



การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองกับการสกัดสารจากมันเทศสีม่วง (*Ipomoea batatas* L.)  
ด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดสำหรับเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

## Application of Response Surface Methodology to Acidified Water Extraction of Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) for Improving Bioactive Compounds and Antioxidant Activity

สุพิชญา คำคม<sup>1</sup> พิทยา ใจคำ<sup>2</sup> และ พิชิต โชดก<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

<sup>2</sup>หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตและการจัดการเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

<sup>3</sup>หลักสูตรเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

Supichaya Khumkhom<sup>1</sup> Pittaya Chaikham<sup>2</sup> and Pichit Chodok<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Home Economics, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,  
Phranakhon Si Ayutthaya 13000

<sup>2</sup>Division of Food Science and Technology Management, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,  
Phranakhon Si Ayutthaya 13000

<sup>3</sup>Division of Modern Agriculture Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,  
Phranakhon Si Ayutthaya 13000

\*Corresponding author: dr.pichitchodok@gmail.com

Received: 15 April 2024/ Revised: 21 June 2024/ Accepted: 24 June 2024

### บทคัดย่อ

มันเทศสีม่วง (Purple sweet potatoes, PSP) เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตและการนำเข้าที่มากขึ้นส่งผลให้เกษตรกรประสบปัญหาด้านราคาที่ดินตกต่ำ ซึ่ง PSP สามารถนำมาผ่านกระบวนการเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจาก PSP ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดยมีตัวแปรต้นประกอบด้วยอัตราส่วนของน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A: 20-60 มิลลิลิตรต่อกรัมของมันเทศสีม่วง) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B: ร้อยละ 0.2-0.6) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C: 1.0-5.0 ชั่วโมง) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D: 20.0-60.0 องศาเซลเซียส) ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในการสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC,  $Y_{TPC}$ ) ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC,  $Y_{TFC}$ ) แอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC,  $Y_{TAC}$ ) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP,  $Y_{FRAP}$ ) และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS<sup>++</sup>,  $Y_{ABTS^{++}}$ ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสองที่ได้จากผลการทดลองมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $p < 0.0001$ ) มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9895, 0.9940, 0.9855, 0.9966 และ 0.9912 ตามลำดับ สำหรับ

ผลตอบสนอง  $Y_{TPC}$ ,  $Y_{TFC}$ ,  $Y_{TAC}$ ,  $Y_{FRAP}$  และ  $Y_{ABTS^{++}}$  ซึ่งบ่งบอกถึงความสอดคล้องกันระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ  $ABTS^{++}$  เท่ากับ 6.28 mg GAE/g PSPP, 5.50 mg RE/g PSPP, 1.48 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP และ 2.97 mg TE/g PSPP ตามลำดับ มีค่าร้อยละความผิดพลาด 0.64-2.70 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง 0.972 ผลจากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติที่มีศักยภาพซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารฟังก์ชัน สารสีธรรมชาติ และผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้

**คำสำคัญ:** มันเทศสีม่วง สารประกอบฟีนอลิก สารประกอบฟลาโวนอยด์ สารประกอบแอนโทไซยานิน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ วิธีพื้นผิวตอบสนอง

## Abstract

Purple sweet potatoes (PSP) are rich in bioactive compounds, especially antioxidants. However, due to increased production and imports, there is now an oversupply, causing prices to drop for farmers. Nonetheless, PSP can be processed into value-added products. The objectives of this study were to optimize the extraction conditions of bioactive compounds from PSP using response surface methodology (RSM). The independent variables were viz. acidified water to purple sweet potato powder (PSPP) ratio (A: 20-60 mL/g PSPP), HCl concentration (B: 0.2-0.6%), extraction time (C: 1-5 h) and extraction temperature (D: 20-60°C). ANOVA results showed that acidified water to PSPP ratio, HCl concentration, extraction time and extraction temperature affected the total phenolic content (TPC,  $Y_{TPC}$ ), total flavonoid content (TFC,  $Y_{TFC}$ ), total anthocyanin content (TAC,  $Y_{TAC}$ ), ferric reducing antioxidant power (FRAP,  $Y_{FRAP}$ ) and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ( $ABTS^{++}$ ,  $Y_{ABTS^{++}}$ ) radical scavenging activities significantly ( $p < 0.05$ ). A second-order polynomial model satisfactorily fitted the experimental data with the  $R^2$  values of 0.9895, 0.9940, 0.9855, 0.9966 and 0.9912, respectively for the responses  $Y_{TPC}$ ,  $Y_{TFC}$ ,  $Y_{TAC}$ ,  $Y_{FRAP}$  and  $Y_{ABTS^{++}}$  ( $p < 0.0001$ ), implying a good agreement between the experimental and predicted values. Under the optimized conditions, TPC, TFC, TAC, FRAP and  $ABTS^{++}$  in acidified water extraction were 6.28 mg GAE/g PSPP, 5.50 mg RE/g PSPP, 1.48 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP and 2.97 mg TE/g PSPP, respectively, with % error 0.64-2.70 and desirability 0.972. These results suggest that bioactive compounds from purple sweet potato are potential natural antioxidant agent that can be used as functional food ingredients, natural colorant and nutraceutical products.

**Keywords:** Purple sweet potato, Phenolic compound, Flavonoid compound, Anthocyanin compound, Antioxidant activity, Response surface methodology

## บทนำ

มันเทศ (sweet potato) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Ipomoea batatas* L. อยู่ในวงศ์เดียวกับผักบุ้ง (Convolvulaceae) เป็นพืชหัวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปอาหาร เครื่องสำอาง และเภสัชกรรม เป็นต้น โดยมันเทศเป็นหนึ่งในพืชอาหารหลักของโลกที่ให้คาร์โบไฮเดรตรองจากข้าวสาลี ข้าว ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าวบาร์เลย์ และมันสำปะหลัง มีการเพาะปลูกมากในแถบทวีปแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชีย โดยเฉพาะประเทศจีนผลิตมันเทศได้มากถึงปีละ 117 ล้านตัน [1] และแนะนำให้ประชาชนชาวจีนบริโภคในปริมาณ 50-100 กรัมต่อวัน [2] เนื่องจากมันเทศ



อุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรต [3] สารประกอบฟีนอลิก (เช่น caffeoylquinic acid derivatives) [4] ฟลาโวนอยด์ [5] สารแอนโทไซยานิน [6] สารสตีแรนอยด์ (บีต้า-แคโรทีน) และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch polysaccharides) [7] ทั้งนี้ปริมาณสารเหล่านี้มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์มันเทศ เช่น มันเทศสีขาว สีส้ม สีเหลือง หรือสีม่วง เป็นต้น โดยเฉพาะมันเทศสีม่วง พบว่ามีสารแอนโทไซยานินเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ และมีปริมาณสูงกว่ามันเทศสีเหลืองขาว และส้ม ในขณะที่มันเทศสีส้มมีสารแคโรทีนอยด์สะสมมากที่สุด [5] ในปัจจุบันสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในมันเทศสีม่วงได้รับความสนใจในทางการแพทย์ เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [6] ต้านการอักเสบ [8] ป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง [9] ลดความดันโลหิตสูง ลดเบาหวาน ลดภาวะกรดยูริกในเลือดสูง [10] ปกป้องความเป็นพิษต่อตับ [11] ลดระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด [12] และปกป้องเซลล์ประสาท [13]

จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีการเพาะปลูกมันเทศเป็นจำนวนมาก โดยพันธุ์ที่ปลูกมีลักษณะสีเนื้อที่แตกต่างกัน เช่น พันธุ์อีกา พันธุ์ปากช่อง พันธุ์เนื้อสีม่วง พันธุ์เวียดนามเนื้อสีม่วงเข้ม พันธุ์ญี่ปุ่นเนื้อสีเหลืองและสีม่วงเข้ม [14] การเพาะปลูกและผลผลิตที่มีจำนวนมากร่วมกับการนำเข้าจากต่างประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกษตรกรประสบปัญหาด้านราคาที่ดีตกต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการสร้างทางเลือกใหม่สำหรับการนำมันเทศสีม่วงไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น โดยการนำมาสกัดและใช้ประโยชน์จากสารสกัดในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพ และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ในกระบวนการสกัดสารจากพืชมีวิธีการสกัดหลายวิธี การสกัดแบบการแช่ด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการสกัดที่มีขั้นตอนง่าย ต้นทุนไม่สูง แต่การสกัดอาจจะใช้ระยะเวลานาน ซึ่งในปัจจุบันวิธีการสกัดแบบนี้มีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติ ได้แก่ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ซึ่งเป็นการใช้องค์ความรู้ทางคณิตศาสตร์และสถิติมาวางแผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่สุดของผลตอบสนอง ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวางแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (central composite design, CCD) เป็นการพัฒนาจากการวางแผนการทดลองเพื่อให้สามารถสร้างรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหรือแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (quadratic model) ได้ ข้อดีของการวางแผนการทดลองแบบ CCD จะช่วยลดจำนวนชุดของการทดลองและลดการใช้ทรัพยากรในการทดลองให้น้อยลง รวมทั้งทราบถึงผลของปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน (interaction) สำหรับการประยุกต์ใช้วิธี RSM และวางแผนการทดลองแบบ CCD ในงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากพืช ตัวอย่างเช่น การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ [15] เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงด้วยตัวทำละลายน้ำที่มีสภาพเป็นกรดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และวางแผนการทดลองแบบ CCD รวมทั้งศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบมันเทศสีม่วง ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำสารสกัดที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในทางเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมผงมันเทศสีม่วง

มันเทศสีม่วง (purple sweet potato, PSP) ซื้อมาจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกมันเทศในอำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น และปอกเปลือกออก หลังจากนั้นนำมันเทศสีม่วงไปเตรียมให้เป็นผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryers) โดยการนำไปนึ่งเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตีบดให้ละเอียด และนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยไอน้ำความดันสูงความเร็ว 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะได้มันเทศสีม่วงที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ และนำมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด [16] และเก็บรักษาผงมันเทศสีม่วง (purple sweet potato powder, PSPP) ในถุงลามิเนทกันความชื้นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

## 2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วงด้วยวิธี RSM

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content, TPC) สารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (total flavonoid content, TFC) และสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (total anthocyanin content, TAC) รวมทั้งการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS<sup>+</sup>) โดยศึกษาตัวแปรต้นที่ใช้ในการสกัดจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ (A) อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (ratio of acidified water to PSPP) 20.0-60.0 มิลลิลิตรต่อกรัม ผงมันเทศสีม่วง (B) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl concentration) ร้อยละ 0.2-0.6 (C) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (extraction time) 1.0-5.0 ชั่วโมง และ (D) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (extraction temperature) 20.0-60.0 องศาเซลเซียส โดยแบ่งระดับของตัวแปรต้นเหล่านี้ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ -2 (- $\alpha$ ), -1, 0, +1 และ +2 (+ $\alpha$ ) มีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 30 การทดลองแสดงดังตารางที่ 1 เมื่อทำการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงในแต่ละชุดการทดลองแล้ว นำตัวอย่างที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิ (Eppendorf centrifuge 5810R, Germany) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดหยดไปวิเคราะห์หาปริมาณ TPC, TFC และ TAC รวมทั้งทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (FRAP และ ABTS<sup>+</sup>) ต่อไป โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

## 3. การวิเคราะห์หาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดหยดที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

### 3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณ TPC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TPC ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (U-5100 UV-visible spectrophotometer, Hitachi, Japan) ที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยดปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำประปาจากโอโซน Folin-Ciocalteu reagent (เจือจางร้อยละ 10) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 5 นาที และเติมน้ำประปาจากโอโซน โซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร (OD<sub>725</sub>) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณ TPC โดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (gallic acid equivalent, GAE) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg GAE/g PSPP)

### 3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณ TFC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TFC ด้วยวิธี aluminum chloride colorimetry ตามวิธีการของ Kubola และคณะ [18] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยดปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ปริมาตร 2.25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำประปาจากโอโซน โซเดียมไนไตรต์ (NaNO<sub>2</sub>) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมน้ำประปาจากโอโซน อะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl<sub>3</sub>) ความเข้มข้นร้อยละ 10.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 0.30 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที เมื่อครบเวลาแล้ว เติมน้ำประปาจากโอโซน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร (OD<sub>510</sub>) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณ TFC โดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของรูติน (rutin equivalent, RE) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของรูตินต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg RE/g PSPP)



### 3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ TAC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TAC ด้วยวิธี pH-differential ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองจำนวน 2 หลอด หลอดที่ 1 นำมาเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 1.0 จนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร ( $OD_{510}$  และ  $OD_{700}$ ) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในขณะที่หลอดที่ 2 นำมาเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 จนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณ TAC และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin 3-glucoside ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg CGE/g PSPP)

## 4. การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

### 4.1 การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ตามวิธีการของ Kubola และคณะ [18] โดยการนำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย FRAP ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืดอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ( $OD_{593}$ ) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่างสารสกัดหยาบ และคำนวณหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ trolox (6-hydroxy-2, 5, 7, 8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, trolox) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg trolox equivalent/g PSPP, mg TE/g PSPP)

### 4.2 การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS<sup>+</sup>

การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS<sup>+</sup> ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] โดยการเตรียมสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลาย ABTS ที่ความเข้มข้น 7.0 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ ) ที่ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ นำสารละลายทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1.0:0.5 ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ หลังจากนั้นเตรียมสารละลาย ABTS<sup>+</sup> โดยการเจือจางด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง  $0.7 \pm 0.02$  ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ( $OD_{734}$ ) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS<sup>+</sup> เริ่มต้นจากการนำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย ABTS<sup>+</sup> ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่างสารสกัดหยาบ และใช้ trolox เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ trolox ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg TE/g PSPP)

## 5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup>) มาวิเคราะห์คุณภาพ ความเหมาะสม ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจปรับแก้ (adjusted  $R^2$ ) สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (coefficient of variation, CV) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ของสารสกัดหยาบในรูปของสมการที่ 1

$$Y_{(\text{Response})} = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4D + \beta_{12}AB + \beta_{13}AC + \beta_{14}AD + \beta_{23}BC + \beta_{24}BD + \beta_{34}CD + \beta_{11}A^2 + \beta_{22}B^2 + \beta_{33}C^2 + \beta_{44}D^2 \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ผลตอบสนอง ได้แก่ TPC (mg GAE/g PSPP), TFC (mg RE/g PSPP), TAC (mg CGE/g PSPP), FRAP (mg TE/g PSPP) และ ABTS<sup>+</sup> (mg TE/g PSPP)



A, B, C และ D คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ต้องการศึกษา

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่สมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  และ  $\beta_4$  คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}$  และ  $\beta_{34}$  คือ สัมประสิทธิ์ของสมการปฏิสัมพันธ์

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$  และ  $\beta_{44}$  คือ สัมประสิทธิ์ของสมการกำลังสอง

## 6. การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามข้อ 5 แล้ว นำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงที่ส่งผลให้ได้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC สูงสุด รวมทั้งได้สารสกัดหยาบที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> มากที่สุดด้วยการใช้โปรแกรม Design-Expert Version 13.0.3 (Stat Ease Inc., MN, USA)

## 7. การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดมันเทศสีม่วง

นำสารสกัดที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาหาสภาวะของการสกัดที่เหมาะสมตามที่ได้ทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 โดยสภาวะของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) จากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดหยาบที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปวิเคราะห์หาปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนาย (predicted value) กับผลที่ได้จากการทดลองจริง (experimental value) และนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% error) รวมทั้งค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (desirability)

