



ผลของจลนพลศาสตร์การอบแห้งต่อคุณภาพของสาหร่ายชื้ออบแห้ง

Effect of Drying Kinetics on the Quality of

Dried *Gracilaria Salicornia* (C. Agardh) Dawson

วรรณพิชญ์ จุลกัลป์^{1*} และ ราม แย้มแสงสังข์²

Wannapit Junlakan^{1*} and Ram Yamsaengsung²

¹ สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ประเทศไทย

² สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

¹ Department of Innovative Technology for Renewable Energy, Faculty of Science and Technology,
Suratthani Rajabhat University, Thailand

² Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand

Received : 30 October 2023, Received in revised form : 1 February 2024, Accepted : 2 February 2024

Available online : 21 February 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : ชาวเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี นิยมนำสาหร่ายชื้อที่มีมากในช่วงฤดูกลางมาทำการลวกและแช่แข็งเพื่อเก็บรักษาวัตถุดิบก่อนนำไปแปรรูปโดยวิธีทำแห้ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของจลนพลศาสตร์การอบแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายชื้ออบแห้ง

วิธีดำเนินการวิจัย : การทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน 6 วิธี คือ วิธีการอบแห้งแบบสูญญากาศ (VD) การลวกก่อนนำไปอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบสูญญากาศ (B-VD) การแช่แข็งและตั้งทิ้งให้ละลายที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบสูญญากาศ (F-VD) อบแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อน (CD) การลวกก่อนนำไปอบแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อน (B-CD) และการแช่แข็งและตั้งทิ้งให้ละลายที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปอบแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อน (F-CD)

ผลการวิจัย : การอบแห้งด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการคืบตัวสูง การเปลี่ยนแปลงสีเทียบกับแบบสดน้อย ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งวิธีอื่น ดังนั้นการอบแห้งสาหร่ายชื้อด้วยวิธี VD 80 องศาเซลเซียส ถูกพิจารณาเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้ง

สรุปผลการวิจัย : การอบแห้งวิธี VD 80 องศาเซลเซียส จะใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสูงและค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ การแพร่ความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์สูงที่ระยะเวลาสั้นจะทำให้เกิดช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์มากขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับค่าการคืบตัวของผลิตภัณฑ์ที่สูง นอกจากนี้การอบแห้งที่ระยะเวลาสั้นส่งผลต่อการกักเก็บปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์สูง โดยแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมในการทำนายลักษณะการอบแห้งด้วยวิธี VD 80 องศาเซลเซียส คือ two-term exponential

คำสำคัญ : สาหร่ายชื้อ ; อบแห้งสูญญากาศ ; จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ; อัตราการคืบตัว ; โครงสร้างผลิตภัณฑ์



Abstract

Background and Objectives : People of Koh Samui in Surat Thani Province often bring *Gracilaria Salicornia* (C. Agardh) Dawson that is in large quantities during the season to be blanched and frozen to preserve raw materials before being processed by drying methods. The purpose of this research was to study the effect of drying kinetics on the physical and chemical quality of dried *Gracilaria Salicornia* (C. Agardh) Dawson.

Methodology : Drying experiments were carried out at drying temperatures of 60, 70 and 80°C using six different drying methods were a vacuum drying (VD), a blanching before (B-VD) vacuum drying, and a freezing and thawing at room temperature before vacuum drying (F-VD), a hot air drying (CD), a blanching before hot air drying (B-CD) and a freezing and thawing at room temperature before hot air drying (F-CD).

Main Results : VD at 80°C of algae showed more rehydration, less color change, higher total phenolic values, higher tannin values, and higher β -carotene values compared to other drying methods. Consequently, the VD at 80°C was suggested as the best drying condition.

Conclusions : VD at 80°C of algae showed shorter drying, higher values of the effective moisture diffusivity and lower values of activation energy. The high moisture diffusion at the short drying time creates a large amount of pores inside the product, which corresponds to a high rehydration ratio. Moreover, the short drying period resulted in the high retention of total phenolic compounds, tannins, chlorophyll A and β -carotene in the product. The suitable thin layer model for drying of algae with VD at 80°C was two-term exponential.

Keywords : *Gracilaria salicornia* (C. Agardh) Dawson ; vacuum drying ; drying kinetic ; rehydration ratio ; product structure

*Corresponding author. E-mail : wannapit.jun@sru.ac.th

บทนำ

สาหร่ายข้อจัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายทะเลสีแดง ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Gracilaria salicornia* (C. Agardh) Dawson ซึ่งอุดมด้วยสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแทนนิน เป็นต้น สารสกัดสาหร่ายข้อมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.39±0.75 และมีความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (IC50) เท่ากับ 5.86±0.07 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (Junlakan, 2022) ประเทศไทยพบสาหร่ายข้อในแถบชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ได้แก่ จังหวัดตราด ระยอง ชลบุรี สุราษฎร์ธานี และชายฝั่งทะเลอันดามัน ได้แก่ จังหวัดภูเก็ต (Phooprong *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2013) ปัจจุบันสาหร่ายข้อมีการนำมาแปรรูป

ค่อนข้างน้อยส่งผลให้ในช่วงฤดูกาลมีสาหร่ายซ้อเหลือทิ้งมากมาย ชาวเกาะสมุยนิยมนำสาหร่ายซ้อที่มีมากในช่วงฤดูกาลมาทำการลวกและแช่แข็งเพื่อเก็บรักษาวัตถุดิบไว้บริโภคภายหลัง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเก็บรักษาวัตถุดิบเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อการใช้สอยที่สำคัญและคุณค่าทางอาหาร การเตรียมวัตถุดิบขึ้นต้นโดยการลวกและแช่แข็งเป็นทางเลือกหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพของวัตถุดิบ การลวกเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาวัตถุดิบโดยใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร (Ngamdee *et al.*, 2019) นอกจากนี้การลวกในอุณหภูมิที่เหมาะสมยังมีส่วนช่วยยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีเขียวในสาหร่าย ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์คลอโรฟิลล์ทำให้สาหร่ายมีสีเขียวสด (Meesirisuk, 2010; Chinnasarn & Krasaechol, 2020) แต่อย่างไรก็ตามการลวกอาจส่งผลกระทบต่อการใช้สอยคุณภาพทางเคมีและกายภาพและเกิดการสูญเสียเม็ดสีในพืชเนื่องจากความร้อน (Ngamdee *et al.*, 2019) นอกจากนี้วิธีการแช่แข็งยังเป็นอีกวิธีที่นิยมใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยใช้หลักการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่า -18°C ทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเพื่อลดปฏิกิริยาของเอนไซม์ เคมี และการเจริญของจุลินทรีย์ (Mohammad *et al.*, 2004) แต่อย่างไรก็ตามการแช่แข็งอาจส่งผลกระทบต่อสีที่เพิ่มขึ้นไปทำลายโครงสร้างเนื้อเยื่อและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็ง (Kaewdee *et al.*, 2013) เทคโนโลยีการอบแห้งมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ใช้ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความคุ้มค่าในการผลิตเป็นสำคัญ การอบแห้งสุญญากาศเป็นการอบแห้งโดยใช้หลักการลดความดันเพื่อลดอุณหภูมิในการอบแห้งจึงส่งผลให้ลดระยะเวลาในการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์จึงคงไว้ซึ่งคุณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติที่ใกล้เคียงกับพืชสดเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งดั้งเดิมที่ใช้ลมร้อน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การอบแห้งมะม่วงเบาด้วยวิธีการอบแห้งแบบสุญญากาศจะมีส่วนช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพด้านกายภาพ ได้แก่ การหดตัวต่ำ สีที่ใกล้เคียงแบบสด และสัณฐานโครงสร้างที่มีลักษณะโปร่ง มีรูพรุนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน (Junlakan, 2017) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อระยะเวลาการอบแห้งและคุณภาพด้านเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น ประหยัดพลังงาน และผลิตภัณฑ์อบแห้งคงไว้ซึ่งคุณภาพด้านเคมีและกายภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

