**วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย** **บทความวิจัย**
**ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561) 38-46**
**ISSN 1685-408X**
**Available online at www.tci-thaijo.org /index.php/TSAEJ**

# การศึกษากระบวนการผลิตพริกแห้งโดยใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนระดับต้นแบบ

# A study on chili drying processes using a pilot scale hot air and microwave dryer

**ธราวุธ บุญน้อม[1],สาวิตรี ประภาการ[1*] ณัฐพงษ์ ประภาการ[1], พรรษา ลิบลับ[1], วีรชัย อาจหาญ[1]**
**Tarawut Bunnom[1], Sawitree Prapakarn[1*], Natthapong Prapakarn[1], Pansa Liplap[1], Weerachai Arjharn[1]**

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000
School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000
*Corresponding author: Tel: +66-9-3454-7462, Fax: +66-44-224-610, E-mail: the_oceanone@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองอบแห้งพริกด้วยต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพของพริกด้านสี ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และต้นทุนพลังงาน โดยต้นแบบที่ใช้ประกอบด้วย ชุดผลิตคลื่นไมโครเวฟ จากแมกนีตรอน 6 ตัว แต่ละตัว แผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ 2,450 MHz กำลัง 1,200 W ขนาดห้องอบ 210 L และชุดผลิตลมร้อนแบบหมุนวน ขนาด 5,000 W อุณหภูมิสูงสุด 180 °C ผลการศึกษาที่สภาวะการเปิดแมกนีตรอน 90 s อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ค่าความชื้นของพริกลดลงจาก 284.6±0.1 ถึง 29.6±1.3 % d.b. ในเวลา 240 min ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 18.79±0.01 kJ $kg^{-1}_{water}$ มีอัตราการผลิตพริกแห้ง 7.2±0.06 $kg_{dry\ chilies}$ $day^{-1}$ ต้นทุนพลังงาน 38±0.96 baht $kg^{-1}_{dry\ chilies}$ และพริกแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียว และไม่แตก โดยแบบจำลอง Logistic มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยให้ค่า $R^2$ (0.9990) มากที่สุด และ RMSE (0.0174) น้อยที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นได้ในนำไปพัฒนาใช้ต่อไปในระดับเชิงพาณิชย์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ใช้เวลาอบแห้งสั้น และผลผลิตมีคุณภาพสูง

คำสำคัญ: ลมร้อน, เตาอบไมโครเวฟ, พริก

**Abstract**

The objective of this project was to study the drying kinetics, color, SEC and production energy costs of chili drying using the pilots-scale hot air and microwave dryer. The design of the pilot-scale hot air and microwave dryer features microwave heat generation from six 2,450 MHz frequency magnetrons in a 210 L of capacity enclosure with a 5000 W air heater running at a 180 °C maximum temperature in a closed loop-heating system. The study showed that the chili drying process using the hot air and microwaves dryer yielded shiny red skin, green calyx without skin cracking .Moisture content reduced from 284.6±0.1 do to 29.6±1.3 % d.b. in 240 min, SEC 8.79±0.01 kJ $kg^{-1}_{water}$ , Yeild 7.2±0.06 $kg_{dry\ chilies}$ $day^{-1}$ and that the energy cost was 38±0.96 baht $kg^{-1}_{dry\ chilies}$ .Furthermore,it was found that the suitable model equation to predict the drying kinetic of chili drying providing the highest coefficient of determination ($R^2$, 0.9990) and the lowest root mean square error (RMSE, 0.0174). As a result, the chili drying process using the hot air and microwave drying is the most suitable for further development on a commercial scale because of its clean technology, short drying times, and high quality of product.

