



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

The Study of Optimum Conditions for Hot Air Drying of *Spirogyra* sp. Using Response Surface Methodology

ฤทธิชัย อัสวราชันย์^{1*}, นภาพน ไชยลังกา¹

Rittichai Assawarachan^{1*}, Namphon Chailungka¹

¹คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่ 50290

¹Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-1792-0946, Fax: +66-53-878-113, E-mail: rittichai.assawarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการอบแห้งสาหร่ายเตาจากความชื้นเริ่มต้น $8.55 \pm 0.20 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ จนเหลือความชื้นสุดท้าย $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ในงานวิจัยนี้หาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่ให้ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (TCD) ต่ำ ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH สูง โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิอากาศ ($60\text{-}75^{\circ}\text{C}$) ความเร็วลม ($1.0\text{-}2.0 \text{ m s}^{-1}$) และชั้นความหนาของตัวอย่าง ($0.2\text{-}0.4 \text{ mm}$) จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธี RSM ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลม 1.60 m s^{-1} และชั้นความหนา 3.05 mm โดยสภาวะที่ได้จากการทำนายให้ค่าความแตกต่างสีโดยรวม เท่ากับ 16.92 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH มีค่าเท่ากับ $2,502.02 \text{ mg GAE } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$, $2,017.40 \text{ mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ และ $3,722.50 \text{ mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ตามลำดับ

คำสำคัญ: สาหร่ายเตา, การอบแห้งด้วยลมร้อน, สารประกอบฟีนอลิก

Abstract

The aim of this research was to optimize the drying process of *Spirogyra* sp. undergoing a laboratory-scale hot air drying from $8.55 \pm 0.20 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ to $0.15 \pm 0.01 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$. Response surface methodology (RSM) was used to determine the optimized conditions of drying of *Spirogyra* sp. for a minimum total color difference (TCD) while maximizing total phenolic content, antioxidant activity of scavenging activity of ABTS radical and DPPH radical. Optimization factors were air temperature ($60\text{-}75^{\circ}\text{C}$), air velocity ($1.0\text{-}2.0 \text{ m s}^{-1}$) and layer thickness ($0.2\text{-}0.4 \text{ mm}$). By using the RSM technique found that the most ideal conditions for hot air drying of *Spirogyra* sp. was a temperature of 69.57°C with an air velocity of 1.60 m s^{-1} and material thickness of 3.05 mm . These conditions produced a total color difference value of 16.92, a total phenolic content equal to $2,502.02 \text{ mg GAE } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$, an antioxidant activity of scavenging activity of ABTS radical and DPPH radical value of 2,017.40 and 3,722.50 mg TEAC $100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$, respectively.

Keywords: *Spirogyra* sp., Hot air drying, phenolic content

1 บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมากระแสในเรื่องความห่วงใยสุขภาพ การป้องกันและการรักษาอาการเจ็บป่วยกำลังเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก ปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสนใจในการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติมารับประทานหรือเพื่อใช้บำรุงรักษาสุขภาพ รวมทั้งการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพ

และเครื่องสำอางที่ผลิตจากวัตถุดิบตามธรรมชาติมากขึ้น มีสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวหลายชนิดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีผู้ให้ความสนใจและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือ สาหร่ายเตา ชื่อสามัญว่า “เตา” หรือ “เทา” และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Spirogyra* sp. เป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (ฐิติกานต์, 2550) มี

ลักษณะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง คล้ายเส้นผมสีเขียวสด พบมากในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ธีระวัฒน์ และคณะ, 2555) สหราชอาณาจักรมูลค่าทางโภชนาการสูงประกอบด้วยโปรตีน 18.63% ไขมัน 5.21% คาร์โบไฮเดรต 56.31% เส้นใย 7.66% เกล็ด 11.78% มีแร่ธาตุ วิตามิน และรงควัตถุหลายชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี เบต้าแคโรทีน แซนโทฟิล (สรณัฏ และ ยุติ, 2552) ด้านเภสัชวิทยาพบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ระงับการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร การหดเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบ ขยายหลอดลม ด้านการอักเสบ ระงับปวด และลดความดันโลหิต (ยุติ และคณะ, 2555; ดวงพร และคณะ, 2555) จากคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพดังกล่าวจึงทำให้สาหร่ายเตาได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางรวมทั้งผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากสาหร่ายเตา อย่างไรก็ตามสาหร่ายเตามีข้อจำกัด คือ มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นและเน่าเสียง่าย ดังนั้นจึงนิยมนำสาหร่ายเตามาอบแห้งเพื่อเก็บไว้ทำการแปรรูปและการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในภายหลัง

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้อาหารมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยลดความชื้นให้มีค่าต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2554; สักกมน, 2555) การอบแห้งอาหารด้วยลมร้อน (Hot air drying) เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติงานและเป็นกระบวนการแปรรูปที่ควบคุมได้ง่าย และไม่ซับซ้อนรวมทั้งยังมีต้นทุนในการดำเนินงานที่ต่ำ การอบแห้งถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของอาหาร ทั้งนี้การพัฒนากระบวนการอบแห้งให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพที่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design: BBD) ซึ่งเป็นวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้ง โดยการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างสมการพหุนามเพื่อทำนายค่าผลตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตา

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างสาหร่ายเตาที่นำมาศึกษาเก็บมาจากบ้านนาคูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ซึ่งทำการพิสูจน์เอกลักษณ์แล้วว่าเป็นชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (ฐิติกันต์, 2550) โดยเก็บตัวอย่างสาหร่ายจำนวน 100

kg นำมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปบรรจุในถุงซิปล็อคเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -18°C เมื่อทำการทดลองอบแห้งนำสาหร่ายแช่เยือกแข็งมาละลายโดยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C จนน้ำแข็งละลายออกจนหมด จากนั้นนำสาหร่ายเตาเข้าเครื่องหมนเหวี่ยง (Wasino model: CE03) เพื่อไล่น้ำออก แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้สาหร่ายเตาเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ก่อนนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป (ปองพล และคณะ, 2556) การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นโดยชั่งตัวอย่างสาหร่ายเตา 2.5 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz จำนวน 60 ตัวอย่าง ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Mettler model: 500/108I) ที่อุณหภูมิ $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr (AOAC, 2010) แล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (Sartorius model: CP 3202S) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาความชื้น

2.2 การออกแบบการทดลองและการหาสภาวะที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้อาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box Behken design: BBD) สำหรับ 3 ปัจจัย อาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลอง โดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแสดงดัง Eq. (1) (Zafer and Filiz, 2009; Montgomery, 2006; ภาณุวิชา และคณะ, 2555; สมเกียรติ และ ภูมินทร์, 2554)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ และ X_i คือ ตัวแปรต้น ปัจจัยที่ต้องการศึกษาในกระบวนการอบแห้งสาหร่ายเตาประกอบไปด้วยอุณหภูมิในการอบแห้ง (X_1) ความเร็วลม (X_2) และชั้นความหนา (X_3) โดยมีระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) กลาง (0) และสูง (1) ดังแสดงรายละเอียดของตัวแปรต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองใน Table 1 ซึ่งค่าตัวแปรต้นเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary) และตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความแตกต่างสีโดยรวม (Y_1) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_2) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y_3) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y_4)

Table 1 The independent variables used in the optimization study.

Independent variables	Coded	Coded variables		
		-1	0	+1
Temperature (°C)	X_1	65	70	75
Velocity (m/s)	X_2	1.0	1.5	2.0
Thickness (mm)	X_3	2.0	3.0	4.0

2.3 การอบแห้งด้วยลมร้อน

งานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดที่ออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้า ขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ชุด และพัดลมระบายอากาศซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (PANASONIC model: DVUS-940W1) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TOHO model: TTM J4/J5) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาข่ายระบบดิจิทัล สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของสาหร่ายเตา ทำการบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน นำตัวอย่างสาหร่ายเตาที่มีความหนาแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2, 3, 4 mm เกลี่ยในถาดตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 20×20 cm จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 65, 70, 75°C และ 1.0, 1.5, 2.0 m s⁻¹ ทำการอบแห้งสาหร่ายเตาทุกสภาวะจนเหลือความชื้น 0.15±0.01 g_{water} g_{dry matter}⁻¹ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องลดขนาดแบบค้อนก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

2.4 การวิเคราะห์ค่าสี

นำสาหร่ายเตาอบแห้งและสาหร่ายเตาสดมาวัดสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (HunterLab model: MiniScan XE PLUS) เพื่อวัดค่าความสว่าง/ความมืด (Lightness/Darkness: L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (Redness/Greenness: a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (Yellowness/Blueness: b^*) จากนั้นนำค่าสีที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (Total color difference: TCD) โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงใน Eq. (2)

$$TCD = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (2)$$

เมื่อ L^* , a^* และ b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตาหลังการอบแห้ง และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของสาหร่ายเตาสด

ค่า TCD เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงคุณภาพการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของค่า L^* , a^* , b^* และถูกใช้การประเมินคุณภาพสีของสาหร่ายเตาถูกนำเสนอในรูปของค่า TCD เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงค่า Degree of browning ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพจากปฏิกิริยา Enzymatic browning และ Maillard reaction และเป็นค่าคุณภาพที่สำคัญที่ใช้เปรียบเทียบกับคุณภาพสีของสาหร่ายเตาที่คั้นตัวเมื่อมีการดูดซับน้ำกลับ (Jangam et al., 2010)

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เตรียมสาหร่ายเตาอบแห้งที่ผ่านการบดจำนวน 0.5 g ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 5 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min นำสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตามาทดสอบโดยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการของ Sachindra et al. (2010) ดังนี้ใช้ตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ละลายในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 10 mg ml⁻¹ จำนวน 0.2 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้น 10% จำนวน 1 ml และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ความเข้มข้น 7.5% จำนวน 0.8 ml ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 hr ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอ่านค่าจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) รายงานผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE 100 g_{dry matter}⁻¹)

