ปัจจัยของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของพริกไทยดำ

Effect of Drying with Heat Convection and Heat Radiation on Drying Kinetics and Quality Aspect of Black Pepper

อัจฉรา แซ่โค้ว[1], สุภาวรรณ ฏิระวณิชย์กุล[2] และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล[3,4]*

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[3] สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[4] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Achara Sae-Khow[1] Supawan Tirawanichakul[2] and Yutthana Tirawanichakul[3,4]*

[1,2] Department of Chemical Engineering,

[3] Energy Technology Research Center (ETRC) Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

[4] Plasma and Energy Technology Research Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพการอบแห้งพริกไทย โดยกระบวนการอบแห้งแบบ 1 ขั้นตอน ด้วยการพาความร้อนของลมร้อน การแผ่รังสีใต้แดงและกระบวนการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยการแผ่รังสีของไมโครเวฟร่วมการพาความร้อนด้วยลมร้อน และการอบแห้ง 2 ขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและรังสีใต้แดง โดยความชื้นเริ่มต้นของเม็ดพริกไทยสดและความชื้นสุดท้ายของเม็ดพริกไทยแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 300-400 ของมูลฐานแห้งและร้อยละ 12-16 ของมูลฐานแห้ง ตามลำดับ ผลทดลองพบว่า การอบแห้งพริกไทยเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิอบแห้งมีผลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้งและระยะเวลาอบแห้ง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งสูงทุกแหล่งพลังงานความร้อนจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่ากรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งต่ำ และที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันการอบแห้งด้วยรังสีใต้แดงเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ยังผลสูงที่สุด ในกรณีการสร้างแบบจำลองทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น สรุปได้ว่า แบบจำลองของ Page สามารถทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยรังสีใต้แดงทั้งแบบขั้นตอนเดียว การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียว และการอบแห้ง 2 ขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและรังสีใต้แดงได้ดีที่สุด ส่วนกรณีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ไมโครเวฟกับลมร้อน ผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นจะมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองลอการิทึม (Logarithmic model) และจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้แก่ การหาค่าสีในระบบ CIE-lab ในเทอมของความสว่าง (L*) ความเป็นสีแดง (a*) และความเป็นสีเหลือง (b*) และร้อยละของการหดตัว สรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำ (อัตราการอบแห้งต่ำ) การหดตัวของพริกไทยมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูง (อัตราการอบแห้งสูง) และค่าความสว่าง (L*) ของพริกไทยภายหลังการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง การอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นค่าความสว่างลดลงกว่ากรณีเงื่อนไขอบแห้งอื่นๆ โดยอุณหภูมิในการอบแห้งไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ($p<0.05$) และผลิตภัณฑ์พริกไทยดำอบแห้งสำหรับทุกสภาวะการทดลองเป็นที่ยอมรับในการบริโภค สำหรับการหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สรุปได้ว่า

***Corresponding author.** E-mail: yutthana.t@psu.ac.th

การอบแห้งโดยการแผ่รังสีความร้อนจากรังสีใต้แดง และการใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมไมโครเวฟและรังสีใต้แดงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำเมื่อเทียบกับสภาวะการอบแห้งอื่นๆ ในการอบแห้งพริกไทยดำที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-80°C.

คำสำคัญ : จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ลมร้อน รังสีใต้แดง คลื่นไมโครเวฟ พริกไทย

Abstract

The objective of this research was to study the effect of drying conditions on drying kinetics and physical qualities of pepper. The drying processes consisted of 1 stage hot air (HA) drying, 1 stage infrared (IR) drying, two stages drying with microwave (MW) and HA sources and two stages drying with MW and IR sources. The initial moisture content and final moisture content was fixed in ranges of 300-400% dry-basis and 12-16% dry-basis, respectively. The results showed that the drying rate of pepper was in the falling drying rate period. For all drying processes, the drying temperature relatively affected to rate of drying and drying time. In addition, the specific energy consumption of all drying processes with a higher temperature was lower than drying with a lower temperature. At the same drying temperature, the pepper dried with IR source has the highest drying rate and give the highest effective diffusion coefficient value compared to the other drying processes. According to mathematical drying modeling using non-linear regression analysis, the conclusion stated that the predicted values using the Page's model was the best fitting with experimental values for 1 stage IR drying, 1 stage HA drying and 2 stages drying with MW and IR sources. Additionally, the simulated value using Logarithmic model had a good relation with exact values for 2 stages drying with MW and HA sources. To determine the physical quality of dried pepper samples in terms of colorness values (lightness (L*), redness (a*) and yellowness (b*) CIE-lab scale) and percentage of shrinkage, the conclusion stated that shrinkage value of pepper dried with a lower temperature (low drying rate) was relatively high compared to a higher temperature drying (high drying rate). The lightness value (L*) of dried pepper with low temperature tend to decrease compared to drying with high temperature. And the HA drying had high decreasing lightness value (L*) compared to the other drying processes and drying temperature had insignificant effect to sensory evaluation ($p<0.05$). Dried black pepper product under all drying conditions was in overall acceptable level. For energy consumption evaluation, the conclusion stated that radiative heat transfer by infrared and combined microwave-infrared drying had relatively low energy consumption compared to the other drying conditions of 50-80°C.

Keywords : Drying kinetics, hot air, Infrared, Microwave, pepper

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

บทนำ

พริกไทย (*Piper nigrum*) เป็นเครื่องเทศที่ตลาดการค้าทั่วโลกต้องการมากที่สุด จนมีชื่อเรียกพริกไทยว่า “ราชาแห่งเครื่องเทศ” โดยประเทศไทยสามารถส่งออกพริกไทยได้มากถึง 83,023 ตันในปี 2552 (สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยปี, 2552) พริกไทยที่ใช้ในทางการค้ามีทั้งพริกไทยสดและพริกไทยแห้ง โดยพริกไทยสดจะนำไปใช้ในการประกระกอบอาหาร จะช่วยเพิ่มรสได้ดีมาก พริกไทยแห้งมี 2 ชนิด คือ พริกไทยดำและพริกไทยขาว พริกไทยดำเป็นพริกไทยที่มีความแก่พอเหมาะนำมาทำให้แห้งด้วยความร้อน จึงจะทำให้สีของผลพริกไทยเปลี่ยนเป็นสีดำส่วนของผิวจะมีลักษณะเหี่ยวย่น ส่วนพริกไทยขาวเป็นส่วนของผลที่นำมาลอกส่วนเปลือกและเนื้อหุ้มออกจึงทำให้ดูน่ารับประทานมากขึ้น การใช้พริกไทยส่วนใหญ่มุ่งเน้นหนักในด้านช่วยปรุงแต่งรสชาติอาหารเป็นสำคัญ แต่การที่พริกไทยมีรสเผ็ดร้อนอยู่ด้วยจึงได้มีการนำพริกไทยมาใช้ประโยชน์ทางยาด้วย เช่น ใช้ขับลม อาการนอนไม่หลับ ขับเสมหะ หอบ ไอ สะอึกและเป็นยาบำรุงธาตุ

เทคโนโลยีการการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิตโดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) สำหรับกระบวนการอบแห้งนั้นสามารถทำได้โดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหลายชนิด และใช้เทคนิคการอบแห้งได้หลายอย่าง อาทิเช่น การอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชัน (Tirawanichakul, 2004; Soponronnarit *et al*., 2005; ศิรประภา คลังทองและคณะ, 2549) การอบแห้งแบบความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Bala & Janjai, 2009) การเร่งกระบวนการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า (Tirawanichakul, *et al*., 2007) การอบแห้งด้วยรังสีใต้แดง (Tirawanichakul *et al*., 2008) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Tulasidas *et al*., 1995; Varith *et al*., 2009) การอบแห้งด้วยความร้อนจากชีวมวล เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็วช้าต่างกัน ดังนั้นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งในแต่เงื่อนไขแต่ละกระบวนการจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษา และทราบแนวทางการอบแห้งและประการสำคัญคือคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จะต้องเป็นที่ยอมรับได้ การอบแห้งด้วยการใช้พลังงานแหล่งต่างๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ซึ่งในปัจจุบันการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีใต้แดง เป็นการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดช่วงความยาวคลื่นรังสีใต้แดงจากแหล่งพลังงานความร้อน มาตกกระทบลงบนผิวของวัสดุ แล้วรังสีทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุ ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกวัสดุดูดกลืนเอาไว้ และทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นในวัสดุ ดังนั้นน้ำที่อยู่ในโมเลกุลก็จะได้รับความร้อนและเกิดการแพร่ไปยังบริเวณผิวของวัสดุ การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ (ศิรประภา คลังทองและคณะ, 2549; Sharma *et al*., 2005; Soponronnarit *et al*., 2005; Kathiravan *et al*., 2008) โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การอบแห้งใบกระเพราแดงด้วยรังสีใต้แดงมีอัตราการอบแห้ง สูงกว่าแบบลมร้อน และยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (Apintanapong, 2009) และสำหรับกระบวนการอบแห้งกลีบกระเทียมด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่แตกแตกต่างกัน ทำให้อัตราการอบแห้งที่ต่างกันความชื้นสุดท้ายที่ต่างกัน (Sharma *et al*., 2005) สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพสีและอัตราการคืนตัวของวัสดุหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งลำไยด้วยรังสีใต้แดงร่วมกับลมร้อน พบว่า เมื่อกำลังใต้แดงและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังของรังสีใต้แดงไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงและอัตราการคืนตัว พบว่า กำลังของรังสีใต้แดง อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการคืนตัว (Nuthong *et al*., 2011) ด้วยเหตุนี้การใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีใต้แดงร่วมกับลมร้อนจึงมีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาแนวทางการอบแห้งเมล็ดพริกไทยสดเพื่อผลิตเมล็ดพริกไทยดำแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดง และลมร้อน และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดง และไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน รวมทั้งสิ้น 4 กระบวนการอบแห้ง โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลและสภาวะการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-80°C ที่มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพและการทดสอบโดยประสาทสัมผัสของพริกไทยดำได้แก่ สี ร้อยละหดตัว และสุดท้ายเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. วัสดุ

เมล็ดพริกไทยสดซื้อจากห้างสรรพสินค้าและตลาดสดอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา นำเมล็ดพริกไทยมานวดเพื่อแยก

ก้านออก และนำมาล้างทำความสะอาดพักให้สะเด็ดน้ำไว้บนตะแกรงในสภาวะอากาศแวดล้อม และก่อนเริ่มการทดลองแต่ละครั้งจะทำการสุ่มตัวอย่างเมล็ดพริกไทยสดเพื่อนำไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยตามมาตรฐาน AOAC (1995) กล่าวคือ ก่อนอบแห้งจะชั่งน้ำหนักเมล็ดพริกไทยสดประมาณ 10-20 g และนำใส่กระป๋องหาความชื้น แล้วนำไปเข้าเครื่องควบคุมอุณหภูมิและตั้งอบแห้งที่อุณหภูมิ 103°C ทำการอบแห้งเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากเมล็ดพริกไทยตัวอย่างออกให้หมด หลังจาก 72 ชั่วโมง จะนำตัวอย่างเมล็ดพริกไทยออกมาหาชั่งน้ำหนักและหาค่าความชื้นต่อไปในหน่วยร้อยละมูลฐานแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องอบแห้ง เป็นเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยของคณะวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุลและคณะ, 2555) รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเครื่องอบแห้งนี้มีแหล่งพลังงานความร้อนสองชนิด ได้แก่ แหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาความร้อน คือ ลมร้อนจากขดลวดความร้อนไฟฟ้า และแหล่งพลังงานความร้อนแบบการแผ่รังสี คือ แท่งรังสีใต้แดง (หรือที่มักเรียกอีกอย่างว่ารังสีอินฟราเรด) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงดำเนินการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทยได้ 4 แนวทาง ได้แก่ การอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดง และการอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยลมร้อน การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดง และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน รายละเอียดของเครื่องอบแห้งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

ก. ห้องอบแห้ง เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดภายนอก (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 61.0×47.5×53 cm^3 และมีขนาดห้องอบแห้ง (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 45.5×34.5×38.5 cm^3 โดยทำการวัดอุณหภูมิต่างๆ ในระบบอบแห้งและสภาวะแวดล้อมด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (5 ตำแหน่ง) ทั่วห้องอบแห้ง วัดอุณหภูมิของเมล็ดพริกไทย และวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกของสภาวะแวดล้อม โดยต่อปลายสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเวลา (Yogokawa Data logger model FX100) ซึ่งมีความละเอียด ±0.5°C ภายในห้องอบแห้งมีหลอดรังสีใต้แดง 3 หลอดๆ ละ 500 W (สามารถใช้งานโดยควบคุมการใช้งานโดยเปิดหลอดรังสีใต้แดงครั้งละหลอด หรือหลายๆ หลอดพร้อมกันได้ตามความต้องการใช้งานกำลังไฟฟ้า) และกำหนดระยะห่างระหว่างกับเม็ดพริกไทยในถาดอบแห้งมีค่าเท่ากับ 15 cm