สาหร่ายซ้อสดจากตลาดในท้องถิ่น อำเภอเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี ล้างทำความสะอาด นำสิ่งแปลกปลอมออกจากนั้นนำสาหร่ายแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 นำสาหร่ายลวกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที ก่อนนำไปอบแห้ง ส่วนที่ 2 นำสาหร่ายแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบแห้ง และส่วนที่ 3 นำสาหร่ายสดไปทำการอบแห้ง

2. การอบแห้ง

นำสาหร่ายข้าววางกระจายลงในถาดขนาด 17.78x27.94x3.81 เซนติเมตร ปริมาณ 150-160 กรัม ก่อนนำไปทำแห้ง 2 วิธี คืออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Enviro-Pak, CVU-500, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Jeio Tech, OV-11, ประเทศเกาหลี) ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 30 มิลลิเมตรปรอท จนกระทั่งสาหร่ายมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 7 (ฐานเปียก) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกเก็บในถุงพลาสติกที่ปิดผนึกสุญญากาศและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3. การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของสาหร่ายข้าวอบแห้ง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Chroma Meter (Konica Minolta, CR-400, ประเทศญี่ปุ่น) วัดสีในระบบ CIE Lab เพื่อวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* ค่าที่ได้ในแต่ละสภาวะได้จากการเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่าง 10 ซีน ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายสด คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\frac{\Delta L^*}{L_0^*} = \frac{L^* - L_0^*}{L_0^*}, \frac{\Delta a^*}{a_0^*} = \frac{a^* - a_0^*}{a_0^*}, \frac{\Delta b^*}{b_0^*} = \frac{b^* - b_0^*}{b_0^*} \text{ และ } \Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

เมื่อ ΔL^* , Δa^* , Δb^* และ ΔE^* คือค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง ความแดง ความเหลือง และการเปลี่ยนแปลงสีรวมของสาหร่ายข้าวอบแห้งเปรียบเทียบกับแบบสด โดยที่ L^* , a^* และ b^* คือ ค่าความสว่าง ความแดงและความเหลืองของสาหร่ายหลังอบ และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าความสว่าง ความแดงและความเหลืองของสาหร่ายก่อนอบ ตามลำดับ

วิเคราะห์การคืนตัว (Rehydration ratio) ของตัวอย่าง โดยนำตัวอย่าง 2 กรัม แช่น้ำ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 6 8 และ 10 นาที จากนั้นตัดตัวอย่างด้วยช้อนตะแกรง สัดส่วนการคืนตัว (Rehydration ratio, RR) ของสาหร่ายถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (FEI, Quanta 400, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่กำลังขยาย 750 เท่า

$$\text{Rehydration ratio, RR} = \frac{m_{\text{after}}}{m} \quad (2)$$

เมื่อ m_{after} และ m คือ น้ำหนักของสาหร่ายหลังและก่อนการคืนตัว (กรัม) ตามลำดับ

4. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของสาหร่ายข้าวอบแห้ง

วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของสาหร่ายข้าวอบแห้ง ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสรวม แทนนิน แคโรทีนอยด์ และคลอโรฟิลล์ เอ โดยใช้วิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Chew *et al.* (2008), Namchot *et al.* (2013), Sommer *et al.* (1992) และ Arnon (1949) ตามลำดับ

5. ศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ของตัวอย่างการอบแห้ง คำนวณดังสมการที่ 3

$$\text{Moisture ratio, MR} = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

เมื่อ M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ ของตัวอย่าง, M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล และ M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น โดยในการทดลองกำหนดให้ M_e มีค่าเป็นศูนย์ เพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ M_0 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นและเวลาถูกนำมาพล็อตกราฟและสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 สมการ ได้แก่ Newton's model (1), Logarithmic model (2), Page's model (3), Two-term model (4), Two-term exponential model (5) และ Diffusion approach (6) เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสาหร่ายข้อ โดยนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression analysis) เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยเป็นแบบจำลองการอบแห้งที่ให้ค่า Correlation coefficient (R^2) สูงสุด ค่า Root Mean Square Error (RMSE) และ Chi-square (χ^2) ต่ำสุด ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลงโดยใช้สมการทฤษฎี ซึ่งความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของ Fick การทดลองนี้เลือกใช้สมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมาก ๆ และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ ดังสมการที่ 4 และพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy) คำนวณโดยประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 5 โดยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแบบจำลองคำนวณโดยใช้โปรแกรม STATISTICA

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2} \right] \exp \left[- \frac{(2p+1)^2 \pi^2 D_{eff} \theta}{l^2} \right] \quad (4)$$

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R T_{abs}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที), θ คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที), l คือ ความหนาของสาหร่าย (มิลลิเมตร), p คือ จำนวนเทอมที่ใช้พิจารณา (Crank, 1975; Bouraoui *et al.*, 1994), D_0 คือ ค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ (ตารางเมตรต่อวินาที), E_a คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล), T_{abs} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน) และ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3143 กิโลจูลต่อโมล.เคลวิน)

6. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test โดยโปรแกรม SPSS (SPSS software for Windows, SPSS Inc., USA)