2.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระวิธี Scavenging activity of ABTS radical

นำสาหร่ายเตาอบแห้งที่ผ่านการบด ชั่งน้ำหนักแห้งประมาณ 0.5 g เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 10 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min ดูดตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาไว้ การทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระวิธี ABTS ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Re et al. (1999) ดังนี้ เตรียมสาร ABTS [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] ที่มีความเข้มข้น 7 mM ปริมาตร 5 ml และสาร potassium persulfate (K₂S₂O₈) ที่มีความเข้มข้น 140 mM ปริมาตร 88 ml จากนั้นผสมสารละลาย 7 mM ABTS และ 140 mM K₂S₂O₈ ในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 16 hr ที่อุณหภูมิห้อง จะได้ ABTS radical cation stock solution หลังจากนั้นทำการเจือจาง ABTS radical cation stock solution ด้วยน้ำกลั่นให้ค่าดูดกลืนแสงที่ 734 nm เท่ากับ 0.700±0.020 เติมสารละลาย ABTS radical cation ปริมาตร 1 ml ลงในหลอดทดลองและใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม จากนั้นเติมตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตา ความเข้มข้น 1 mg ml⁻¹ ปริมาตร 10 µl ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 min จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %inhibition หรือการยับยั้งอนุมูลอิสระดัง Eq. (3) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้าน

อนุมูลอิสระ ABTS ของสารห่วยเตาที่สภาวะต่างๆ เทียบกับความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของวิตามินอี หรือเรียกว่าค่า TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ($\text{mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$)

$$\%inhibition = \left[\frac{A_{734 \text{ control}} - A_{734 \text{ test sample}}}{A_{734 \text{ control}}} \right] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ $A_{734 \text{ control}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม และ $A_{734 \text{ test sample}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ

2.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity

วิธี DPPH radical scavenging ดัดแปลงมาจาก Hou et al. (2001) ดังนี้ ทำการเจือจาง DPPH radical ด้วยเอทานอลให้ค่า

ดูดกลืนแสงที่ 517 nm เท่ากับ 1.40 ± 0.05 นำสารห่วยเตาอบแห้งที่ผ่านการบด จำนวน 0.5 g ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 10 ml ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 10 min แล้วดูดตัวอย่างสารสกัดน้ำของสารห่วยเตา ความเข้มข้น 0.1 mg ml^{-1} ปริมาตร 0.6 ml ลงในหลอดทดลอง เติมสาร 1 M Tris-HCl buffer (pH=7.9) ปริมาตร 0.2 ml และเติม 5 mM DPPH ในเอทานอลปริมาตร 1.2 ml ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืด 20 min วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %inhibition ตาม Eq. (3) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารห่วยเตาอบแห้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ($\text{mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$)

Table 2 The experimental data for the response surface analysis.

run	Coded			response			
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	65 (-1)	1.0 (-1)	3 (0)	21.96	1,508.35	1,617.73	3,287.86
2	75 (+1)	1.0 (-1)	3 (0)	24.82	1,626.09	1,483.44	3,112.50
3	65 (-1)	2.0 (+1)	3 (0)	20.01	1,466.10	1,686.38	3,432.91
4	75 (+1)	2.0 (+1)	3 (0)	22.75	1,654.72	1,564.22	3,334.83
5	65 (-1)	1.5 (0)	2 (-1)	20.64	1,505.19	1,488.15	3,484.15
6	75 (+1)	1.5 (0)	2 (-1)	22.25	1,670.45	982.93	3,334.83
7	65 (-1)	1.5 (0)	4 (+1)	21.32	1,605.55	1,659.11	3,154.56
8	75 (+1)	1.5 (0)	4 (+1)	22.97	1,692.30	1,429.51	3,031.66
9	70 (0)	1.0 (-1)	2 (-1)	21.61	1,774.43	1,327.70	3,334.83
10	70 (0)	2.0 (+1)	2 (-1)	19.55	1,864.99	1,583.46	3,536.94
11	70 (0)	1.0 (-1)	4 (+1)	22.13	1,832.02	1,342.78	3,112.50
12	70 (0)	2.0 (+1)	4 (+1)	21.02	2,075.01	1,762.27	3,334.83
13	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	17.91	2,597.14	2,039.11	3,697.38
14	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	16.74	2,487.65	1,927.88	3,721.54
15	70 (0)	1.5 (0)	3 (0)	16.51	2,466.98	2,000.99	3,718.06

3 ผลและวิจารณ์

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสารห่วยเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธี RSM และใช้การทดลองแบบ BBD เพื่อเลือกระดับอุณหภูมิในการอบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมในการอบแห้งสารห่วยเตาที่ทำให้มีค่า TCD น้อยที่สุด ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่ามากที่สุด Table 2

แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของสารห่วยเตาอบแห้งที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง จากการทดลองพบว่าค่า TCD มีค่าอยู่ระหว่าง 16.51-24.82 ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH มีค่าอยู่ระหว่าง 1,466.10-2,597.14 $\text{mg GAE } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$, 982.93-2,039.11 $\text{mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ และ 3,031.66-3,721.54 $\text{mg TEAC } 100 \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ตามลำดับ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัย

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สมการการถดถอย (Regression equation) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$ พบว่าแบบจำลองโพลิโนเมียลลำดับที่สอง (Quadratic model) มีความเหมาะสมในการทำนายค่าการตอบสนองทุกค่าของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน

Figure 1 แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ (3D plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความหนาของชั้นวัสดุต่อค่า TCD พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า TCD ของสาหร่ายเตาอบแห้งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.01$) โดยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้มีค่า TCD มากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้แรงดึงดูดหรือสารให้สีถูกทำลายและเกิดการสลายตัวจากความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้เกิดการสูญเสียสี รวมทั้งมีการสลายตัวและมีการรวมตัวกันของหมู่จะมีในกับสารประกอบรีดิวซิง และพัฒนาการเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนเป็นสีน้ำตาล ในขณะที่การเพิ่มความเร็วลมในกระบวนการจะทำให้ค่า TCD ของสาหร่ายเตาอบแห้งมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการถ่ายเทมวลความชื้นและอากาศร้อนระหว่างตัวอย่างได้เร็วขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงช่วยให้สาหร่ายเตาลดการสัมผัสอากาศร้อนเป็นเวลานานที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ($p\text{-value} < 0.01$) เมื่อพิจารณาชั้นความหนาของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TCD อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) การทดลองสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับค่า TCD ได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงใน Table 3 โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีระดับนัยสำคัญ $p\text{-value} < 0.01$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R^2) เท่ากับ 0.9745

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH จากการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการ

ความสัมพันธ์ดังแสดงใน Eq. (5), (6) และ (7) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9860, 0.9145 และ 0.9912 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพื้นที่การตอบสนองได้ดัง Figure 2-4 ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากปริมาณความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้สารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่ไม่ทนความร้อนเกิดการสลายตัวในระหว่างการอบแห้ง และอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นมีผลต่อค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงโดยอาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูงเกินไป ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบเดียวกันโดยเป็นวิธีวัดสมบัติในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single electron transfer reaction) (ธนศักดิ์, 2552; Huang et al., 2005) ในขณะที่ผลของความเร็วมวลและความหนาของชั้นวัสดุไม่มีผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$)

Table 4 แสดงการกำหนดช่วงของแต่ละปัจจัยกับค่าการตอบสนองที่นำมาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน เมื่อนำช่วงของค่าการตอบสนองทุกค่ามาทำการหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อหาค่าปัจจัยที่ให้ค่าการตอบสนองดีที่สุด การวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อน คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลมร้อน 1.60 m s⁻¹ และความหนาของชั้นวัสดุ 3.05 mm โดยค่าที่ได้จากการทำนายให้ค่า TCD เท่ากับ 16.92 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 2,502.02 mg GAE 100 g_{dry matter}⁻¹ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH เท่ากับ 2,017.40 และ 3,722.50 mg TEAC 100 g_{dry matter}⁻¹

Table 3 Regression coefficients (based on coded data) of polynomial equations representing the relationship of the response and the independent variables.

Response	Model	R^2	Equation
Total color difference (TCD)	$Y_1 = 17.05 + 1.11X_1 - 0.90X_2 + 0.42X_3 - 0.029X_1X_2 + 0.010X_1X_3 + 0.24X_2X_3 + 3.03X_1^2 + 2.31X_2^2 + 1.72X_3^2$	0.9745	(4)
Total phenolic content (mg GAE 100 g _{dry matter} ⁻¹)	$Y_2 = 2,517.26 + 69.79X_1 + 39.99X_2 + 48.73X_3 + 17.72X_1X_2 - 19.63X_1X_3 + 38.11X_2X_3 - 610.84X_1^2 - 342.60X_2^2 - 288.04X_3^2$	0.9860	(5)
Antioxidant activity ABTS (mg TEAC 100 g _{dry matter} ⁻¹)	$Y_3 = 1,989.33 - 123.91X_1 + 103.08X_2 + 101.43X_3 + 3.03X_1X_2 + 68.91 X_1X_3 + 40.93X_2X_3 - 257.76X_1^2 - 143.63X_2^2 - 341.65X_3^2$	0.9145	(6)
Antioxidant activity DPPH (mg TEAC 100 g _{dry matter} ⁻¹)	$Y_4 = -46,422.17 + 1,367.38X_1 + 1,677.73X_2 + 1,030.08X_3 + 7.73X_1X_2 + 1.32 X_1X_3 + 10.11X_2X_3 - 9.98X_1^2 - 683.66X_2^2 - 211.64X_3^2$	0.9912	(7)

Table 4 The range determination of factor that affect the response to choose of the optimal conditions for hot air drying of *Spirogyra* sp.