ข. พัดลมแบบใบพัดโค้งหน้ายี่ห้อ DAICHI ขนาด 0.5 hp เส้นผ่าศูนย์กลาง 10˝

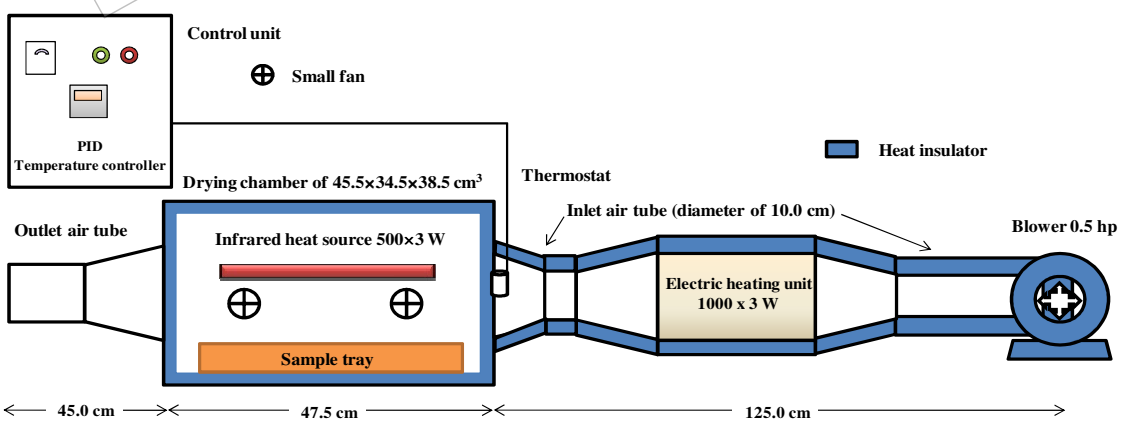
ค. ถาดที่ใช้ในการอบแห้ง ขนาด 38.5×45.5 cm^2 จำนวน 1 ถาด

ง. ขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 1,000 W (บริษัทแสงชัยมิเตอร์) จำนวน 3 ตัว

จ. อุณหภูมิอบแห้งควบคุมด้วยหน่วยควบคุมอุณหภูมิชนิด PID (Proportional–Integral–Derivative Controller) ซึ่งมีเทอร์โมสตัทเป็นตัวเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิ มีความละเอียด ±0.5°C

ฉ. เครื่องชั่งไฟฟ้าขนาดน้ำหนักที่ชั่งได้ 1-3,000 g (A&D electric balance model FX3000)

ช. วัตต์ฮาวมิเตอร์แบบใช้กับไฟฟ้าสามเฟส ยี่ห้อ MITSUBISHI ทนกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 25 A สำหรับวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทั้งหมด



ภาพที่ 1 รายละเอียดของเครื่องอบแห้ง (สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุลและคณะ, 2555)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.2 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อ DAEWOOD รุ่น KOR-63D ขนาดกำลัง 800 W ในกรณีที่เลือกใช้เครื่องเตาอบไมโครเวฟสำหรับการทดลองนี้ เพราะเป็นเตาอบไมโครเวฟที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งหาซื้อง่ายและสะดวกต่อการดำเนินการทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับพริกไทยดำต่อไป (ก่อนที่จะขยายสเกลหากผลการทดลองมีข้อบ่งชี้ว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งได้)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมพริกไทย

นำพริกไทยสดมานวดเพื่อแยกก้านออก ทำความสะอาด โดยคัดขนาดเมล็ดพริกไทยสมบูรณ์ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน แล้วนำมาจัดเรียงในถาดอบแห้ง

3.2 กระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

หลังจากทำความสะอาดเมล็ดพริกไทยสดและนำวางเรียงกระจายให้เต็มถาดขนาด 38.5×45.5 cm^2 เป็นที่เรียบร้อย จึงนำไปชั่งหาน้ำหนักก่อนอบแห้ง และเริ่มทำการอบแห้งพริกไทย ทำการบันทึก น้ำหนักพริกไทยกับเวลา อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง-เปียก (เก็บข้อมูลทุก 5 นาที เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บข้อมูลทุก 15-20 นาที จนสิ้นสุดการทดลอง) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 การอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอน

- อบแห้งด้วยรังสีใต้แดงที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-80°C โดยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งครั้งใหม่ครั้งละ 10°C

- อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงด้วยความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1.3 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 80°C

3.2.2 การอบแห้งแบบสองขั้นตอน

- อบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยอบแห้งช่วงต้นด้วยเตาอบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 400 W นาน 3 นาที หลังจากนั้นทำการอบแห้งพริกไทยด้วยรังสีใต้แดงที่กำลัง 1,000 W อุณหภูมิอบแห้ง 50-80°C โดยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งครั้งใหม่ครั้งละ 10°C

- อบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยอบแห้งช่วงต้นด้วยเตาอบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 400 W นาน 3 นาที และหลังจากนั้นทำการอบพริกไทยด้วยลมร้อนที่ความเร็วลม 1.3 m/s โดยทำการทดลอง ช่วงอุณหภูมิ 50-80°C โดยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งครั้งใหม่ครั้งละ 10°C

3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการทดลองเกี่ยวกับการอบแห้ง โดยปกติค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุจะมีความแตกต่างกันบ้าง ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของตัวอย่างสามารถเปรียบเทียบกันได้ และไม่มีผลของหน่วยในการวัดเข้ามาเกี่ยวข้อง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นจึงมักแสดงในรูปเทอมไร้หน่วย (dimensionless analysis) ได้แก่ การทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในรูปอัตราส่วนความชื้น โดยนิยามอัตราส่วนความชื้นแสดงรายละเอียดดังสมการที่ (1) (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำสมการที่ (1) นี้ไปใช้ในการคำนวณอัตราส่วนของพริกไทยดำเช่นกัน

$$MR = Moisture\ ratio = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (1)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมูลฐานแห้ง (dry-basis)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ, เศษส่วนมูลฐานแห้ง (dry-basis)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมูลฐานแห้ง (dry-basis)

สำหรับในการทดลองนี้ จะดูความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดพริกไทยที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาอบแห้งในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอ็มพิริคัล (Empirical equation) เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ มีความไม่ซับซ้อนและสามารถใช้ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตัวอย่างต่างๆ ได้เป็นอย่างดีภายใต้สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งนั้นๆ (Bala, 1997; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) และสมการอบแห้งแบบเอ็มพิริคัลนี้ไม่ขึ้นกับลักษณะเฉพาะของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการอบแห้ง เช่น รูปทรงทางเรขาคณิต, ความเป็นรูพรุน เป็นต้น ตารางที่ 1 เป็นตารางแสดงสมการอบแห้งทางคณิตศาสตร์แบบเอ็มพิริคัล 7 สมการที่เลือกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทยนี้

3.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (Effective diffusion coefficient, D)

โดยปกติกระบวนการอบแห้ง ช่วงต้นของการอบแห้งอาจจะมีอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate) และหลังจากนั้นการอบแห้งที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate) กล่าวคือ ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นั้นผิวของ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 1 สมการเอ็มพิริคัลสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Hii *et al*., 2009; Tirawanichakul and Tirawanichakul, 2004)

