



ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพและ กิจกรรมการต้านออกซิเดชันของมะเขือม่วง

Effect of Drying Methods on Physico-Chemical Properties and Antioxidant Activity of Eggplants

ยุพารัตน์ โพธิเศษ^{*}, คุณากร ชติศรี และ ศักดา คุ่มสา

Yuparat Potisate^{*}, Kunakorn Katsri and Sakda Coomsa

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยพะเยา

School of Agriculture and Natural Resources, University of Phayao

Received : 24 September 2019

Revised : 14 November 2019

Accepted : 15 January 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของมะเขือม่วงด้วยการทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟตามด้วยการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C (การทำแห้งแบบ 2 ระยะ) และการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 70°C และศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทอรัม ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Modified Henderson แสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปฟังก์ชัน $X_e = f(RH_e, T)$ ดีที่สุดด้วยค่า R^2 สูงสุด ค่า RSS และ SEE ต่ำสุด และแบบจำลอง Modified Oswin แสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปฟังก์ชัน $RH_e = f(X_e, T)$ แสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปฟังก์ชัน $X_e = f(RH_e, T)$ ดีที่สุดด้วยค่า R^2 สูงสุด ค่า RSS และ SEE ต่ำสุด สำหรับผลของทั้ง 3 วิธีการทำแห้ง พบว่าการทำแห้งมะเขือม่วงแบบใช้ไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C (การทำแห้งแบบ 2 ระยะ) สามารถคงปริมาณสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันได้ โดยใช้เวลาทำแห้งสั้นที่สุดเพียง 30 นาที ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อการผลิตมะเขือม่วงผึ่งเพื่อการใช้ประโยชน์ในการนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่หรือผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไป

คำสำคัญ : มะเขือม่วง, ดีซอร์พชันไอโซเทอรัม, การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งแบบลมร้อน

*Corresponding author. E-mail : ypotisate@hotmail.com



Abstract

The objectives of this research were to study the effect of drying methods on some physico-chemical properties and antioxidant activity of eggplant with three different drying methods including hot air oven drying at 70°C, the microwave-assisted drying and combined with hot air drying at 70°C (two-stage drying) and the infrared drying at 70°C and to study desorption isotherms. The results were the modified Henderson model $X_e = f(RH_e, T)$ desorption isotherms gave the best fit to the experimental data with the highest R^2 and the lowest RSS and SEE as well as the modified Oswin showed $RH_e = f(X_e, T)$ desorption isotherms gave the best fit to the experimental data with the highest R^2 and the lowest RSS and SEE. For all three drying methods, it was found that the microwave-assisted drying and combined with hot air drying at 70°C (two-stage drying) could maintain antioxidant activity which was shortest drying time (30 mins). Therefore, the information from this research could be used an application of the eggplants powder production for the utilization of waste from pickled eggplant export for new product development or health product.

Keywords : eggplants, desorption isotherm, microwave-assisted drying combined hot air drying

บทนำ

แนวโน้มและพฤติกรรมกรรมการบริโภคของประชาชนโดยทั่วไปในปัจจุบันพบว่ามีการบริโภคผักและผลไม้มากขึ้น เนื่องจากประชาชนเห็นความสำคัญและหันมาใส่ใจในเรื่องของสุขภาพ การเจ็บไข้ได้ป่วยมากขึ้นอีกทั้งมีความตระหนักในเรื่องของคุณประโยชน์ของผักและผลไม้สามารถช่วยลดความเสี่ยงโรคหัวใจ ปริมาณสารสำคัญที่มีผลต่อสุขภาพ ได้แก่ สารประกอบสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งช่วยป้องกันเชื้อโรคและควบคุมมะเร็ง (Vaciarik, et al., 2014; Oroian, et al., 2015)

มะเขือม่วง (eggplant/aubergine) (*Salanum melongena*) มีการปลูกกันแพร่หลายเกือบทั่วโลก เป็นไม้ล้มลุก เจริญเติบโตง่ายและเจริญได้ดีในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน มีต้นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และมีการปลูกกันมากในแถบเอเชียและเขตเมดิเตอร์เรเนียน ยังพบการปลูกในเขตตะวันออกกลางและแอฟริกาเหนือ ในทวีปยุโรปประเทศที่มีปริมาณการปลูกมะเขือม่วงสูงที่สุดคือประเทศอิตาลี มะเขือม่วงจะมีสี ขนาด รูปลักษณะภายนอกแตกต่างกันตามสายพันธุ์ (Luthria, et al., 2010) สำหรับในประเทศไทยมะเขือม่วงมีแหล่งปลูกในพื้นที่จังหวัดพะเยา เชียงราย ลำปาง ซึ่งอาจจะกลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในอนาคตเพราะปลูกและเจริญเติบโตง่าย มีรูปทรงอวบอ้วน ขนาดเล็กได้รูปทรงและมีลักษณะคล้ายหยดน้ำสวยงาม โดยการนำมาดองเย็น ย่าง ใส่ขวดใส่หรือบรรจุกล่องพลาสติกให้เห็นรูปร่างสวยงามดึงดูดลูกค้าได้ จึงมีตลาดส่งออกที่สำคัญคือ ญี่ปุ่น ผู้ประกอบการในประเทศไทย เช่น บริษัท ซีวี เอเชีย ฟู้ดส์ จำกัด มีการส่งเสริมการปลูกเพื่อส่งออกไปประเทศญี่ปุ่นประมาณ 300 ตัน/ปี แต่เนื่องจากความเข้มงวดในเรื่องข้อกำหนดคุณภาพของลูกค้าญี่ปุ่น ทำให้ต้องคัดแยกมะเขือม่วงที่ไม่ได้ขนาด รูปร่างบิดงอต่าง ๆ คัดทิ้งคิดเป็น 30% ของผลผลิตจากแปลงของเกษตรกรที่ส่งเสริมการปลูกซึ่งทำให้ผู้ประกอบการและเกษตรกรผู้ปลูกต้องการจะใช้ประโยชน์อื่น ๆ และเพิ่มมูลค่าจากมะเขือม่วงนี้เพื่อเป็นรายได้เพิ่มเติม มีรายงานวิจัยพบว่าวิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันจากการสกัดมะเขือม่วงไปใช้พัฒนาเป็นสารป้องกันการเจริญของเซลล์มะเร็ง (Matsubara, et al., 2005) ยังช่วยยับยั้งแผลติดเชื้อได้ (Han et al, 2003) กระบวนการแปรรูปและวิธีการให้ความร้อนเพื่อถนอมรักษาและยืดอายุผัก

และผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวให้นานขึ้นนั้นมักจะมีผลต่อความคงตัวของปริมาณสารสำคัญ เช่น สารต้านออกซิเดชันต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารสำคัญจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผักผลไม้ อุณหภูมิ เวลาตลอดจนวิธีการแปรรูปที่เลือกใช้ (Boulekbache-Makhlouf, *et al.* 2013)

การทำแห้งเป็นวิธีถนอมอาหารที่นิยมแพร่หลายในอุตสาหกรรม สามารถยืดอายุ ลดขนาดและน้ำหนัก ช่วยลดต้นทุนการขนส่ง แต่การทำแห้งมักมีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง (Gümüsay, *et al.*, 2015) ด้วยเหตุนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการทำแห้งมากขึ้นโดยการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการนำไปประยุกต์ใช้โดยคำนึงถึงการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการผลิตและเพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (Soponronnarit, 1997) การทำแห้งด้วยไมโครเวฟถือเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ช่วยรักษาคุณภาพ ลดการสูญเสียได้ดี ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับคลื่นไมโครเวฟ โมเลกุลของน้ำเป็นโมเลกุลที่มีทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โมเลกุลของน้ำภายในจะเกิดการหมุนตัวเพื่อจัดเรียงโมเลกุลตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงสลับไปมาจนเกิดการเสียดสีกันขึ้น เกิดเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น น้ำระเหยและความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นการทำแห้งด้วยไมโครเวฟใช้เวลาสั้น ประหยัดพลังงาน และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง Jino & Assawarachan, (2015) ทำการเลือกกำลังของไมโครเวฟสูง 752 W ในการทำแห้งใบกระเพรา และ Potisate & Phoungchang, (2015) ทำแห้งใบมะขาม (900W) ช่วยลดเวลาในการทำแห้ง รักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์และลดการสูญเสียออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชันได้ดี อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียวและใช้เวลาไม่เหมาะสมบางครั้งอาจทำให้คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยดีหรืออาจพบรอยไหม้บางส่วน (จึงมีการทำแห้งด้วยไมโครเวฟแบบหลายขั้นตอนซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ เช่น ธัญพืช ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ เป็นต้น (Panyayuen, *et al.*, 2018) Rattanaphitakkul (2007) ได้ศึกษาการทำแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยไมโครเวฟ 0.5 W/g เวลา 10 นาที ร่วมกับการใช้ลมร้อน 70°C โดยสามารถลดเวลาการทำแห้งด้วยผงและทำให้ค่าความสว่าง (L*) สูงขึ้น และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงเสียน้อยที่สุด การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นการใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดที่อาศัยการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบบนผิวของวัสดุ โดยที่พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุ ข้อดีของรังสีอินฟราเรดคือจะทำให้วัสดุทำแห้งมีคุณภาพดี การทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์แห้งไปก่อนที่น้ำภายในผลิตภัณฑ์จะระเหยหรือเกิดการแพร่ออกมาได้ จึงใช้เวลาในการทำแห้งนาน Dongbang, (2013) ทำการเปรียบเทียบผลของความชื้นจากอินฟราเรดกับลมร้อน 60°C พบว่าผักที่ทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการเสื่อมสภาพของเบต้าแคโรทีนและคลอโรฟิลล์เอมากกว่า การคงตัวของสารต้านออกซิเดชันภายหลังการทำแห้งในมะเขือม่วงยังไม่ค่อยมีงานวิจัยมากนัก Zaro, *et al.* (2015) ทำแห้งมะเขือม่วงโดยใช้ลมร้อนที่ 70°C สูญเสียปริมาณฟีนอลิกน้อยกว่าที่ 50°C และทำให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าดัชนีความขาว (whiteness index, WI) สูงกว่าการใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 50-60°C เวลาในการทำแห้งสั้นกว่าส่งผลต่อการรักษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดได้ดี (Adiletta, *et al.*, 2016) ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้อุณหภูมิในการทำแห้งอาจเลือกใช้อุณหภูมิการทำแห้งปานกลางเพื่อช่วยรักษาปริมาณสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันได้ดี (Mesweeney & Seetharaman, 2015)

โดยทั่วไปชออร์พชันไอโซเทอรั่มเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของอาหารและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ หรือ Water activity (A_w) ของอาหาร มีความสำคัญต่อการแปรรูปเพื่อใช้กำหนดปริมาณความชื้น และ A_w ที่เหมาะสมในการแปรรูปและการเก็บรักษาอาหาร บรรจุภัณฑ์และวิธีการจัดเก็บอาหาร รวมถึงการเลือก

ปริมาณความชื้นสุดท้ายสำหรับการทำแห้ง (Schmidt & Lee, 2012) อาหารแต่ละชนิดมีชอร์พชันไอโซเทิร์มของความชื้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ในอาหารและสมบัติของน้ำในอาหาร ดิซอร์พชันไอโซเทิร์ม (Desorption isotherm) เป็นการศึกษากระบวนการคายความชื้นมีประโยชน์ในการหาความชื้นสุดท้ายเพื่อนำไปกำหนดเวลาปฏิบัติการทำแห้งที่เหมาะสม แบบจำลองชอร์พชันไอโซเทิร์มที่ใช้การทำแห้ง ได้แก่ สมการ Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Halsey และ Modified Chung-Pfost นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับผลผลิตทางการเกษตรจากพืช (Raji & Ojediran, 2011; Tejada-ortigoza, *et al.*, 2017)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้งโดยใช้สภาวะการทำแห้งต่าง ๆ เพื่อคัดเลือกวิธีการทำแห้งที่เหมาะสมสามารถรักษาปริมาณสารสำคัญได้ดีที่สุดและศึกษาดิซอร์พชันไอโซเทิร์มเพื่อทำนายจุดยุติการทำแห้งที่เหมาะสม สำหรับเป็นแนวทางการผลิตมะเขือผงต่อการใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบอาหารเพื่อสุขภาพหรือผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพอื่น ๆ เป็นต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