Factors	Target value	Low level	High level
Temperature (°C)	In range	65	75
Velocity (m s ⁻¹)	In range	1.0	2.0
Layer thickness (mm)	In range	2.0	4.0
Total color difference (TCD)	Minimize	16.51	24.82
Total phenolic content (mg GAE 100 g _{dry matter} ⁻¹)	Maximize	1,466.10	2,597.14
Antioxidant activity ABTS (mg TEAC 100 g _{dry matter} ⁻¹)	Maximize	982.93	2,039.11
Antioxidant activity DPPH (mg TEAC 100 g _{dry matter} ⁻¹)	Maximize	3,031.66	3,721.54

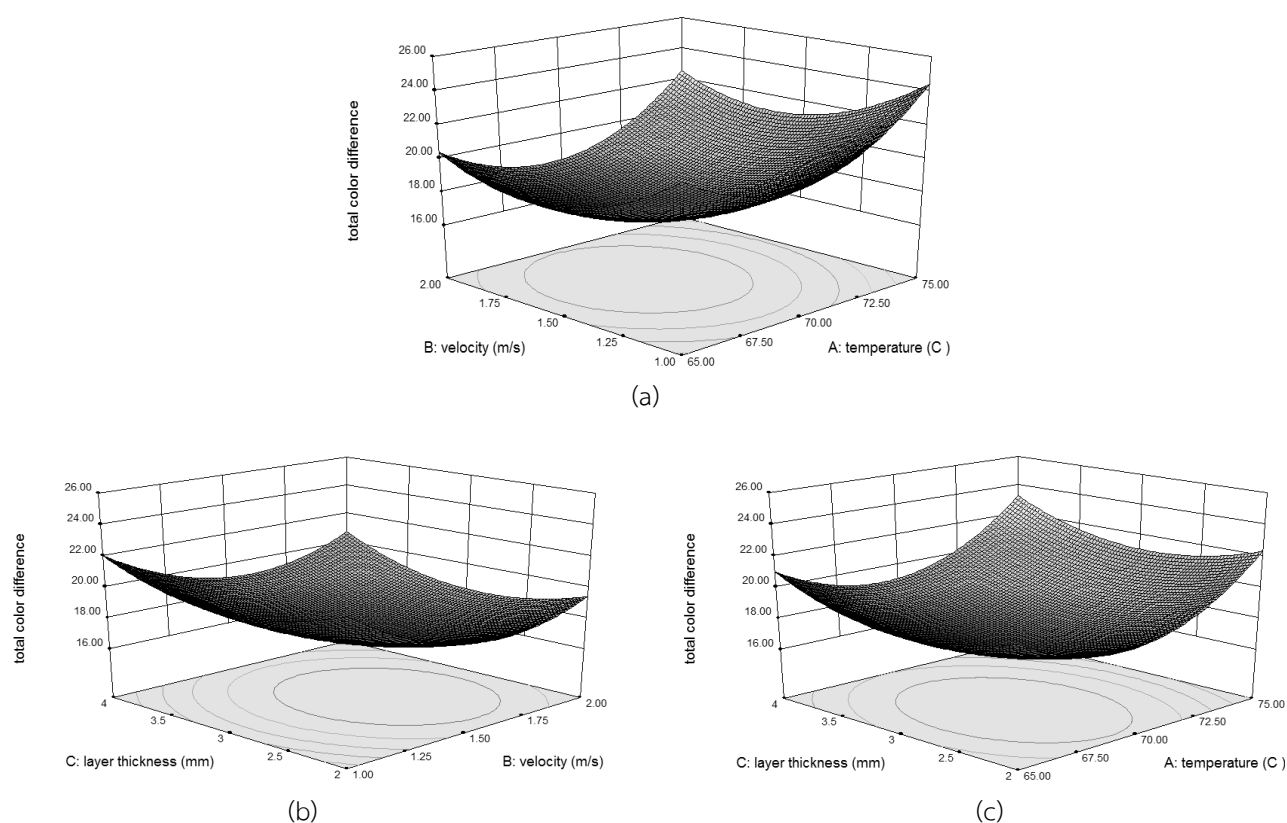


Figure 1 3D plot of total color difference as a function of; (a) temperature and velocity, (b) temperature and layer thickness, (c) velocity and layer thickness.