No	Model Name	Empirical drying model	
1.	Newton	$MR=exp(-kt)$	(2)
2.	Page	$MR=exp(-kt^n)$	(3)
3.	Henderson and Pabis	$MR=a\ exp(-kt)$	(4)
4.	Logarithmic	$MR=a\ exp(-kt)+c$	(5)
5.	Two term	$MR=a\ exp(-k_1t)+b\ exp(-k_2t)$	(6)
6.	Logistic	$MR=a/(1+exp(kt))$	(7)
7.	Wang and Singh	$MR=1 + at + bt^2$	(8)

หมายเหตุ: a b k_1 k_2 k และ n เป็นค่าคงที่ใดๆ ในสมการอบแห้ง ซึ่งหาได้จากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) และ t หมายถึงระยะเวลาอบแห้ง, วินาที (s)

วัสดุอบแห้งยังคงอิ่มตัวด้วยน้ำ อัตราการอบแห้งหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะถูกจำกัดโดยอัตราการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งกำเนิดพลังงานไปยังวัสดุอบแห้ง และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะบ่งชี้ให้เห็นความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เกิดขึ้นทั้งการส่งผ่านความร้อนและการส่งผ่านมวล (Crank, 1975) ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นหรือปริมาณน้ำถูกควบคุมด้วยกลไกภายในวัสดุ ทำให้ปัจจัยของรูปทรงทางเรขาคณิต ลักษณะเฉพาะของวัสดุและพื้นที่ผิวในการถ่ายเทพลังงานและมวลมีผลต่อการอบแห้งที่เกิดขึ้น ซึ่งการทำนายอัตราส่วนความชื้นนี้มีความซับซ้อนกว่ากรณีการทำนายด้วยสมการอบแห้งแบบเอ็มพิริคัล ปัจจุบันได้มีการนำหลักการทางทฤษฎีการแพร่และการส่งผ่านมวลมาใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงการอบแห้งลดลง จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุตามทฤษฎีของ Luikov (Crank, 1975; Bala, 1997; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุและความดันรวม แต่เนื่องจากแบบจำลองมีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงไม่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย แต่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นหรือเกรเดียนท์ของความชื้น ซึ่งเมื่อน้ำเคลื่อนที่มายังผิวของวัสดุแล้วจึงจะระเหยกลายเป็นไอ อัตราการระเหยของน้ำนี้จะถูกกำจัดโดยการแพร่ของความชื้นซึ่ง อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของการถ่ายเทมวลแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนท์ความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (9)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla[D(\nabla M)] \qquad (9)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล ซึ่งหมายถึงเทอมของกลไกการส่งผ่านความชื้นทั้งหมดในวัสดุตัวอย่างที่อบแห้ง มีหน่วยเป็น เมตร^2/วินาที (m^2/s)

โดยค่าพารามิเตอร์ D นี้จะหาได้จากเส้นโค้งของการอบแห้งแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลลดลงของผลการทดลอง โดยมีสมมุติฐานว่าเกรเดียนท์ของความชื้นเริ่มต้นมีค่าคงที่ ไม่คิดค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำจากสภาวะแวดล้อมและปัจจัยของการหดตัวมีผลน้อยมาก (Crank, 1975; Bala, 1997) เป็นต้น ดังนั้นจากสมการที่ (9) จะสามารถหาผลเฉลยทั่วไปของสมการการเปลี่ยนแปลงความชื้นนี้ได้ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ จะได้ผลเฉลยทั่วไปสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ ดังปรากฏในเอกสารและผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Bala, 1997; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540; Tirawanichakul *et al*., 2008)

สำหรับเมล็ดพริกไทยนั้นมีรูปทรงเราคณิตเป็นทรงกลม ซึ่งมีผลเฉลยเป็นดังสมการที่ (10)

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{r^2}\right) \qquad (10)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นยังผล, เมตร^2/วินาที (m^2/s)

r คือ รัศมีของเมล็ดพริกไทย, เมตร (m)

t คือ เวลา, วินาที (s)

อย่างไรก็ดีในการทดลองการอบแห้งนั้นมักจะมีปัจจัยของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะอัตราการอบแห้งจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอบแห้ง และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นยังผลและอุณหภูมิอบแห้งได้ในรูปของสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$D = A\ exp\left(\frac{-D}{T_{abs}}\right) \quad (11)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ของสมการ ซึ่งค่า B ในบางเอกสารอ้างอิง (Bala, 1997; สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540; Tirawanichakul *et al*., 2008) จะเขียนในรูปสมการ $B = \left(\frac{E_a}{R}\right)$ โดยที่ E_a คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ (Activation energy), kcal/kg mol และค่า R คือ ค่าคงตัวสากลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-โมล-เคลวิน (kJ/kg mol K)

T_{abs} คือ อุณหภูมิองศาสมบูรณ์, เคลวิน (K)

3.5 อัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

จากผลการทดลองทำการคำนวณหาอัตราการอบแห้งโดยนำค่าความชื้นของพริกไทยก่อนการอบแห้ง และหลังการอบแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด คำนวณหาอัตราการอบแห้ง (DR, kg·of water evaporated/h) ดังสมการที่ (12) ดังนี้

$$Drying\ rate,\ DR = \frac{(M_{in}-M_f)W_d}{drying\ time\ (t)} \quad (12)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, ร้อยละมูลฐานแห้ง (dry-basis)

M_f คือ ความชื้นสุดท้าย, ร้อยละมูลฐานแห้ง (dry-basis)

W_d คือ มวลของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม (kg)

t คือ ระยะเวลาในการอบแห้ง, ชั่วโมง (h)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg of water evaporated) ที่ใช้ในการอบแห้งพริกไทยดำ คำนวณตามสมการที่ (13) (Tirawanichakul, 2004; สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ, 2555)

$$Specific\ energy\ consumption,\ SEC = \frac{3.6E_p}{(M_{in}-M_f)W_d} \quad (13)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย (MJ/kg of water evaporated)

E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้, kWh อ่านจากวัตต์ฮาวมิเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานจากการไฟฟ้านครหลวงเรียบร้อยแล้ว และตัวเลข 3.6 คือค่าแฟกเตอร์การแปลงหน่วยไฟฟ้าให้เป็นเมกะจูล

3.6 การทดสอบการหดตัวของเมล็ดพริกไทย

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของพริกไทยดำอบแห้งจะทดสอบโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของพริกไทย ก่อนและหลังอบแห้งด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ ที่มีความละเอียด ±0.1 mm การทดลองดำเนินการโดยทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ดพริกไทย 3 ตำแหน่ง จำนวน 50 เมล็ด