มะเขือม่วง (eggplant/aubergine) จัดอยู่ในสายพันธุ์ *Solanum melongena* ปลูกและเก็บเกี่ยวจากแหล่งเดียวกัน คือ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีวี เจเวียน ฟู้ดส์ จำกัด นำมาล้างเด็ดขั้วออก นำมาหั่นเป็นแผ่นบางตามขวางให้มีขนาดหนาเท่า ๆ กันหนา 0.2 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องสไลด์ (Saviol 350S, Italy) ทำการสะดัดน้ำเป็นเวลา 2 นาที นำไปวิเคราะห์ความชื้นเริ่มต้น (AOAC, 2005) และปริมาณสารสำคัญของมะเขือม่วงสด ได้แก่ ปริมาณสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ได้แก่ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชันก่อนการนำไปทำแห้ง

การศึกษาดิซอร์พชันไอโซเทิร์ม

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของอาหารและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ หรือ Water activity (A_w) ของอาหาร เรียกว่า ชอร์พชันไอโซเทิร์ม โดยอาหารแต่ละชนิดมีชอร์พชันไอโซเทิร์มของความชื้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะเนื่องจากมีโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน การศึกษาดิซอร์พชันไอโซเทิร์ม (Desorption isotherm) หรือการศึกษากระบวนการคายความชื้นเพื่อหาความชื้นสุดท้ายในการกำหนดจุดยุติการทำแห้งที่เหมาะสม ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองชอร์พชันไอโซเทิร์มที่ใช้การทำแห้ง ได้แก่ สมการ Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Halsey และ Modified Chung-Pfost ดังแสดงตารางที่ 1 นิยมใช้ในการทำนายสำหรับผลผลิตทางการเกษตรจากพืช (Raji & Ojediran, 2011; Tejada-ortigoza, *et al.*, 2017) ซึ่งแบบจำลอง Modified Henderson เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายวัตถุดิบอาหารที่มีค่า $A_w \leq 0.8$ และมีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ (Colley, *et al.*, 2006; Dranca & Oroian, 2016) แบบจำลอง Modified Oswin เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายวัตถุดิบที่มีค่า $0.1 \leq A_w \leq 0.8$ หรืออาหารจำพวกแป้ง เยื่อใยอาหาร ธัญพืช มีปริมาณความชื้นสูง (Al-muthtaseb, 2004)

ตารางที่ 1 แบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทอรัม

แบบจำลอง	ค่าความชื้นสมดุล $X_e = f(RH_e, T)$	ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล $RH_e = f(X_e, T)$
1. Modified Oswin (Oswin, 1946)	$(C_1 + C_2 T) / ((1/RH_e - 1)^{(1/C_3)}) \dots(1)$	$1 / (((C_1 + C_2 T) / X_e)^{C_3} + 1) \dots(2)$
2. Modified Henderson (Thompson et al., 1968)	$(\ln(1 - RH_e) / (-C_1(T + C_2)))^{(1/C_3)} \dots(3)$	$1 - \exp((-C_1(T + C_2) X_e^{C_3})) \dots(4)$
3. Modified Halsey (Iglesias and Chirife, 1976)	$(-\ln(RH_e) / \exp(C_1 + C_2 T))^{(-1/C_3)} \dots(5)$	$\exp(-\exp(C_1 + C_2 T) X_e^{-C_3}) \dots(6)$
4. Modified Chung-Pfost (Pfost et al., 1976)	$(1 - C_3) \ln((T + C_2) \ln(RH_e) - C_1) \dots(7)$	$\exp((-C_1 / (T + C_2)) \exp(-C_3 X_e)) \dots(8)$

การศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทอรัมโดยการนำมะเขือม่วงน้ำหนัก 100 กรัม เรียงใส่ในถาดอะลูมิเนียมที่มีช่องในลมร้อนของอากาศผ่านได้ของเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (Kluaynamthai รุ่น 12 Tray, 600 W Heater 380 V 50 Hz, Digital/Analog Temperature Controller PIP mode on/off 40-180°C (±1°C), Thailand) จากนั้นนำเข้าไปอบที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s สุ่มตัวอย่างออกมาหาความชื้น (X_e) โดยมาตรฐานแห้ง (% d.b) อย่างน้อย 7 ระดับ (Phoungchandang and Woods, 2000) พร้อมทั้งวัดค่า A_w (เมื่อ $A_w \times RH_e / 100$ หน่วยเป็น ทศนิยม) ด้วยเครื่อง AQUALAB (Series 4 TE) และอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุดสมดุลที่อุณหภูมิ 20 35 และ 50°C ตามลำดับ นำข้อมูลแทนค่าลงในสมการที่ 1-8 จากนั้นคัดเลือกแบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทอรัมที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากค่าทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายของสมการโดยใช้เทคนิค Non-Linear least square regression ด้วยโปรแกรมทางสถิติ (SPSS version 19.0) การตรวจสอบความเหมาะสม (Goodness of fit) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Correlation Coefficient, R^2) สูงที่สุด และค่าต่ำที่สุดของ Residual sum of squares (RSS) (สมการที่ 9) และ Standard error of estimate (SEE) (สมการที่ 10)

$$RSS = \sum_{i=1}^n (RH_m - RH_p)^2 \quad (9)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูล และหาค่า Standard error of estimate (SEE) ได้ดังนี้

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RH_m - RH_p)^2}{n-1}} \quad (10)$$

การศึกษาสภาวะการทำแห้งมะเขือม่วง

มะเขือม่วงที่เตรียมไว้แล้วในข้อ (1) อย่างละประมาณ 100 กรัม นำมาเรียงใส่ถาดอะลูมิเนียม (ภาพที่ 1) จากนั้นนำไปอบแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบการทดลองเป็น 3 สภาวะ ดังนี้ 1) ทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s, 2) ทำแห้งแบบ 2 ระยะ (2 stage) โดยระยะที่ 1 โดยใช้เครื่องไมโครเวฟ (Samsung รุ่น