## ผลการวิจัย

### 1. ผลของสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงด้วยวิธี RSM ใช้การออกแบบการทดลอง CCD ต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> จากมันเทศสีม่วง แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าสามารถสกัดสารได้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC แตกต่างกันในช่วง 4.72 - 6.27 mg GAE/g PSPP, 4.34-6.79 mg RE/g PSPP และ 1.03-1.45 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วงเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> มีค่าอยู่ในช่วง 8.73-11.38 และ 2.61-4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในการทดลองที่ 16 ประกอบด้วยปัจจัย A = 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง ปัจจัย B = ร้อยละ 0.5 ปัจจัย C = 4 ชั่วโมง และปัจจัย D = 50 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างสารสกัดหยาบมีปริมาณ TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP สูงสุดเท่ากับ 6.27 mg GAE/g PSPP, 1.45 mg CGE/g PSPP และ 11.38 mg TE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองที่ 19 (A = 40 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง B = ร้อยละ 0.2 C = 3 ชั่วโมง และ D = 40 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างสารสกัดหยาบมีปริมาณ TFC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS<sup>•+</sup> สูงที่สุดเท่ากับ 6.79 mg RE/g PSPP และ 4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ (ตารางที่ 1) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต้นของการสกัดทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) มีอิทธิพลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วง





**ตารางที่ 1** ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) แอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS<sup>++</sup> ของสารสกัดหยาบในแต่ละการทดลองเมื่อออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD สำหรับ RSM

| Runs | A  | B   | C | D  | TPC             | TFC            | TAC             | FRAP           | ABTS <sup>++</sup> |
|------|----|-----|---|----|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|
|      |    |     |   |    | (mg GAE/g PSPP) | (mg RE/g PSPP) | (mg CGE/g PSPP) | (mg TE/g PSPP) | (mg TE/g PSPP)     |
|      |    |     |   |    | Exp. (Pred.)    | Exp. (Pred.)   | Exp. (Pred.)    | Exp. (Pred.)   | Exp. (Pred.)       |
| 1    | 30 | 0.3 | 2 | 30 | 4.72 (4.80)     | 5.40 (5.40)    | 1.04 (1.04)     | 8.74 (8.87)    | 3.20 (3.30)        |
| 2    | 50 | 0.3 | 2 | 30 | 5.22 (5.24)     | 6.08 (6.04)    | 1.11 (1.10)     | 9.80 (9.72)    | 3.48 (3.49)        |
| 3    | 30 | 0.5 | 2 | 30 | 5.01 (4.95)     | 4.79 (4.77)    | 1.06 (1.05)     | 9.58 (9.58)    | 2.61 (2.64)        |
| 4    | 50 | 0.5 | 2 | 30 | 5.41 (5.42)     | 5.43 (5.39)    | 1.10 (1.11)     | 10.30 (10.24)  | 2.82 (2.85)        |
| 5    | 30 | 0.3 | 4 | 30 | 4.85 (4.88)     | 4.98 (5.02)    | 1.04 (1.05)     | 8.94 (8.91)    | 3.48 (3.51)        |
| 6    | 50 | 0.3 | 4 | 30 | 5.38 (5.38)     | 5.53 (5.57)    | 1.13 (1.14)     | 9.98 (10.07)   | 3.51 (3.58)        |
| 7    | 30 | 0.5 | 4 | 30 | 4.98 (5.04)     | 4.85 (4.81)    | 1.11 (1.11)     | 9.49 (9.59)    | 2.72 (2.72)        |
| 8    | 50 | 0.5 | 4 | 30 | 5.57 (5.56)     | 5.41 (5.34)    | 1.20 (1.19)     | 10.55 (10.56)  | 2.77 (2.81)        |
| 9    | 30 | 0.3 | 2 | 50 | 5.20 (5.19)     | 5.00 (5.03)    | 1.15 (1.15)     | 9.48 (9.44)    | 3.84 (3.79)        |
| 10   | 50 | 0.3 | 2 | 50 | 5.55 (5.53)     | 5.77 (5.78)    | 1.25 (1.24)     | 10.67 (10.58)  | 3.98 (4.06)        |
| 11   | 30 | 0.5 | 2 | 50 | 5.63 (5.68)     | 4.73 (4.67)    | 1.25 (1.24)     | 9.93 (9.85)    | 2.91 (2.92)        |
| 12   | 50 | 0.5 | 2 | 50 | 6.10 (6.05)     | 5.48 (5.41)    | 1.33 (1.31)     | 10.79 (10.79)  | 3.25 (3.21)        |
| 13   | 30 | 0.3 | 4 | 50 | 5.27 (5.31)     | 4.73 (4.74)    | 1.22 (1.20)     | 9.55 (9.62)    | 3.75 (3.79)        |
| 14   | 50 | 0.3 | 4 | 50 | 5.68 (5.72)     | 5.42 (5.41)    | 1.32 (1.31)     | 11.11 (11.08)  | 3.99 (3.95)        |
| 15   | 30 | 0.5 | 4 | 50 | 5.84 (5.80)     | 4.80 (4.80)    | 1.35 (1.34)     | 9.94 (9.99)    | 2.81 (2.79)        |
| 16   | 50 | 0.5 | 4 | 50 | 6.27 (6.24)     | 5.48 (5.45)    | 1.45 (1.44)     | 11.38 (11.26)  | 3.00 (2.97)        |
| 17   | 20 | 0.4 | 3 | 40 | 4.80 (4.74)     | 4.34 (4.33)    | 1.14 (1.15)     | 8.73 (8.62)    | 3.00 (2.96)        |
| 18   | 60 | 0.4 | 3 | 40 | 5.58 (5.62)     | 5.54 (5.62)    | 1.30 (1.31)     | 10.60 (10.73)  | 3.36 (3.33)        |
| 19   | 40 | 0.2 | 3 | 40 | 5.31 (5.24)     | 6.79 (6.72)    | 1.04 (1.05)     | 9.47 (9.45)    | 4.56 (4.48)        |
| 20   | 40 | 0.6 | 3 | 40 | 5.87 (5.92)     | 6.00 (6.13)    | 1.18 (1.19)     | 10.30 (10.34)  | 2.83 (2.85)        |
| 21   | 40 | 0.4 | 1 | 40 | 5.22 (5.22)     | 4.73 (4.80)    | 1.11 (1.13)     | 10.01 (10.11)  | 3.32 (3.27)        |
| 22   | 40 | 0.4 | 5 | 40 | 5.52 (5.49)     | 4.46 (4.46)    | 1.27 (1.27)     | 10.69 (10.61)  | 3.25 (3.24)        |
| 23   | 40 | 0.4 | 3 | 20 | 5.10 (5.05)     | 4.97 (5.01)    | 1.03 (1.02)     | 9.57 (9.48)    | 2.84 (2.71)        |
| 24   | 40 | 0.4 | 3 | 60 | 6.08 (6.11)     | 4.72 (4.75)    | 1.35 (1.38)     | 10.65 (10.75)  | 3.29 (3.35)        |
| 25   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.65 (5.61)     | 4.57 (4.71)    | 1.17 (1.22)     | 10.05 (10.04)  | 3.43 (3.33)        |
| 26   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.67 (5.61)     | 4.75 (4.71)    | 1.22 (1.22)     | 10.17 (10.04)  | 3.23 (3.33)        |
| 27   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.67 (5.61)     | 4.80 (4.71)    | 1.22 (1.22)     | 10.07 (10.04)  | 3.28 (3.33)        |
| 28   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.53 (5.61)     | 4.72 (4.71)    | 1.21 (1.22)     | 10.02 (10.04)  | 3.34 (3.33)        |
| 29   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.67 (5.61)     | 4.62 (4.71)    | 1.24 (1.22)     | 10.04 (10.04)  | 3.30 (3.33)        |
| 30   | 40 | 0.4 | 3 | 40 | 5.47 (5.61)     | 4.77 (4.71)    | 1.24 (1.22)     | 9.90 (10.04)   | 3.40 (3.33)        |

Exp. คือ ผลที่ได้จากการทดลองจริง (experimental value), Pred. คือ ผลที่ได้จากการทำนาย (predicted value)  
 A คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง, B คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก, C คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ D คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