ผลการวิจัย

1. ผลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพของสาหร่ายช็อคแห้ง

จาก Figure 1 และ Table 1 พบว่าสาหร่ายช็อคแห้งที่ผ่านการลวกและแช่แข็งมีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) สูงกว่าสาหร่ายช็อคสดอบแห้ง และอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีเขียวของสาหร่ายช็อคแห้ง นอกจากนี้พบว่าวิธีการอบแห้งสาหร่ายช็อคสดอบแห้งมีการคืบตัวสูงกว่าสาหร่ายช็อคที่ผ่านการแช่แข็งและการลวก ยกเว้นสาหร่ายช็อคที่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และจากการทดลองพบว่าการคืบตัวของสาหร่ายช็อคแห้งวิธี VD สูงกว่าวิธี CD โดยการคืบตัวของสาหร่ายช็อคแห้งสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ผลของการคืบตัวต่อระยะเวลาการคืบตัวของผลิตภัณฑ์แสดงดัง Figure 2 พบว่าสาหร่ายช็อคแห้งจะเกิดการคืบตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 2 นาที แรก จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง และเริ่มคงที่หลังจาก 8 นาที ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ใน Figure 3 โดยสาหร่ายช็อคแห้งที่ไม่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นช่องว่างมากกว่าสาหร่ายช็อคแห้งที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นก่อนการอบแห้ง และสาหร่ายช็อคแห้งที่อุณหภูมิสูงสาหร่ายช็อคมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นช่องว่างมากกว่าสาหร่ายช็อคแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

2. ผลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพทางเคมีของสาหร่ายช็อคแห้ง

จากการทดลองที่แสดงใน Table 2 พบว่าวิธีการอบแห้งแบบสุญญากาศ สาหร่ายช็อคแห้งวิธี F-VD มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าวิธี VD และ B-VD ในขณะที่วิธี VD มีแทนนินสูงกว่าวิธี B-VD และ F-VD ยกเว้นการอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งโดยใช้ลมร้อนพบว่าวิธี F-CD มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าวิธี CD และ B-CD ยกเว้นที่ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่วิธี CD มีแทนนินสูงกว่าวิธี B-CD และ F-CD ยกเว้นที่ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายช็อคแห้งที่ไม่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นมีคลอโรฟิลล์ เอ และเบต้าแคโรทีนสูงกว่าสาหร่ายที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้น ยกเว้นผลิตภัณฑ์อบแห้งสุญญากาศ ที่ 70 องศาเซลเซียส โดยวิธี B-VD มีคลอโรฟิลล์ เอ สูงกว่าวิธี VD และ F-VD และผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยลมร้อน ที่ 80 องศาเซลเซียส วิธี B-CD มีคลอโรฟิลล์ เอ สูงกว่าวิธี CD และ F-CD และพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน และคลอโรฟิลล์ เอ ที่เพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นวิธี F-CD ซึ่งส่งผลต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูง และวิธี VD และ B-CD ที่ส่งผลต่อแทนนินสูง และวิธี VD, F-VD และ CD ที่ส่งผลต่อคลอโรฟิลล์ เอ สูง ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเกือบทุกวิธีการอบแห้งส่งผลต่อเบต้าแคโรทีนที่เพิ่มสูงขึ้น

3. แบบจำลองการอบแห้งสาหร่ายช็อค

จาก Table 3 และ 4 พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งสาหร่ายช็อคโดยพิจารณาจากค่า R^2 สูงสุด ค่า x^2 และ RMSE ต่ำสุด วิธี VD, B-VD, F-VD, CD, B-CD และ F-CD ที่ 60 องศาเซลเซียส คือ Logarithmic (2), Two-term (4), Page (3), Page (3), Logarithmic (2) และ Diffusion approach (6) ที่ 70 องศาเซลเซียส คือ Diffusion

approach (6), Page (3), Two-term (4), Logarithmic (2), Logarithmic (2) และ Page (3) และที่ 80 องศาเซลเซียส คือ Two-term (4), Page (3), Diffusion approach (6), Diffusion approach (6), Page (3) และ Page (3) ตามลำดับ

4. สมบัติการแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

จาก Table 5 พบว่าการทำแห้งสาหร่ายข้อที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขึ้นต้นด้วยวิธีการแช่แข็งส่งผลต่อค่าสมบัติการแพร่ความชื้น (D_{eff}) สูงที่สุด รองลงมาคือการลวก และการอบแห้งโดยไม่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบขึ้นต้น โดยการอบแห้งด้วยวิธี VD ค่า D_{eff} สูงกว่าวิธี CD และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อค่า D_{eff} ที่เพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าสาหร่ายข้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธี VD มีค่า E_a น้อยกว่าสาหร่ายข้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธี CD

วิจารณ์ผลการวิจัย

สาหร่ายข้อมีองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ซึ่งให้สีเขียวแก่ผลิตภัณฑ์ กระบวนการเตรียมวัตถุดิบขึ้นต้นและการอบแห้งที่ต้องผ่านความร้อนจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์และส่งผลต่อค่าสีของสาหร่ายข้ออบแห้ง จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายข้ออบแห้งทุกวิธีการอบแห้งและทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ (80, 70 และ 80 องศาเซลเซียส) มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบสด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และพบว่าสาหร่ายข้ออบแห้งที่ผ่านการแช่แข็งและการลวก ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าสาหร่ายข้อสดอบแห้ง อาจเนื่องจากการลวกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม (60-82.2 องศาเซลเซียส) ในการทำงานของเอนไซม์คลอโรฟิลล์เลสที่เร่งให้เกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เปลี่ยนไปเป็นคลอโรฟิลล์ไลนทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเขียวสดเพิ่มมากขึ้น (Meesirisuk, 2010) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสียังขึ้นอยู่กักระยะเวลาการอบแห้งโดยสาหร่ายข้อที่ผ่านการแช่แข็งจะใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นเนื่องจากน้ำภายในโครงสร้างสาหร่ายข้อ แช่แข็งได้กลายเป็นผลึกน้ำแข็งและถูกแยกออกมาระหว่างการละลายน้ำแข็งทำให้สาหร่ายมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำ อีกทั้งความร้อนจากการลวกด้วยน้ำยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ควบคุมขนาดช่องเปิดของเซลล์ทำให้การถ่ายโอนมวลของเหลวระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Chinnasarn & Krasaechol, 2020) ส่งผลให้ลดระยะเวลาในการอบแห้ง ในขณะที่การอบแห้งสาหร่ายข้อสดที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลและเกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นฟิโอฟิตินที่ยาวนานส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของสาหร่ายจากสีเขียวเป็นสีเขียวมะกอกปนน้ำตาล (Sirijariyawat *et al.*, 2017) ทำให้สาหร่ายข้ออบแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงสีสูงและสาหร่ายข้ออบแห้งมีค่าความเป็นสีเขียวต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสาหร่ายข้อที่ผ่านการลวกหรือแช่แข็ง ในขณะที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิแตกต่างกันผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากสภาวะดังกล่าวใช้ระยะเวลาการอบแห้งใกล้เคียงกันส่งผลให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลใกล้เคียงกัน การคืนตัวของสาหร่ายอบแห้งเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งเนื่องจากการก่อนการใช้ประโยชน์ผู้บริโภคจำเป็นต้องทำให้ผลิตภัณฑ์คืนตัว โดยสาหร่ายข้อที่ได้หลังจากผ่านการทำให้คืนตัวควรมีคุณภาพใกล้เคียงกับสาหร่ายข้อสด จากการทดลองพบว่าวิธี VD และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์จะมีการคืนตัวสูงกว่าวิธี CD และการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งวิธี VD เป็นกระบวนการอบแห้งโดยใช้หลักการลด

