

Research Article

ผลของวิธีและสภาวะการทำแห้งต่อปริมาณผลผลิตและสมบัติทางเคมีกายภาพของเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวผง

Effect of drying methods and conditions on yield and physicochemical properties of gac aril powder

สุธิดา อัครชนียากร^{1*}, รัชชานนท์ ไพศาล¹, วชิรวิทย์ อาจสันตียะ¹ และกัมพล เกียรติทวีมนคง¹

Suthida Akkarachaneeyakorn^{1*}, Ratchanon Phaisarn¹, Wachirawit Artsanthia¹ and
Kumpol Krettaweemonkong¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 ประเทศไทย

¹Department of Agro-Industrial, Food, and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800 Thailand

*E-mail: suthida.a@sci.kmutnb.ac.th

Received: 3/11/2020; Revised: 18/05/2021; Accepted: 25/06/2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธี (แช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และลมร้อน) และสภาวะ (ต่ำ ปานกลาง และสูง) การทำแห้งต่อปริมาณผลผลิต บีตา-แคโรทีน และไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวผง ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยแปรผันสภาวะการทำแห้ง ได้แก่ ต่ำ ปานกลาง และสูง (อุณหภูมิทำแห้งขั้นที่ 2 เท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส) นาน 120 นาที ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวด้วยเตาไมโครเวฟโดยแปรผันสภาวะการทำแห้ง ได้แก่ ต่ำ (กำลังไฟไมโครเวฟ เท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที) ปานกลาง (กำลังไฟไมโครเวฟ เท่ากับ 560 วัตต์ นาน 13 นาที) และสูง (กำลังไฟไมโครเวฟ เท่ากับ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) ทำแห้ง เยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวด้วยเตาอบลมร้อน แปรผันสภาวะการทำแห้ง ได้แก่ ต่ำ (อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที) ปานกลาง (อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที) และสูง (อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) พบว่าการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางและสูงทำให้มีปริมาณผลผลิต บีตา-แคโรทีน และไลโคปีนมากที่สุดและไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) การทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจึงใช้พลังงานน้อยกว่าที่สภาวะสูง ดังนั้นวิธีและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนู คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลาง (อุณหภูมิการทำแห้งขั้นที่ 2 เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส) โดยมีปริมาณผลผลิตสูงที่สุด (ร้อยละ 21.46) ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนสูงที่สุด (10.19 และ 1.98 mg/g น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ)

คำสำคัญ: เยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนู การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ บีตา-แคโรทีน ไลโคปีน

Abstract

The objectives of this research were to study the effects of drying methods (freeze, microwave, and hot air drying) and conditions (low, medium, and high) on yield, beta-carotene, and lycopene content of gac aril powder. Gac aril was dried using a freeze-dryer under different drying conditions: low, medium, and high (where the second stage of temperatures were 40, 50, and 60 °C) for 120 min. Gac aril was dried using a microwave oven under different drying conditions: low (using 480 W microwave power for 15 min), medium (using 560 W microwave power for 13 min) and high (using 640 W microwave power for 11 min). Gac aril was also dried using a hot air oven under different conditions: low (hot air temperature of 60 °C for 540 min), medium (hot air temperature of 70 °C for 480 min) and high (hot air temperature of 80 °C for 420 min). It was found that gac aril dried using a freeze dryer under medium and high conditions resulted in the highest value of yield, beta carotene, and lycopene content and insignificant difference ($p \geq 0.05$). Freeze drying of gac aril at medium condition using lower drying temperature resulted in lower energy consumption than at a higher condition. Therefore, the optimal method and drying condition of gac aril was freeze drying at medium condition (using a second stage drying temperature of 50 °C) which gave the highest yield (21.46%), and highest beta-carotene and lycopene content (10.19 and 1.98 mg/g dry weight, respectively).

Keywords: beta-carotene, freeze drying, gac aril, lycopene, microwave

บทนำ

เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีมีสีแดงสดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายหลายชนิด เช่น กรดไขมันจำเป็นที่มีส่วนช่วยให้ร่างกายทำงานได้ปกติ และมีสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ ได้แก่ บีตา-แคโรทีน และไลโคปีนสูง จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีมีปริมาณบีตา-แคโรทีนอยู่ในช่วง 0.64 ถึง 0.84 mg/g FW ซึ่งมากกว่าแครอท 10 เท่า และมีปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 1.55 ถึง 3.05 mg/g FW ซึ่งมีปริมาณมากกว่ามะเขือเทศ 12 เท่า (Aoki et al., 2002; Selvan et al., 2011; Tran et al., 2008) แคโรทีนอยด์มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถป้องกันมะเร็ง โรคหัวใจ หลอดเลือด และโรคประสาทตาเสื่อม (Gu et al., 2008) การทำแห้งเป็นการแปรรูปอาหารโดยลดความชื้น และปริมาณน้ำอิสระในอาหารเพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษา การทำแห้งผัก และผลไม้โดยทั่วไปนิยมใช้ลมร้อน ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถควบคุมกระบวนการผลิต และสภาวะในการทำแห้งได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถทำแห้งได้ครั้งละปริมาณมาก แต่มีข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน สิ้นเปลืองพลังงาน และอาจทำให้การสูญเสียสารอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อน เนื่องจากการทำแห้งที่ให้ลมร้อนสัมผัสกับอาหาร เกิดการถ่ายเทความร้อนให้แก่อาหาร โดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากผลต่างอุณหภูมิความร้อนกับอาหาร (Fiedor & Burda, 2014) ส่วนการทำแห้งแบบไมโครเวฟมีข้อดี คือ ใช้เวลาในการทำแห้งสั้นกว่าแบบลมร้อน เนื่องจากเมื่ออาหารดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วจะเปลี่ยนเป็นความร้อนได้โดยตรง ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าแบบลมร้อน ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น มีข้อเสีย คือ ภายในอาหารมีองค์ประกอบหลายชนิด เช่น น้ำ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน ทำให้ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาจแห้งไม่สม่ำเสมอ (Vadivambal & Jayas, 2010) ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำแห้งในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ มีข้อดี คือ ลดการสูญเสียของสารอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อน ลดการทำลายเนื้อเยื่อและโครงสร้างอาหารเนื่องจากความร้อน ทำให้อาหารแห้งที่ได้มีคุณภาพสูง รักษาคุณภาพอาหาร เช่น สี กลิ่น รสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารได้ดี ข้อเสีย คือ เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีราคาแพง และมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าแบบลมร้อน และไมโครเวฟ สภาวะการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณผลผลิต และสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารหลังจากอบแห้ง เช่น ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ และสารอาหาร นอกจากนี้ยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีแบบแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และลมร้อน ต่อปริมาณผลผลิต สมบัติทางเคมีกายภาพของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และลมร้อน และสภาวะในการทำแห้งที่แตกต่างกัน 3 ระดับที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิต สมบัติทางเคมีกายภาพของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลี ได้แก่ ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีน และหาวิธีและสภาวะการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณผลผลิต บีตา-แคโรทีน และไลโคปีนคงเหลือสูงที่สุด

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีแช่เยือกแข็ง ซื้อจากบริษัท ไลโคปีนเลิฟเวอร์ จำกัด ตำบล โขกนาสาม อำเภอบางบาล จังหวัด สุรินทร์

2. การเตรียมและศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลี

2.1 ละลายเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีแช่เยือกแข็งที่ซื้อจากบริษัท ไลโคปีนเลิฟเวอร์ โดยวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) จนละลายหมด หลังจากนั้นคนให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่น (รุ่น BL3001 ยี่ห้อ Tefal ประเทศจีน) ด้วยความเร็วเบอร์ 1 เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่เยือกแข็ง (รุ่น SF-PC1497 ยี่ห้อ Panasonic ประเทศไทย) จนกว่าจะนำมาทำการทดลอง (ทำการทดลองภายใน 15 วัน)