## 2. ผลของการวิเคราะห์คุณภาพและความเหมาะสมของข้อมูลปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

ผลของการตรวจสอบคุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 30 การทดลอง แสดงดังภาพที่ 1 (a1) – (a5) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูล พบว่าข้อมูลปริมาณ (a1) TPC, (a2) TFC และ (a3) TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (a4) FRAP และ (a5) ABTS<sup>++</sup> มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ในขณะที่ภาพที่ 1 (b1) – (b5) เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย ได้แก่ ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในด้านบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีเสถียรภาพของความแปรปรวน และภาพที่ 1 (c1) – (c5) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลโดยพิจารณาจากกราฟส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลอง พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> มีการกระจายตัวไร้รูปแบบ แสดงให้เห็นถึงความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีคุณภาพ และมีความเหมาะสมในการนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>++</sup> ของสารสกัดหยาบ

## 3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

ผลจากการเลือกรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>++</sup> ของสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วง โดยพิจารณาจากผลสรุปทางสถิติ พบว่าจากการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสอง (quadratic model) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> โดยค่า  $R^2$  ของแบบจำลองกำลังสองมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9814, 0.9887, 0.9793, 0.9838 และ 0.9826 ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบกำลังสอง หรือ quadratic model มีความเหมาะสมที่จะใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (A, B, C และ D) กับปริมาณ TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>++</sup> รวมทั้งยังสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2 - 6

$$\text{TPC (mg GAE/g PSPP)} = 5.61 + 0.2183A + 0.1692B + 0.0667C + 0.265D + 0.0063AB + 0.015AC - 0.0225AD + 0.0013BC + 0.0838BD + 0.01CD - 0.1079A^2 - 0.0079B^2 - 0.0629C^2 - 0.0079D^2 \quad (2)$$

$$\text{TFC (mg RE/g PSPP)} = 4.71 + 0.3217A - 0.1467B - 0.0842C - 0.065D - 0.0037AB - 0.0225AC + 0.0288AD + 0.1062BC + 0.0675BD + 0.0238CD + 0.0669A^2 + 0.4306B^2 - 0.0194C^2 + 0.0431D^2 \quad (3)$$

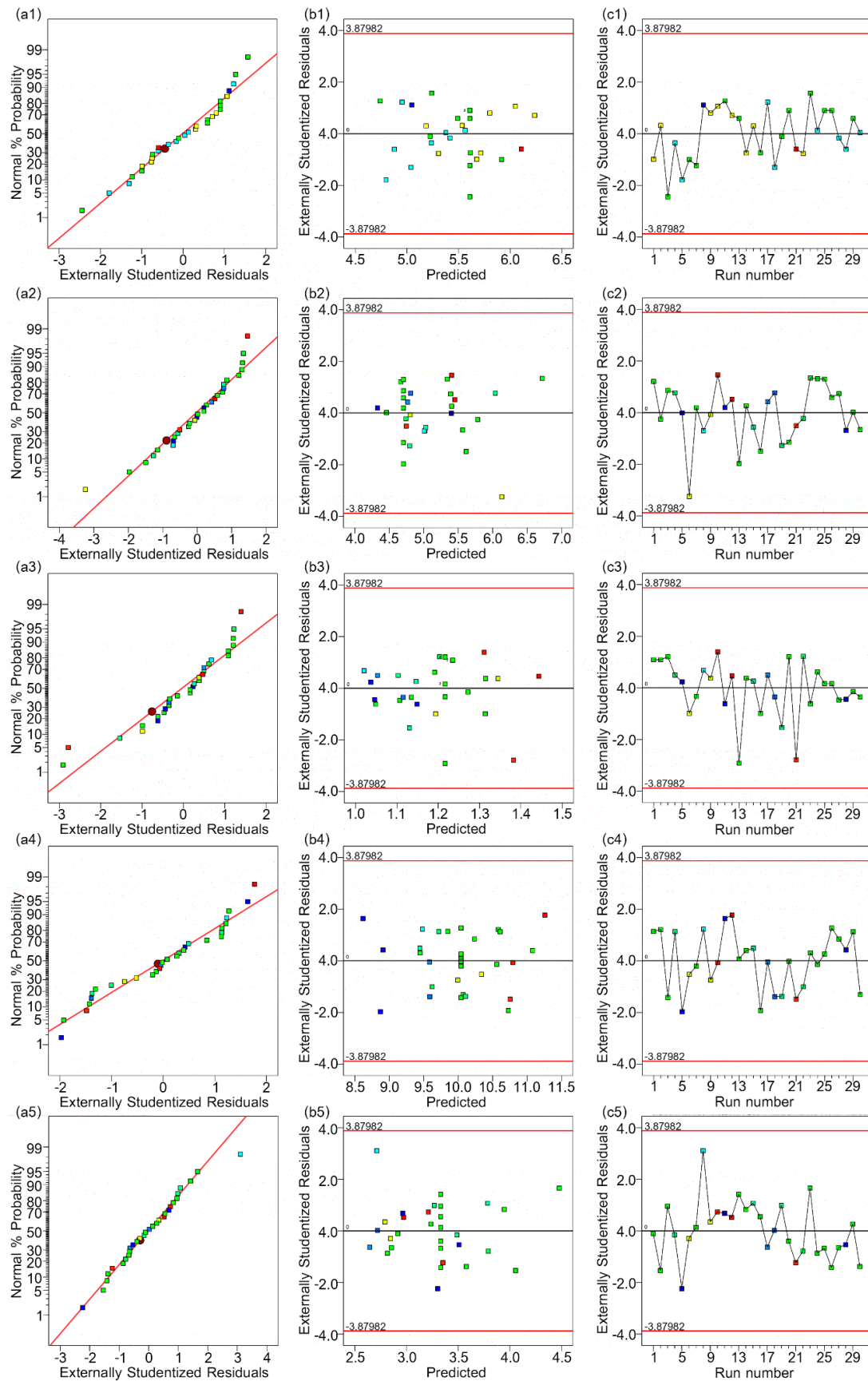
$$\text{TAC (mg CGE/g PSPP)} = 1.22 + 0.0412A + 0.0362B + 0.0354C + 0.0904D - 0.0031AB + 0.0056AC + 0.0056AD + 0.0131BC + 0.0181BD + 0.0119CD + 0.0036A^2 - 0.0239B^2 - 0.0039C^2 - 0.0039D^2 \quad (4)$$

$$\text{FRAP (mg TE/g PSPP)} = 10.04 + 0.5279A + 0.2229B + 0.1254C + 0.3179D - 0.0481AB + 0.0794AC + 0.0731AD - 0.0081BC - 0.0769BD + 0.0356CD - 0.0922A^2 - 0.0372B^2 + 0.0791C^2 + 0.0191D^2 \quad (5)$$

$$\text{ABTS}^{++} (\text{mg TE/g PSPP}) = 3.33 + 0.0917A - 0.4083B - 0.0083C + 0.16D + 0.0063AB - 0.0287AC + 0.0213AD - 0.0325BC - 0.0525BD - 0.05CD - 0.0456A^2 + 0.0831B^2 - 0.0194C^2 - 0.0744D^2 \quad (6)$$

เมื่อ TPC (mg GAE/g PSPP) คือ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g PSPP), TFC (mg RE/g PSPP) คือ ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (mg RE/g PSPP), TAC (mg CGE/g PSPP) คือ ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (mg CGE/g PSPP), FRAP (mg TE/g PSPP) คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP (mg TE/g PSPP), ABTS<sup>++</sup> (mg TE/g PSPP) คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ABTS<sup>++</sup> (mg TE/g PSPP), A, B, C และ D คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อผงมันเทศสีม่วง ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในการสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด ตามลำดับ





**ภาพที่ 1** กราฟการกระจายแบบปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล (a1) TPC, (a2) TFC, (a3) TAC, (a4) FRAP และ (a5) ABTS<sup>+</sup>, กราฟค่าส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย (b1) TPC, (b2) TFC, (b3) TAC, (b4) FRAP และ (b5) ABTS<sup>+</sup> และ กราฟค่าส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลองของข้อมูล (c1) TPC, (c2) TFC, (c3) TAC, (c4) FRAP และ (c5) ABTS<sup>+</sup>