ความดันระหว่างการอบแห้ง ทำให้น้ำระเหยออกจากวัตถุดิบได้ที่อุณหภูมิต่ำจึงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น อีกทั้งการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง การระเหยของน้ำออกจากอาหารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เหล่านี้ส่งผลต่อโครงสร้างภายในอาหารเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้การดูดน้ำกลับคืนสู่สภาพเดิมเกิดขึ้นได้มากกว่าการอบแห้งด้วยวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำ

จากการศึกษาพบว่าการศึกษาวิธีอบแห้งวัตถุดิบขั้นต้น วิธีการอบแห้ง อุณหภูมิ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการกักเก็บปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์ โดยการอบแห้งวิธี VD ที่อุณหภูมิสูงสาหร่ายชื้ออบแห้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงเพื่อเทียบกับการอบแห้งวิธี CD ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uribe *et al.* (2020) ได้ทำแห้งสาหร่ายสีแดง (*Pyropia orbicularis*) ด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิสูงพบว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าการอบแห้งวิธี CD นอกจากนี้ Gupta *et al.* (2011) ได้รายงานว่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 70 - 80 °C องศาเซลเซียส อีกทั้งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานส่งผลต่อการลดลงของคลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์ เนื่องจากคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสาหร่ายโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานจะส่งผลให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนทำให้คลอโรฟิลล์ เอ ในผลิตภัณฑ์อบแห้งลดลง เช่นเดียวกับปริมาณแคโรทีนอยด์ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรือการได้รับสัมผัสความร้อนที่ยาวนานจะส่งผลให้แคโรทีนอยด์ซึ่งอยู่ในไทลาคอยด์เมมเบรน ใกล้เคียงกับคลอโรฟิลล์ถูกทำลายเนื่องจากความร้อนส่งผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์มีค่าลดลงเช่นกัน (Laopaiboon *et al.*, 1997)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งขึ้นบางที่เหมาะสม จะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้ง โดยจากการศึกษานี้พบว่าแบบจำลองการอบแห้งสาหร่ายชื้อทุกสภาวะการอบแห้ง มีค่า R^2 มากกว่า 0.9 ค่า X^2 น้อยกว่า 0.05 และค่า RMSE น้อยกว่า 0.06 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองจากการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ (Phothi & Prakancharoen, 2011) วิธี VD มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสูงกว่าวิธี CD เนื่องจากการอบแห้งวิธี VD ใช้หลักการลดความดันในการอบแห้งจึงส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจึงมีค่าสูง และการใช้อุณหภูมิต่ำสูงจะช่วยเร่งอัตราการระเหยของน้ำให้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจึงมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และวิธีการอบแห้งมีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้น โดยสาหร่ายชื้อที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธี VD มีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าการอบแห้งด้วยวิธี CD ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง ค่าพลังงานกระตุ้นที่น้อยแสดงถึงปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นหรืออัตราการอบแห้งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้พลังงานกระตุ้นเพื่อเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของความชื้นน้อยกว่า (Assawarachan *et al.*, 2014)

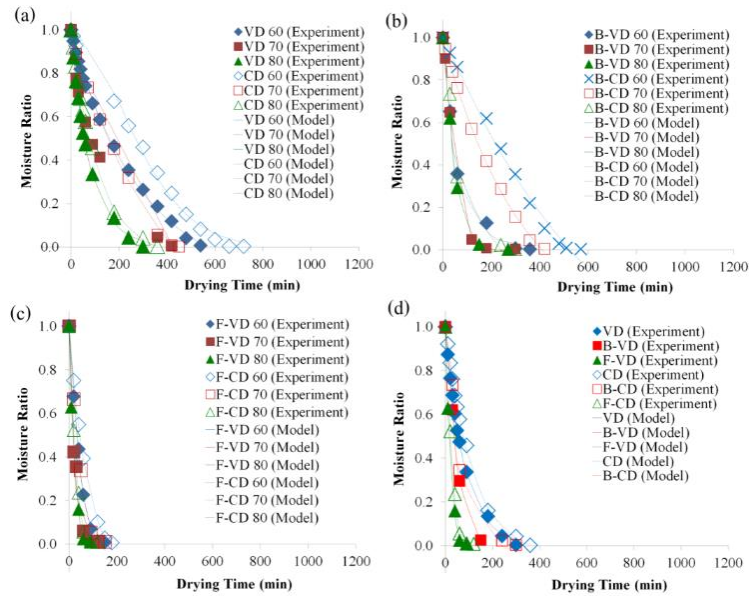


Figure 1 Drying curves of (a) fresh seaweeds, (b) blanched seaweeds, (c) frozen and thawed seaweeds and (d) seaweeds by use different drying methods

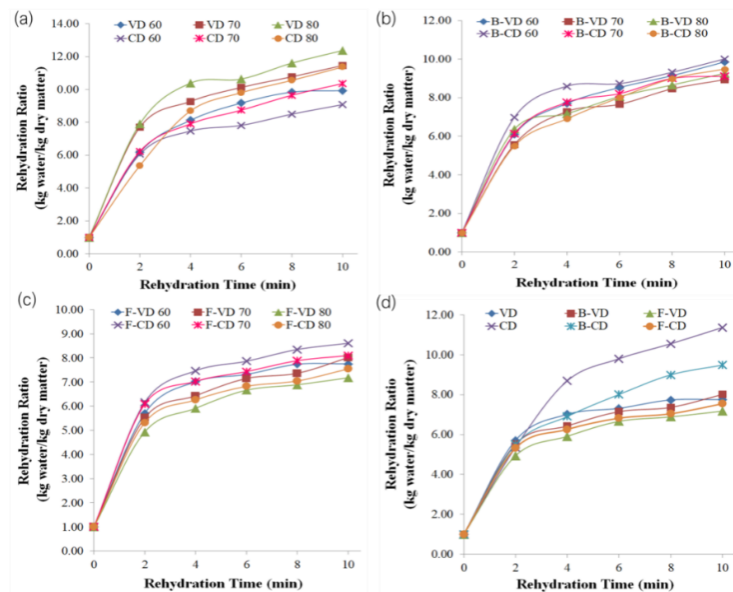


Figure 2 Rehydration curves of (a) fresh seaweeds, (b) blanched seaweeds, (c) frozen and thawed seaweeds and (d) seaweeds by using different drying methods