2.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยนำเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจากข้อ 2.1 มาละลาย โดยวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) จนละลายหมด จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าดังต่อไปนี้

ก) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ โดยกรองเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลีผ่านผ้าขาวบาง วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ที่ปรับมาตรฐานแล้ว วัด 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

ข) ปริมาณความชื้น วัดตามวิธี AOAC (2000)

ค) ปริมาณน้ำอิสระ โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (รุ่น AL40009195 ยี่ห้อ AQUALAB) วัด 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

ง) ค่าสี โดยชั่งน้ำหนักเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลี 3 กรัม ใส่ในถ้วยวัดสี และเกลี่ยให้ทั่วถ้วยวัดสี จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น colorflex EZ ยี่ห้อ Hunter lab ประเทศสหรัฐอเมริกา) ใช้ Port ขนาด 1 นิ้ว โดยวัดค่า L^* , a^* , b^* , C^* และ h^* 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

จ) ปริมาณบิตา-แคโรทีน และไลโคปีน โดยดัดแปลงวิธีมาจาก Nagata & Yamashita (1992) นำตัวอย่างเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสาลี 1 กรัม มาเติมสารละลายผสมระหว่างเฮกเซนต่อแอซีโตน ในอัตราส่วน 3:2 (v/v) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร บั่นผสมด้วยเครื่องเขย่าผสม เป็นเวลานาน 1 นาที หลังจากนั้นนำมาเจือจาง 10 เท่า เพื่อวิเคราะห์ปริมาณบิตา-แคโรทีน และปริมาณไลโคปีนด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น SP-830 plus ยี่ห้อ Metertech ประเทศไทย) ที่ความยาวคลื่น 663 645 505 และ 453 นาโนเมตร โดยใช้เฮกเซนต่อแอซีโตนในอัตราส่วน 3:2 (v/v) เป็นเบสไลน์ แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณบิตา-แคโรทีน และไลโคปีนดังสมการที่ 1-2

$$\text{บิตา-แคโรทีน (mg/g FW)} = 0.216_{A_{663}} - 1.220_{A_{645}} - 0.304_{A_{505}} + 0.452_{A_{453}} \quad (1)$$

$$\text{ไลโคปีน (mg/g FW)} = -0.0458_{A_{663}} + 0.20_{A_{645}} + 0.372_{A_{505}} - 0.0806_{A_{453}} \quad (2)$$

3. การศึกษาผลของวิธีและสภาวะการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวต่อปริมาณผลผลิต และสมบัติทางเคมีกายภาพของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผง

3.1 ละลายเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่แช่แข็งจากข้อ 2.1 โดยวางที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) จนเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวละลายหมด

3.2 ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจนเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวอบแห้งที่ได้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 และปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 (Thai Industrial Standards Institute, 2015) 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และตู้อบลมร้อน

ก) การทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบแช่เยือกแข็ง

ชั่งน้ำหนักเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวปริมาณ 50 กรัม จากนั้นเทลงในถาดอลูมิเนียมทรงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวเท่ากับ 30 เซนติเมตร เปลี่ยนให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเป็นรูปวงกลมด้วยแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 เซนติเมตร ความหนาเท่ากับประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การแช่เยือกแข็ง 2. การทำแห้งขั้นต้น 3. การทำแห้งขั้นที่สอง

ก.1) การแช่เยือกแข็ง โดยนำเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวไปแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส (รุ่น SF-PC1497 ยี่ห้อ Panasonic ประเทศไทย) นาน 5 ชั่วโมง

ก.2) การทำแห้งขั้นต้น โดยนำเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (รุ่น Alpha 1-4 LSC plus ยี่ห้อ Christ ประเทศเยอรมนี) อุณหภูมิขั้นต้นเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 0.1 มิลลิบาร์ นาน 300 นาที

ก.3) การทำแห้งขั้นที่สอง แปรผันสภาวะ 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง (อุณหภูมิขั้นที่สอง 3 ระดับ ได้แก่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.05 มิลลิบาร์ นาน 120 นาที ซึ่งสภาวะที่แปรผันได้จากผลการทดลองเบื้องต้น) ทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ข) การทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ

ชั่งน้ำหนักเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวปริมาณ 100 กรัม เทลงในถาดแก้วเป็นรูปทรงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และเปลี่ยนให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีความหนาเท่ากับประมาณ 3 มิลลิเมตร อบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟ (รุ่น R-742P ยี่ห้อ Sharp ประเทศไทย) ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ แปรผันสภาวะ 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง ที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 560 และ 640 วัตต์ เป็นเวลารวมทั้งหมด 15 13 และ 11 นาที ตามลำดับ (ด้านแรก 14 12 และ 10 นาที ตามลำดับ กลับด้าน และอบแห้งอีกด้านต่อ 1 นาที) (สภาวะที่แปรผันได้จากผลการทดลองเบื้องต้น) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ค) การทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยเตาอบลมร้อน

ชั่งน้ำหนักเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวปริมาณ 50 กรัม เทลงในถาดอลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 22 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และเปลี่ยนให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวโดยแผ่ตัวอย่างตามพิมพ์รูปวงกลมเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ให้มีความหนาเท่ากันประมาณ 1.5 มิลลิเมตร อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น UF110 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี) แปรผันสภาวะ 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 540 480 และ 420 นาที ตามลำดับ (สภาวะที่แปรผันได้จากผลการทดลองเบื้องต้น) เพื่อให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.3 ชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาปริมาณผลผลิต ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\text{ผลผลิต (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวหลังอบแห้ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด (กรัม)}} \quad (3)$$

3.4 ปั่นให้เป็นผงด้วยเครื่องบด (รุ่น WF-04 ยี่ห้อ Thaingrinder ประเทศไทย) เป็นระยะเวลา 3 นาที 30 วินาที

3.5 ร้อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช (250 ไมครอน)

3.6 ใส่ถุงซิปล็อคสีขา และเก็บไว้ในโถสุญญากาศจนกว่าจะนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ

3.7 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผง ได้แก่

ก) ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2000)

ข) ปริมาณน้ำอิสระ โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (รุ่น AL40009195 ยี่ห้อ AQUALAB) วัด 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

ค) ค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น colorflex EZ ยี่ห้อ Hunter lab ประเทศสหรัฐอเมริกา) วัด 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย $\pm$ SD

ง) ปริมาณบิตา-แคโรทีน และไลโคปีน คัดแปลงวิธีมาจาก Nagata และ Yamashita (1992) โดยชั่งน้ำหนักเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผง 0.4 กรัมใส่ในบีกเกอร์ เดิมสารละลายผสมระหว่างเฮกเซนต่อเอซีโตนในอัตราส่วน 3:2 (v/v) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร กวนโดยใช้แม่เหล็กกวนที่ความเร็วเบอร์ 2 จากนั้นทำการสกัดอีก 3 ครั้ง โดยใช้ตัวทำละลาย 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการสกัดครั้งละ 20 นาที โดยสกัดสารตัวอย่างจนไม่มีสี จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มารวมกันในกรวยแยก ล้างเอซีโตนออกโดยใช้น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร หยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว 12 หยด ลงในกรวยแยก เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้จนเกิดการแยกชั้น นำน้ำส่วนใสด้านล่างทิ้ง จากนั้นทำการล้างเอซีโตนและหยดสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวอีกครั้ง เก็บสารละลายตัวอย่างด้านบน วิเคราะห์หาปริมาณบิตา-แคโรทีน และไลโคปีนโดยนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น SP-830 plus ยี่ห้อ Metertech ประเทศไทย) ที่ความยาวคลื่น 663 645 505 และ 453 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณบิตา-แคโรทีนและไลโคปีนดังในสมการที่ 1-2