#### 4. ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสม และคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2 - 6 โดยการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่า  $p$ -value ของโมเดล (model) และค่าความสมบูรณ์ (lack of fit) แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าค่าโมเดลของแบบจำลองของปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยมีค่า  $p < 0.0001$  และเมื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (สมการที่ 2 - 6) พบว่าแบบจำลองสำหรับทำนายค่า TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> มีความสมบูรณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) มีค่าเท่ากับ 0.8205, 0.6874, 0.8105, 0.2280 และ 0.4519 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 สามารถใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

| Source                              | $p$ -value      |                |                 |                |                   |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
|                                     | TPC             | TFC            | TAC             | FRAP           | ABTS <sup>+</sup> |
|                                     | (mg GAE/g PSPP) | (mg RE/g PSPP) | (mg CGE/g PSPP) | (mg TE/g PSPP) | (mg TE/g PSPP)    |
| Model                               | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001           |
| A- Ratio of acidified water to PSPP | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001           |
| B-HCl concentration                 | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001           |
| C-Extraction time                   | 0.0004          | 0.0001         | <0.0001         | <0.0001        | 0.6166            |
| D-Extraction temperature            | <0.0001         | 0.0015         | <0.0001         | <0.0001        | <0.0001           |
| AB                                  | 0.7346          | 0.8571         | 0.5694          | 0.1080         | 0.7585            |
| AC                                  | 0.4202          | 0.2892         | 0.3116          | 0.0130         | 0.1704            |
| AD                                  | 0.2329          | 0.1807         | 0.3116          | 0.0202         | 0.3040            |
| BC                                  | 0.9458          | 0.0001         | 0.0274          | 0.7769         | 0.1243            |
| BD                                  | 0.0003          | 0.0049         | 0.0042          | 0.0155         | 0.0189            |
| CD                                  | 0.5887          | 0.2642         | 0.0430          | 0.2251         | 0.0243            |
| A <sup>2</sup>                      | <0.0001         | 0.0007         | 0.3882          | 0.0006         | 0.0091            |
| B <sup>2</sup>                      | 0.5753          | <0.0001        | <0.0001         | 0.1043         | <0.0001           |
| C <sup>2</sup>                      | 0.0004          | 0.2344         | 0.3624          | 0.0022         | 0.2232            |
| D <sup>2</sup>                      | 0.5753          | 0.0147         | 0.3624          | 0.3894         | 0.0002            |
| Lack of fit                         | 0.8205          | 0.6874         | 0.8105          | 0.2280         | 0.4519            |
| R <sup>2</sup>                      | 0.9814          | 0.9887         | 0.9793          | 0.9838         | 0.9826            |
| Adjusted R <sup>2</sup>             | 0.9640          | 0.9782         | 0.9599          | 0.9687         | 0.9664            |
| Predicted R <sup>2</sup>            | 0.9320          | 0.9549         | 0.9237          | 0.9206         | 0.9222            |
| C.V. (%)                            | 1.33            | 1.60           | 1.80            | 1.12           | 2.43              |

ส่วนคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ในสมการที่ 2 - 6 สามารถประเมินได้จากค่า R<sup>2</sup>, Adjusted R<sup>2</sup> และ C.V.% พบว่ามีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.9814, 0.9887, 0.9793, 0.9838 และ 0.9826 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าตัวแปรตอบสนองได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) เท่ากับร้อยละ 98.14, 98.87, 97.93, 98.38 และ 98.26 ตามลำดับ และที่เป็นผลมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้มีเพียงร้อยละ 1.86, 1.13, 2.07, 1.62 และ 1.74 ตามลำดับ ส่วนความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> สามารถตรวจสอบได้จากค่า adjusted R<sup>2</sup> แสดงดังตารางที่ 2 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9640, 0.9782, 0.9599, 0.9687 และ 0.9664 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ

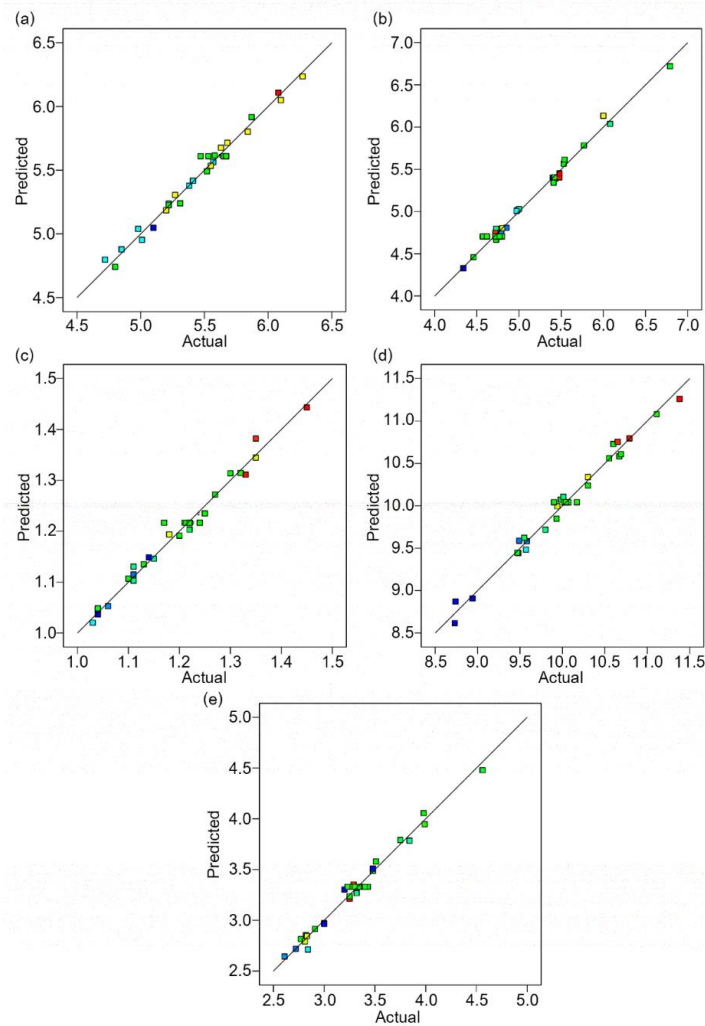


ABTS<sup>+</sup> ด้วยแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 มีความแม่นยำร้อยละ 96.40, 97.82, 95.99, 96.87 และ 96.64 ตามลำดับ ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 พบว่ามีแนวโน้มเข้าใกล้แนวของเส้นทแยงมุม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 สามารถใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ได้อย่างแม่นยำ ส่วนค่า C.V. (%) พบว่ามีค่าต่ำอยู่ในช่วงร้อยละ 1.33, 1.60, 1.80, 1.12 และ 2.43 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 นั้นสามารถทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> ในสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วงได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือ ในขณะที่การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุคูณของตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) ในสมการที่ 2 - 6 เมื่อพิจารณาว่ามีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> หรือไม่โดยพิจารณาในส่วนของพจน์เชิงเส้น (A, B, C และ D) พจน์อิทธิพลร่วมกัน (AB, AC, AD, BC, BD และ CD) และพจน์กำลังสอง ( $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  และ  $D^2$ ) แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ 2 - 6 พบว่าพจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ได้แก่ (1) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC ได้แก่ A, B, C, D, BD,  $A^2$  และ  $C^2$  (2) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TFC ได้แก่ A, B, C, D, BC, BD,  $A^2$ ,  $B^2$  และ  $D^2$  (3) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TAC ได้แก่ A, B, C, D, BC, BD, CD และ  $B^2$  ในขณะที่พจน์ที่มีอิทธิพลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ได้แก่ พจน์ A, B, C, D, AC, AD, BD,  $A^2$  และ  $C^2$  และพจน์ที่มีอิทธิพลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ABTS<sup>+</sup> คือ พจน์ A, B, D, BD, CD,  $A^2$ ,  $B^2$  และ  $D^2$  อย่างไรก็ตามปัจจัยในพจน์อื่น ๆ เป็นพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> (ตารางที่ 2)