GE711K, 20L, 100W/750W, 2450 MHz, 220V 50 Hz; Thailand) ที่ 750 วัตต์ เวลา 5 นาที จากนั้นนำไปอบต่อโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s เป็นการทำให้แห้งระยะที่ 2 และ 3) ทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Commercial oven, ยี่ห้อ Linkrich รุ่น PL-4 12kW Heater, 30-300°C, 220V 50 Hz; China) ที่ 70°C ทำการสูบลมออกมาซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ทั้งก่อนและระหว่างการทำให้แห้งทุก ๆ 5 นาที สำหรับเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนและเครื่องทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ส่วนเครื่องไมโครเวฟสูบลมซึ่งน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที จากนั้นทำให้แห้งจนกระทั่งมะเขือม่วงมีความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับความชื้นที่ทำนายได้จากสมการดีซอร์พชันไอโซเทอรั่ม โดยทำนายที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล 0.6 ($RHe \leq 0.6$) นำข้อมูลการทำแห้งคำนวณปริมาณความชื้นที่เวลาต่าง ๆ (Eq. 11) และหาอัตราการทำให้แห้ง (Drying rate, DR) คำนวณโดยใช้ผลต่างของปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (X_t) (Eq.12)

$$X_t = (X - X_e)/(X_0 - X_e) \quad (11)$$

เมื่อ X คือ ร้อยละปริมาณความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (% d.b), X_0 คือ ร้อยละปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่อน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (% d.b) และ X_e คือ ร้อยละปริมาณความชื้นสมดุล (% d.b.)

$$DR = (d(Xt))/dt ; \text{เมื่อ } t \text{ คือเวลา (นาที)} \quad (12)$$

ตัวอย่างมะเขือม่วงหลังทำให้แห้งไปบดให้ละเอียดจนได้อนุภาคน้อยกว่า 50 ไมครอน จากนั้นนำมามะเขือม่วงผงมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น วัดค่าสี L^* a^* b^* และค่าสีหลักโดยวิธี a^*/b^* เป็นดัชนีนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของอาหาร (Francis & Clydesdale, 1975) (Hunter Lab, รุ่น Color Quest XE, Hunter Lab, Inc. USA) วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และกิจกรรมการต้านออกซิเดชัน โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตัวอย่างโดยสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) เพื่อเปรียบเทียบผลการทำให้แห้งทั้ง 3 สภาวะ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยใช้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดเป็นเกณฑ์ตัดสินใจเลือกวิธีการทำแห้งที่เหมาะสม



ภาพที่ 1 มะเขือม่วงสดและมะเขือม่วงก่อนการทำแห้ง

การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญ

1. การสกัดตัวอย่าง

ทำการสกัดตัวอย่างมะเขือม่วงสดหรือมะเขือม่วงแห้งทำแห้ง โดยดัดแปลงวิธีตาม Boulekbache-Makhlouf, *et al.*, (2013) ซึ่งตัวอย่าง 2-5 กรัม เติมเมทานอล(CH₃OH) ความเข้มข้น 60% (v/v) ปริมาตร 20 ml ปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่อง Homogenizer (ยี่ห้อ Ystral รุ่น x10/20) 2 นาที นำไปให้ความร้อนในน้ำใน water bath ที่ 90°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 ปรับปริมาตรให้ได้ 25 ml ด้วย เมทานอลเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -18°C เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

2. ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

ปีเปตสารสกัดตัวอย่าง 0.5 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 2.5 ml Folin-Ciocalteu ที่เจือจางด้วยน้ำกลั่น (1:10) เป็นเวลา 8 นาที เติม 2 ml ของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ความเข้มข้น 7.5% (w/v) เก็บไว้ในที่มืด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Evolution 201) ที่ความยาวคลื่น 760 nm เทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) โดยดัดแปลงวิธีจาก Boulekbache-Makhlouf, *et al.*, (2013)

3. ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดได้ดัดแปลงจากวิธีของ Boulekbache-Makhlouf, *et al.*, (2013) โดยการปีเปตสารสกัดตัวอย่าง 0.5 ml ผสมน้ำกลั่น 3.2 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมโซเดียมไนไตรท์ (NaNO₂) ความเข้มข้น 5% (w/v) ปริมาตร 150 µL เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃) ความเข้มข้น 10% (w/v) ปริมาตร 150 µL เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นเติม 1 M ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตร 1 ml บ่มไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร เทียบกับกราฟมาตรฐานของควอร์เซทิน (Quercetin)

4. กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน

เตรียมสารละลาย ABTS^{•+} (2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt radical solution) เข้มข้น 7.4 M กับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K₂S₂O₈) ความเข้มข้น 2.6 mmol ผสมทั้ง 2 สารในอัตราส่วน 1:1 บ่มไว้ในที่มืด 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางสารละลาย 1 ml กับเมทานอล (CH₃OH) 24 ml วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร จากนั้นผสมสารสกัดจากมะเขือม่วงหรือสารมาตรฐาน (Trolox) 150 µl กับสารละลาย ABTS^{•+} 2,850 µL บ่มไว้ในที่มืดอุณหภูมิห้อง 15 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชันโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสาร Trolox โดยดัดแปลงวิธีจาก Boulekbache-Makhlouf, *et al.*, (2013)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละสิ่งทดลอง (multiple comparison) โดยวิธี Duncan's new Multiple Range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 19

ผลการวิจัย

มะเขือม่วงสดมีความชื้นต่อน้ำหนักเปียกเริ่มต้น 84.48% และมีปริมาณสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ได้แก่ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 376.38 ± 7.48 มิลลิกรัมสมมูลของแกลลิกต่อตัวอย่างแห้ง 100 กรัม ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด 844.08 ± 114.03 มิลลิกรัมสมมูลของเคอซิทินต่อตัวอย่างแห้ง 100 กรัม และกิจกรรมการต้านออกซิเดชันโดยวิธี ABTS 431.12 ± 21.41 มิลลิกรัมของสาร Trolox ต่อตัวอย่างแห้ง 100 กรัม

ดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของมะเขือม่วง

จากการสุ่มตัวอย่างมะเขือม่วงวัดความชื้นระหว่างการทำให้แห้งที่ 70°C 7 ระดับ คำนวณความชื้นสมดุล (X_e) ได้ ในช่วงร้อยละ 6.05 ถึง 216.93 โดยมาตรฐานแห้ง (d.b) และวัดค่า A_w ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (RH_e) ที่อุณหภูมิ 20, 35 และ 50°C ในช่วง 0.334 ถึง 0.969 เมื่อนำข้อมูลวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับแบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทิร์ม ได้แก่ Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost และ Modified Halsey (Eq. 1-8) โดยใช้เทคนิค Non-linear least square regression ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อทำนายค่าคงที่ของแบบจำลอง พบว่าค่าคงที่ของมะเขือม่วงสดพบว่าแบบจำลอง Modified Henderson มีค่า R^2 สูงสุดและค่า SEE ต่ำสุดสำหรับมะเขือม่วงสดในรูปแบบฟังก์ชัน X_e และแบบจำลอง Modified Oswin มีค่า R^2 สูงสุดและค่า SEE ต่ำสุดสำหรับมะเขือม่วงสดในรูปแบบฟังก์ชัน RH_e (ตารางที่ 2) โดยแบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของมะเขือม่วงสำหรับทำนายค่าปริมาณความชื้นสมดุล (X_e) เพื่อจุดยุติการทำแห้งมะเขือม่วงและสามารถสร้างกราฟดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของมะเขือม่วง (Eq. 13, ภาพที่ 2)

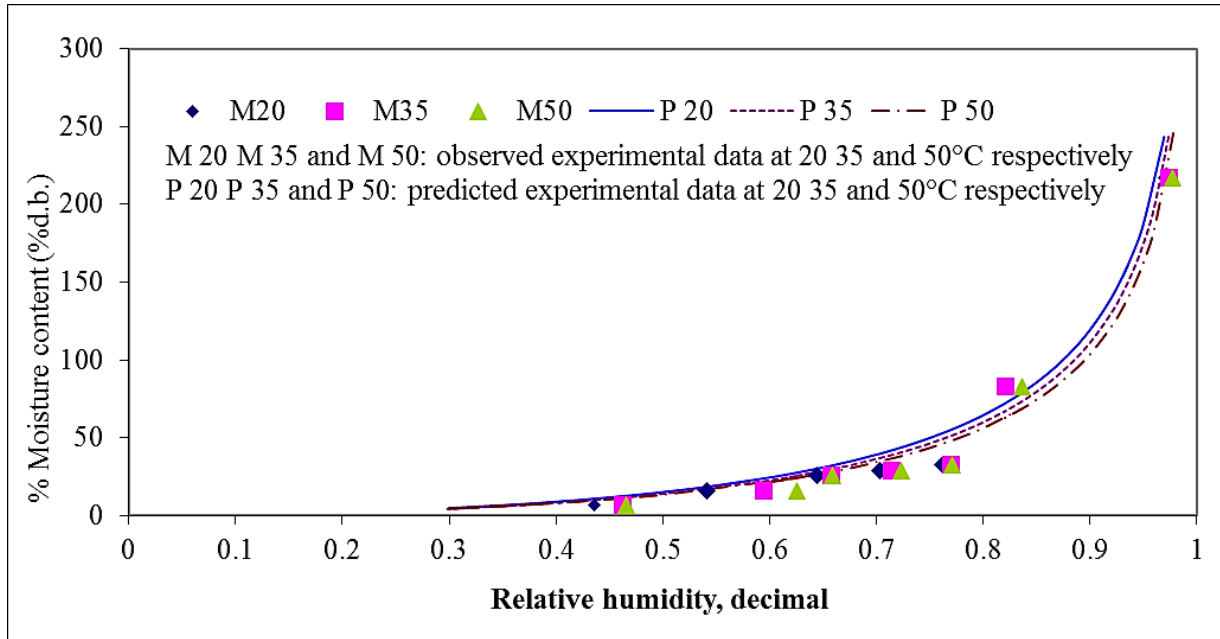
$$\text{ปริมาณความชื้นสมดุล } (X_e) = (\ln(1 - RH_e) / (-0.00406(T + 330.423))) (1/0.582) \quad \dots(13)$$

ผลของสภาวะการทำแห้งมะเขือม่วง

หลังจากทำให้แห้งมะเขือม่วงทั้ง 3 สภาวะการทำแห้ง พบว่าการทำให้แห้งแบบ 2 ระยะ โดยการใช้เครื่องไมโครเวฟที่ 750W ร่วมกับการทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C ใช้เวลาการทำแห้งสั้นที่สุด (30 นาที) และมีอัตราการทำให้แห้งสูงที่สุด (ตารางที่ 3, ภาพที่ 2) รองลงมาคือการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C และเครื่องทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ 70°C ใช้เวลาการทำแห้งนานที่สุด (190 นาที)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่แบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของมะเขือม่วง (C_1, C_2, C_3) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสมดุล ที่อุณหภูมิ 20, 35 และ 50°C

แบบจำลอง	C_1	C_2	C_3	RSS (% d.b.)	SEE (% d.b.)	R^2
$X_e = f(RH_e, T)$						
Modified Henderson	0.004	330.423	0.582	2.05E+03	9.43E+00	0.981
Modified Halsey	4.022	0.010	1.355	4.23E+03	1.36E+01	0.960
Modified Chung-Pfost	157.648	182.674	0.016	6.97E+03	1.74E+01	0.934
Modified Oswin	22.804	0.125	1.457	3.63E+03	1.26E+01	0.966
$RH_e = f(X_e, T)$						
Modified Henderson	0.001	274.869	0.517	2.90E-02	3.55E-02	0.965
Modified Halsey	1.288	0.004	0.665	3.30E-02	3.79E-02	0.960
Modified Chung-Pfost	254.822	211.395	0.036	7.60E-02	5.75E-02	0.909
Modified Oswin	12.202	-0.062	0.848	2.80E-02	3.49E-02	0.966