3.7 การทดสอบคุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพทางด้านสีของผลิตภัณฑ์เมล็ดพริกไทยแห้งจะใช้เครื่องวัดสีอาหาร Hunter Lab รุ่น Color Flex โดยวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์พริกไทยในเทอมของตัวแปร L* a* และ b* ทำการวัดสีตัวอย่าง 5 ซ้ำ (ภัคนัย ทองทิอัมพร, 2550) โดยที่ค่า L* (Lightness) แสดงค่าความสว่างและมืดเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบ ตามลำดับ และค่า a* (Redness) แสดงค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบ ตามลำดับ และค่า b* (Yellowness) แสดงค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบ ตามลำดับ

3.8 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (Hedonic scale) 1-9 คะแนน (1= ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 25-30 คน ลักษณะเฉพาะที่ทำการทดสอบโดยประสาทสัมผัส ได้แก่ ความเผ็ดร้อน สี กลิ่น ความร่วน และความชอบโดยรวมในการบริโภค จากนั้นนำข้อมูลผลการทดลองของการทดสอบที่ได้มาหาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบแต่ละด้านกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการอบแห้ง โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

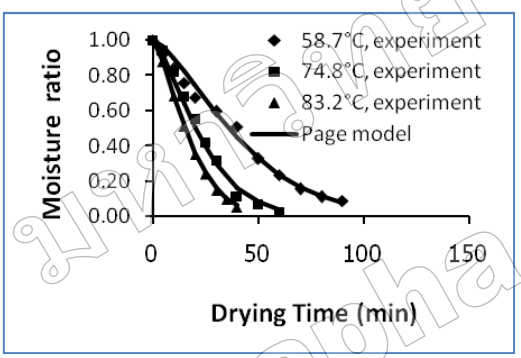
จลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทย

ภาพที่ 2. แสดงอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลาของการทดลองที่สภาวะต่างๆ โดยพริกไทยสดมีความชื้นเริ่มต้น

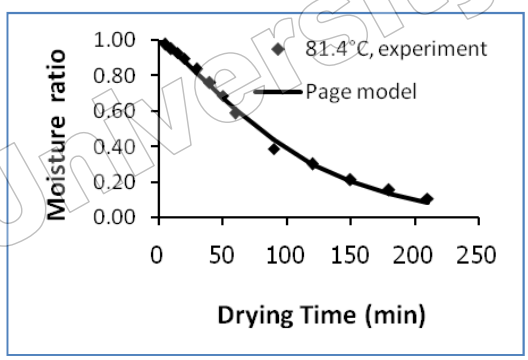
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

อยู่ในช่วงร้อยละ 300-400 มูลฐานแห้ง. และความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 12-19 มูลฐานแห้ง. ผลการทดลองในภาพที่ 2 พบว่า การอบแห้งพริกไทยไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ การลดลงของความชื้นเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงแรกอัตราส่วนความชื้นในของพริกไทยจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากภายในเมล็ดพริกไทยมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากเมล็ดพริกไทยออกจากไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่าย และรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไป และนอกจากนี้พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ซึ่งสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ ดังจะกล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อต่อไป สำหรับการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบลดลงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากกราฟรูปที่ 2 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า การอบแห้งด้วยรังสีใต้แดงเพียงอย่างเดียวและการอบแห้ง 2 ขั้นตอนด้วยไมโครเวฟกับรังสีใต้แดงมีอัตราการอบแห้งสูงใกล้เคียงกัน โดยการอบแห้ง 2 ขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน, การอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยลมร้อนจะมีอัตราการอบแห้งต่ำ

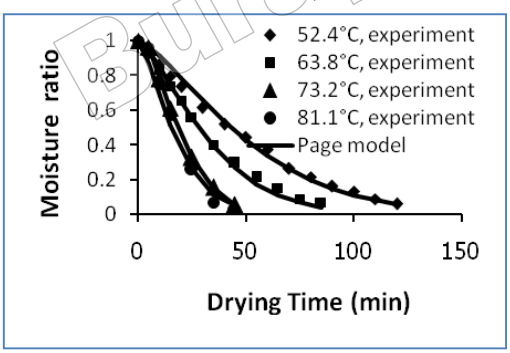
และจากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีสมการถดถอยกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอ็มพิริคัลในตารางที่ 1 และแสดงค่าคงที่ต่างๆ ในแต่ละสมการและแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ในการเลือกสมการคณิตศาสตร์แบบเอ็มพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (determination of coefficient, R^2) ที่มีค่าสูงสุดและค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด พบว่า ในการอบแห้งที่ช่วงอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-80°C นั้น ผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สอดคล้องกับผลการทดลองของการอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดงที่ 1,000 W การอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดงที่ 1,000 W ได้ดีที่สุดดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 2(ก)-2(ค)



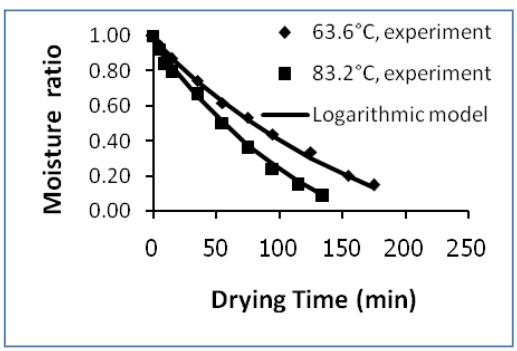
(ก) รังสีใต้แดง 1,000 W



(ข) ลมร้อน



(ค) ไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดง 1,000 W



(ง) ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การอบแห้งขั้นตอนเดียวด้วยรังสีใต้แดง 1,000 W (ก), การอบแห้งขั้นตอนเดียวด้วยลมร้อน (ข), การอบแห้งสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดง 1,000 W (ค) และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (ง) ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-80°C

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-80°C

Source	Model	Constant	R^2	RSME
One stage drying with Infrared (1,000 W)	Page model	n= 1.44 k=220301.22 exp(5915.75/T)	99.14	0.031
	Newton model	k=6664.75 exp(4202.98/T)	95.82	0.068
	Logarithmic model	a= 1.44 , c= -0.41 k= 3042.87 exp(4112.13/T)	98.74	0.037
	Wang and Singh model	a=-0.03 b=0.01	85.04	0.127
	Logistic model	c=2.075 k=8203.33 exp(4125.59/T))	98.55	0.040
	Henderson and Pabis model	a=1.07 k=5677.26 exp(4120.59/T)	96.71	0.060
	Two-term exponential model	a=0.01 k=1554042.34 exp(3890.52/T)	95.71	0.069
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) -Infrared (1,000 W)	Page model	n= 1.38 k=147346.24 exp(5684.26/T)	98.78	0.038
	Newton model	k=3392.84 exp(3958.95/T)	96.05	0.067
	Logarithmic model	a= 1.30 , c= -0.15 k= 4074.07 exp(4134.69/T)	98.17	0.046
	Wang and Singh model	a=-0.02 b=0.01	84.84	0.131
	Logistic model	c=2.08 k=7258.43 exp(4066.43/T)	98.43	0.042
	Henderson and Pabis model	a=1.07 k=3498.54exp(3940.24/T)	97.03	0.058
	Two-term exponential model	a=1.93 k=7949.47exp(4092.76/T)	98.75	0.038
One stage drying with Hot air	Page model	n= 1.28 k=0.02 exp(0.07/T)	99.64	0.019
	Newton model	k=0.01exp(0.06/T)	97.76	0.047
	Logarithmic model	a= 1.19 , c= -0.15 k= 3042.87 exp(4112.13/T)	99.17	0.028
	Wang and Singh model	a=-0.007 b=0.01	99.06	0.030
	Logistic model	c=0.51 k=1.06exp(0.01/T)	99.53	0.021
	Henderson and Pabis model	a=1.06 k=0.01 exp(0.06/T)	98.82	0.034
	Two-term exponential model	a=0.01 k=525.58 exp(-0.81/T)	97.76	0.047