Keywords:Hot air, Microwave, Chilie

## 1 บทนำ

พริกเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะเกษตรกรที่ปลูกพริกในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (วีระ และคณะ, 2557) เกษตรกรจะจำหน่ายทั้ง พริกสด และพริกแห้ง ในส่วนของการผลิตพริกแห้ง ปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับครัวเรือน นิยมใช้วิธีการตากแดดกลางแจ้ง ใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 5 วัน (คำนึง, 2553) ซึ่งใช้เวลานาน และต้องใช้แรงงานใน

ครัวเรือน ส่วนระดับการค้า นิยมใช้การอบแห้งพริกในโรงเรือน ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 3 วัน (คำนึง, 2553) สามารถป้องกันฝนและน้ำค้างได้ แต่การอบแห้งในโรงเรือนนี้ จำเป็นต้องใช้แรงงานจำนวนมากในการกลับชั้น ซึ่งขณะทำการกลับชั้น ไอระเหยของพริกจะทำให้แสบตา และจมูกเป็นอันตรายต่อแรงงาน ทำให้การผลิตพริกแห้งทำได้ด้วยความยากลำบาก ดังนั้นการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ในกระบวนการผลิตพริกแห้งจะสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคโนโลยีมาใช้ในกระบวนการผลิตแห้งพริก พบว่า มีการผลิตพริกแห้ง โดยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2,450 MHz กำลังไฟฟ้า 1,180 W ความดันสุญญากาศ 60 mmHg และเวลาในการทำแห้ง 44 min เป็นสภาวะที่เหมาะสม ทำให้ได้พริกแห้งที่มีลักษณะเฉพาะที่ไม่เหมือนกับพริกแห้งในท้องตลาด คือ มีสีแดงสดใส เม็ดป่อง ผิวเรียบแข็งเลื่อมมัน ค่าความชื้นต่ำกว่าพริกแห้งท้องตลาด มีกลิ่นหอม มีความกรอบ และรสเผ็ดมากกว่าพริกแห้งในท้องตลาด (จิรวัฒน์ และคณะ, 2549)

เทคโนโลยีการใช้ไมโครเวฟในการผลิตความร้อนจัดเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงรวดเร็ว (เหมการ์, 2545) และไม่มีของเสียออกจากกระบวนการ หลักการของเทคโนโลยีนี้สามารถอธิบายเพื่อความเข้าใจอย่างง่าย คือ เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจะให้ความร้อนกับวัสดุโดยการแผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในวัสดุจะดูดซับพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้าไป โมเลกุลของน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้า คือ มีประจุบวก และประจุลบที่ตรงกันข้าม เมื่อคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปโมเลกุลเหล่านี้ก็จะถูกเหนี่ยวนำและหมุนขั้ว เพื่อปรับเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นเป็นสนามที่เปลี่ยนแปลงสลับไปมาจึงส่งผลให้โมเลกุลเหล่านี้หมุนกลับไปกลับมาทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้น (นาริสา, 2553) น้ำจึงกลายเป็นไอน้ำออกจากวัสดุซึ่งเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดที่มีปัจจัยแตกต่างกัน เช่น ความชื้นในชิ้นวัสดุ ความหนาแน่นและองค์ประกอบอื่นๆ (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน ) ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะลอยตัวสู่ด้านบนหากต้องการให้วัสดุแห้งจะต้องดูดไอน้ำนี้ออก แต่หากไม่ดูดออก วัสดุจะถูกนึ่งหรือต้มด้วยน้ำภายในชิ้นวัสดุเอง (สาวิตรี, 2552) จึงทำให้เตาอบไมโครเวฟสามารถนำไปใช้งานในครัวเรือนได้อย่างแพร่หลาย นอกจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีการนำไมโครเวฟมาใช้อบแห้งผลผลิตเกษตรอื่นๆ อีก อาทิเช่น การใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนในการลดความชื้นของแอปเปิ้ล และเห็ดหอม ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพในด้านสีที่ดีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ 50 และ 75 % สำหรับการอบแห้งแอปเปิ้ลและการอบแห้งเห็ดหอม ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว (Funebo and Ohlsson, 1998) และการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนระดับขยาย (คำนึง, 2553) รวมถึงการใช้ต้นแบบเตาอบไมโครเวฟแบบสายพานที่มีแมกนีตรอนจำนวน 20 ตัว เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 2,450 MHz เพื่อนึ่งปาล์มน้ำมันซึ่งสามารถยับยั้งเอนไซม์ไลเปสและลดปริมาณกรดไขมันอิสระในผลปาล์มน้ำมันได้ ในระยะเวลาการนึ่งที่สั้นกว่าการนึ่งปาล์มน้ำมันโดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำ (สาวิตรี, 2552)