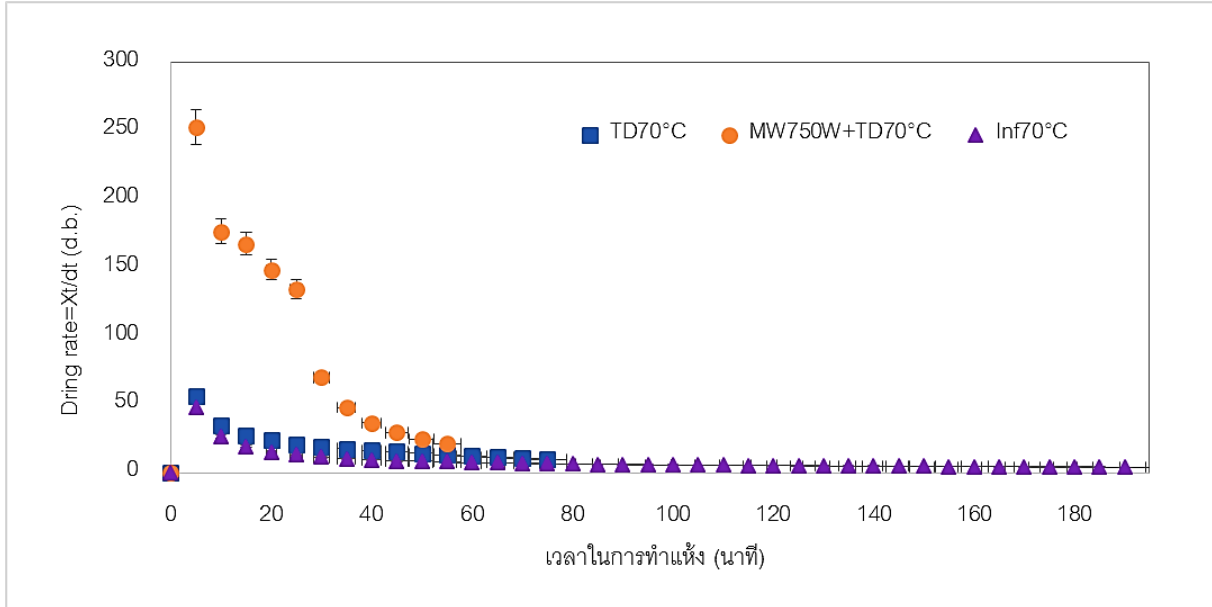


ภาพที่ 2 Desorption isotherms of eggplants at 20, 35 and 50°C, RH_e at 0.334 to 0.969 as predicted using the fitted modified Henderson ($X_e = f(RH_e, T)$) compared with the observed experimental data

ตารางที่ 3 เวลาในการทำแห้ง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของมะเขือม่วงหลังการทำแห้ง

สภาวะการทำแห้งที่	เวลาที่ใช้ในการ การทำแห้ง (นาที่)	ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของแกลลิกต่อ ตัวอย่างแห้ง 100 กรัม)	ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของ เคอซิทินต่อ ตัวอย่างแห้ง 100 กรัม)	กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน โดยวิธี ABTS (มิลลิกรัม Trolox ต่อ ตัวอย่างแห้ง 100 กรัม)
1. เครื่องทำแห้งแบบ ลมร้อนที่ 70°C	75 ^b	21.91 ^b ±1.67	24.74 ^b ±1.11	12.02 ^b ±0.39
2. การทำแห้งแบบ 2 ระยะ (2 stage)	30 ^c	43.17 ^a ±8.43	57.25 ^a ±11.64	16.26 ^a ±1.39
3. เครื่องทำแห้งด้วย รังสีอินฟราเรด ที่ 70°C	190 ^a	35.93 ^{ab} ±3.83	54.44 ^a ±7.57	16.71 ^a ±0.81

a,b,... Means within the same column followed by different letters are significantly different (p<0.05)



ภาพที่ 3 อัตราการทำแห้งของมะเขือม่วงที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ 1. การทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน 70°C (TD70°C) 2. การทำแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C (MW750W+TD70°C) และ 3. การทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วย ริงส์อินฟราเรดที่ 70°C (Inf 70°C)

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้นและค่าสีต่าง ๆ ของมะเขือม่วงหลังการทำแห้งแต่ละสภาวะ

สภาวะการทำแห้ง	% ปริมาณความชื้นต่อน้ำหนักแห้ง (d.b.)	ค่าสี			
		L*	a* ^{ns}	b*	a*/b*
1. เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C	13.81 ^b ±0.04	27.73 ^a ±1.49	2.59±0.54	11.69 ^a ±2.47	0.22 ^b ±0.00
2. การทำแห้งแบบ 2 ระยะ (2 stage)	17.21 ^a ±1.77	20.43 ^c ±0.42	2.51±0.55	11.43 ^b ±0.12	0.35 ^a ±0.01
3. เครื่องทำแห้งด้วยริงส์อินฟราเรดที่ 70°C	15.54 ^{ab} ±0.24	22.84 ^b ±0.54	3.02±0.20	8.45 ^{ab} ±2.67	0.36 ^a ±0.06

a,b,... Means within the same column followed by different letters are significantly different (p<0.05); ns is non-significant (p<0.05); mean ± standard deviation

วิจารณ์ผลการวิจัย

มะเขือม่วงสดพบว่ามีความชื้นสูงถึง 84.48% และมีองค์ประกอบของสารต้านออกซิเดชันต่าง ๆ เช่นเดียวกับ Concello *et al.*, (2012) และ Dranca & Oroian, (2016) ในการศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทอรัม ได้แก่ สมการ Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Halsey, Modified Chung-Pfost พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson สามารถแสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปแบบฟังก์ชัน $X_e=f(RH_e,T)$ ได้ดีที่สุด เนื่องจากมะเขือม่วงมีปริมาณเส้นใยอาหารสูง และมีปริมาณความชื้นสูงซึ่งสอดคล้องกับ Colley, *et al.*, (2006) และ Dranca & Oroian, (2016) แบบจำลอง Modified Henderson เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบอาหารที่มี $A_w \leq 0.8$ และมีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ และแบบจำลอง Modified Oswin สามารถแสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปแบบฟังก์ชัน $RH_e=f(X_e, T)$ ได้ดีที่สุด โดยที่ Al-muthtaseb, (2004) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Modified Oswin เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบ $0.1 \leq A_w \leq 0.8$ หรืออาหารจำพวกแป้ง เยื่อใยอาหาร ธัญพืช มีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองดีซอร์พชันไอโซเทอรัมของไบโหมอนและไบตาลีง (Phoungchandang, *et al.*, 2008; Potisate & Phoungchandang, 2010) นอกจากนั้นกราฟซอร์พชันไอโซเทอรัมของวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณน้ำในอาหารที่ยึดเกาะภายในวัตถุดิบนั้น ๆ (Udomkun, *et al.*, 2015; Tejada-ortigoza, *et al.*, 2017) และอุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ระยะห่างของโมเลกุลเพิ่มขึ้นการเกาะเกี่ยวกันเป็นไปอย่างหลวม ๆ (Mrad, *et al.*, 2012; Chottanom, *et al.*, 2018) เช่นเดียวกับกราฟดีซอร์พชันไอโซเทอรัมของมะเขือม่วงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อมีปริมาณความชื้นสมดุลเท่ากันหรือคงที่ และอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (RH_e) จะสูงขึ้นหรือปริมาณความชื้นสมดุล (X_e) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ณ ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (RH_e) เดียวกัน