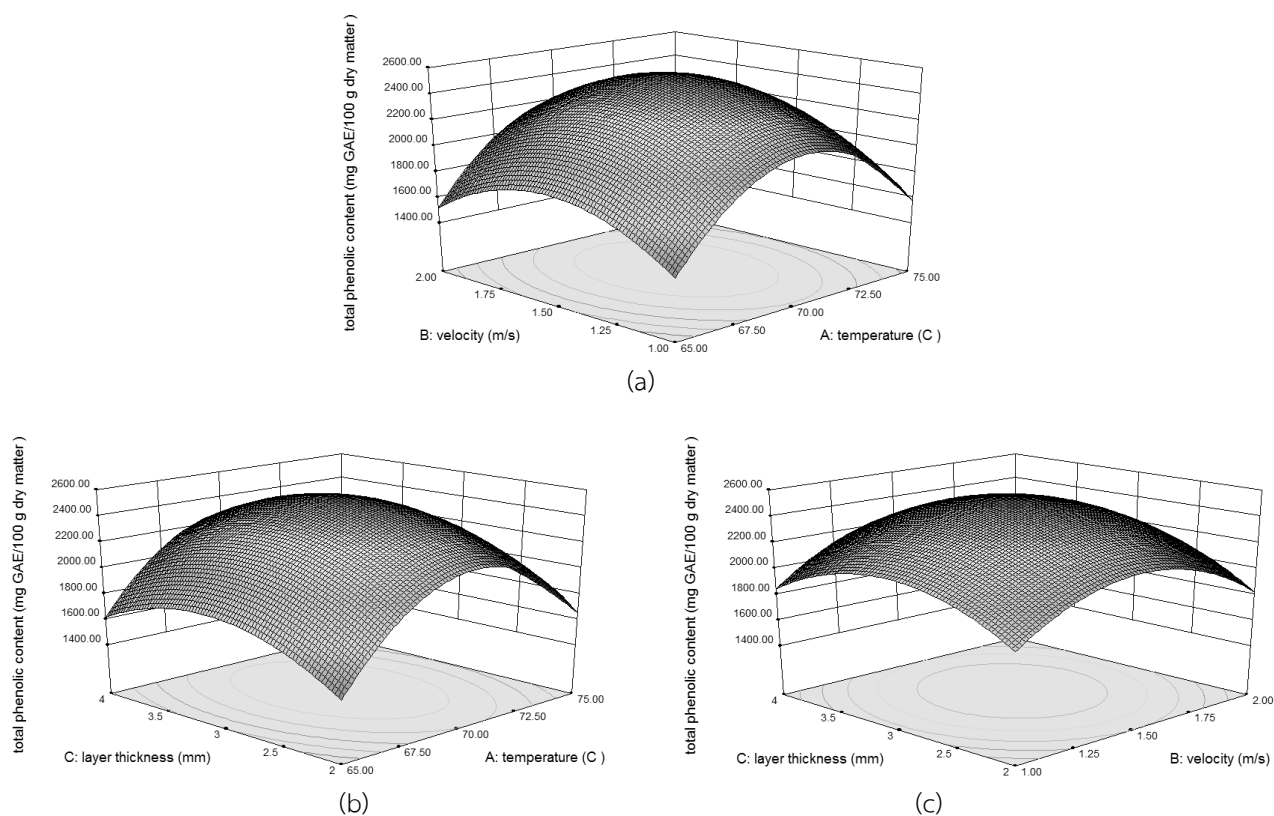


Figure 2 3D plot of total phenolic content as a function of; (a) temperature and velocity, (b) temperature and layer thickness, (c) velocity and layer thickness.