## 5. ผลของการสร้างพื้นผิวตอบสนองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (3D-surface plot) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (A, B, C และ D) กับผลตอบสนอง (TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup>) แสดงดังภาพที่ 3 (a) – (i) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BD, BC, CD, AC และ AD ที่มีผลต่อการสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าที่อุณหภูมิของการสกัด 60 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากร้อยละ 0.2 เป็น 0.6 (ภาพที่ 3 (a), (d), (e) และ (i)) ร่วมกับการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 1 เป็น 5 ชั่วโมง (ภาพที่ 3 (d), (f) และ (g)) และเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงจาก 20 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อกรัม มันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยปริมาณ TPC เพิ่มขึ้นจาก 4.27 เป็น 6.27 mg GAE/g PSPP ปริมาณ TAC เพิ่มขึ้นจาก 1.03 เป็น 1.45 mg CGE/g PSPP และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เพิ่มขึ้น 8.73 เป็น 11.38 mg TE/g PSPP อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิ ระยะเวลา ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงดังภาพที่ 3 (a) และ (d) – (i)

ในขณะภาพที่ 3 (b) และ (c) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BC และ BD ที่มีผลต่อการสกัด TFC เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าการสกัดให้ได้ปริมาณ TFC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จาก 4.34 เป็น 6.79 mg RE/g PSPP ต้องลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเหลือร้อยละ 0.2 ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 1 ชั่วโมง และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 3 (j) และ (k) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BD และ CD ที่มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS<sup>+</sup> เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับการลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเหลือร้อยละ 0.2 และลดระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 5 เป็น 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS<sup>+</sup> เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จาก 2.61 เป็น 4.56 mg TE/g PSPP อย่างไรก็ตาม การลดระดับของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดร่วมกับการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS<sup>+</sup> ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

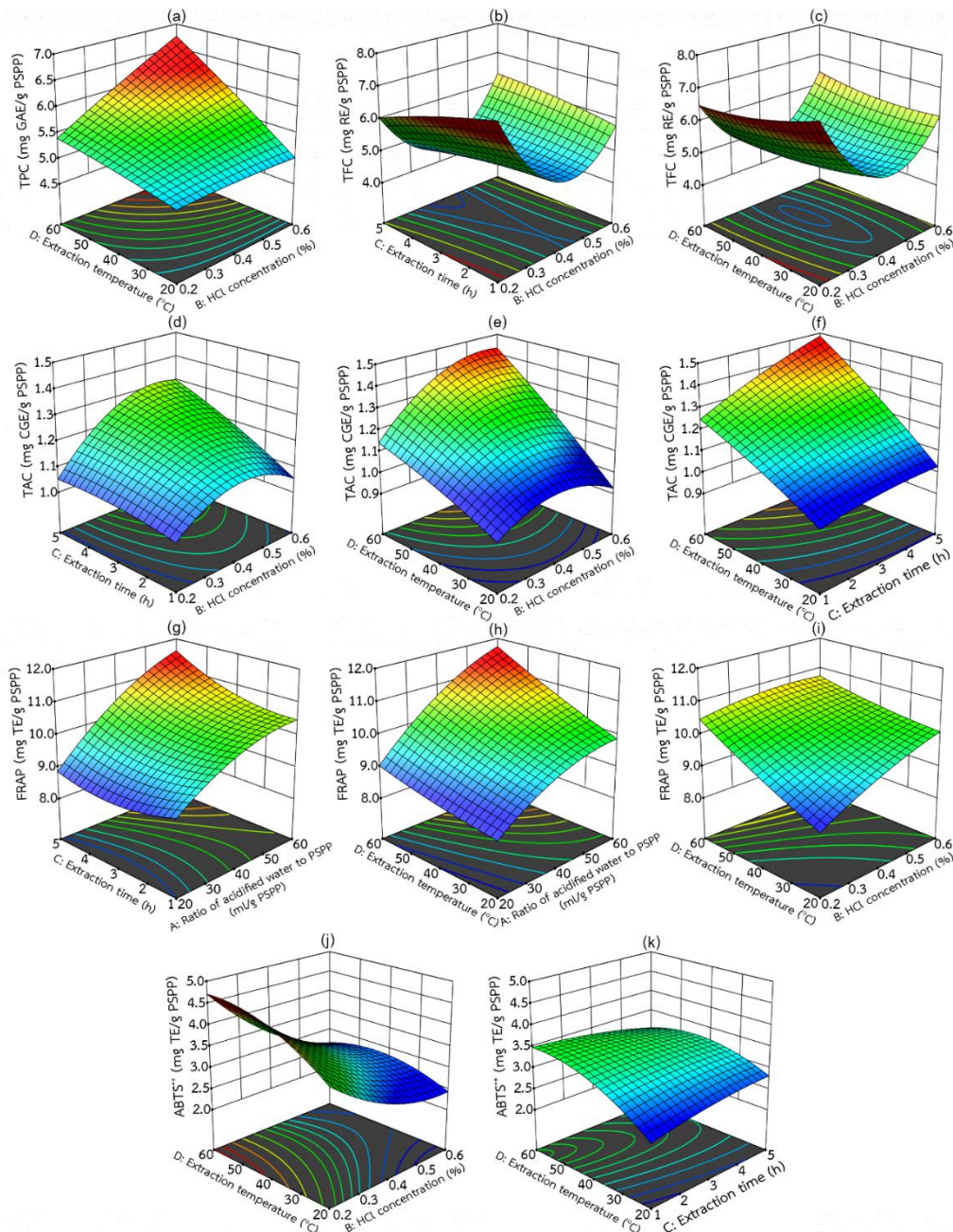


**ภาพที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ (a) TPC, (b) TFC, (c) TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี (d) FRAP และ (e) ABTS<sup>•+</sup> ของสารสกัดจากการทำนาย (Predicted) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าที่ได้จากการทดลองจริง (Experimental)

## 6. ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการวิเคราะห์ระดับของแต่ละตัวแปรต้น ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) ที่เหมาะสมต่อค่าปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> ที่ได้สูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองด้วยสมการที่ 2 - 6 เพื่อทวนสอบและยืนยันผลของการใช้แบบจำลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดที่ทำให้ได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> สูงที่สุด ประกอบด้วยปัจจัย A = 50.0 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง ปัจจัย B = ร้อยละ 0.5 ปัจจัย C = 4.0 ชั่วโมง และปัจจัย D = 50 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมนี้ พบว่าได้ปริมาณ TPC เท่ากับ 6.28 mg GAE/g PSPP, TFC เท่ากับ 5.50 mg RE/g PSPP, TAC เท่ากับ 1.48 mg CGE/g PSPP, FRAP เท่ากับ 11.45 mg TE/g PSPP และ ABTS<sup>•+</sup> เท่ากับ 3.05 mg TE/g PSPP ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองตามสมการที่ 2 - 6 เท่ากับ 6.24 mg GAE/g PSPP, 5.45 mg RE/g PSPP, 1.44 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP และ 2.97 mg TE/g PSPP ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละความผิดพลาด (% error) พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 0.64, 0.91, 2.70, 1.66 และ 2.62 ตามลำดับ รวมทั้งมีความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (desirability) เท่ากับ 0.972





**ภาพที่ 3** กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติของปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ BD ต่อปริมาณ (a) TPC, (c) TFC, (e) TAC, (i) FRAP และ (j) ABTS<sup>•+</sup> สำหรับ (b) และ (d) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ BC ต่อปริมาณ TFC และ TAC ตามลำดับ ในขณะที่ (f) และ (k) คือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ CD ต่อปริมาณ TAC และ ABTS<sup>•+</sup> ตามลำดับ ส่วน (g) และ (h) คือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ AC และ AD ต่อปริมาณ FRAP ตามลำดับ

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธี RSM ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ CCD เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> จากมันเทศสีม่วง พบว่าตัวแปรต้นที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) มีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>•+</sup> แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อยู่ในช่วง 4.72 - 6.27 mg GAE/g PSPP, 4.34-6.79 mg RE/g PSPP, 1.03-1.45 mg CGE/g