ภายหลังการทำแห้งมะเขือม่วงทั้ง 3 สภาวะ พบว่าการทำแห้งแบบ 2 ระยะ โดยการใช้เครื่องไมโครเวฟที่ 750 W ร่วมกับการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C ใช้เวลาการทำแห้งสั้นที่สุด (30 นาที) เป็นผลสืบเนื่องมาจากคลื่นไมโครเวฟเป็นนวัตกรรมที่สร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงช่วยเร่งอัตราการทำแห้ง ช่วยลดเวลาในการทำแห้งลง โดยที่อัตราการทำแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟสูงกว่าการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (Dadal, *et al.*, 2007; Assawarachan, 2014) Zho, *et al.*, (2017) ศึกษาการทำแห้งลูกพลับด้วยไมโครเวฟที่ระดับ 10.7 W/g ร่วมกับการทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C พบว่าสามารถปริมาณกรดแอสคอบิกได้สูง เช่นเดียวกับ Wang, *et al.*, (2019) ศึกษาการทำแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟ 450 วัตต์ ร่วมกับการทำแห้งแบบลมร้อนที่ 60°C พบว่าสามารถคงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญได้สูง ดังนั้นภายหลังการทำแห้งมะเขือม่วงแบบ 2 ระยะ โดยใช้เครื่องไมโครเวฟที่ 750 วัตต์ 5 นาที ร่วมกับการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C นั้น จึงสามารถคงปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด รวมถึงการแสดงความเข้มข้นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี ABTS สูงกว่าการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สำหรับค่าสีของมะเขือม่วงที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 สภาวะ พบว่าค่าสี $L^* a^* b^*$ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่มะเขือม่วงหลังการทำแห้งทุก ๆ ตัวอย่างมีค่า a^*/b^* ที่แสดงค่าเป็นสีเหลือง-น้ำตาล (Francis and Clydesdale, 1975; Kone, *et al.*, 2013; Jia, *et al.*, 2019) โดยทั่วไปวิธีการทำแห้งมีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักและผลไม้ รวมถึงผลกระทบต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสำคัญต่างๆ โดยเฉพาะการทำแห้งด้วยลมร้อนมักจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่าง ๆ มากที่สุด (Sirijariyawat, *et al.*, 2017)

สรุปผลการวิจัย

มะเขือม่วงมีคุณค่าทางอาหารที่สำคัญและมีองค์ประกอบของสารต้านออกซิเดชันต่าง ๆ เมื่อทำการศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทอรัมเพื่อสร้างกราฟดีซอร์พชันไอโซเทอรัมและคัดเลือกสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำนายเวลาและความชื้นสำหรับปฏิบัติการทำแห้งที่ 70°C พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson สามารถแสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปแบบฟังก์ชัน $X_e=f(\text{RH}_e, T)$ ได้ดีที่สุด และแบบจำลอง Modified Oswin สามารถแสดงข้อมูลดีซอร์พชันไอโซเทอรัมในรูปแบบฟังก์ชัน $\text{RH}_e=f(X_e, T)$ ได้ดีที่สุด ภายหลังจากการทำแห้งมะเขือม่วงพบว่าการทำแห้งทั้ง 3 สภาวะ สามารถคงปริมาณสารสำคัญที่มีคุณสมบัติการต้านออกซิเดชันได้ โดยที่การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (การทำแห้งแบบ 2 ระยะ) ใช้เวลาการทำแห้งสั้นที่สุด และมีอัตราการทำแห้งสูงที่สุด ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้อาจใช้เป็นแนวทางที่ใช้ประโยชน์สำหรับมะเขือม่วงให้ยังคงปริมาณสารสำคัญที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันต่าง ๆ ได้นี้ สำหรับนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือส่วนประกอบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่หรือผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพอื่น ๆ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอย่างยิ่งสำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยพะเยา สัญญาเลขที่ RD61006 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. (2005). *Official method of analysis*. Association of Official Analytical Chemists. USA: Arlington, VA. 1015p.
- Adiletta, G, Russo, P, Crescittelli, A, & Matteo, D. (2016). Combined pretreatment for enhancing quality of dried and rehydrated eggplants. *Food Bioprocess Technology* ,9,1912-1923.
- Al-Muthaseb, AH, McMinn, WAM, & Magee, TRA. (2004). Water sorption isotherms of starch powders part 1: mathematical description of experimental data. *Journal of Food Engineering*, 61,297-307.
- Assawarachan, R. (2014). Drying agricultural products by microwave. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 1(2),31-42. (in Thai).
- Boulekbache-Makhlouf, L, Medouni, L, Medouni-Adar, S, Arkoub, L, & Madani, K. (2013). Effect of solvents extraction on phenolics content and antioxidant activity of the byproduct of eggplant. *Industrial Crops Products*, 49,668-674.
- Chottanom, P, Suwannarong, S, Amornsri, A, & Bunlue, K. (2018). Effect of osmotic dehydration on sorption isotherm, drying kinetics and lycopene in tomatoes. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 46(1), 1285-1291. (in Thai).
- Colley, Z, Fasina, OO, Branshy, D, & Lee, YY. (2006). Moisture effect on the physical characteristics of switchgrass pellets. *Transactions of the ASABE*, 49(6),1845-1856.



