเหลือทิ้งหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม และไม่เป็นการแข่งขันกับผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นกากกาแฟจึงเป็นแหล่งทางเลือกที่มีศักยภาพในอนาคต โดยปัจจุบันปริมาณกากกาแฟมากถึง 29,000 ตันต่อปี [6] และจากข้อมูลของ The International Coffee Organization (ICO) เสนอว่ามีการผลิตกาแฟทั่วโลกประมาณ 148 ล้านถุง (ถุงละ 60 กก.) [7] พร้อมทั้งแนวโน้มมีมากอย่างต่อเนื่องสอดคล้องตามตลาดกาแฟที่กำลังเติบโตรองรับความต้องการของผู้บริโภค

กากกาแฟ เป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากรูธุรกิจกาแฟ ในปริมาณกาแฟ 1 กรัม จะได้กากกาแฟ 0.91 กรัม ภายในเมล็ดกาแฟมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 11-20 ของน้ำหนักและความชื้น >50% [1] จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น ปาล์มน้ำมันและถั่วเหลือง (20%) [8] กาแฟมีหลายสายพันธุ์โดยอาราบิก้า 70-75% ของการผลิต รองลงมาเป็นโรบัสต้า และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค [9] กาแฟแต่ละสายพันธุ์มีปริมาณน้ำมันและคุณลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน [10] โดยอาราบิก้ามีปริมาณน้ำมันอยู่ระหว่าง 12-18% และโรบัสต้าประมาณ 9-14% [11], [12] จึงมีการผสมของแต่ละสายพันธุ์ตามความชื่นชอบและความนิยมของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจกากกาแฟผสมระหว่างสองสายพันธุ์ (อาราบิก้า/โรบัสต้า; 60 : 40) งานวิจัยของ Caetano *et al.* [3] ได้รายงานวากากกาแฟแห้งได้ร้อยละผลได้ (%Yield) ของน้ำมันกาแฟ มากกว่ากากกาแฟเปียก (65.7% Moisture) เมื่อใช้ตัวทำละลายเฮกเซน และความชื้นมีผลต่อการสกัด

นอกจากนั้นม้งงานวิจัยศึกษาประสิทธิภาพตัวทำละลาย (เฮกเซน ไอโซโพรพานอล เอทานอล ออกเทน เฮปเทน เฮกเซน ผสมไอโซโพรพานอล) ที่อัตราส่วน 1 : 20 และการนำกลับมาใช้ พบว่ามีร้อยละผลได้ ตั้งแต่ 6.3 ถึง 28.3 wt% ขึ้นกับสถานะสกัดใช้เวลาแตกต่างกัน [13] และ Al-Hamamre [11] ศึกษาตัวทำละลายและเวลาที่แตกต่างกัน ที่อัตราส่วนกากกาแฟต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1 : 4.2 รายงานว่าตัวทำละลายที่มีข้อสกัดได้มากกว่าตัวทำละลายไม่มีข้ออย่างมีนัยสำคัญ และโดยตัวทำละลายเฮกเซนสกัดที่ 30 นาที ได้ร้อยละผลได้ที่มากที่สุด (15.28%) อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาไม่พบการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟผสมและการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้นำวิธีหาค่าที่เหมาะสมของใช้การวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีหาค่าที่เหมาะสม (RSM) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางสถิติที่ใช้เพื่อ 1) การออกแบบการทดลอง 2) ศึกษาอิทธิพลร่วม (Interactive Effect) ของหลายปัจจัยต่อตัวแปรตาม ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เพื่อประเมินความพอเพียงของแบบจำลองและทดสอบนัยสำคัญของเทอมของแบบจำลอง และ 3) ทำนายสภาวะที่เหมาะสม (Optimum Conditions) เพื่อแสดงค่าการตอบสนองสูงสุด (Maximum Response) ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายผลการทดลองจริง และใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์กำลังสองไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear Quadratic Correlation) เพื่อคำนวณค่าความสัมพันธ์พื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม [14]-[17] ข้อดีที่สำคัญของ RSM คือ ลดจำนวนชุดทดลอง ที่ใช้ในการประเมินตัวแปรหลายตัว รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น ดังนั้น RSM มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนากระบวนการร้อยละผลได้ การลดเวลา และการลดต้นทุนในเชิงปฏิบัติการ [18] และนำมาใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวางรวมทั้ง ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านอาหาร ด้านเภสัช เคมี วิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมเครื่องกล เช่น การสังเคราะห์พอลิเมอร์ [19] น้ำมันชีวภาพ (Bio-oils) [20] การผลิตไบโอดีเซล [21] การสกัด [22]

และการดูดซับ [23]

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟและอิทธิพลของ 3 ปัจจัยหลัก (อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ ระยะเวลาสกัด และอุณหภูมิสกัด) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดจากกากกาแฟผสมอะราบิก้าและโรบัสต้าด้วยเฮกเซน โดยใช้วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันกาแฟ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

กากกาแฟผสมของอะราบิก้าและโรบัสต้า อัตราส่วน 60 : 40 จากร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยนเรศวร (ประเทศไทย) ลดความชื้นของกากกาแฟด้วยวิธีการอบแห้งเตาอบ ที่อุณหภูมิ 105°ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นใส่โถดูดความชื้นและคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนคัดขนาด 200–500 ไมโครเมตร ตัวทำละลายเฮกเซน 99.0% เกรดวิเคราะห์ บริษัท RCI Labscan จำกัด (Thailand) และกระดาษกรอง (Whatman No.1) บริษัท W.&R. Balston Ltd.