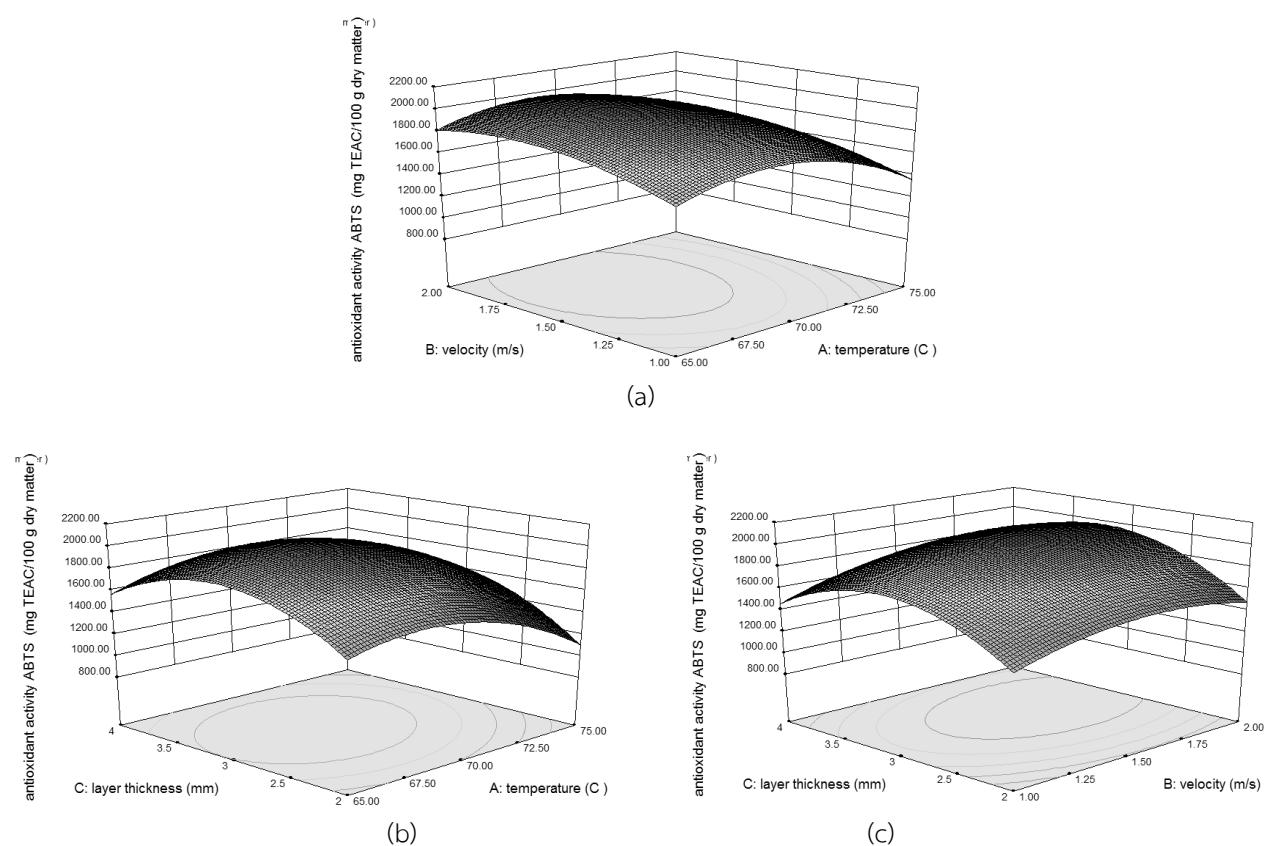


Figure 3 3D plot of antioxidant activity ABTS as a function of; (a) temperature and velocity, (b) temperature and layer thickness, (c) velocity and layer thickness.

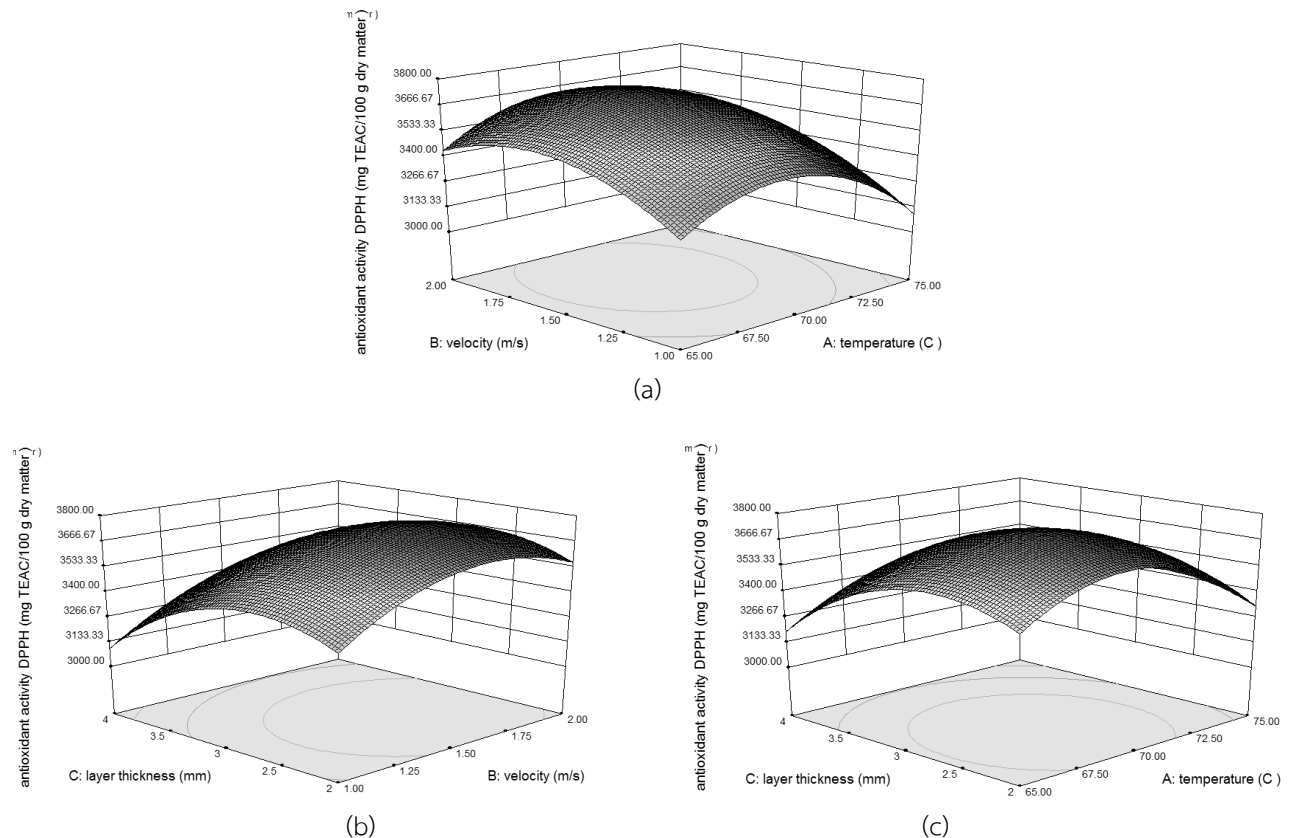


Figure 4 3D plot of antioxidant activity DPPH as a function of; (a) temperature and velocity, (b) temperature and layer thickness, (c) velocity and layer thickness.