PSPP, 8.73-11.38 และ 2.61-4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cai และคณะ [19] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP จากมันเทศสีม่วง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดประกอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 90 นาที ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 80 และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 9.55 mg GAE/g PSPP, 0.41 mg quercetin equivalents/g PSPP, 2.17 mg CGE/g PSPP และ 12.99 mg TE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่ Rodríguez-Mena และคณะ [20] ได้สกัดสาร TPC และ TFC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมประกอบด้วยพีเอช 2.5 แอมพลิจูด (amplitude) ร้อยละ 60 และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 10 นาที สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้ปริมาณเท่ากับ 21 mg GAE/g PSPP และ 9.76 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าการวิจัยในครั้งนี้ทั้งนี้ปริมาณสารและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบมันเทศสีม่วง ตัวทำละลายและความเข้มข้นที่ใช้ในการสกัด วิธีการสกัดสาร ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน หลังจากที่ได้ข้อมูลจากการทดลองทั้ง 30 การทดลอง ให้นำข้อมูลมาตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสม เพื่อนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองสำหรับใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> พบว่าข้อมูลที่ได้มีคุณภาพและความเหมาะสม เนื่องจากเป็นไปตามสมมติฐาน คือ (1) ส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ (2) ข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน และ (3) ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน เมื่อตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสมของข้อมูลแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากผลสรุปทางสถิติเพื่อเลือกรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> รวมทั้งใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับผลตอบสนอง โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่าแบบจำลองกำลังสองเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับผลตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า  $R^2$  ของแบบจำลองอยู่ในช่วง 0.9793-0.9887 ซึ่งมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1.0 [21, 22] เมื่อได้รูปแบบของแบบจำลองแล้ว นำมาตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าโมเดล (model) และค่าความสมรูป (lack of fit) พบว่าแบบจำลองมีคุณภาพและความเหมาะสมเป็นแบบจำลองที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากโมเดลมีค่า  $p < 0.05$  และความสมรูปมีค่า  $p > 0.05$  สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [23] พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือ โมเดลต้องมีค่า  $p < 0.05$  ในขณะที่ความสมรูปมีค่า  $p > 0.05$  ส่วนการตรวจสอบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> จะพิจารณาจากค่า  $R^2$  และ adjusted  $R^2$  ซึ่งอยู่ในช่วง 0.9793-0.9887 และ 0.9599-0.9782 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำต้องมีค่า  $R^2$  และ adjusted  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากที่สุด [21, 22] และมีค่า C.V. (%) ไม่ควรเกินร้อยละ 10 ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่า C.V. (%) อยู่ในช่วงร้อยละ 1.12-2.43 สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> มีความแม่นยำสูง น่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้ [22] เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย กับค่าตอบสนอง พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงจาก 20 เป็น 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อตัวอย่างเป็นปัจจัยที่มีสำคัญต่อการสกัด เนื่องจากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชส่วนใหญ่จะสกัดออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยปริมาตรของตัวทำละลายที่เหมาะสม การใช้ตัวทำละลายในปริมาณที่น้อยเกินไปจะส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ของสารเป้าหมาย ในทางกลับกันการใช้ตัวทำละลายที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดของเสียที่ไม่จำเป็น [24] โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอัตราส่วนน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงที่ 20 - 60 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง สามารถสกัดได้สาร TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>+</sup> สูงที่สุด เนื่องจากปริมาตรของตัวทำละลายในอัตราส่วนนี้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวทำละลายกับมันเทศสีม่วง ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสาร และเพิ่มการละลายของสารออกมาสู่ตัวทำละลาย ทำให้สาร TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดจากมันเทศ





สีม่วงได้ในปริมาณมากขึ้น [15] ซึ่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้ที่ถูกสกัดออกมาในปริมาณมากจะสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>++</sup> ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhu และคณะ [6] พบว่า TPC จากมันเทศสีม่วงที่สกัดได้ประกอบด้วยสาร quinic acid, chlorogenic acid, caffeic acid และ chlorogenic acid-3-glucose ในขณะที่ TAC ประกอบด้วย Peonidin-3-sophoroside-5-glucoside, Peonidin-3-p-hydroxybenzoyl sophoroside-5-glucoside, Peonidin-3-(6"-feruloyl sophoroside)-5-glucoside และ Peonidin-3-caffeoyl-p-hydroxybenzoyl sophoroside-5-glucoside สารเหล่านี้มีรายงานว่ามียฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี ทั้งนี้อัตราส่วนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดพืชและวิธีการสกัด ตัวอย่างเช่น Sai-Ut และคณะ [15] ได้ศึกษาการสกัดสาร TPC จากเมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ พบว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณเอทานอลต่อตัวอย่าง (เมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ) เท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อกรัมตัวอย่างสามารถสกัด TPC ได้ปริมาณเท่ากับ 11.59 และ 14.55 mg GAE/g ตามลำดับ ส่วน Wang และคณะ [25] ได้สกัดสาร TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่ากับ 15 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 2.77 mg CGE/g PSPP และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่า IC<sub>50</sub> เท่ากับ 0.089 µg/mL ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากร้อยละ 0.2 เป็น 0.5 ช่วยเพิ่มการสกัดสาร TPC และ TAC จากมันเทศสีม่วง และเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ยกเว้น TFC และ ABTS<sup>++</sup> โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.2-0.6 พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 0.5 สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้สูงสุด เนื่องจากพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารแอนโทไซยานิน โดยที่พีเอชต่ำ (พีเอช 1-4) สารแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูป flavylum cations แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของ flavylum cations ลดลง ส่งผลให้โครงสร้างของสารแอนโทไซยานินไม่เสถียรเปลี่ยนจาก flavylum cation ซึ่งมีสีแดงในสารละลายที่เป็นกรดไปอยู่ในรูปของ chalcone ที่ไม่มีสี [20] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [26] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าสาร TAC ที่สกัดได้จะมีความคงตัวที่พีเอชเป็นกรดมากกว่าพีเอชเป็นกลางและเบส และเมื่อใช้ตัวทำละลายเอทานอลที่มีสภาพเป็นกรด (พีเอช 2) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ทำให้สามารถสกัดสาร TAC ได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.31 mg CGE/g PSPP ในขณะที่ Zhu และคณะ [6] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC และ TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าการปรับพีเอชของตัวทำละลายเอทานอลจากพีเอช 1 เป็น 2.5 มีผลทำให้สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ 3.877 mg GAE/g PSPP และ 0.293 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ส่วน Ryu และ Koh [27] ได้สกัดสาร TPC และ TAC จากถั่วดำ (*Glycine max* [L.] Merr. Cheongja4ho) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็นร้อยละ 0.359 มีผลทำให้สามารถสกัดสาร TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS<sup>++</sup> ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เท่ากับ 11.97 mg GAE/g, 1.37 mg CGE/g และ 2.11 mg TE/g ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 1 เป็น 4 ชั่วโมง ส่งผลให้การสกัด TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 1-5 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาของการสกัดที่เหมาะสมเท่ากับ 4 ชั่วโมง สามารถสกัดสาร TPC, TFC และ TAC ได้สูงสุด เนื่องจากระยะเวลาของการสกัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่อยู่ในมันเทศสีม่วงเกิดการแพร่หรือการถ่ายโอนมวลสารได้ยาวนานขึ้น ส่งผลให้สาร TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดและแพร่ออกมาในตัวทำละลายได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ระยะเวลาในการสกัด 5 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดออกมาน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [24] พบว่าการเพิ่มระยะเวลาจาก 30 เป็น 90 นาที สำหรับการสกัดสารไตรเทอร์พีนอยด์ทั้งหมด (total triterpenoid content, TTC) จากใบพลับ ทำให้สกัดสาร TTC ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากร้อยละ 6.09 เป็น 7.31 ในขณะที่การใช้ระยะเวลาของการสกัดให้นานขึ้น (120 นาที) ส่งผลให้ปริมาณ TTC ลดน้อยลง เนื่องจากการสลายตัวของสารเป้าหมาย [24] ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจาก 20 เป็น 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การสกัดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 20-60

องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสาร TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS<sup>++</sup> สูงสุด เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ (diffusion rate) การย่อยสลายโครงสร้างเนื้อเยื่อพืช (degradation of plant matrix) การแทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช (penetration) และประสิทธิภาพของการละลาย (solubility) ของสารเพิ่มสูงขึ้น [6] สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Fan และคณะ [28] ได้สกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจาก 40 เป็น 80 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสารได้ปริมาณเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.58 mg CGE/g PSPP ส่วน Huang และคณะ [23] ได้สกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 64 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 1.58 mg CGE/g PSPP ส่วน Ilaiyaraja และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดสาร TPC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS<sup>++</sup> จากมะขวิด (*Feronia limonia*) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 29.16 เป็น 49.70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การสกัดสาร TPC (7.21 mg GAE/g) และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS<sup>++</sup>) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 81.60 และ 85.20 ตามลำดับ ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองเท่ากับ 0.972 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zainol และคณะ [21] ได้รายงานว่าการเลือกสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดีที่สุดควรมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองเข้าใกล้ 1