2.2 วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

วิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) วิเคราะห์อิทธิพลร่วมของหลายตัวแปรอิสระ (ปัจจัย) ที่มีต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดจากกากกาแฟ (ค่าการตอบสนอง) โดยปัจจัยหลักและช่วงในศึกษานี้ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (x_1) (2 : 1–10 : 1 มล./ก.) อุณหภูมิสกัด (x_2) (30–50°ซ) และระยะเวลาสกัด (x_3) (5–45 นาที) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

Factor	Level				
	–∞	–1	0	1	+∞
Liquid-to-solid Ratio (x_1)	2	4	6	8	10
Temperature (x_2)	30	35	40	45	50
Extraction Time (x_3)	5	15	25	35	45

การออกแบบการทดลองตาม CCD ในงานวิจัยนี้จำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง โดย 8 แฟกเทอเรียล 6 แกน และ 6 จุดกึ่งกลางซ้ำ ดังแสดงตารางที่ 2 คำนวณจาก $N = 2^n + 2n + n_c$ โดย N คือจำนวนการทดลอง n คือจำนวนตัวแปรอิสระ n_c คือ จำนวนการทดลองซ้ำตำแหน่งกลาง [18]

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางและผลการทดลอง (ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ)

Run Number	Factor			Yield of Oil, Y (wt%)
	X_1 (mL/g)	X_2 (°C)	X_3 (min)	
1	4 (–1)	35 (–1)	15 (–1)	11.640
2	8 (1)	35 (–1)	15 (–1)	12.650
3	4 (–1)	35 (–1)	35 (1)	11.330
4	8 (1)	35 (–1)	35 (1)	13.015
5	4 (–1)	45 (1)	15 (–1)	11.795
6	8 (1)	45 (1)	15 (–1)	12.675
7	4 (–1)	45 (1)	35 (1)	11.721
8	8 (1)	45 (1)	35 (1)	12.946
9	2 (–2)	40 (0)	25 (0)	9.990
10	10 (2)	40 (0)	25 (0)	12.285
11	6 (0)	40 (0)	5 (–2)	11.865
12	6 (0)	40 (0)	45 (2)	12.550
13	6 (0)	30 (–2)	25 (0)	11.925
14	6 (0)	50 (2)	25 (0)	12.000
15	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.775
16	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.650
17	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.730
18	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.500
19	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.505
20	6 (0)	40 (0)	25 (0)	12.560

ข้อมูลจากชุดการทดลองวิเคราะห์อิทธิพลร่วม ของหลายปัจจัยต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดจากกากกาแฟด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อประเมินความสอดคล้องของ

แบบจำลอง (Fitted Model) โดยค่าความสอดคล้องของแบบจำลองตัดสินจาก R^2 และทดสอบนัยสำคัญของเทอมของแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของค่า p -value และ F -value พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองทำนายผลการทดลองในรูปแบบ สมการพหุนามกำลังสอง (Quadratic Polynomial Equation) แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละปัจจัย ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ [18] ดังสมการที่ (1) และสภาวะที่เหมาะสม ด้วยซอฟต์แวร์ Minitab (R.17)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

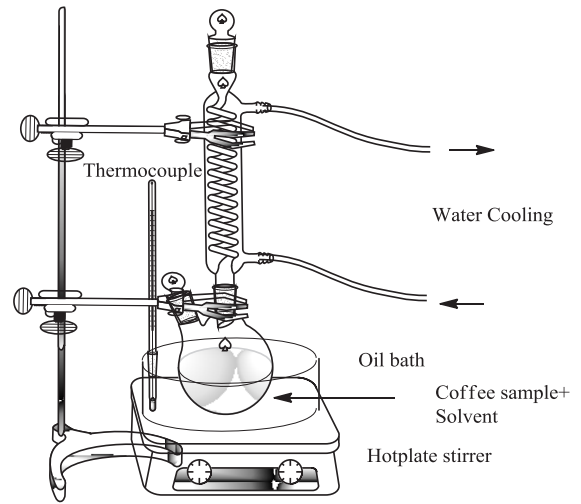
เมื่อ y คือ ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่ทำนายได้ β_0 คือ ค่าคงที่ $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย และ x_i, x_j คือ ปัจจัยการทดลอง