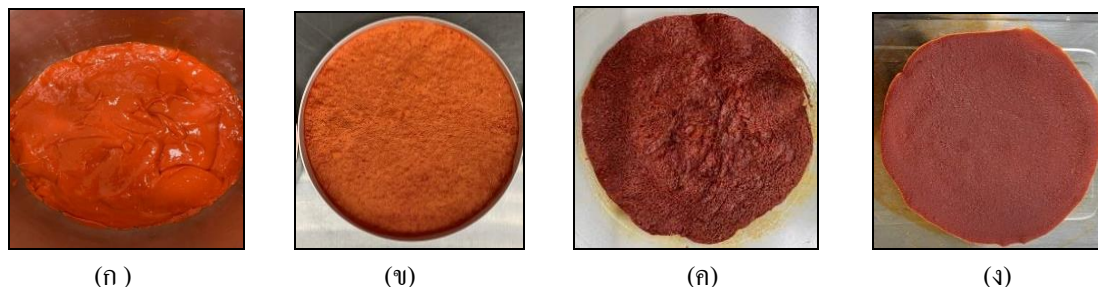
4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาผลของวิธี และสภาวะการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี L^* a^* b^* C^* h^* ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย 2-way ANOVA โดยมี 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ คือ วิธีที่ใช้ในการทำแห้ง (การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ไมโครเวฟ และตู้อบลมร้อน) และสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง (ต่ำ ปานกลาง และสูง) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 19 วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี Tukey's test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษามบัตินทางเคมีกายภาพของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด

เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดที่ใช้ในการทดลอง (ภาพที่ 1 (ก)) มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เฉลี่ยเท่ากับ 13.00 ± 0.00 °Brix มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81.98 ± 0.08 โดยน้ำหนักเปียก ปริมาณน้ำอิสระเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 ± 0.00 ค่า L^* เท่ากับ 35.42 ± 0.05 ค่า a^* เท่ากับ 42.65 ± 0.03 ค่า b^* เท่ากับ 38.99 ± 0.11 ค่า C^* เท่ากับ 57.79 ± 0.10 และค่า h^* เท่ากับ 42.43 ± 0.06 ° และเมื่อสังเกตด้วยตาเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดมีสีส้มแดงเข้ม ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีน ที่วัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เท่ากับ 31.63 ± 7.00 และ 4.33 ± 1.01 mg/g FW ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Tran et al. (2008) พบว่าเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจากผลพืชข้าวที่ปลูกในประเทศเวียดนามและเก็บเกี่ยวในปี ค.ศ. 2011 ถึง 2012 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 17.86 ถึง 18.13 °Brix และเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจากผลพืชข้าวที่ปลูกในประเทศออสเตรเลียและเก็บเกี่ยวในปี ค.ศ. 2013 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 16.75 °Brix ความชื้นเท่ากับร้อยละ 80 โดยน้ำหนักเปียก ค่าสี L^* a^* b^* C^* และ h^* โดยค่า L^* แสดงถึงความสว่างที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 โดยหากมีค่าที่ใกล้ 100 จะมีความสว่างมากที่สุด ส่วนค่า a^* หากมีค่าเป็นบวกจะแสดงความเป็นสีแดง หรือมีค่าเป็นลบจะแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนค่า b^* หากมีค่าเป็นบวกจะแสดงเป็นสีเหลือง หรือมีค่าเป็นลบจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ส่วนค่า C^* แสดงถึงความบริสุทธิ์ของสี และค่า h^* แสดงถึงค่าเฉดสี โดยค่า 0° จะแสดงสีแดง 90° แสดงสีเหลือง 180° แสดงสีเขียว และ 270° แสดงสีน้ำเงิน ซึ่งค่าสี L^* a^* b^* C^* และ h^* ที่ได้จากงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kubola & Siriamornpun (2011) พบว่าเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดมีค่า L^* เท่ากับ 24.00 ± 1.17 ค่า a^* เท่ากับ 37.27 ± 0.99 และค่า b^* เท่ากับ 14.70 ± 0.59 ตามลำดับ ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าแตกต่างกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่นงานวิจัยของ Nhung et al. (2010) วัดปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีน โดยวิธี HPLC ในเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด พบว่ามีปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนเท่ากับ 0.38 และ 3.73 mg/g FW ตามลำดับ งานวิจัยของ Kubola & Siriamornpun (2011) วัดปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีน โดยวิธี HPLC ในเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดพบว่ามีปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนเท่ากับ 0.45 ± 0.01 และ 0.01 ± 0.00 mg/g FW ตามลำดับ งานวิจัยของ



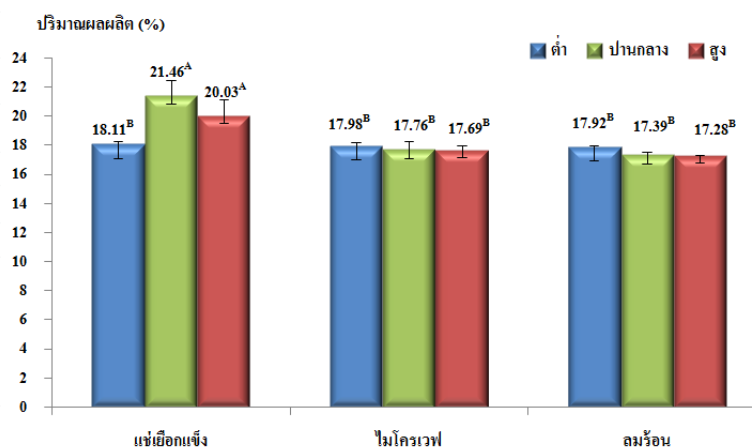
ภาพที่ 1 เชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวสด (ก) และหลังจากทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (ข) ไมโครเวฟ (ค) และลมร้อน (ง) ที่สภาวะต่ำ

Tran (2007) วัดปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนในเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวสด โดยวิธี HPLC พบว่ามีปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนเท่ากับ 0.06 และ 1.21 mg/g FW ตามลำดับ และงานวิจัยของ Tran et al. (2008) วัดปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนโดยวิธี HPLC พบว่าเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวสดจากผลฟักข้าวที่ปลูกที่ประเทศเวียดนาม และเก็บเกี่ยวในปี ค.ศ. 2011 ถึง 2012 และที่ปลูกในประเทศออสเตรเลียเก็บเกี่ยวในปี ค.ศ. 2013 มีปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนเท่ากับ 0.66 ถึง 1.49 และ 0.70 ถึง 4.33 mg/g FW ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของแห้งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี $L^* a^* b^* C^* h^*$ ปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนที่ได้จากงานวิจัยนี้แตกต่างกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องมาจากสายพันธุ์ อายุ การดูแล สภาพภูมิประเทศ แหล่งที่ปลูกฟักข้าว เครื่องมือ และวิธีการวัดที่ต่างกัน โดยปริมาณบีตา-แคโรทีน และไลโคปีนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าที่แตกต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากวิธีการวัดที่ต่างกัน โดยงานวิจัยนี้วัดโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ส่วนงานวิจัยของ Tran (2007) Tran et al. (2008) และ Nhung et al. (2010) วัดด้วยวิธี HPLC งานวิจัย Tran (2007) วัดปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น SP-830 plus ยี่ห้อ Metertech ประเทศไต้หวัน) และวิธี HPLC ในผงเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่ทำแห้งแบบลมร้อน พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดที่วัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มีปริมาณเท่ากับ 5.06 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่าวิธี HPLC (4.01 mg/g) โดยปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดที่วัดด้วยวิธี HPLC มีความถูกต้องมากกว่า แต่มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์มากกว่า

2. ผลของวิธีและสภาวะการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวต่อปริมาณผลผลิตและสมบัติทางเคมีกายภาพของเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาวิธีการทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าว 3 วิธี และ 3 สภาวะ ได้แก่ แช่เยือกแข็ง (การทำแห้งอุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) ไมโครเวฟ (กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) ลมร้อน (อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) พบว่ามี

ปริมาณผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 17.28 ถึง 21.46 จากภาพที่ 2 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่แสดงผล) พบว่าผลของอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีและสภาวะการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางและสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชื้นที่สอง 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) มีปริมาณผลผลิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และมีความมากที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางและสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชื้นที่สองเท่ากับ 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) โดยการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การแช่เยือกแข็งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวให้มีอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส 2. การทำแห้งขึ้นต้นอุณหภูมิขึ้นต้นเท่ากับ -50 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 0.1 มิลลิบาร์ ระยะเวลา 300 นาที 3. การทำแห้งขึ้นที่สองอุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.05 มิลลิบาร์ ระยะเวลา 120 นาที ซึ่งเป็นการทำให้แห้งขณะที่อาหารมีอุณหภูมิต่ำจึงลดการสูญเสียของอาหารเนื่องจากความร้อน ลดการทำลายเนื้อเยื่อ และโครงสร้างอาหาร จึงทำให้ปริมาณผลผลิตสูงที่สุด ส่วนการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบไมโครเวฟและลมร้อนทุกสภาวะ (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที



หมายเหตุ ^{A,B,C,...} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในกราฟแท่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิชื้นที่สองเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ

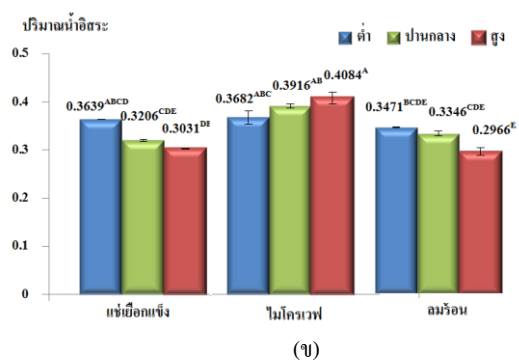
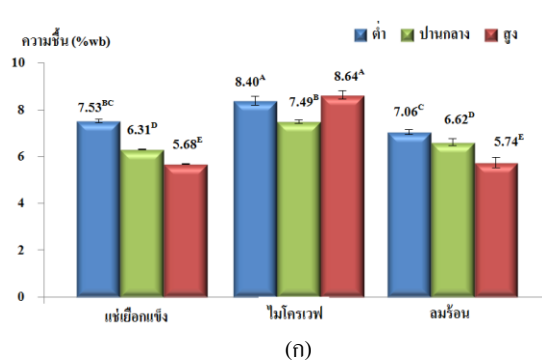
การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที ตามลำดับ

ภาพที่ 2 ปริมาณผลผลิตของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน

และการทำแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที ตามลำดับ) มีปริมาณผลผลิตต่ำที่สุด เนื่องมาจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนสูงโดยตรงภายในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วย 2 กลไก คือ การเคลื่อนที่ของไอออน เช่น โพแทสเซียม คลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด โดยเกิดการเคลื่อนที่กลับไปมาในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตามความถี่ของไมโครเวฟ 2,450 ล้านรอบต่อวินาที จึงเกิดการเสียดสีและเกิดความร้อนขึ้น โดยปริมาณโพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดมีค่าเท่ากับ 487.40 71.64 20.72 และ 11.37 mg/100g FW (Pinthong et al., 2019) ตามลำดับ และเกิดจากกลไกการหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว เช่น น้ำ ในสภาพปกติสารประกอบจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Random oriented) เมื่อเข้าอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะถูกเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเมื่อผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลน้ำจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟเท่ากับ 2,450 ล้านรอบต่อวินาที และเนื่องจากลักษณะของคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นไซน์ (Sine wave) จึงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวดูดซับคลื่นไมโครเวฟไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ซึ่งทำให้บางบริเวณของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวได้รับอุณหภูมิที่สูงเกินไปจึงทำลายเนื้อเยื่อบางส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ดังแสดงในภาพที่ 1 (ค) ทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง นอกจากนี้การทำแห้งแบบไมโครเวฟ มีการกลับด้านเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวโดยใช้ที่ตัดแบ่งสแตนเลส จึงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวบางส่วนที่ยังไม่แห้งติดไปกับที่ตัดแบ่ง จึงทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง งานวิจัยของ Sharma & Suresh (2005) ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบไมโครเวฟ พบว่าเมื่อกำลังไฟไมโครเวฟสูงขึ้น จาก 700 เป็น 900 วัตต์ จะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตลดลง เนื่องจากการใช้กำลังไฟไมโครเวฟสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นในอาหารลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำภายในชั้นอาหารไปยังผิวหน้าได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ส่งผลให้น้ำในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเกิดการระเหยออกไปได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ได้มีน้ำหนักน้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ส่วนการทำแห้งแบบลมร้อนทุกสภาวะ (การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) มีการใช้อุณหภูมิสูงที่สุดและระยะเวลานาน จึงเกิดความร้อนสะสมไปทำลายเนื้อเยื่อ โครงสร้างและสารอาหารของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุด (Vadivambal & Jayas, 2010)

จากภาพที่ 3 (ก) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีและสภาวะการทำแห้งมีผลต่อปริมาณความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ปริมาณความชื้นของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ทำแห้งทั้ง 3 วิธี และ 3 สภาวะ มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5.68 ถึง 8.64 โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งปริมาณความชื้นมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องผัก และผลไม้แห้ง ที่กำหนดความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 (Thai Industrial Standards Institute, 2015) วิธีการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะ (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) ทำให้ความชื้นของ

เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีแนวโน้มสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 8.40 7.49 และ 8.64 โดยน้ำหนักเปียกตามลำดับ เนื่องมาจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟถูกส่งมาที่อาหารในรูปของคลื่นไนซ์ ทำให้คลื่นไมโครเวฟสัมผัสกับเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวไม่สม่ำเสมอ และเนื่องจากเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีองค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าเท่ากับร้อยละ 89.76 0.62 0.37 7.85 และ 1.40 ตามลำดับ (Pinthong et al., 2019) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีสมบัติไดอิเล็กตริกแตกต่างกันจึงดูดซับคลื่นไมโครเวฟไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความร้อนในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ทำให้เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอ โดยเกิดความร้อนที่สูงอยู่บริเวณขอบ ในขณะที่การเกิดความร้อนต่ำเกิดที่บริเวณใจกลางของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ดังภาพที่ 1 (ก) และวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สอง 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) และวิธีการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 5.68 และ 5.74 ตามลำดับ เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีขั้นตอนการแช่เยือกแข็งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งทำให้เกิดผลึกน้ำแข็ง แล้วทำแห้งขึ้นต้นเพื่อลดปริมาณน้ำโดยการระเหิดน้ำแข็งให้เป็นไอ โดยการลดอุณหภูมิและความดันบรรยากาศให้ต่ำกว่าจุดรวมสาม (Triple point of water) เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งที่อยู่ภายในเกิดการระเหิดเป็นไอออกไปจากผิวหน้าเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าว โดยจะเริ่มจากชั้น



หมายเหตุ ^{A,B,C,...} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในกราฟแท่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที ตามลำดับ

ภาพที่ 3 ปริมาณความชื้น (ก) และปริมาณน้ำอิสระ (ข) ของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน

น้ำแข็งบริเวณผิวหน้าของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ทำให้บริเวณผิวหน้าเป็นชั้นแข็ง จากนั้นเป็นการระเหิดของชั้นน้ำแข็งที่อยู่ภายในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว โดยระเหิดน้ำแข็งผ่านชั้นแข็งออกไปสู่ผิวหน้าของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทำแห้งขั้นที่สอง เพื่อทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวให้สมบูรณ์ โดยการทำแห้งขั้นต้นน้ำแข็งจะระเหิดไปหมดแต่ยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการทำแห้งด้วยการเพิ่มอุณหภูมิขั้นที่สองให้สูงขึ้นและลดความดันมากขึ้น เพื่อดึงเอาความชื้นที่เหลืออยู่ออก ปริมาณความชื้นของผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะสูงจึงมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuyen et al. (2016) ทำแห้งเปลือกพืชข้าวแบบลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส และแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการทำแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีและสภาวะการทำแห้งแบบอื่นโดยมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.38 และ 2.35 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ จากภาพที่ 3 (ก) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการทำแห้งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราเร็วของการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสูงขึ้น เนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการถ่ายเทมวลมากขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการแพร่ของความชื้นจากตัวอย่างมีค่ามากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuyen et al. (2017) พบว่าในการทำแห้งเปลือกพืชข้าวแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 6.40 เป็น 2.30 โดยน้ำหนักเปียก และเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran et al. (2008) ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน คือ การทำแห้งแบบลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบสูญญากาศ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แบบแช่เยือกแข็ง และแบบพ่นฝอย พบว่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ทำแห้งทุกวิธีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรกของการทำแห้ง และปริมาณความชื้นยังคงลดลงจนถึงร้อยละ 6.4 โดยน้ำหนักเปียก และ Tanongkankit et al. (2016) ทำแห้งผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 330 และ 270 นาที ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีปริมาณความชื้นลดลงจาก 0.060 เป็น 0.050 g/g โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ภาพที่ 3 (ข) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีและสภาวะการทำแห้งมีผลต่อปริมาณน้ำอิสระของเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) พบว่าปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าระหว่าง 0.30 ถึง 0.41 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องผัก และผลไม้แห้ง ที่กำหนดปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 (Thai Industrial Standards Institute, 2015) ซึ่งแสดงว่าเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ได้จากการทำแห้งทั้ง 3 วิธี และ 3 สภาวะสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ปลอดภัยต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด และเชื้อจุลินทรีย์ จากภาพที่ 3 (ข) พบว่าการทำแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) มีปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.41 ซึ่งมีค่ามากกว่าการ

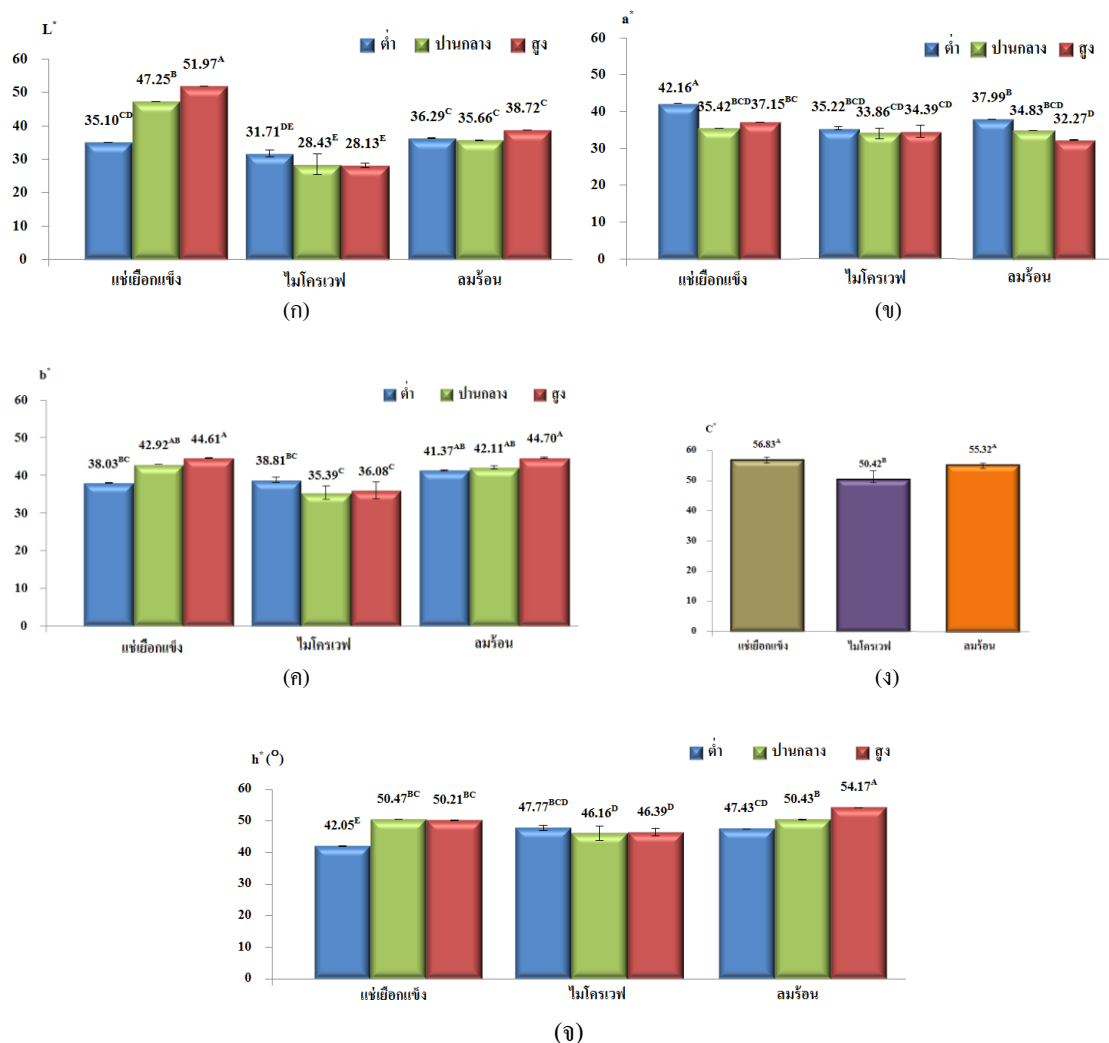
ทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) พบว่าปริมาณความชื้นของผงเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบไมโครเวฟที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่ กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) มีปริมาณความชื้นมากกว่าการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) เนื่องจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟถูกส่งมาที่อาหารในรูปของคลื่นไซน์ ทำให้คลื่นไมโครเวฟสัมผัสกับเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอ และอาจเนื่องจากการเคลื่อนย้ายเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวไม่สม่ำเสมอในขั้นตอนการขึ้นรูป โดยบริเวณใจกลางของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณขอบ จึงเกิดความร้อนสูงบริเวณขอบ ในขณะที่เกิดความร้อนต่ำที่บริเวณใจกลางเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าว ดังภาพที่ 1 (ค) ส่วนการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด เนื่องจากการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูงใช้เวลาในการทำแห้งเท่ากับ 420 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานกว่าการทำแห้งแบบไมโครเวฟซึ่งใช้ระยะเวลาในการทำแห้งเพียง 11 นาที จึงทำให้มีเวลาในการระเหยน้ำอิสระในเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวออกได้มากกว่างานวิจัยของ Chuyen et al. (2017) ศึกษาการทำแห้งเปลือกพืชข้าวแบบลมร้อน พบว่าอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส นาน 6 5 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ทำให้เปลือกพืชข้าวมีปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.53 ถึง 0.40

เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4 จากภาพที่ 5 (ก) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีและสภาวะการทำแห้ง มีผลต่อค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยวิธีการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะ (การทำแห้งที่ กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ) มีค่า L^* ต่ำที่สุด เนื่องจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟเป็นการทำแห้งโดยใช้กำลังไฟไมโครเวฟที่สูง ทำให้บางส่วน ของเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ได้รับอุณหภูมิสูงเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Maillard reaction) มากกว่าการทำแห้งวิธีอื่น โดยสอดคล้องกับภาพที่ 1 (ค) และ 4 พบว่าการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะมีค่า C^* ต่ำที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 5 (ง) โดยงานวิจัยของ Pinthong et al. (2019) ทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ แบบแช่เยือกแข็ง และแบบลูกกลิ้ง พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้เชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีค่า L^* สูงที่สุดเท่ากับ 37.82 เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (อุณหภูมิลูกกลิ้งเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส) ที่มีค่า L^* เท่ากับ 35.06 จากภาพที่ 5 (ข) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมของวิธีและสภาวะการทำแห้งส่งผลต่อค่า a^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากภาพที่ 4 และ 5 (ข) พบว่าวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ (การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สอง 40 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) มีค่า a^* สูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดที่มีค่า a^* เท่ากับ 42.65 โดยการทำแห้งแบบ



ภาพที่ 4 เชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน

แช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำทำให้ปริมาณไลโคปีนคงเหลืออยู่มาก (ภาพที่ 6 (ข)) ซึ่งไลโคปีนจะเสถียรภาพที่อุณหภูมิมากกว่า 63 องศาเซลเซียสโดยมีความร้อนและแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Saini et al., 2019) ส่วนการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) มีค่า a^* เท่ากับ 32.27 ซึ่งมีค่าต่างจากค่า a^* ของเชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูสดมากที่สุด (a^* ของเชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูสดเท่ากับ 42.65) เนื่องจากวิธีการทำแห้งแบบตูบลมร้อนที่สภาวะสูงใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที จึงทำให้เกิดการสูญเสียไลโคปีนสูง ดังภาพที่ 6 (ข) ซึ่งไลโคปีนเป็นรงควัตถุ (Pigment) ในเชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูที่มีสีแดงไม่มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่สูงกว่า 63 องศาเซลเซียส (Saini et al., 2019) ค่าความเป็นสีแดงจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pinthong et al. (2019) ทำแห้งเชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ แบบแช่เยือกแข็ง ลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิลูกกลิ้งเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้เชื้อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูมีค่า a^* เท่ากับ 23.90 ซึ่งสูงกว่าการทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่มีค่า a^* เท่ากับ 19.22 จากภาพที่ 5 (ค) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมของวิธีและสภาวะการทำแห้งส่งผลต่อค่า b^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) พบว่าวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางและสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ



หมายเหตุ ^{A,B,C,...} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในกราฟแท่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที ตามลำดับ

ภาพที่ 5 ค่า L* (ก) a* (ข) b* (ค) C* (ง) และ h* (จ) ของเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน

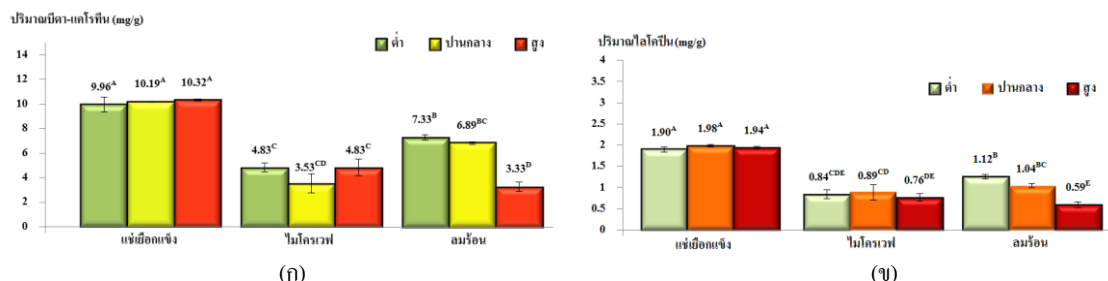
ชั้นที่สองเท่ากับ 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) มีค่า b^* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) และมีแนวโน้มมากกว่าการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะ (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ) เนื่องมาจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางและสูงเป็นการทำแห้งในขณะที่เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีอุณหภูมิต่ำ ใช้อุณหภูมิและความดันในการทำแห้งต่ำ ดังนั้นเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจึงสัมผัสกับความร้อนและออกซิเจนในอากาศได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบไมโครเวฟ และจากภาพที่ 6 (ก) พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทุกสภาวะมีปริมาณบิตา-แคโรทีนสูงที่สุด ซึ่งบิตา-แคโรทีนเป็นรงควัตถุที่มีสีเหลืองส้ม จึงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีค่า b^* สูงที่สุด ส่วนการทำแห้งแบบลมร้อนทุกสภาวะเป็นการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิที่สูงและระยะเวลาในการทำแห้งนาน ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกรดอะมิโน (Amino acids) และน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สารประกอบสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลานอยดิน (Melanoidins) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไมเอนไซม์ โดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไมเอนไซม์เกิดจากสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในผลพืชข้าวถูกออกซิไดซ์ในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้สารประกอบโมโนฟีนอล (ไม่มีสี) และถูกออกซิไดซ์เป็นไดฟีนอล (ไม่มีสี) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นออโร-ควิโนน แล้วเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) กับกรดอะมิโน หรือโปรตีน ส่งผลให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่าเมลานอยดินซึ่งมีสีน้ำตาล ดังนั้นผงพืชข้าวจึงมีค่าความเป็นสีเหลืองสูงที่สุด จึงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีค่า b^* สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanongkankit et al. (2016) พบว่าการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 300 และ 270 นาที ตามลำดับ ค่า b^* นั้นไม่แตกต่างกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.4 และการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะมีค่า b^* ต่ำที่สุด เนื่องจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟนั้นมีอัตราเร็วในการให้ความร้อนสูง และเป็นการให้ความร้อนโดยตรงจึงทำให้บิตา-แคโรทีนในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเกิดการสูญเสียอย่างมาก ซึ่งบิตา-แคโรทีนเป็นรงควัตถุในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่ทำให้มีสีเหลืองส้มค่า b^* จึงต่ำที่สุด (Park et al., 2016) จากภาพที่ 5 (ง) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมของวิธีและสภาวะการทำแห้งไม่ส่งผลต่อค่า C^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยวิธีการทำแห้งเพียงอย่างเดียวส่งผลต่อค่า C^* พบว่าวิธีการทำแห้งแบบไมโครเวฟทำให้ผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวมีค่า C^* ต่ำที่สุด เนื่องจากการทำแห้งแบบไมโครเวฟนั้นมีอัตราเร็วในการให้ความร้อนสูง และเป็นการให้ความร้อนโดยตรงจึงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวเกิดการสูญเสียบิตา-แคโรทีน และไลโคปีนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์มากกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งวิธีอื่น จากภาพที่ 5 (จ) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมของวิธีการทำแห้งและสภาวะส่งผลต่อค่า h^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) พบว่าวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ (การทำแห้งที่อุณหภูมิชั้นที่สอง 40 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) มีค่า h^* ต่ำที่สุด เท่ากับ 42.05° และมีค่าใกล้เคียงกับเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดที่มี h^* เท่ากับ 42.43° บ่งบอกถึงค่าสีที่เข้าใกล้กับสีแดงและสอดคล้องกับการสังเกตด้วยตาพบว่า

เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำมีเอนไซม์สูงมากที่สุด และใกล้เคียงกับเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงสด ดังภาพที่ 4 เนื่องจากปริมาณแคโรทีนอยด์โดยเฉพาะไลโคปีนในผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงเท่ากับ 1.90 mg/g ซึ่งมีปริมาณที่สูงที่สุด ดังภาพที่ 6 (ข) เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dang et al. (2014) พบว่าผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมี h^* ต่ำกว่า (ใกล้เคียงกับค่า h^* อยู่ในช่วง 0° ถึง 90°) และปริมาณไลโคปีนสูงกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน โดยผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่า h^* เท่ากับ 27.3° และปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 5.43 mg/g และเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่ทำแห้งแบบลมร้อนมีค่า h^* เท่ากับ 40.1° และปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 3.65 mg/g

จากภาพที่ 6 (ก) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการทำแห้งและสภาวะส่งผลต่อปริมาณบิตา-แคโรทีน เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณบิตา-แคโรทีนเท่ากับ 31.63 mg/g FW พบว่าเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทุกสภาวะ (การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) มีปริมาณบิตา-แคโรทีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) เฉลี่ยเท่ากับ 10.16 mg/g การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำและปานกลาง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที และ 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที) ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณบิตา-แคโรทีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยมีปริมาณบิตา-แคโรทีนเฉลี่ยเท่ากับ 7.11 mg/g ส่วนการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะ (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) และแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณบิตา-แคโรทีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยมีปริมาณบิตา-แคโรทีนเฉลี่ยเท่ากับ 4.13 mg/g เมื่อเปรียบเทียบปริมาณบิตา-แคโรทีนในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงสด พบว่าการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงแบบแช่เยือกแข็งทุกสภาวะสามารถรักษารักษาปริมาณบิตา-แคโรทีนได้มากที่สุด โดยมีปริมาณบิตา-แคโรทีนคงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 32.12 เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำแห้งในขณะที่เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีอุณหภูมิต่ำ ใช้เวลานาน และความดันในการทำแห้งต่ำ จึงสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีปริมาณบิตา-แคโรทีนคงเหลืออยู่สูง (Tran et al., 2008) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran (2007) ที่อบแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่มีบิตา-แคโรทีนเริ่มต้นเท่ากับ 0.28 mg/g FW เมื่อทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิขึ้นที่ 20 องศาเซลเซียส และแบบลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีบิตา-แคโรทีนคงเหลือเท่ากับ 0.28 และ 0.26 mg/g ตามลำดับ โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษารักษาปริมาณบิตา-แคโรทีนได้มากกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน การสูญเสียของบิตา-แคโรทีน เกิดขึ้นเมื่อบิตา-แคโรทีนสัมผัสกับออกซิเจน โดยมีความร้อนและแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณบิตา-แคโรทีนมีปริมาณต่ำลง ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากการสูญเสียของบิตา-แคโรทีนในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงเกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ไลพอกซิจีเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่อยู่ตามธรรมชาติในผักผลไม้ โดยจะออกซิไดซ์บิตา-แคโรทีน ซึ่งจะเปลี่ยนบิตา-แคโรทีน ให้อยู่ในรูปของสารประกอบอื่นที่ไม่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Baysal &

Demirdoven, 2004) โดยเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเกิดการเสียสภาพโปรตีน (Denaturation) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Anthon & Barrett, 2003) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanongkankit et al. (2016) พบว่าการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 300 และ 270 นาที ตามลำดับ จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 10 งานแห้งพบว่าปริมาณบิตา-แคโรทีนลดลงจาก 170.52 mg/100g เป็น 158.21 และ 126.77 mg/100g ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 70 และ 80 องศาเซลเซียส และ Kha et al. (2013) ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวด้วยไมโครเวฟ พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟไมโครเวฟจาก 495 วัตต์ นาน 95 นาที เป็น 630 วัตต์ นาน 60 นาที และ 900 วัตต์ นาน 45 นาที พบว่าเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณบิตา-แคโรทีน ลดลงจาก 135 เป็น 134 และ 59 mg/100 mL ตามลำดับ และการทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) ทำให้ปริมาณบิตา-แคโรทีนคงเหลือน้อยที่สุด เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงที่สุด และระยะเวลาในการทำแห้งนาน ทำให้บิตา-แคโรทีนเกิดการสลายตัวมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran et al. (2008) ที่รายงานว่า อุณหภูมิของการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบลมร้อนส่งผลต่อการสลายตัวของบิตา-แคโรทีน ซึ่งการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยลดการสลายตัวของบิตา-แคโรทีน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจากอุณหภูมิเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส เป็น 60 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณบิตา-แคโรทีนลดลงจาก 0.38 เป็น 0.26 mg/g หรือลดลงร้อยละ 32

จากภาพที่ 6 (ข) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (ไม่ได้แสดงผล) พบว่าผลของอิทธิพลร่วมระหว่างวิธีการทำแห้งและสภาวะส่งผลต่อปริมาณไลโคปีนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสดมีปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 4.33 mg/g FW พบว่าเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทุกสภาวะ (การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สอง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) ซึ่งมีปริมาณไลโคปีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) เฉลี่ยเท่ากับ 1.94 mg/g การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำและปานกลาง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที และ 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที) ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณไลโคปีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยมีปริมาณไลโคปีนเฉลี่ยเท่ากับ 1.15 mg/g ส่วนการทำแห้งแบบไมโครเวฟทุกสภาวะ (การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที) และแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงมีปริมาณไลโคปีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยมีปริมาณไลโคปีนเฉลี่ยเท่ากับ 0.77 mg/g เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด พบว่าการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวแบบแช่เยือกแข็งทุกสภาวะสามารถรักษามูลค่าไลโคปีนได้ดีที่สุด โดยมีปริมาณไลโคปีนคงเหลือเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 44.80 เนื่องจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นการทำแห้งในขณะที่อาหารมีอุณหภูมิต่ำ ใช้อุณหภูมิและความดันในการทำแห้งต่ำซึ่งสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดการสลายตัวของไลโคปีนในผงเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว (Tran et al., 2008) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran (2007) ที่ทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวสด



หมายเหตุ ^{A,B,C,...} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในกราฟแท่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่กำลังไฟไมโครเวฟเท่ากับ 480 วัตต์ นาน 15 นาที 560 วัตต์ นาน 13 นาที และ 640 วัตต์ นาน 11 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะต่ำ ปานกลาง และสูง หมายถึง การทำแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส นาน 540 นาที 70 องศาเซลเซียส นาน 480 นาที และ 80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที ตามลำดับ

ภาพที่ 6 ปริมาณบีตา-แคโรทีน (ก) และไลโคปีน (ข) ของเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าที่ทำแห้งด้วยวิธีและสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน

ที่มีไลโคปีนเริ่มต้นเท่ากับ 6.07 mg/g FW เมื่อทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิขึ้นที่สองเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส และแบบลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีไลโคปีนคงเหลือเท่ากับ 7.30 และ 4.56 mg/g โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาปริมาณไลโคปีนได้ดีกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณไลโคปีนมีค่าต่ำลง ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากการสลายตัวของไลโคปีนในเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าเกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ไลพอกซิจีเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่อยู่ตามธรรมชาติในผัก และผลไม้ โดยจะออกซิไดซ์ไลโคปีนเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Baysal & Demirdoven, 2004) โดยเอนไซม์ไลพอกซิจีเนสนี้ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเกิดการเสียสภาพโปรตีน (Denaturation) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Anthon & Barrett, 2003) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanongkankit et al. (2016) พบว่าการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 300 และ 270 นาที ตามลำดับ จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 10 ฐานแห้ง พบว่ามีปริมาณไลโคปีนลดลงจาก 193.80 mg/100g เป็น 168.33 และ 134.50 mg/100g ตามลำดับ และ Kha et al. (2013) พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟไมโครเวฟในการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่า จาก 495 วัตต์ นาน 95 นาที เป็น 630 วัตต์ นาน 60 นาที และ 900 วัตต์ นาน 45 นาที ทำให้เห็ดหุ้มเมล็ดผักข่ามีปริมาณไลโคปีนลดลงจาก 287 mg/100 mL เป็น 293 และ 180 mg/100 mL ตามลำดับ จากภาพที่ 6 (ข) พบว่าการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าแบบลมร้อนที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิ

80 องศาเซลเซียส นาน 420 นาที) ทำให้ปริมาณไลโคปีนคงเหลือต่ำที่สุด เนื่องจากการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงที่สุดและระยะเวลานาน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ไลโคปีนเกิดการสูญเสียอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi et al. (1999) พบว่ามะเขือเทศที่ทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณไลโคปีนคงเหลือเท่ากับ 0.08 mg/g ซึ่งมีปริมาณมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (ปริมาณไลโคปีนคงเหลือเท่ากับ 0.07 mg/g)

สภาวะการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าที่เหมาะสม คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลาง และสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชั้นที่สอง 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที) โดยมีปริมาณผลผลิตสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 21.46±1.30 และ 20.03±1.06 มีปริมาณบิตา-แคโรทีนคงเหลือสูงที่สุดเท่ากับ 10.19±0.02 และ 10.32±0.08 mg/g และปริมาณไลโคปีนคงเหลือสูงที่สุดเท่ากับ 1.98±0.03 mg/g และ 1.94±0.03 mg/g ตามลำดับ โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะสูง เนื่องจากทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางใช้อุณหภูมิในการทำแห้งต่ำกว่า จึงใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะสูง ดังนั้นการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลางเป็นวิธีและสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมในการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่า

สรุปผลการทดลอง

วิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าที่ทำให้ได้ปริมาณผลผลิต บิตา-แคโรทีนไลโคปีนสูงที่สุด และต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ที่สภาวะปานกลางและสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชั้นที่สอง 50 และ 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลาง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชั้นที่สอง 50 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) ใช้พลังงานความร้อนในการทำแห้งชั้นที่สองน้อยกว่าจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะสูง (การทำแห้งที่อุณหภูมิชั้นที่สอง 60 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที) ดังนั้นการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่สภาวะปานกลาง เป็นวิธีและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่า โดยทำให้ได้ปริมาณผลผลิต ปริมาณบิตา-แคโรทีน และไลโคปีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 21.46±1.30 10.19±0.02 mg/g และ 1.98±0.03 mg/g ตามลำดับ โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 6.31±0.02 โดยน้ำหนักเปียก และปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.32±0.00 ค่า L* เท่ากับ 47.25±0.03 a* เท่ากับ 35.42±0.00 b* เท่ากับ 42.92±0.01 C* เท่ากับ 55.68±0.01 และ h* เท่ากับ 50.47±0.00°

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปี 2565 เลขที่สัญญาวิจัย 653090 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (17th ed.). Maryland: Association of Official Analytical Chemists.
- Anthon, G. E., & Barrett, D. M. (2003). Thermal inactivation of lipoxygenase and hydroperoxytrienoic acid lyase in tomatoes. *Food Chemistry*, 81(2), 275–279. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00424-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00424-7)
- Aoki, H., Kieu, N. T. M., Kuze, N., Tomikasa, K., & Chuyen, N.V. (2002). Carotenoid Pigments in Gac Fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Bioscience, Biotechnology, Biochemistry*, 66(11), 2479–2482. <https://doi.org/10.1271/bbb.66.2479>
- Baysal, T., & Demirdöven, A. (2007). Lipoxygenase in fruits and vegetables: A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 491–496. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.11.025>
- Chuyen, H. V., Roach, P. D., Golding, J. B., Parks, S. E., & Nguyen, M. H. (2016). Effects of four different drying methods on the carotenoid composition and antioxidant capacity of dried Gac peel. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(5), 1656–1662. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7918>
- Chuyen, H. V., Roach, P. D., Golding, J. B., Parks, S. E., & Nguyen, M. H. (2017). Effects of pretreatments and air drying temperatures on the carotenoid composition and antioxidant capacity of dried gac peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13226. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13226>
- Dang, Y. T., Phan, H. T. & Kha, T. C. (2014). Gac aril powder processing by using microwave drying and its incorporation into the rice porridge product. *Food and Applied Bioscience Journal*, 2(2), 98-114. <https://doi.org/10.14456/fabj.2014.8>
- Fiedor, J., & Burda, K. (2014). Potential Role of Carotenoids as Antioxidants in Human Health and Disease. *Nutrients*, 6, 466-488. <https://doi.org/10.3390/nu6020466>
- Gu, Z., Chen, D., Han, Y., Chen, Z., & Gu, F. (2008). Optimization of carotenoids extraction from *Rhodobacter sphaeroides*. *LWT - Food Science and Technology*, 41(6), 1082-1088. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.07.005>
- Kha, T. C., Nguyen, M. H., Roach, P. D., Parks, S. E., & Stathopoulos, C. E. (2013). Gac fruit: Nutrient and phytochemical composition and options for processing. *Food Reviews International*, 29(1), 92-106. <https://doi.org/10.1080/87559129.2012.692141>
- Kubola, J., & Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril, and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>

- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 39(10), 925-928.
- Nhung, D. T. T., Bung, P. N., Ha, N. T., & Phong, T. K. (2010). Changes in lycopene and beta carotene contents in aril and oil of gac fruit during storage. *Food Chemistry*, 121(2), 326-331. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.032>
- Park, H. J., Lee, Y., & Eun, J.B. (2016). Physicochemical characteristics of kimchi powder manufactured by hot air drying and freeze drying. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 5, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.02.002>
- Pinthong, S., Judprasong, K., Tangsuphoom, N., Jittinandana, S., & Nakngamanong, Y. (2019). Effect of different drying processes on physical properties and carotenoid content of Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.). *Journal of Food Science and Agricultural Technology*, 5, 61-70.
- Saini, R. K., Bekhit, A. E. D., Roohinejad, S., Rengasamy, K. R. R., & Keum, Y. S. (2019). Chemical stability of lycopene in processed products: A review of the effects of processing methods and modern preservation strategies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68(3), 712-726. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06669>
- Selvan, V. K., Vijayakumar, A., Kumar K. S., & Singh, G. N. (2011). Lycopene's effects on health and diseases. *A Comprehensive Review of the Literature*, 3(3), 1-13.
- Sharma, G. P., & Suresh, P. (2005). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.029>
- Shi, J., Maguer, M. L., Kakuda, Y., Liptay, A., & Niekamp, F. (1999). Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. *Food Research International*, 32(1), 15-21. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00059-9)
- Tanongkankit, Y., Narkprasom, K., & Narkprasom, N. (2016). Effect of Processing on Physical Property and Carotenoid Content in Natural Food Colorant from Gac aril. *Journal of Food Technology, Siam University*, 11(1), 47-56.
- Thai Industrial Standards Institute. (2015). *Thai community products standard: dried fruits and vegetable 136/2015*. Bangkok, Thailand: Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. (in Thai)
- Tran, T. H. (2007). *Producing carotenoid-rich powder from Gac fruit* [Master's thesis, University of Western Sydney]. <https://researchdirect.westernsydney.edu.au/islandora/object/uws%3A85/datastream/PDF/view>

- Tran, T. H., Nguyen, M. H., Zabaras, D., & Vu, L. T. T. (2008). Process development of Gac powder by using different enzymes and drying techniques. *Journal of Food Engineering*, 85(3), 359-365. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.029>
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2010). Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials-A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 3(2), 161–171. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0136-0>