นอกจากนี้ที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟแบบครัวเรือน (ความถี่ 2,450 MHz 1,200 W) ร่วมกับลมร้อนเพื่อทดสอบการอบพริกแห้งพบว่าความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วค่าความชื้นของพริกลดลงจาก 71.80 ถึง 8.61 % w.b. ในเวลา 150 min ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนหรือ ไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว พริกแห้งที่ผลิตได้มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียวไม่แตก และไม่เหี่ยว ใกล้เคียงกับพริกแห้งตามท้องตลาดทั่วไป (สาวิตรี และคณะ, 2555) ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้การผลิตพริกแห้งในระดับต้นแบบและระดับเชิงพาณิชย์

การนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว จำเป็นต้องมีการศึกษาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นอย่างละเอียด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองอบแห้งพริกด้วยต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพของพริกด้านสี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงต้นทุนพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งโดยข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการอบแห้งพริกด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในระดับเชิงพาณิชย์ต่อไป อันเป็นการช่วยให้ผลผลิตมีมูลค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วงที่มีปัญหาผลผลิตที่ล้นตลาด มีราคาตกต่ำ และช่วงฤดูฝน

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### *2.1 อุปกรณ*

ต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญต่างๆ ดังแสดงใน Figure 1-2 มีรายละเอียดดังนี้ ห้องอบ มีขนาดความจุ 210 L หรือขนาดกว้าง 70 cm ยาว 100 cm และ สูง 30 cm ผนังของห้องอบประกอบด้วย ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (ด้านบน) ทางเข้า-ออกวัตถุดิบ (ด้านหน้าและหลัง) ระบบระบายความชื้น (ด้านข้าง 2 ด้าน) และทางเข้า-ออกลมร้อน (ด้านล่าง) ระยะการติดตั้งแมกนีตรอน และท่อนำคลื่นบนผนังห้องอบ ใช้ระยะการกระจายตัวของคลื่นกว้าง 15 cm ยาว 20 cm ดังนั้นจึงใช้แมกนีตรอน 6 ตัว แต่ละตัวแผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ 2,450 MHz กำลัง 1,200 W ด้านบนของผนังห้องอบมีอุปกรณ์สำหรับลดอุณหภูมิให้กับแมกนีตรอน คือ พัดลมระบายความร้อน โดยติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 2 ตำแหน่ง ดังนี้ ตำแหน่งที่ 1 บริเวณด้านบนของผนังห้องอบภายนอกหนึ่งตัว ความเร็วลม 3.7 m $s^{-1}$ กำลังไฟฟ้า 60