2.3 วิธีในการสกัด

ชั่งน้ำหนักกาแฟ 20 กรัม ผสมกับเฮกเซนตามอัตราส่วนดังตารางที่ 2 ลงในชุดการสกัดแบบไหลย้อนกลับ (Reflux Extraction) ที่ประกอบด้วยขวดก้นกลมและท่อคอนเด็นเซอร์ ดังรูปที่ 1 จากนั้นนำขวดก้นกลมวางลงบนอ่างควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุด้วยพาราฟินออยล์ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน โดยให้ความร้อนและเวลาสกัดที่กำหนดดังตารางที่ 2 เมื่อครบเวลาตามกำหนดนำไปกรองแยกกากภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วย Buckner Funnel และกระดาษกรอง (Whatman No.1) ได้สารละลายสีเหลืองนำไปกำจัดเฮกเซนที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) รุ่น Rotovapor Hei-VAP Value/G3 บริษัท Heidolph, Schwabach, Germany จนกระทั่งไม่มีเฮกเซนกลิ่นแยกออกมา และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง [24] เพื่อกำจัดเฮกเซนที่ยังหลงเหลือ นำขวดเก็บสารไปพักให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักน้ำมันกาแฟที่ได้

2.4 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ

การคำนวณปริมาณน้ำมันได้จากการสกัดเทียบกับ



รูปที่ 1 ชุดการสกัดแบบไหลย้อนกลับ

น้ำหนักของกากกาแฟก่อนการสกัดคำนวณโดยใช้สมการที่ (2) จาก Obruca *et al.* [25].

$$\text{Yield of Oil (wt\%)} = (W_o/W_d) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ Yield of Coffee Oil, Y (wt%) คือ ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ W_o คือ น้ำหนักของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ (g), W_d คือ น้ำหนักของกากกาแฟแห้ง (g)

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันกาแฟ

การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันกาแฟเบื้องต้นประกอบด้วย ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) เพื่อประเมินความเป็นได้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระตามวิธี AOCS Ca 5a-40 [26] และคุณสมบัติกายภาพด้วยความหนืดและความหนาแน่น วัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น DV2T จากประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้สารตัวอย่างปริมาตร 5 มล. Spindle หมายเลข 18 ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40°C และวัดความหนาแน่นโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิ 15°C แสดงค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของการวัด 3 ครั้ง [27]

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูล

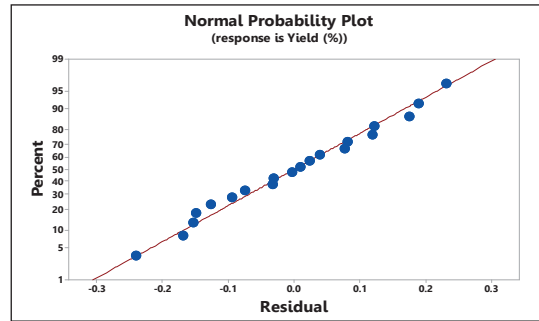
การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ จำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพด้วยการวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลต้องเป็นไปตามสมมติฐานที่ Montgomery [18] กล่าวไว้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน เพื่อนำไปสู่การใช้แบบจำลองถดถอยให้มีความถูกต้องและมีอำนาจการทดสอบที่สูงขึ้น [22]

จากรูปที่ 2 (ก) กราฟการกระจายแบบปกติส่วนตกค้าง เห็นได้ว่าจุดบนกราฟที่เรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรงและมีการกระจายตัวที่หนาแน่นบริเวณใกล้ๆ ค่าศูนย์ แสดงให้เห็นถึงความปกติของข้อมูลที่ได้ดำเนินการทดลอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ รูปที่ 2 (ข) กราฟค่าส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงถึงความเสถียรภาพของความแปรปรวนของข้อมูลตามที่ได้ออกแบบไว้

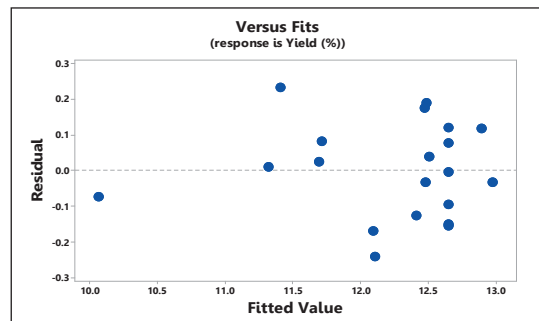
จากรูปที่ 2 (ค) กราฟฮิสโทแกรมส่วนตกค้าง พบว่าเป็นรูปทรงสมมาตรเป็นรูปประฆังคว่ำแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวปกติ และรูปที่ 2 (ง) กราฟค่าส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลอง พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองข้อมูลกระจายตัวไร้รูปแบบ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูลกล่าวอีกนัยหนึ่งคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม จากทั้งหมดกล่าวได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและวิเคราะห์ความแปรปรวน [22] จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสหสัมพันธ์กำลังสอง

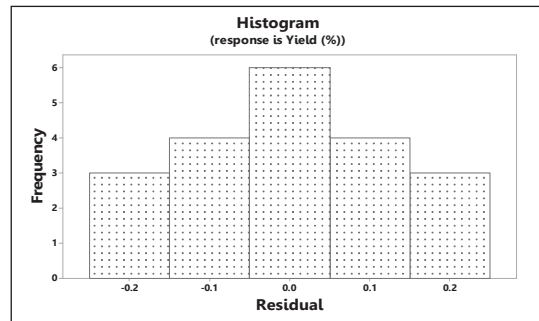
การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยหลักอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมัน