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-80°C

Source	Model	Constant	R^2	RSME
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) -Hot air	Page model	n= 1.07 k=6313142.97 exp(7152.88/T))	98.80	0.033
	Newton model	k=4678940.46 exp(6934.97/T)	98.65	0.035
	Logarithmic model	a= 1.41 , c= -0.43 k= 7517634.12 exp(7312.77/T)	99.58	0.019
	Wang and Singh model	a=-0.01 b=0.01	95.06	0.067
	Logistic model	c=1.95 k=2572252.09 exp(6595.99/T)	99.19	0.027
	Henderson and Pabis model	a=1.01 k=8549312.38 exp(7146.07/T)	98.69	0.034
	Two-term exponential model	a=0.02 k=8154596.89exp(5686.99/T)	98.21	0.040

หมายเหตุ: ขีดเส้นใต้ หมายถึง สมการที่ดีที่สุดถูกเลือกมาใช้ในการทำนายผลการทดลองในกระบวนการอบแห้งนั้นๆ

ส่วนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมลมร้อน จากผลการคำนวณพบว่า ผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลอการิทึม (Logarithmic model) สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ดังแสดงผลการทำนายและผลการทดลองในภาพที่ 2(ง)

ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพริกไทยที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Drying temperature (°C)	Drying time (min)	Initial (Final) moisture (%d.b.)	Drying rate, DR (kg/min)	Specific Energy Consumption, SEC (MJ/kg of water evaporated)
One stage drying with Infrared (1,000 W)				
58.7°C	90	392.44 (14.25)	0.19	0.11
74.8°C	60	350.79 (13.48)	0.21	N/A
83.2°C	40	372.073(13.29)	0.37	0.10
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) - Infrared (1,000 W)				
52.4°C	120	354.87 (13.67)	0.12	0.13
63.8°C	85	314.94 (10.95)	0.14	0.15
73.2°C	45	327.20 (16.27)	0.22	0.11
81.1°C	45	332.07 (11.68)	0.25	0.15
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) - Hot Air				
63.6°C	175	379.06 (20.17)	0.04	1.47
79.4°C	135	367.15 (17.85)	0.07	0.87
One stage drying with Hot air				
81.4°C	210	392.44 (19.67)	0.03	1.52

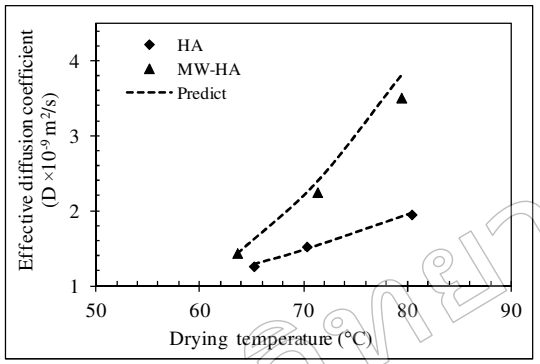
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

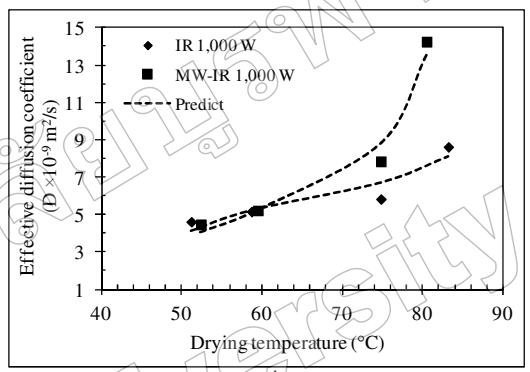
ตารางที่ 3 แสดงอัตราการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งพริกไทยที่สภาวะการทดลองต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งพริกไทยลดลง โดยอัตราการอบแห้งพริกไทยแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดง (อุณหภูมิ 83.2°C) มีค่ามากที่สุด และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของพริกไทย

จากภาพที่ 3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดงมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดง, การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งหนึ่งขั้นตอนด้วยลมร้อน ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลอยู่ในช่วง $(4.50\text{-}14.8)\times10^{-9}$ m^2/s, $(4.7\text{-}8.52)\times10^{-9}$ m^2/s, $(1.40\text{-}3.8)\times10^{-9}$ m^2/s และ $(1.20\text{-}1.98)\times10^{-9}$ m^2/s ตามลำดับ



(ก) การอบแห้งด้วยลมร้อน และไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



(ข) การอบแห้งด้วยรังสีใต้แดงที่ 1,000 W และไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดงที่ 1,000 W

ภาพที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของการอบแห้งเมล็ดพริกไทยกับค่าผลการทำนาย ที่เงื่อนไขการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวด้วยลมร้อน (Hot air, HA) การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Microwave-Hot air, MW-HA) (ก) และการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวด้วยรังสีใต้แดง (Infrared, IR) 1,000 W และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมรังสีใต้แดง (MW-IR) 1,000 W (ข)

จะเห็นได้ว่า การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยรังสีใต้แดงและไมโครเวฟจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ สูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยการพาความร้อนจากลมร้อนอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถผ่านจากผิวนอกของตัวอย่างเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกในระดับหลายมิลลิเมตร ส่งผลให้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกระตุ้นให้น้ำในเนื้อวัสดุแพร่ออกมาที่ผิวและระเหยออกจากวัสดุได้เร็วกว่ากรณีอบแห้งแบบการพาความร้อนด้วยตัวกลางที่เป็นอากาศเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา (Sharma&Suresh, 2005; Alibas *et al*., 2007; Varith *et al*., 2008; Kathiravan *et al*., 2008; Tirawanichakul *et al*., 2008; Tirawanichakul *et al*., 2009; Nathakaranakul *et al*., 2010; สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ, 2555) อย่างไรก็ดีแม้ว่าการอบแห้งด้วยการใช้รังสีใต้แดงและไมโครเวฟจะรวดเร็วและทำให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพกว่าการพาความร้อนก็ตาม ปัจจัยที่จะต้องคำนึงต่อไปก็คือ คุณภาพของพริกไทยดำที่ได้ด้วยการอบแห้งจากรังสีใต้แดงและไมโครเวฟจะมีความแตกต่างหรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน ดังรายงานของ Apintanapong (2009) ที่กล่าวถึงปัจจัยของการอบแห้งด้วยรังสีใต้แดงที่มีผลต่อคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของใบ Holy Basil

คุณภาพทางกายภาพและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของพริกไทยดำอบแห้ง

คุณภาพทางกายภาพของพริกไทย: สี

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าสีของพริกไทยดำภายหลังการอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ

บูรพาวิทยาลัย Burapha University

ตารางที่ 4 ค่าสีและร้อยละการหดตัวของผลิตภัณฑ์พริกไทยที่สภาวะต่างๆ

Drying Temperature (°C)	Color of products (CIE Lab)			Shrinkage (%)
	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	
One stage drying with Infrared (1,000 W)				
58.7°C	15.59^{def}	1.62^{efg}	3.02^{fg}	17.87^{c}
74.8°C	20.16^{a}	4.42^{b}	9.18^{b}	12.56^{ef}
83.2°C	17.38b^{c}	2.14^{de}	4.01^{ef}	14.44^{de}
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) + Infrared (1,000 W)				
52.4°C	15.13^{ef}	1.43^{fg}	3.15^{fg}	21.28^{b}
63.8°C	16.99^{bcd}	2.36^{d}	5.07^{de}	12.74^{ef}
73.2°C	17.78^{b}	3.29^{c}	6.85^{c}	16.35^{cd}
81.1°C	17.55^{bc}	3.13^{c}	6.19^{cd}	11.45^{f}
Two stages drying with Microwave (400 W, 3 min) + Hot air				
63.6°C	14.71^{f}	1.26^{fg}	2.33^{fg}	24.12^{a}
79.4°C	14.51^{f}	1.02^{g}	1.84^{g}	26.20^{a}
One stage drying with Hot air				
81.4°C	16.03^{cdef}	1.73^{ef}	3.57^{ef}	18.41^{c}

(ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) กล่าวคือที่สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำ จะมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ดังจะเห็นได้จากค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มมีค่าต่ำเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ ขณะที่เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งสูง แนวโน้มค่าความสว่างของพริกไทยดำมีค่าสูง ที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความเป็นสีแดง (a*) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีใต้แดง มีแนวโน้มเป็นสีแดงมากกว่ากรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน ขณะที่การอบแห้งสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและลมร้อน มีค่าความเป็นสีแดงต่ำกว่ากรณีสภาวะอบแห้งอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการกระตุ้นหรือการอบแห้งเบื้องต้นด้วยไมโครเวฟอาจไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นสีแดงของพริกไทยดำ ทั้งนี้เพราะการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนด้วยรังสีใต้แดง และไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดงมีแนวโน้มความเป็นสีแดงสูงที่อุณหภูมิสูง ซึ่งน่าจะมาจากปัจจัยของรังสีใต้แดงมากกว่าการใช้ไมโครเวฟกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทความชื้นเพียง 3 นาที ดังนั้นในการศึกษาการอบแห้งในครั้งต่อไปจำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนนี้ต่อเนื่องเพื่อหาข้อสรุปต่อไป และกรณีการวัดค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ผลการทดลองในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองมากกว่าสภาวะการอบแห้ง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Soponronnarit *et al*. (1998) และ Tirawanichakul *et al*. (2008).

คุณภาพทางกายภาพของพริกไทย: การหดตัว

จากตารางที่ 4 การหดตัวของพริกไทยดำหลังการอบแห้ง การหดตัวของพริกไทยดำเกิดจากการได้รับความร้อนจากตัวกลางความร้อน ส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเมล็ด ทำให้เกิดการเหี่ยวย่น และมีปริมาตรลดลง การหดตัวเกิดขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากชิ้นพริกไทยมีความแปรเปลี่ยนของสภาพยืดหยุ่น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งต่ำ อัตราการอบแห้งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้พริกไทยเกิดการหดตัวสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผิวภายนอกของพริกไทยจะแข็งอย่างรวดเร็วเป็นการคงสภาพของโครงสร้าง

การทดสอบประสาทสัมผัสของพริกไทย

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ความเผ็ดร้อน, สี, กลิ่น/ความฉุน, ความร่วน และความชอบโดยรวมในการบริโภคของพริกไทย แสดงดังตารางที่ 5

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 5 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พริกไทยที่สภาวะต่างๆ

เงื่อนไขการอบแห้ง	ความเผ็ดร้อน	สี	กลิ่น/ความฉุน	ความร่วน	ความชอบโดยรวม
IR (1,000 W) 58.7°C	5.71^{cd}	4.52^{d}	6.14b^{c}	7.64^{a}	7.36^{ab}
IR (1,000 W) 74.8°C	5.29^{c}	5.71^{bc}	5.43^{c}	7.50^{a}	6.93^{ab}
IR (1,000 W) 83.2°C	5.71^{b}	5.43^{b}	5.50^{b}	7.21^{a}	7.29^{a}
MW (400 W, 3 min) + IR (1,000 W) 52.4°C	5.07^{b}	5.30^{b}	5.29^{b}	7.57^{a}	7.57^{a}
MW (400 W, 3 min) + IR (1,000 W) 63.8°C	5.43^{b}	6.14^{ab}	6.21^{ab}	7.14^{a}	6.86^{a}
MW (400 W, 3 min) + IR (1,000 W) 73.2°C	5.86^{b}	6.21^{b}	5.86^{b}	7.29^{a}	6.93^{ab}
MW (400 W, 3 min) + IR (1,000 W) 81.1°C	5.00^{b}	5.71^{b}	5.50^{b}	7.36^{a}	7.36^{a}
MW (400 W, 3 min) + HA 63.6°C	5.36^{b}	1.50^{c}	5.93^{ab}	6.93^{a}	6.93^{a}
MW (400 W, 3 min) + HA 79.4°C	5.93^{b}	2.93^{c}	5.86^{b}	7.64^{a}	7.07^{ab}
HA 81.4°C	5.57^{b}	4.5^{b}	5.86^{ab}	7.14^{a}	7.29^{a}

หมายเหตุ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉยๆ
6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก 9 = ชอบมากที่สุด
IR, HA และ MW หมายถึง การอบแห้งด้วยรังสีใต้แดง ลมร้อน และไมโครเวฟ, ตามลำดับ