4 สรุป

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เป็นวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อนเพื่อหาสภาวะที่ให้ค่า TCD ต่ำที่สุด ในขณะที่ให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH สูงที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถสร้างแบบจำลองโพลีโนเมียลลำดับที่สองสำหรับการทำนายค่าการตอบสนองของการอบแห้งสาหร่ายเตา จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งสาหร่ายเตาดด้วยลมร้อน คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 69.57°C ความเร็วลมร้อน 1.60 m s^{-1} และความหนาของชั้นวัสดุ 3.05 mm

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการงานวิจัยระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารได้รับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งและลดความชื้น คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

ฐิติกานต์ ปัญญาใหญ่. 2550. กิจกรรมต้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ดวงพร อมรเลิศพิศาล, กฤษณา ดวงจันทร์, ดวงตา กาญจนโพธิ์, รัชต์ แต่โสติกุล, ยุวดี พิรพรพิศาล. 2555.ฤทธิ์ปกป้องแผลกระเพาะอาหารของสาหร่ายเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มข 40(1), 236-241.

ธนศักดิ์ แซ่เลี้ยว. 2552. ผลของการทำแห้งต่อสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของกระชายเหลือง (*Boesenbergia pandurata* (Roxb.) Schltr.). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีระวัฒน์ รัตนพจน์, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน, ชุตินา ศรีมะเร็ง, รัตนภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและผลการเสริมสาหร่ายเตาต่อการเจริญเติบโตของปลานิลในกระชัง. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 6(2), 23-34.

ปองพล สุริยะกันธร, นักรบ นาคประสม, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง. Rajabhat Journal of Science, Humanities & Social Sciences 13(1), 1-8.

ภณิกษา วิชยปรีชา, บัญชา ยิ่งงาม, วันดี รังสิวิจิตรประภา. 2555. การหาสภาวะที่เหมาะสมของยาฟีนาสเตอไรด์ในรูปแบบโปรนีโอโซมด้วยวิธีตอบสนองพื้นผิว. รายงานการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานระดับชาติ ครั้งที่ 4 ประจำปี 2555, 105-

111. ขอนแก่น: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 11-12 กุมภาพันธ์ 2555, ขอนแก่น.
- ยุวดี พิรพรพิศาล, วิฑิตกานต์ ปัญญาใหญ่, ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555.ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบของสารห่วยเตา. วารสารวิทยาศาสตร์ มข 40(1), 228-235.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, ภาณุภณ แสงเจริญรัตน์, สุเนตร สืบคำ, เทียรณณ มิ่งมุล, ดวงกมล จินใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1), 27-34.
- สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, ภูมิรินทร์ แจ่มเชื้อ. 2554. การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบิ้ลนเคน. รายงานการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2554, 171-175. ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 20-21 ตุลาคม 2554, ธัญบุรี, ปทุมธานี.
- สรณัตร เทียมดาว, ยุวดี พิรพรพิศาล. 2552. ความหลากหลายของสารห่วยน้ำจืดกินได้ในแม่น้ำโขงและแม่น้ำน่าน. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 3(1), 115-124.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: ท้อป.
- Hou, W.C., Chen, Y.C., Lin, Y.H., Yang, L.L., Lee, M.H. 2001. Antioxidant activities of trypsin inhibitor a 33 kDa root storage protein of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam cv. Tainong 57. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49, 2,978-2,981.
- Huang, D., Ou, B., Prior, R.L. 2005. The chemistry behind dietary antioxidant capacity assays. Journal of Agricultural and Food Chemistry 3(6), 1,841-1,856.
- Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S. 2010. Drying of Food, Vegetables and Fruits. Chapter 6 : Product quality evolution during drying of food, vegetables and fruits. pp. 127-129.
- Montgomery, D.C. 2006. Design and analysis of experiments. New York: John Wiley & Son Asia.
- Re, R., Pellegrini, N., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evan, C. 1999. Antioxidant activity applying an improve ABTS radical cation decolorisation assay. Free Radical Bio Med 26, 1,231-1,237.
- Sachindra, N.M., Airanthi, M.K., Hosokaw W.A.M., Miyashita, K. 2010. Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of extracts from Indian seaweeds. Journal of Food Science Technology 47, 94-99.
- Zafer, E., Filiz, I. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. Journal of Food Engineering 91, 533-541.