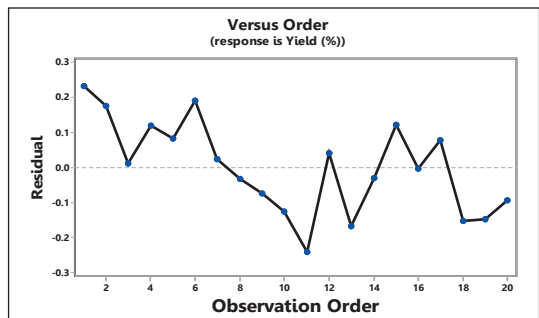
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 (ก) กราฟการกระจายแบบปกติส่วนตกค้าง (ข) กราฟค่าส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย (ค) กราฟฮิสโทแกรมส่วนตกค้าง (ง) กราฟค่าส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลอง



ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Sum of Square	df	Mean Squares	F-Value	P-Value	Remarks
Model	9.15990	9	1.01777	31.01	0.000	Significant
Linear	5.82573	3	1.94191	59.16	0.000	
X ₁	5.51076	1	5.51076	167.89	0.000	Significant
X ₂	0.16443	1	0.16443	5.01	0.049	Significant
X ₃	0.15054	1	0.15054	4.59	0.058	
Square	3.15809	3	1.05270	32.07	0.000	
X ₁ ²	3.14999	1	3.14999	95.97	0.000	Significant
X ₂ ²	0.18793	1	0.18793	5.73	0.038	Significant
X ₃ ²	0.21029	1	0.21029	6.41	0.030	Significant
2-Way Interaction	0.17608	3	0.05869	1.79	0.213	
X ₁ *X ₁	0.13005	1	0.130	3.96	0.075	
X ₁ *X ₂	0.04351	1	0.044	1.33	0.276	
X ₂ *X ₃	0.00252	1	0.003	0.08	0.787	
Lack of Fit	0.25999	5	0.059	3.81	0.084	Insignificant
Pure Error	0.06825	5	0.004			
Total SS	9.48814	19				
R ²	96.54%		Adjust R ²	93.43%	Pred R ²	77.01%

กาแฟที่ได้จากการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของแบบจำลองและการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit) ด้วยการเปรียบเทียบค่า p -value กับระดับนัยสำคัญ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) [16], [17] ผลแสดงในตารางที่ 3 พบว่ารูปแบบจำลองถดถอยที่เหมาะสมของปริมาณของน้ำมันกาแฟ ($p < 0.05$) คือแบบจำลองแบบกำลังสอง (Quadratic Model) เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยหลักแบบเชิงเส้น พบว่าอุณหภูมิสกัดและอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณน้ำมันกากกาแฟ ($p < 0.05$) และอิทธิพลของแต่ละปัจจัยหลักกำลังสอง (Quadratic) พบว่าทั้งสามปัจจัยมีนัยสำคัญต่อปริมาณน้ำมันกากกาแฟ ($p < 0.05$) นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย พบว่าไม่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณน้ำมันกาแฟ

ความใกล้เคียงระหว่างผลจากการทดลองกับแบบจำลองถดถอยด้วยการประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยหากค่าจากการคำนวณด้วยสมการถดถอยมีค่าเท่ากับค่าจากการทดลองทุกจุด R^2 จะมีค่าเท่ากับ 1 และค่าความถูกต้องของค่า R^2 (Adjusted Coefficient of Determination; Adj- R^2) ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย [18] จากผลการวิเคราะห์ R^2 และ Adj- R^2 จะมีค่าเท่ากับ 96.54% และ 93.43% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองถดถอยทำนายความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงการสกัดในชุดการทดลองนี้

การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณด้วยซอฟต์แวร์ สามารถสร้างแบบจำลองทำนายผลการทดลองของความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยและค่าการตอบสนองสูงสุด ได้จากการวิเคราะห์ผลของงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสหสัมพันธ์กำลังสอง

ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear Quadratic Correlation Model) ของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ แสดงดังสมการที่ (3)

$$Y = 3.41 + 0.937X_1 + 0.212X_2 + 0.0634X_3 - 0.08849X_1^2 - 0.00346X_2^2 - 0.000915X_3^2 + 0.01275X_1 * X_2 - 0.00369X_1 * X_3 + 0.00036X_2 * X_3 \quad (3)$$

เมื่อ Yield; Y คือ ร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟ X_1 คือ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (2–10 มล./ก.) X_2 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (30–50°ซ) X_3 คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด (5–45 นาที)