W เป็นพัดดูดอากาศเย็นจากภายนอกแล้วปล่อยเข้าไปในห้องแมกนีตรอน และ ตำแหน่งที่ 2 บริเวณติดกับหัวแมกนีตรอน ทั้ง 6 ตัว พัดลมแต่ละตัว มีความเร็วลม 3.6 m $s^{-1}$กำลังไฟฟ้า 1.7 W เป็นพัดลมดูดลมอากาศเย็นแล้วปล่อยผ่านครีบระบายความร้อนของแมกนีตรอนแต่ละตัว พัดลมระบายความร้อนทั้ง 2 ตำแหน่ง เปิด-ปิด ตามการทำงานของแมกนีตรอน ทางเข้า-ออก วัตถุดิบ มีขนาด กว้าง 70 cm สูง 7 cm มีลักษณะเป็นอุโมงค์ลึก 10 cm มีประตูเปิด-ปิด ระหว่างห้องอบกับอุโมงค์ ประตูเปิดได้ 2 ด้าน ทั้งจากด้านในและด้านนอก ด้วยถาดบรรจุวัตถุดิบ ภายในห้องอบมีระบบระบายความชื้นด้วยพัดลมดูดความชื้นจำนวน 12 ตัว ติดตั้งไว้ด้านข้าง สูงจากพื้นห้องอบ 16 cm แต่ละตัวมีความเร็วลม 3.1 m $s^{-1}$ กำลังไฟฟ้า 0.08 W ทำหน้าที่ดูดความชื้นจากห้องอบปล่อยสู่ภายนอก โดยกำหนดให้พัดลมดูดความชื้นเปิดระบบทำงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบมีค่ามากกว่าภายนอกห้องอบ ภายในห้องอบด้านล่าง มีทางเข้าลมร้อนอยู่ด้านข้างมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 4 cm ยาว 100 cm และทางออกเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm ระบบลมร้อนหมุนวน ผนังของห้องอบภายใน ทำจากวัสดุ สแตนเลสสตีล เกรด 304 ส่วนผนังห้องอบด้านนอกใช้วัสดุตะแกรงเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 2 mm มีความหนา 3 mm และฐานใช้เหล็กเป็นโครงสร้าง สายพานสำเร็จรูป มีลักษณะเป็นตะแกรงลวด พื้นที่ใช้งานทั้งหมดกว้าง 60 cm ยาว 180 cm พื้นที่ใช้งานภายในห้องอบ กว้าง 60 cm ยาว 100 m ขนาดมอเตอร์ 0.21 kW ควบคุมความเร็วด้วยเกียร์ทด ถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์ขับสายพานด้วยโซ่ ชุดผลิตลมร้อน ที่ใช้ในงานนี้มีขนาด 5,000 W อุณหภูมิสูงสุด 180 ºC เป็นระบบผลิตลมร้อนแบบหมุนวน ควบคุมการเปิด-ปิดด้วยอุณหภูมิภายในห้องอบ ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1.21 m $s^{-1}$ และ ระบบควบคุม แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การควบคุมการทำงานของแมกนีตรอน โดยโหมดอัตโนมัติจะเปิดแมกนีตรอนที่อุณหภูมิภายในห้องอบต่ำกว่า 60 ºC ความชื้นภายในห้องอบ 15 % ส่วนที่ 2 การควบคุมระบบการทำงานอุปกรณ์อื่น ๆ แบบปรับมือ และส่วนที่ 3 การควบคุมระบบการทำงานอุปกรณ์อื่นๆ แบบอัตโนมัต

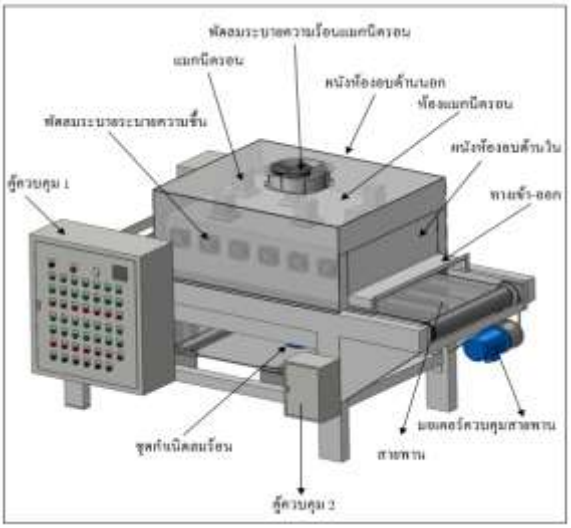


Figure 1 A 3D of the pilots-scale hot air and microwave dryer.

Figure 2 Photographs of the pilots-scale hot air and microwave dryer.

*2.2 วิธีการทดลอง*

***2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง***

ในงานวิจัยนี้ใช้พริกสด (ไม่สนใจสายพันธุ์) ซื้อจากตลาดสุรนคร อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา นำมาคัดเลือกเฉพาะพริกสีแดงสด ขนาดใกล้เคียงกัน แล้วนำไปวิเคราะห์หาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน (AOAC, 2000) และเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบโดยเตรียมพริกสด น้ำหนัก 0.9 kg ใส่ถาดพลาสติกพื้นมีลักษณะเหมือนตะแกรง ขนาดกว้าง 31 cm ยาว 41 cm สูง 5 cm ดังแสดงใน Figure 3 จำนวน 4 ถาด หรือ 3.6 kg สำหรับใช้ในการทดสอบ 1 ครั้ง งานวิจัยนี้ใช้พริกสดทั้งหมด 72 kg

Figure 3 Photographs of chilies in a tray.