Table 1 Effect of drying methods on physical quality of dried *Gracilaria Salicornia* (C. Agardh) Dawson

Drying methods	Temperature (°C)	Time (min)	Color parameters				RR
			L*	a*	b*	ΔE	
VD	60	540	15.32±0.90 ^g	-3.13±0.72 ^{abc}	6.92±0.48 ^{fg}	14.68±0.63 ^b	9.92±0.31 ^d
	70	420	20.60±0.26 ^{ef}	-2.60±0.05 ^a	9.11±1.18 ^{ef}	9.21±0.90 ^{cde}	11.46±0.78 ^b
	80	300	25.92±1.99 ^{ab}	-2.94±0.81 ^{ab}	10.20±1.02 ^{de}	5.41±0.51 ^{fgh}	12.37±0.12 ^a
B-VD	60	360	21.36±2.09 ^{ef}	-6.22±0.20 ^{fg}	13.94±0.43 ^{ab}	6.69±2.06 ^{efgh}	9.86±0.10 ^{de}
	70	300	20.89±1.31 ^{ef}	-5.96±0.47 ^f	13.06±0.86 ^{abc}	7.23±1.49 ^{defgh}	8.94±0.26 ^{gh}
	80	270	19.30±4.08 ^f	-5.43±0.43 ^{ef}	14.01±2.09 ^{ab}	8.60±4.23 ^{cdef}	9.26±0.11 ^{fg}
F-VD	60	150	25.25±0.26 ^{abc}	-6.54±0.17 ^{fg}	11.18±0.66 ^{cde}	4.99±0.67 ^{gh}	7.75±0.14 ^j
	70	120	25.11±0.46 ^{abcd}	-6.16±0.82 ^f	10.78±2.10 ^{cde}	5.39±1.45 ^{fgh}	8.01±0.20 ⁱ
	80	90	21.56±1.71 ^{def}	-6.64±0.87 ^{fg}	7.05±1.64 ^{fg}	10.38±0.36 ^{cd}	7.18±0.13 ^k
CD	60	720	11.68±0.45 ^h	-2.87±0.18 ^{ab}	5.85±0.24 ^g	18.34±0.49 ^a	9.08±0.09 ^{fg}
	70	450	23.55±2.61 ^{bcde}	-4.68±1.33 ^{de}	10.35±1.03 ^{de}	6.32±2.29 ^{efgh}	10.36±0.05 ^c
	80	360	19.75±0.76 ^f	-3.97±0.60 ^{bcd}	7.14±0.71 ^{fg}	11.02±1.04 ^c	11.37±0.11 ^b
B-CD	60	570	21.51±4.49 ^{def}	-6.38±0.58 ^{fg}	11.37±1.99 ^{cde}	7.67±4.28 ^{defg}	10.01±0.04 ^{cd}
	70	420	24.18±1.47 ^{abcde}	-5.84±0.90 ^f	15.29±2.37 ^a	4.48±1.04 ^{gh}	9.12±0.07 ^{fg}
	80	300	21.95±0.95 ^{cdef}	-5.89±0.53 ^f	10.60±1.25 ^{cde}	7.32±1.52 ^{defgh}	9.49±0.15 ^{ef}
F-CD	60	180	27.64±1.82 ^a	-6.40±0.37 ^{fg}	11.96±0.78 ^{bcd}	4.02±0.18 ^h	8.60±0.12 ^h
	70	150	21.93±0.61 ^{cdef}	-7.40±0.56 ^g	11.00±0.92 ^{cde}	7.65±0.84 ^{defg}	8.10±0.15 ⁱ
	80	120	22.47±0.86 ^{bcdef}	-6.42±0.54 ^{fg}	11.67±0.80 ^{bcd}	6.51±1.00 ^{efgh}	7.54±0.10 ^{jk}
Fresh seaweed			27.63±1.81 ^a	-4.10±0.63 ^{cd}	14.83±1.48 ^a		

^{a-k} In the same column with different superscripts means that the values are significantly different (p<0.05). Rehydration ratio of dried samples at recovery time of 10 minutes

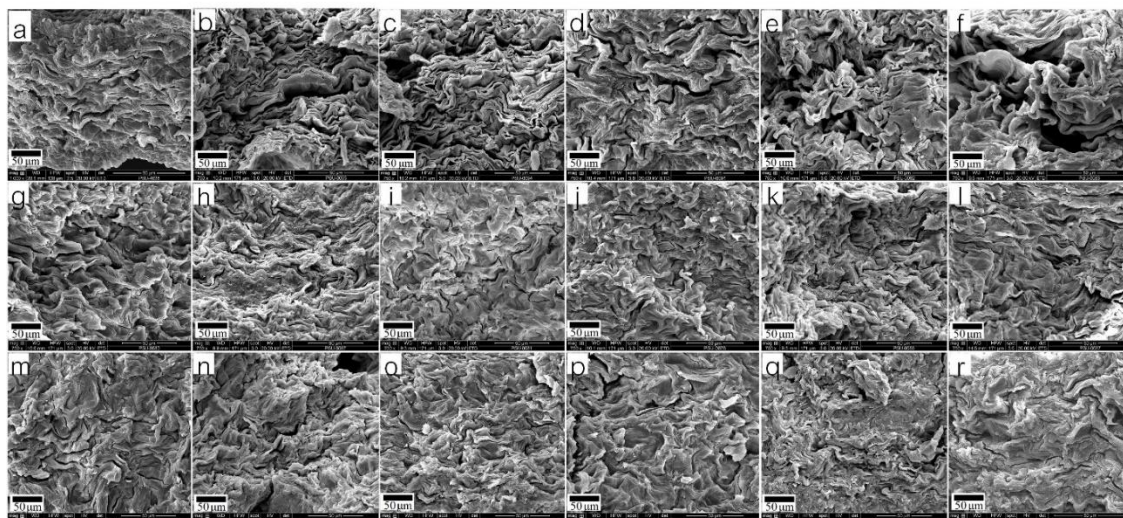


Figure 3 SEM photographs showing cross section of samples dried by CD methods at (a) 60, (b) 70 and (c) 80°C; VD methods at (d) 60, (e) 70 and (f) 80°C; B-CD methods at (g) 60, (h) 70 and (i) 80°C; B-VD methods at (j) 60, (k) 70 and (l) 80°C; F-CD methods at (m) 60, (n) 70 and (o) 80°C and F-VD methods at (p) 60, (q) 70 and (r) 80°C