นอกจากการพิจารณาค่าความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ การขาดความเหมาะสมของสมการ เป็นหนึ่งในค่าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในวิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง สามารถบอกได้ว่าแบบจำลองสหสัมพันธ์กำลังสองไม่เป็นเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสามปัจจัยมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ เนื่องจากสมการถดถอยเชิงเส้นนี้ใช้กับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง หากปัจจัยทั้งสามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง สมการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลชุดนั้น ซึ่งถ้าการขาดความเหมาะสมของสมการไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สามารถบอกได้ว่าสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายผลการทดลองมีความเหมาะสม [18] จากตารางที่ 3 ค่า Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.084 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.050 แสดงให้เห็นว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความเหมาะสมข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงสามารถนำสมการข้างต้นมาใช้ทำนายร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟสูงสุด (ค่าการตอบสนองสูงสุด) ได้

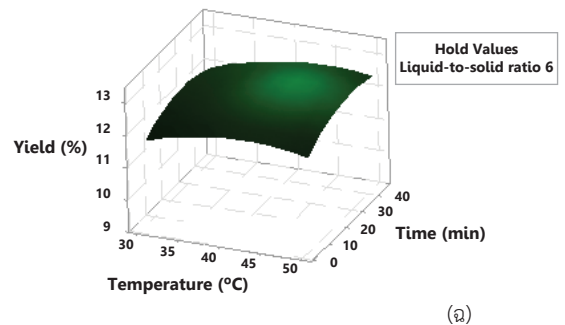
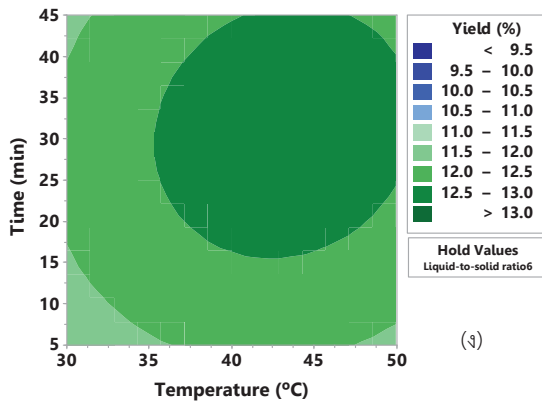
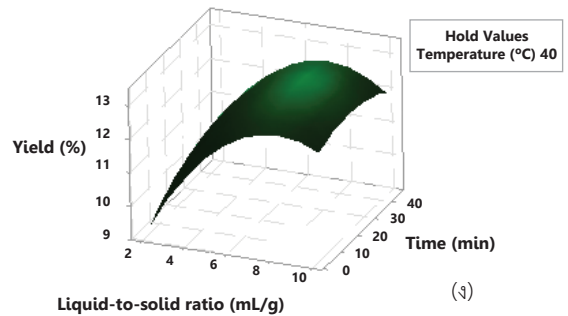
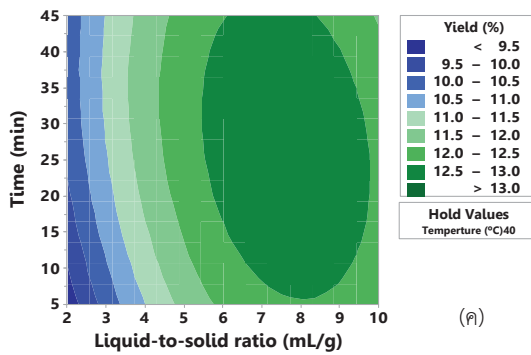
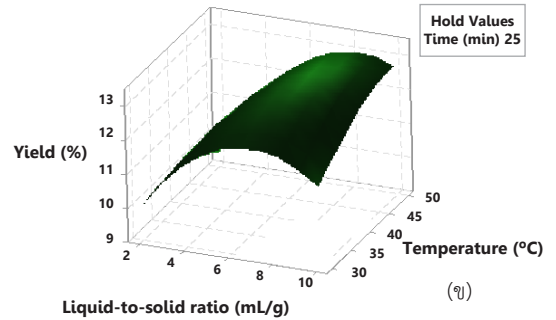
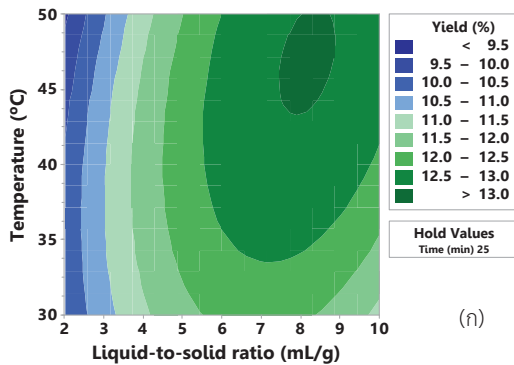
3.3 อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อการสกัดกากกาแฟด้วยพื้นผิวตอบสนองและโครงร่าง

แบบจำลองถดถอยกำลังสองไม่เป็นเส้นตรงสำหรับทำนายปริมาณกาแฟที่สกัดได้นำมาสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง 3 มิติและกราฟโครงร่าง 2 มิติ แสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสามประกอบด้วย อัตราส่วนของตัวทำละลาย