- Conellon, A, Zaro, MJ, Chaves AR, & Vicente, AR. (2012). Changes in quality and phenolic antioxidants in dark purple American eggplant (*Solanum melongena* L. cv. Lucia) as affects by storage at 0°C and 10°C. *Postharvest Biology and Technology*, 66, 35-41.
- Dadal, G, Apar, DK, & Özbek, B. (2007). Microwave drying kinetic okra. *Drying Technology* 25:917-924.
- Dadal, G, Demirhan, E, & Özbek, B. (2007). Color kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying Technology*, 25,1713-1723.
- Dongbang, W. (2013). Infrared radiation and applications in food industries. *Burapha Science Journal* ,18(2). 299-304. (in Thai).
- Dranca, F, & Oroian, M. (2016). Optimization of ultrasound-assisted extraction of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) from eggplant (*Solanum melongena* L.) peel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31,637-646.
- Francis,FJ, & Clydesdale, FM. (1975). *Food Colorimetry: Theory and applications*. Westport Connecticut: The AVI Pub. 477p.
- Gümüşay, ÖA, Borazan, AA, Ercal, N,& Demirkol, O. (2015). Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food Chemistry*, 173,156-162.
- Han, SW, Tae, J, Kim, JA, Kim, DK, Seo, GS, Yun, KJ, Choi, SC, Kim, TH, Nah, YH, & Lee, YM. (2003). The aqueous extract of *Solanum melongena* inhibits PAR2 agonist-induced inflammation. *Clinica Chimica Acta* ,328,39-44.
- Iglesias, HA, & Chirife, J. (1976). Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *Journal Food Technology*, 11,109-116.
- Jia, Y, Khalifa, I, Hu, L, Zhu, W, Li, J, Li, K, & Li, C. (2019). Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and combined hot-air-microwaves, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioprocess Processing*, 118,67-76.
- Jino, P, & Assawarachan, R. (2015). Microwave drying kinetics of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leaves. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 21(1),16-24. (in Thai).
- Kone, K, Druon, C, Gaimpieba, E, Delmotte, M, Duquenoy, A, & Lagueroe, J. (2013). Power density control in microwave assisted air drying to improve quality of food. *Journal of Food Engineering*, 119,750-757.
- Luthria, L, Singh, AP, Wilson, T, Vorsa, N, Banuelos, GS, & Vinyard, BT. (2010). Influence of conventional and organic agricultural practices on the phenolic content in eggplant pulp: plant-to-plant variation. *Food Chemistry*, 121,406-411.
- Matsubara, K, Kaneyuki, T, Miyake, T, & Mori, M. (2005). Antiangiogenic activity of nasunin, an antioxidant anthocyanin, in eggplant peels. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*, 53, 6272-6275.
- McSweeney, M, & Seetharaman, K. (2015). State of polyphenols in the drying process of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5),660-669.



- Mrad, ND, Bonazzi, C, Bondhrioua, N, Kechaou, N, & Courtois, F. (2012). Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition of pears and apples. *Drying Technology*, 30, 1397-1406.
- Oroian, M, & Escriche I. (2015). Antioxidant: characterization, natural sources extraction and analysis. *Food Research International*, 74,10-36.
- Oswin, CR. (1946). The kinetic of package life. III. *Journal of the Society of Chemical Industry* 65:419-421.
- Panyayuen, A, Lek-ong, J, Kunsuwan, K, & Sa-adchum, P. (2018). The study of suitable using microwave followed by hot air. *RMUTP Research Journal*, 13(1),63-77.
- Pfost HB, Maurer SG, Chung DS, & Milliken GA. (1976). Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *Transactions ASAE*, 76,3520.
- Phoungchandang, S, & Woods. (2000). Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Journal of Food Science*, 65(4),613-657.
- Phoungchandang, S, Tochip, L, & Srijesdaruk, V. (2008). White mulberry leaf drying by tray and heat pump dehumidified dryer. *World Journal of Agricultural Science*, 4(s),844-851.
- Potisate, Y, & Phoungchandang, S. (2010). Chlorophyll Retention and Drying Characteristics of Ivy Gourd Leaf (*Coccinia grandis* Voigt) Using Tray and Heat Pump–Assisted Dehumidified Air Drying. *Drying Technology*, 28(6),786-797.
- Potisate, Y, & Phoungchandang, S. (2015). Microwave drying of Moringa oliefera (Lam.) leaves: Drying characteristics and quality aspects. *KKU Research Journal*, 20(1),16-24.
- Raji, AO, & Ojediran, JO. (2011). Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. *Food and Bioproducts Processing*, 89,178-184.
- Rattanaphitakkul, K. (2007). Influence of dehydrate process on quality changes and antioxidant activity of dried banana. [MS Thesis] Department of Food Science and Technology, Naresuan University Phitsanulok, Thailand. (in Thai)
- Schmidt, SJ, & Lee, LW. (2012). Comparison between water vapor sorption isotherms obtained using the new dynamic dew point isotherm method and those obtained using the standard saturated salt slurry method. *International Journal Food Properties*, 15,236-248.
- Sirijariyawat, A, Polviluy, C, & Yalai, K. (2017). Effect of drying methods on physical property of spring onion. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 45 Suppl (1), 1155-1161. (in Thai).
- Soponronnarit, S. (1997). *Drying of some grains and foods*. Bangkok: King Mongkut's University. (in Thai)
- Tejada-Ortigoza, V, Garcia-Amezquita, LE, Serment-Moreno, V, Torres, JA, & Welti-Chanes, J. (2017). Moisture sorption isotherms of high pressure treated fruits peels used as dietary fiber sources. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 43,45-53.
- Thompson, TL, Peart, RM, & Foster, GH. (1968). Mathematical simulation of corn drying-a new model. *Transactions ASAE*, 24,582-586.



- Udomkun, P, Argyropoulos, D, Nagle, M, Mahayothee, B, & Müller, J. (2015). Sorption behaviors of papayas as affected by compositional and structural alterations from osmotic pretreatment and drying. *Journal of Food Engineering*, 157,14-23.
- Vaclavik ,VA, & Christian, EW. (2014). Vegetables and fruits in essentials of food science. 4th ed. *Food Science*. Pp.83-113.
- Wang, Q, Li, S, Han, X, Ni, Y, Zhao, D, & Hao, J. (2019). Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods. *LWT-Food Science and Technology*, 107, 236-242.
- Zaro, MJ, Ortiz, LC, Keunchkarian, S, Chaves, AR, Vicente, AR, & Concello, A. (2015). Chlorogenic acid retention in white and purple eggplant after processing and cooking. *LWT-Food Science and Technology*, 64, 802-808.
- Zho, G, Zhang, R, Liu, L, Deng, Y, Wei, Z, Zhang, Y, Ma, Y, & Zhang, M. (2017). Different thermal drying methods affect the phenolic profiles, their bioaccessibility and antioxidant activity in *Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hassk berries. *LWT-Food Science and Technology*, 79, 260-266.