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TAC จากมันเทศสีม่วง และ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS<sup>++</sup> ด้วยตัวทำละลายน้ำที่มีสภาพเป็นกรดร่วมกับการวางแผนการทดลองด้วยวิธี CCD สำหรับ RSM พบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วง โดยมีสภาวะของการสกัดที่เหมาะสมประกอบด้วย A เท่ากับ 50.0 มิลลิลิตรต่อกรัมผงมันเทศสีม่วง, B เท่ากับร้อยละ 0.5, C เท่ากับ 4.0 ชั่วโมง และ D เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถสกัดได้ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS<sup>++</sup> สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าร้อยละความผิดพลาดเท่ากับร้อยละ 0.64-2.62 ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้องค์ความรู้นี้ไปพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำสารสกัดที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในทางเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไปในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 (FF2567/1) และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

### เอกสารอ้างอิง

1. Wu Q, Qu H, Jia J, Kuang C, Wen Y, Yan H, et al. Characterization, antioxidant and antitumor activities of polysaccharides from purple sweet potato. *Carbohydr Polym* 2015;132:31-40.
2. Tang C, Han J, Chen D, Zong S, Liu J, Kan J, et al. Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins. *Food Biosci* 2023;53:102670.
3. Yong H, Wang X, Sun J, Fang Y, Liu J, Jin C. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. *Int J Biol Macromol* 2018;120:1632-8.



4. Torres A, Noriega LG, Delgadillo-Puga C, Tovar AR, Navarro-Ocana A. Caffeoylquinic acid derivatives of purple sweet potato as modulators of mitochondrial function in mouse primary hepatocytes. *Molecules* 2021;26(2):319.
5. Wang A, Li R, Ren L, Gao X, Zhang Y, Ma Z, et al. A comparative metabolomics study of flavonoids in sweet potato with different flesh colors (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). *Food Chem* 2018;260:124-34.
6. Zhu Z, Guan Q, Koubaa M, Barba FJ, Roohinejad S, Cravotto G, et al. HPLC-DAD-ESI-MS<sup>2</sup> analytical profile of extracts obtained from purple sweet potato after green ultrasound-assisted extraction. *Food Chem* 2017;215:391-400.
7. Tang C, Sun J, Zhou B, Jin C, Liu J, Kan J, et al. Effects of polysaccharides from purple sweet potatoes on immune response and gut microbiota composition in normal and cyclophosphamide treated mice. *Food Funct* 2018;9(2):937-50.
8. de Aguiar Cipriano P, Kim H, Fang C, Paula Venancio V, Mertens-Talcott SU, Talcott ST. In vitro digestion, absorption and biological activities of acylated anthocyanins from purple sweet potatoes (*Ipomoea batatas*). *Food Chem* 2022;374:131076.
9. Lim S, Xu J, Kim J, Chen TY, Su X, Standard J, et al. Role of anthocyanin-enriched purple-fleshed sweet potato p40 in colorectal cancer prevention. *Mol Nutr Food Res* 2013;57(11):1908-17.
10. Yang Y, Zhang Z, Zhou Q, Yan J, Zhang J, Su G. Hypouricemic effect in hyperuricemic mice and xanthine oxidase inhibitory mechanism of dietary anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *J Funct Foods* 2020;73:104151.
11. Cai Z, Song L, Qian B, Xu W, Ren J, Jing P, et al. Understanding the effect of anthocyanins extracted from purple sweet potatoes on alcohol-induced liver injury in mice. *Food Chem* 2018;245:463-70.
12. Yang Y, Zhang JL, Shen LH, Feng LJ, Zhou Q. Inhibition mechanism of diacylated anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) against  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase. *Food Chem* 2021;359:129934.
13. Qin S, Sun D, Mu J, Ma D, Tang R, Zheng Y. Purple sweet potato color improves hippocampal insulin resistance via down-regulating SOCS3 and galectin-3 in high-fat diet mice. *Behav Brain Res* 2019;359:370-7.
14. ละอองศรี ศิริเกษร, สุขาดา บุญเลิศนิรันดร์, วชิรญา เหลียวตระกูล. การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและผลผลิตของมันเทศ 6 พันธุ์. *วารสารวิจัย มทร. ศรีวิชัย* 2561;10(3):411-23.
15. Sai-Ut S, Kingwascharapong P, Mazumder MAR, Rawdkuen S. Optimization of extraction of phenolic compounds and antioxidants from passion fruit and rambutan seeds using response surface methodology. *J Agr Food Res* 2023;14:100888.
16. สุพิชญา คำคม. ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งมันเทศสีม่วงต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว. *ววบ* 2563;25(2):664-79.
17. Shao YXF, Sun X, Bao J, Beta T. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.). *J Cereal Sci* 2014;59(2):211-8.



18. Kubola J, Siriamornpun S, Meeso N. Phytochemicals, vitamin C and sugar content of Thai wild fruits. Food Chem 2011;126(3):972-81.
19. Cai Z, Qu Z, Lan Y, Zhao S, Ma X, Wan Q, et al. Conventional, ultrasound-assisted, and accelerated-solvent extractions of anthocyanins from purple sweet potatoes. Food Chem 2016;197:266-72.
20. Rodríguez-Mena A, Ochoa-Martínez LO, González-Herrera SM, Rutiaga-Quinones OM., González-Laredo RF, Olmedilla-Alonso B, et al. Coloring potential of anthocyanins from purple sweet potato paste: Ultrasound-assisted extraction, enzymatic activity, color and its application in ice pops. Food Chemistry Advances 2023;3:100358.
21. Zainol N, Aziz NH, Baharudin AS. Influence of agitation and solvent percentage on the extraction of phytochemical compound from *Asystasia gangetica*. Food Chemistry Advances, 2023;3:100538.
22. Zhang S, Xie H, Huang J, Chen Q, Li X, Chen X, et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from pine needles (*Pinus elliottii*): Comprehensive insights from RSM optimization, antioxidant activity, UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS analysis and kinetic model. Ultrason Sonochem 2024;102:106742.
23. Huang H, Xu Q, Belwal T, Li L, Aalim H, Wu Q, et al. Ultrasonic impact on viscosity and extraction efficiency of polyethylene glycol: A greener approach for anthocyanins recovery from purple sweet potato. Food Chem 2019;283:59-67.
24. Nguyen HV, Le NT, Le NTN, Duong TD, Le TT, Nguyen HTT, et al. Extraction, purification, and evaluation of bioactivities of total triterpenoids from Persimmon (*Diospyros kaki* L.f.) leaves. Process Biochem 2024;139:70-80.
25. Wang F, Zhang S, Deng G, Xu K, Xu H, Liu J. Extracting total anthocyanin from purple sweet potato using an effective ultrasound-assisted compound enzymatic extraction technology. Molecules 2022;27(14):4344.
26. Liu W, Yang C, Zhou C, Wen Z, Dong X. An improved microwave-assisted extraction of anthocyanins from purple sweet potato in favor of subsequent comprehensive utilization of pomace. Food Bioprod Process 2019;115:1-9.
27. Ryu D, Koh E. Application of response surface methodology to acidified water extraction of black soybeans for improving anthocyanin content, total phenols content and antioxidant activity. Food Chem 2018;261:260-6.
28. Fan G, Han Y, Gu Z, Chen D. Optimizing conditions for anthocyanins extraction from purple sweet potato using response surface methodology (RSM). LWT-Food Sci Technol 2008;41(1):155-60.
29. Ilaiyaraja N, Likhith KR, Babu GRS, Khanum F. Optimisation of extraction of bioactive compounds from *Feronia limonia* (wood apple) fruit using response surface methodology (RSM). Food Chem 2015;173:348-54.