ต่อกากกาแฟ อุณหภูมิในการสกัด และเวลาในการสกัดที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่ได้จากการสกัด ดังรูปที่ 3 โดยกราฟพื้นผิวผลตอบสนองแสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด และจุดกึ่งกลางของพื้นผิว และกราฟโครงร่างแสดงระดับของแต่ละตัวแปรของเส้นโค้งบนพื้นผิวตอบสนอง ดังนั้นกราฟโครงร่างจึงง่ายต่อการตีความ [18]

จากรูปที่ 3 (ก), (ข) แสดงอิทธิพลร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ (X_1) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (X_2) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่สกัดได้ เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัด (X_3) คงที่ที่ 25 นาที พบว่าปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่ได้เป็นอย่างดี โดยเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามระดับ X_1 และ X_2 ที่สูงขึ้น จนถึงอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟเท่ากับ 9 : 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายส่งผลให้มีปริมาณตัวทำละลายมากพอที่สกัดน้ำมันกาแฟได้จากกากกาแฟ เนื่องจากปริมาณตัวทำละลายส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสารและการแพร่ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสองเฟส [28] ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Elkhaleefa และ Shigidi [29] ศึกษาการสกัดเมล็ดกาแฟ พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ และเมื่อพิจารณาพร้อมกับปัจจัยอุณหภูมิ พบว่าประสิทธิภาพการสกัดแปรผันตรงตามอุณหภูมิการสกัด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวทำละลายเฮกเซนและสารที่ต้องการสกัดมีความหนืดลดลงส่งผลต่อการเพิ่มการซึมผ่านเข้าสู่สารที่ต้องการสกัด และการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟสทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับอุณหภูมิการสกัดสูง (40–50°ซ) ร้อยละผลได้ของน้ำมันสูง แสดงให้เห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพการสกัดดี การละลายของเฮกเซนมากและสารอื่นละลายในเฮกเซนรอบกวนการสกัดนี้เล็กน้อย แนวโน้มนี้เช่นเดียวกับการสกัดสารโพลีแซคคาไรด์จากเส้นใยเห็ด *Boletus edulis* [30]

ในทางกลับกัน เมื่ออัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ มากกว่า 8 : 1 พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟที่ได้ลดลงเล็กน้อย ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นไม่สอดคล้องกับหลักการโอนมวลซึ่งระบุว่าการแพร่กระจายเป็นสัดส่วน



รูปที่ 3 กราฟโครงร่าง (Contour Plots) และกราฟพื้นผิวตอบสนอง (3D Surface Plot) แสดงอิทธิพลร่วมของ (ก), (ข) อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและอุณหภูมิในการสกัด (ค), (ง) อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาในการสกัด (จ), (ฉ) ระยะเวลาและอุณหภูมิในการสกัด

โดยตรงกับความเข้มข้น เป็นไปได้ว่าระบบนี้เกิดสมดุลกับอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเกิดสารอื่นที่ละลายในเฮกเซนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการละลายของน้ำมัน

จากรูปที่ 3 (ค), (ง) แสดงอิทธิพลร่วมของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาที่ใช้ในการสกัดที่อุณหภูมิการสกัดคงที่ (40°C) พบว่าร้อยละผลได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น

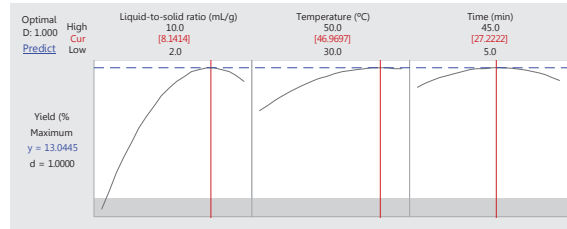
ถึงประมาณ 8 : 1 มล./ก. หลังจากนั้นร้อยละผลได้ลดลงที่เวลาการสกัดใดๆ แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นปริมาณตัวทำละลายระบบการสกัดนี้ และเวลาการสกัดมีอิทธิพลเล็กน้อย เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายในเมทริกซ์วัสดุ ส่งผลให้การเพิ่มอัตราการละลายของสารและการแพร่มากขึ้น [28] เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 6 : 1–9 : 1 ที่เวลาใดๆ อุณหภูมิ 40°ซ ดังรูปที่ 3 (ค) พบว่า ค่าร้อยละผลได้ของการสกัดสูงใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับช่วงอัตราส่วนอื่นๆ อาจกล่าวได้ว่า เวลาไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ ณ ช่วงอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกากกาแฟนี้

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดที่อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟคงที่ ที่ 6 มล./ก. ดังรูปที่ 3 (จ), (ฉ) พบว่าไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ โดยค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันคงตัวประมาณ 11.8–12.9% แสดงให้เห็นว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมต่อร้อยละผลได้ไม่แตกต่างกันที่อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟนี้ เนื่องจากเกิดความสมดุลในระบบการสกัดนี้ กล่าวได้ว่าช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสกัดนี้ ณ อัตราส่วนนี้ส่งผลให้เชิงบวกกับประสิทธิภาพการสกัด

3.4 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer และยืนยันผลการทดลอง

การทำนายสถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการสกัดนี้เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มากที่สุด (ค่าการตอบสนองสูงสุด) ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในซอฟต์แวร์ Minitab R.17 โดยวัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability; D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีค่าอยู่ระหว่าง 0–1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบสนองนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [15], [18]

จากรูปที่ 4 พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายคืออัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 8.14 มล./ก.