Table 2 Effect of drying methods on the chemical qualities of dried *Gracilaria Salicornia* (C. Agardh) Dawson

Drying methods	Temperature (°C)	Total phenolic compound (mg GAE /100 g, DW)	Tannin (mg TAE/100 g, DW)	Chlorophyll A (µg/ml)	β-carotene (mg/100 g, DW)
VD	60	16588.89±2600.28 ^{de}	27144.44±1645.65 ^a	0.061±0.011 ^{ab}	11.07±0.29 ^a
	70	18077.78±452.56 ^{cde}	15344.44±3256.16 ^{cde}	0.018±0.005 ^{def}	8.30±0.11 ^c
	80	26444.44±1419.05 ^a	25644.44±2837.12 ^{ab}	0.057±0.017 ^{abc}	8.75±0.41 ^b
B-VD	60	14611.11±636.25 ^b	19444.44±1787.72 ^{abcde}	0.030±0.024 ^{cdef}	7.81±0.17 ^d
	70	26188.88±3645.60 ^a	23411.11±2501.18 ^{ab}	0.041±0.015 ^{bcd}	4.02±0.29 ^j
	80	23955.55±2479.32 ^{ab}	20844.44±9576.15 ^{abcd}	0.034±0.018 ^{bcd}	3.41±0.23 ^k
F-VD	60	21177.78±1500.12 ^{abcd}	20900.00±1507.02 ^{abcd}	0.038±0.003 ^{bcd}	3.90±0.24 ⁱ
	70	22155.55±453.79 ^{abcd}	25211.11±738.12 ^{ab}	0.011±0.008 ^{ef}	5.31±0.35 ^f
	80	25500.00±300.00 ^b	22355.55±4641.88 ^{abc}	0.028±0.005 ^{def}	4.24±0.17 ^{hij}
CD	60	18044.44±6047.71 ^{cde}	19644.44±1152.94 ^{abcde}	0.036±0.013 ^{bcd}	8.53±0.34 ^{bc}
	70	22122.22±3700.50 ^{abcd}	24622.22±1776.81 ^{ab}	0.022±0.007 ^{def}	6.03±0.11 ^e
	80	16588.89±2503.41 ^{de}	22344.44±2964.67 ^{abc}	0.011±0.006 ^{ef}	4.55±0.11 ^{gh}
B-CD	60	17555.56±1236.63 ^{cde}	24077.78±3987.39 ^{ab}	0.006±0.004 ^f	4.17±0.17 ^{hij}
	70	17177.78±2456.81 ^{cde}	17755.56±1001.30 ^{bcd}	0.017±0.002 ^{def}	3.18±0.11 ^k
	80	19622.22±485.72 ^{bcd}	18677.77±6551.02 ^{bcd}	0.073±0.041 ^a	2.31±0.29 ^j
F-CD	60	23888.89±3333.39 ^{ab}	14066.67±8806.50 ^{de}	0.011±0.007 ^{ef}	4.36±0.29 ^{ghi}
	70	22588.89±3288.42 ^{abc}	12211.11±1792.68 ^e	0.013±0.002 ^{def}	4.77±0.11 ^g
	80	7055.56±6125.48 ^f	19477.78±1721.22 ^{abcde}	0.019±0.017 ^{def}	3.98±0.23 ^{ij}

^{a-j} In the same column with different superscripts means that the values are significantly different (p<0.05).

**Table 3** Kinetic parameters of drying models as affected by different temperatures and drying methods

Model numbers	Coefficient	VD			B-VD			F-VD		
		60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C
1	k	0.00473	0.00872	0.01246	0.01518	0.01736	0.01880	0.02342	0.03598	0.04785
	a	1.14407	0.97017	0.99525	0.98599	1.07890	1.03793	1.09321	1.00812	1.02096
2	k	0.00332	0.00758	0.01202	0.01581	0.01676	0.01818	0.02014	0.03357	0.04517
	c	-0.17440	-0.02227	-0.00759	0.01596	-0.04056	-0.02410	-0.07759	-0.02193	-0.02096
3	k	0.00407	0.01625	0.01433	0.02171	0.00405	0.00521	0.00756	0.04627	0.04110
	n	1.02856	0.86204	0.96586	0.91043	1.37873	1.33041	1.29129	0.93069	1.04810
4	a	0.51576	0.10323	0.03396	0.45568	0.70143	0.86516	0.89431	0.14604	0.50227
	k_0	0.00469	0.33751	0.08143	0.00940	0.01847	0.01913	0.02405	1.46360	0.04808
	b	0.47924	0.89677	0.96607	0.55164	0.34373	0.15121	0.13449	0.85396	0.50193
	k_1	0.00469	0.00720	0.01183	0.02309	0.01847	0.01914	0.02404	0.03128	0.04808
5	a	0.00654	0.10164	0.02026	0.02440	1.92179	0.00308	0.00294	0.12953	1.44139
	k	0.71581	0.07231	0.59397	0.60037	0.02864	6.07041	7.92628	0.24602	0.05503
6	a	-6.30762	0.10326	0.03394	0.54422	11.1510	7.98733	0.64720	0.14596	1.75254
	k	0.00653	0.32596	0.08133	0.02272	0.01029	0.01267	0.02342	0.57089	0.03788
	b	0.95483	0.02210	0.14549	0.41525	0.94908	0.94375	0.99974	0.05480	0.74998
Model numbers	Coefficient	CD			B-CD			F-CD		
		60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C	60°C	70°C	80°C
1	k	0.00330	0.00532	0.00932	0.00402	0.00551	0.01470	0.01663	0.02385	0.03673
2	a	1.68174	1.44155	1.04561	1.92453	1.41737	1.03825	1.11987	1.08567	1.04547
	k	0.00137	0.00266	0.00862	0.00143	0.00295	0.01487	0.01331	0.02026	0.03393
	c	-0.68257	-0.45777	-0.04435	-0.90934	-0.42287	-0.01247	-0.11403	-0.07518	-0.03615
3	k	0.00004	0.00086	0.00709	0.00005	0.00129	0.00071	0.00670	0.00875	0.01402
	n	1.72569	1.33992	1.06346	1.77075	1.27561	1.78464	1.22068	1.25708	1.27323
4	a	0.51552	0.51456	0.50459	0.53525	0.51534	0.68853	0.65074	0.61926	8.22620
	k_0	0.00338	0.00548	0.00951	0.00427	0.00572	0.01526	0.01715	0.02436	0.06166
	b	0.51555	0.51418	0.50661	0.53461	0.51647	0.33886	0.37772	0.40377	-7.22671
	k_1	0.00338	0.00548	0.00951	0.00427	0.00572	0.01526	0.01715	0.02436	0.06762
5	a	0.00196	0.00181	0.00268	0.00160	0.00189	0.00182	0.00274	0.00302	0.00488
	k	1.67863	2.92317	3.45465	2.49636	2.89534	8.01952	6.04766	7.87284	7.48093
6	a	-24.5856	-19.6446	1.30706	-24.2094	-15.9645	9.08779	5.03349	-22.4275	0.66628
	k	0.00707	0.00982	0.00770	0.00825	0.01003	0.01088	0.00920	0.04183	0.03673
	b	0.95720	0.96441	0.50171	0.96051	0.95897	0.96196	0.86062	0.97127	1.00008