จากผลในตารางที่ 5 สรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์พริกไทยเป็นที่ยอมรับในการบริโภคในทุกสภาวะการทดลอง และมีแนวโน้มความชอบในระดับปานกลาง ซึ่งอุณหภูมิในการอบแห้งไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) เช่นเดียวกันสภาวะการอบแห้งที่ไม่ส่งผลต่อผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัส จึงสรุปได้ว่า การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวหรือสองขั้นตอนด้วยการแผ่รังสี การพาความร้อน ไม่มีผลต่อความชอบโดยรวมและคุณภาพจากทดสอบทางประสาทสัมผัสของเมล็ดพริกไทยดำอบแห้งทุกกรณี

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองอบแห้งพริกไทยที่สภาวะต่างๆ สรุปผลการทดลองต่างๆ ได้ดังนี้

1. อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิสูงและอัตราการอบแห้งสูง โดยการลดลงของความชื้นของการอบแห้งพริกไทย เกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยในช่วงแรกของการทดลอง ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน

2. การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า เมื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบสมการที่เหมาะสมพบว่า แบบจำลอง Page สามารถทำนายการอบแห้งพริกไทยด้วยรังสีใต้แดงทั้งแบบขั้นตอนเดียวและ 2 ขั้นตอน ส่วนแบบจำลอง Page ทำนายการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยไมโครเวฟกับลมร้อน สามารถทำนายโดยแบบจำลอง Logarthmic

3. การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีใต้แดง มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง (4.50-14.8)×10^{-9} m^2/s และเมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า การอบแห้งพริกไทยดำด้วยรังสีใต้แดงเพียงอย่างเดียวมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่า การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยรังสีใต้แดงและไมโครเวฟจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของน้ำสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยการพาความร้อนจากลมร้อน

4. การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของพริกไทยดำ สรุปได้ว่า การหดตัวของพริกไทยที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกิดการหดตัวสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผิวภายนอกของพริกไทยจะแข็งอย่างรวดเร็ว เป็นการคงสภาพของโครงสร้าง ทำให้เมล็ดพริกไทยหดตัวได้น้อยลง สำหรับค่าสีของพริกไทยภายหลังการอบแห้ง สรุปได้ว่า ค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มต่ำเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ ขณะที่เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งสูง แนวโน้มค่าความสว่างของ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

พริกไทยดำมีค่าสูง และที่อุณหภูมิอบแห้งใกล้เคียงกัน ค่าความเป็นสีแดง (a*) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีใต้แดง มีแนวโน้มเป็นสีแดงมากกว่ากรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน

5. การทดสอบทางประสาทสัมผัสอุณหภูมิในการอบแห้งไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) ผลิตภัณฑ์พริกไทยดำอบแห้งเป็นที่ยอมรับในการบริโภคสำหรับทุกสภาวะการทดลอง สรุปได้ว่าการอบแห้งแบบหนึ่งขั้นตอนหรือสองขั้นตอนด้วยการแผ่รังสีการพาความร้อน ไม่มีผลต่อความชอบโดยรวมและคุณภาพจากทดสอบทางประสาทสัมผัสของเมล็ดพริกไทยดำอบแห้งทุกกรณี และกล่าวได้ว่าจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพริกไทยเพื่อผลิตพริกไทยดำจะเกี่ยวข้องกับคุณภาพทางกายภาพด้านสีและการหดตัว แต่ไม่เกี่ยวข้องกับคุณภาพความชอบโดยรวมจากการทดลองโดยประสาทสัมผัส

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และคณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทำการทดลอง การทำงานวิจัย และการทำวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ศิรประภา คลังทอง, ศิริวิไล อนุกูลประชา, จาตุพงศ์ วาฤทธิ์, ไพรัชต์ ดิฐคณารักษ์กุล และศิวะ อัจฉริยวิริยะ. (2549). การอบแห้งใบหอมสับแบบไมโครเวฟ-ฟลูอิไดเซชัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 13(2), 8-15.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดธัญพืช, พิมพ์ครั้งที่ 5, คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 338 หน้า.

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, สากีนา ลาแมปะ และยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล. (2555). การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์ คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17 (1), 117-129

ภัคนัย ทองทิอัมพร. (2550). การมองเห็นและการวัดสี. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม (ที่มา:http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf).

สถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยปี. (2552). สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรมวิชาเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

Alibas, O. I., Akbudak, B. & Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering, 78*, 577-583.

Apintanapong, M. (2009). Infrared drying of Holy Basil leaves and its effect on sensory characteristics. Journal of Agricultural Science, 40(3), 69-72

AOAC. (1995). *Official Method of Analysis*, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Verginia, USA.

Bala, B.K. (1997). Drying and storage of cereal grains. Oxford & IBH Publishing Co. PVT. Ltd., New Delhi, India, 302 pages.

Bala, B.K. & Janjai, S. (2009). Solar drying of fruits, vegetables, spices, medicinal plants and fish: Developments and Potentials, International Solar Food Processing Conference 2009, 1-24.

Crank, J. (1975), *The Mathematics of diffusion*, Oxford University Press, U.K., 410 pages.

Kathiravan, K., Harpreet, K.K., Soojin J., Joseph, I. & Ali, D. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 7*, 2-13.

Nathakaranakul, A., Jaiboon, P., & Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering, 100*(4), 662-668.

Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K. & Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering, 102*, 233-239.

Sharma, G.P. & Suresh, P. (2005). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering 75*, 441–446.

บูรพาวิทยาลัย Burapha University

Sharma, G.P., Verma, R.C. & Pathare, P.B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering, 67*, 361-366.

Soponronnarit, S., Srisubati, N. & Yoovidhya, T. (1998). Effect of temperature and relative humidity on yellowing rate of paddy. *Journal of Stored Product Research, 34*(4), 323-330.

Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A. & Taechapairoj, C. (2005). Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering, 75*, 423–432.

Tirawanichakul, S. & Tirawanichakul, Y. (1994). Thin layer grain dryer: parameters of thin layer drying for cashew nut. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 16*, 92-381.

Tirawanichakul, S. (2004). Influence of fluidized-bed drying temperature on chemical and physical properties of paddy, PhD. Dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 127 pages.

Tirawanichakul, S., Tasara, J. & Tirawanicahkul, Y. (2007). Thermo-physical properties and effect of electrical field on drying process of paddy. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, May (Suppl 2), 325-333.

Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W. & Tirawanichakul, Y. (2008). Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection. *Walailak Journal of Science and Technology, 55*, 77-100.

Tirawanichakul, S., Linpo, P. & Tirawanichakul, Y. (2009). Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. *Thai Journal of Physics, 4*, 116-120.

Tulasidas, T. N., Raghavan, G.S.V. & Mujumdar, A.S. (1995). Microwave drying of grapes in a single mode at 2450 MHz-II and energy aspect. *Drying Technology, 13*, 1973-1992.

Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. & Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering, 81*, 459-466.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University