รูปที่ 4 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ

อุณหภูมิในการสกัด 46.97°ซ และเวลาในการสกัด 27.22 นาที ได้ปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้จากกากกาแฟร้อยละ 13.04 โดยน้ำหนัก เมื่อนำสถานะที่ได้จากการประมวลผลของซอฟต์แวร์มาทำการทดลองเพื่อทดสอบ โดยทำการประมาณค่าสถานะเพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง จะได้อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 8.14 มล./ก. อุณหภูมิในการสกัด 47°ซ และเวลาในการสกัด 27 นาที หลังจากการทดลองเพื่อตรวจสอบสถานะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันเท่ากับ 13.08 ± 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ จึงสามารถยืนยันได้ว่าการประยุกต์ใช้วิธีหาพื้นที่ผิวดอกบนอง ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการนำมาหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัด

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันจากกากกาแฟ

การวิเคราะห์น้ำมันจากกาแฟที่สกัดได้จากกากกาแฟผสมอะราบิก้าและโรบัสต้าด้วยตัวทำละลายเฮกเซนเพื่อตรวจสอบว่าน้ำมันที่สกัดได้เบื้องต้นมีคุณสมบัติสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้หรือไม่ ด้วยค่ากรดไขมัน และคุณสมบัติกายภาพของน้ำมันด้วยค่าความหนืด และค่าความหนาแน่น แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่าค่ากรดไขมัน 3.70 มิลลิกรัมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมันกาแฟ ค่าความหนืด 49.65 เซนติพอยส์ และค่าความหนาแน่น 948 กก./ม.³ ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ได้มีการทดลองสกัดน้ำมันได้ก่อนหน้านี้ของ Caetano *et al.* [3] และ Hamamre *et al.* [11] กล่าวว่

น้ำมันจากกากกาแฟที่สกัดได้จากเฮกเซนมีค่ากรดไขมันอิสระต่ำกว่าตัวทำละลายอื่นๆ ซึ่งหมายความว่าน้ำมันสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยการลดค่าความเป็นกรดไม่มาก สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ เติมน้ำมันเติมแต่งหลังจากที่ผลิตเป็นไบโอดีเซลจากกาแฟเพื่อปรับให้ไปตามมาตรฐานการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง [27]

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันกาแฟ

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าอ้างอิง	ค่า
กรดไขมันอิสระ	mg _{NaOH} /g _{Oil}	3.9–12.50 [3]	3.70±0.34
ความหนืด	cP	50.99 [11]	49.65±0.64
ความหนาแน่น	Kg/m ³	917.00 [3]	948.00±0.21

4. สรุป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเฮกเซนโดยวิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนอง ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (3 ระดับ และ 5 ปัจจัย) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวแปรของการสกัด (อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ อุณหภูมิในการสกัด และเวลาในการสกัด) ที่พิจารณาและแบบจำลองถดถอยกำลังสองทำนายร้อยละผลได้ของน้ำมันกาแฟได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ร้อยละผลได้ของน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟและเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนตัวทำละลายต่อกากกาแฟ ส่งผลเชิงบวกหรือลบต่อร้อยละผลได้นอกจากนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากกาแฟ 8.14 มล./ก. อุณหภูมิในการสกัด 47°C และเวลาในการสกัด 27 นาที ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันจากการทดลองเท่ากับ 13.08±0.20 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนายที่ได้จากการประมวลผล ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.31 เทียบกับการทดลองยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวิธีวิทยาพื้นผิวตอบสนองใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันกาแฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเคมี สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. S. Oliveira, A. S. Franca, R. R. S. Camargos, and V. P. Ferraz, "Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 8, pp. 3244–3250, 2008.
- [2] N. Kondamudi, S. K. Mohapatra, and M. Misra, "Spent coffee grounds as a versatile source of green energy," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, no. 24, pp. 11757–11760, 2008.
- [3] N. S. Caetano, A. C. Melo, T. M. Mata, V. F. M. Silva, and A. A. Martins, "Spent coffee grounds for biodiesel production and other applications," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, no. 7, pp. 1423–1430, 2014.
- [4] L. S. Oliveira, A. S. Franca, J. C. F. Mendonça, and M. C. Barros-Júnior, "Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 39, no. 3, pp. 235–239, 2006.
- [5] P. Campo, Y. Zhao, M. T. Suidan, A. D. Venosa, and G. A. Sorial, "Biodegradation kinetics and toxicity of vegetable oil triacylglycerols under aerobic conditions," *Chemosphere*, vol. 68, no. 11, pp. 2054–2062, 2007.
- [6] T. Dugmore. (2017, June). The Business of Food Waste. Centre for European Policy Studies.