**Table 4** Statistical analysis of drying models as affected by different temperatures and drying methods

Drying methods	Model numbers	60°C			70°C			80°C		
		R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE	R ²	X ²	RMSE
VD	1	0.99606	0.00092	0.02930	0.99266	0.00175	0.03915	0.99919	0.00018	0.01284
	2	0.99897	0.00024	0.01497	0.99520	0.00157	0.03613	0.99932	0.00015	0.01181
	3	0.99619	0.00089	0.02882	0.99567	0.00083	0.02625	0.99936	0.00014	0.01144
	4	0.99609	0.00091	0.02919	0.99790	0.00030	0.01572	0.99940	0.00013	0.01105
	5	0.99610	0.00091	0.02915	0.99733	0.00055	0.02143	0.99938	0.00014	0.01126
	6	0.99656	0.00080	0.02738	0.99790	0.00030	0.01571	0.99940	0.00013	0.01105
B-VD	1	0.99624	0.00121	0.03170	0.99370	0.00277	0.04805	0.99670	0.00118	0.03074
	2	0.99656	0.00110	0.03030	0.99632	0.00162	0.03676	0.99743	0.00092	0.02714
	3	0.99673	0.00105	0.02957	0.99996	0.00002	0.00366	0.99993	0.00003	0.00463
	4	0.99724	0.00088	0.02713	0.99515	0.00213	0.04217	0.99691	0.00111	0.02978
	5	0.99627	0.00120	0.03157	0.99981	0.00008	0.00841	0.99662	0.00121	0.03110
	6	0.99721	0.00089	0.02730	0.99673	0.00144	0.03461	0.99796	0.00073	0.02421
F-VD	1	0.99386	0.00176	0.03887	0.98485	0.00442	0.06068	0.99915	0.00032	0.01604
	2	0.99766	0.00067	0.02402	0.98531	0.00428	0.05974	0.99946	0.00020	0.01277
	3	0.99932	0.00019	0.01291	0.98517	0.00432	0.06003	0.99932	0.00025	0.01426
	4	0.99443	0.00160	0.03701	0.98604	0.00407	0.05826	0.99916	0.00032	0.01592
	5	0.99374	0.00180	0.03925	0.98597	0.00409	0.05840	0.99936	0.00024	0.01395
	6	0.99386	0.00176	0.03887	0.98604	0.00407	0.05826	0.99952	0.00018	0.01208
CD	1	0.97739	0.00634	0.07653	0.98369	0.00470	0.06467	0.99873	0.00031	0.01670
	2	0.99681	0.00090	0.02889	0.99861	0.00040	0.01892	0.99962	0.00009	0.00919
	3	0.99684	0.00090	0.02875	0.99249	0.00217	0.04396	0.99925	0.00018	0.01283
	4	0.97823	0.00611	0.07511	0.98441	0.00450	0.06324	0.99886	0.00028	0.01585
	5	0.97728	0.00638	0.07671	0.98359	0.00473	0.06485	0.99867	0.00032	0.01713
	6	0.99381	0.00175	0.04021	0.99222	0.00225	0.04475	0.99963	0.00009	0.00903
B-CD	1	0.97155	0.00828	0.08676	0.98900	0.00307	0.05258	0.99147	0.00328	0.05122
	2	0.99669	0.00098	0.02977	0.99956	0.00012	0.01053	0.99216	0.00301	0.04910
	3	0.99479	0.00153	0.03735	0.99562	0.00123	0.03321	0.99964	0.00014	0.01058
	4	0.97519	0.00723	0.08109	0.99002	0.00279	0.05008	0.99202	0.00307	0.04957
	5	0.97138	0.00833	0.08702	0.98887	0.00311	0.05288	0.99140	0.00331	0.05144
	6	0.99021	0.00288	0.05113	0.99571	0.00120	0.03290	0.99198	0.00309	0.04969
F-CD	1	0.99477	0.00155	0.03644	0.99420	0.04026	0.04026	0.99640	0.00111	0.03041
	2	0.99960	0.00012	0.01006	0.99755	0.02619	0.02619	0.99767	0.00072	0.02447
	3	0.99905	0.00028	0.01555	0.99833	0.02163	0.02163	0.99941	0.00018	0.01237
	4	0.99537	0.00137	0.03426	0.99457	0.03895	0.03895	0.99935	0.00020	0.01297
	5	0.99465	0.00158	0.03685	0.99410	0.04061	0.04061	0.99631	0.00114	0.03081
	6	0.99975	0.00007	0.00792	0.99826	0.00059	0.02209	0.99640	0.00111	0.03041

Table 5 Comparisons of moisture diffusivity, activation energy, coefficient D_0 and related correlation coefficient

Drying methods	Temperature (°C)	D_{eff} (m ² /s)	R^2	E_a (kJ/mol)	D_0 (m ² /s)	R^2
VD	60	1.30×10^{-17}	0.9527	37000	9.30×10^{-12}	0.9901
	70	2.22×10^{-17}	0.9791			
	80	3.18×10^{-17}	0.9703			
B-VD	60	4.15×10^{-17}	0.9820	15000	9.38×10^{-15}	0.9938
	70	4.98×10^{-17}	0.9552			
	80	5.60×10^{-17}	0.9721			
F-VD	60	4.78×10^{-17}	0.9625	30000	2.63×10^{-12}	0.9846
	70	7.54×10^{-17}	0.9734			
	80	9.55×10^{-17}	0.9779			
CD	60	1.06×10^{-17}	0.9370	32000	1.21×10^{-12}	0.9903
	70	1.61×10^{-17}	0.9384			
	80	2.30×10^{-17}	0.9551			
B-CD	60	1.26×10^{-17}	0.9177	55000	5.04×10^{-9}	0.9562
	70	1.60×10^{-17}	0.9380			
	80	3.98×10^{-17}	0.9640			
F-CD	60	3.23×10^{-17}	0.9578	40000	6.28×10^{-11}	0.9957
	70	4.92×10^{-17}	0.9655			
	80	7.80×10^{-17}	0.9756			