- Brussels, [Online]. Available: <http://www.ceps.eu/sites/default/files/u153872/Tom%20Dugmore%20%20The%20Business%20of%20Food%20Waste.pdf>
- [7] International Coffee Organization (ICO). (2017, June). Total Coffee Production of Exporting Countries. International Coffee Organization. London, UK, 2016, [Online]. Available: http://www.ico.org/monthly_coffee_trade_stats.asp
- [8] M. M. Gui, K. T. Lee, and S. Bhatia, “Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock,” *Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 1646–1653, 2008.
- [9] J.N. Wintgens, *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*, 2nd ed. Wiley-VCH, 2009.
- [10] L. Servillo, A. Giovane, R. Casale, D. Cautela, N. D’Onofrio, M. L. Balestrieri, and D. Castaldo, “Homostachydrine (pipercolic acid betaine) as authentication marker of roasted blends of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* (Robusta) beans,” *Food Chemistry*, vol. 205, pp. 52–57, 2016.
- [11] Z. Al-Hamamre, S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt, “Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing,” *Fuel*, vol. 96, pp. 70–76, 2012.
- [12] M. Abdullah and A. Bulent Koc, “Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication,” *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 965–970, 2013.
- [13] N. S. Caetano, V. F. M. Silvaa, and T. M. Mata, “Valorization of coffee grounds for biodiesel production,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 26, pp. 267–272, 2012.
- [14] Z. Alam, S. A. Muyibi, and J. Toramae, “Statistical optimization of adsorption processes for removal of 2, 4-dichlorophenol by activated carbon derived from oil palm empty fruit bunches,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 19, pp. 674–677, 2007.
- [15] D. Awapak, N. Maha, and D. Pichairat, “Optimization of polysaccharide extraction from *Gracilaria fisheri* using response surface methodology,” *KKU Science Journal*, vol. 41, no. 2, pp. 414–430, 2013 (in Thai).
- [16] M. Stroescu, A. Stoica-Guzun, S. Ghergu, N. Chira, and I. Jipa, “Optimization of fatty acids extraction from *Portulaca oleracea* seed using response surface methodology,” *Industrial Crops and Products*, vol. 43, no. 1, pp. 405–411, 2013.
- [17] S. Zhao and D. Zhang, “A parametric study of supercritical carbon dioxide extraction of oil from *Moringa oleifera* seeds using a response surface methodology,” *Separation and Purification Technology*, vol. 113, pp. 9–17, 2013.
- [18] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [19] D. R. Vardon, B. R. Moser, W. Zheng, K. Witkin, R. L. Evangelista, T. J. Strathmann, K. Rajagopalan, and B. K. Sharma, “Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar,” *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 1, no. 10, pp. 1286–1294, 2013.
- [20] H. A. Oramahi, Wahdina, F. Diba, Nurhaida, and T. Yoshimura, “Optimization of production of



- lignocellulosic biomass bio-oil from oil palm trunk,” *Procedia Environmental Sciences*, vol. 28, pp. 769–777, 2015.
- [21] S. V. Ghadge and H. Raheman, “Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil using response surface methodology,” *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 3, pp. 379–384, 2006.
- [22] M. Noparat, “Optimization of high protein content protein hydrolysate extraction from hard clam (*meretrix casta*) using response surface methodology,” *KKU Science Journal*, vol. 43, no. 3, pp. 425–438, 2015 (in Thai).
- [23] B. Sadhukhan, N. K. Mondal, and S. Chattoraj, “Optimisation using central composite design (CCD) and the desirability function for sorption of methylene blue from aqueous solution onto *Lemna major*,” *Karbala International Journal of Modern Science*, vol. 2, no. 3, pp. 145–155, 2016.
- [24] M. V. P. Rocha, L. J. B. L. de Matos, L. P. de Lima, P. M. da S. Figueiredo, I. L. Lucena, F. A. N. Fernandes, and L. R. B. Goncalves, “Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds,” *Bioresource Technology*, vol. 167, pp. 343–348, 2014.
- [25] S. Obruca, S. Petrik, P. Benesova, Z. Svoboda, L. Eremka, and I. Marova, “Utilization of oil extracted from spent coffee grounds for sustainable production of polyhydroxy-alkanoates,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 98, no. 13, pp. 5883–5890, 2014.
- [26] *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists’ Society*, 5th edition, AOCS press. 1997.
- [27] D. R. Vardon, B. R. Moser, W. Zheng, K. Witkin, R. L. Evangelista, T. J. Strathmann, K. Rajagopalan, and B. K. Sharma, “Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 1, no. 10, pp. 1286–1294, 2013.
- [28] A. Elkhaleefa and I. Shigidi, “Optimization of sesame oil extraction process conditions,” *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 5, pp. 305–310, 2015.
- [29] W. Chen, W. Wang, H. Zhang, and Q. Huang, “Optimization of ultrasonic-assisted extraction of water-soluble polysaccharides from *Boletus edulis* mycelia using response surface methodology,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, no. 1, pp. 614–619, 2012.
- [30] S. Šahin and R. Šamlı, “Optimization of olive leaf extract obtained by ultrasound-assisted extraction with response surface methodology,” *Ultrasonics Sonochemistry journal*, vol. 20, pp. 595–602, 2012.