สรุปผลการวิจัย

การใช้สารถ่ายสดอบแห้งด้วยวิธี VD ที่ 80 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์อบแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงสีเปรียบเทียบกับสารถ่ายสดต่ำ การคั่วตัวสูง และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งวิธีอื่น ดังนั้นเมื่อพิจารณาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจากวิธีการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าการ คั่วตัวสูง การเปลี่ยนแปลงสีน้อย สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์สูง วิธีการที่ถูกเลือก เป็นวิธีการที่เหมาะสม คือ การอบแห้งสารถ่ายสดด้วยวิธีอบแห้งแบบสุญญากาศที่ 80 องศาเซลเซียส โดยแบบจำลองการ อบแห้งที่เหมาะสมในการทำนายลักษณะการอบแห้ง คือ Two-term Diffusion approach จากการทดลองพบว่าจลนพลศาสตร์ การอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพของสารถ่ายซ้ออบแห้ง โดยการอบแห้งด้วยวิธี VD ที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นสูงและค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ เมื่อความชื้นเคลื่อนที่ออกจะทำให้เกิดช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์อบแห้งส่งผลต่อ คุณภาพด้านการคั่วตัวของผลิตภัณฑ์สารถ่ายซ้ออบแห้งที่สูง นอกจากนี้การแพร่ของความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ทำให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นส่งผลต่อการกักเก็บสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แทนนิน คลอโรฟิลล์ เอและแคโรทีนอยด์ ในผลิตภัณฑ์อบแห้งสูง



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ปีงบประมาณ 2562 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และสาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีที่อำนวยความสะดวกสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Anon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in beta vulgaris. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15.
- Assawarachan, R., Suriyakunthorn, P., & Jino, P. (2014). Effect of blanching pretreatment and drying model of *Chrysanthemum indicum* Linn. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 20(2), 43-51.
- Bouraoui, M., Richard, P., & Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17, 353-363.
- Chew, Y.L., Lim, Y.Y., Omar, M. & Khoo, K.S. (2008). Antioxidant activity of three edible seaweeds from two areas in South East Asia. *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1067-1072.
- Chinnasarn, S., & Krasaechol, N. (2020). Effect of pretreatment and drying conditions on quality of dried green caviar product. *The Journal of KMUTNB*, 30(4), 668-677. (in Thai)
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.
- Junlakan, W. (2017). Vacuum drying kinetics of mango (*Mangifera indica* L. Var.) slices. *Burapha Science Journal*, 22(3), 358-373. (in Thai)
- Junlakan, W. (2022). Optimized extraction of antioxidant compounds from *Gracilaria salicornia* (C. Agardh) Dawson. In *Proceedings of 17th SRU National, International and Graduate Research Conference*. (pp. 365-372). Suratthani: Suratthani Rajabhat University. (in Thai)
- Kaewdee, R., Wiriacharee, P., Pruenglampoo, S., Leelapat, P., & Phongphisuttinant, R. (2013). Effect of osmotic solution on the quality of softly frozen longan product. In *Proceedings of 14th Graduate Research Conference*. (pp. 350-358). Khon Kean: Khon Kean University. (in Thai)



- Laopaiboon, L., Laopaiboon, P., & Posri., W. (1997). Effect of drying methods on composition in *Spirulina platensis*. *KKU Research Journal*, 2(2), 42-48. (in Thai)
- Gupta, S., Cox, S., & Abu-Ghannam, N. (2011). Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. *LWT–Food Science and Technology*, 44, 1266-1272
- Mohammad, A.S., Mohsen, B.F., & Zohreh, H.E. (2004). Effect of low temperature on the ascorbic acid content and quality characteristics of frozen strawberry. *Food Chemistry*, 86, 357–363.
- Meesirisuk, P. (2010). *Thai cuisine from edible flowers for transferring to the public*. Chon Buri: Rajamangala University of Technology Tawan-ok Publishing. (in Thai)
- Namchot, J., Phasuk, S., & Thakonpakdee, P. (2013). Efficiency of *Feronia limonia* Swingle branch crude extract as antioxidant. *RMUTP Research Journal Special Issue*. The 5th Rajamangala University of Technology National Conference. 251-260. (in Thai)
- Ngamdee, P., Srisutam, A., & Tongmak, A. (2019). The effects of grilling and blanching on physico-chemical, textural and sensory properties of ready-to-eat grilled pumpkin from Kang-Khok and Sri-Muang cultivars. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 22(3), 152-165. (in Thai)
- Phooprong, S., Ogawa, H., & Hayashizaki, K. (2007). Photosynthetic and respiratory responses of *Gracilaria salicornia* (C. Agardh) Dawson (Gracilariales, Rhodophyta) from Thailand and Japan. *Journal of Applied Phycology*, 19(6), 795-801.
- Phothi, N. & Prakancharoen, S. (2011). Data imputation estimation using partial least squares of structural equation modeling. In *Proceedings of 2nd Nation Conference on Applied Computer Technology and Information System*. (pp. 13-18). Bangkok: Rajamangala University of Technology Krungthep.
- Sirijariyawat, A., Polviluy, C. & Yalai, K. (2017). Effect of drying methods on physical property of spring onion. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 45(1), 1155-1161 (in Thai)



- Sommer, T.R., D'Souza, F.M.L., & Morrisy, N.M. (1992). Pigmentation of adult rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, using the green alga *Haematococcus pluvialis*. *Aquacult*, 106(1), 63-74.
- Uribe, E., Vega-Galvez, A., García, V., Past'en, A., Rodriguez, K., & Lopez, J. (2020). Evaluation of physicochemical composition and bioactivity of a red seaweed (*Pyropia orbicularis*) as affected by different drying technologies. *Drying Technology*, 38(9), 1218-1230.
- Yang, M. Y. , Geraldino, P. J. L. , & Kim, M. S. (2013) . DNA barcode assessment of *Gracilaria salicornia* (Gracilariaceae, Rhodophyta) from Southeast Asia. *Botanical Studies*, 54(27), 218-226.