### *2.2.2 วิธีการทดสอบ*

นำตัวอย่างพริกจากหัวข้อ 2.2.1 มาทำการทดสอบอบแห้งดังนี้ 1) เปิดไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่สภาวะลมร้อน 60 ºC (สาวิตรี และคณะ,2555 ) ความเร็ว 1.21 $ms^{-1}$ และแมกนีตรอนที่เวลา 60 s [สัญลักษณ์; M60 H60] , 90 s [สัญลักษณ์; M90 H60] และ 120 s [สัญลักษณ์; M120 H60] 2) เปิดไมโครเวฟอย่างเดียว 90 s [สัญลักษณ์; M90] และ 3) เปิดลมร้อนอย่างเดียว 60 ºC ความเร็ว 1.21 $ms^{-1}$ [สัญลักษณ์; H60] โดยทำการทดลอง 4 ซ้ำ แล้ววิเคราะห์หาความชื้น จลนพลศาสตร์การอบแห้ง สมการการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ต้นทุนพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และสี ตามรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

*2.2.2.1 ความชื้น*

ค่าความชื้น (Moisture content) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ตามมาตรฐาน (AOAC, 2000) สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $MC$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง ;% d.b., $W_t$ คือ น้ำหนักพริกที่เวลาใดๆ ; g, $W_d$ คือ น้ำหนักแห้งของพริก ; g

*2.2.2.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง*

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ $MR$ คือ อัตราส่วนของความชื้น, $M_{in}$ คือ ความชื้นเริ่มต้น ; % d.b., $M_t$ คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ; % d.b., $M_{eq}$ คือ ความชื้นสมดุล ; % d.b.

ในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน ค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (พิชิต และคณะ, 2556 ;อีลีหยัะ และคณะ, 2555 )

ทำการวิเคราะห์สมการอบแห้งของพริกโดยนำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น 9 สมการ คือ Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term, Wang and Singh, Modified Henderson and Pabis, Midilli et al., และ Logistic (สุเนตร และคณะ, 2554 ;สุภวรรณ และคณะ, 2013 ;ศักชัย และคณะ, 2553) ดังแสดงใน Table 1 ผลการทดลองค่าความชื้นที่เวลาใดๆ จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการทดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression analysis) และหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการ โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 19 มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, $R^2$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square,RMSE)

Table 1 Mathematical drying models

| Name of model | Model equation |
|---|---|
| Newton | MR = exp(-kt) |
| Page | MR = exp(-$kt^n$) |
| Henderson and Pabis | MR = a exp(-kt) |
| Logarithmic | MR = a exp(-kt) + c |
| Two term | MR = a exp(-$k_0$t) + b exp(-$k_1$t) |
| Wang and Singh | MR = 1+at+$bt^2$ |
| Modified Henderson and Pabis | MR = a exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt) |
| Midilli et al. | MR = a exp(-$kt^n$) + bt |
| Logistic | MR =a/(1+exp(kt)) |

*2.2.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ*

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$SEC = \frac{3.6\,E}{(W_t - W_d)} \quad (3)$$

เมื่อ $SEC$ คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ; MJ $kg^{-1}$ water evaporated, $E$ คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ ; kW h, $W_t$ คือ น้ำหนักพริกที่เวลาใดๆ ; g, $W_d$ คือ น้ำหนักแห้งของพริก ; g และ 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

*2.2.2.4 สี*

ทำการวัดค่าสีพริกสด และพริกแห้งที่ผ่านการทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab Color Quest XE) และนำไปเปรียบเทียบกับพริกสดและพริกแห้งตามท้องตลาด

## 3 ผลและวิจารณ์

*3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง*

จากการทดสอบอบพริกแห้งด้วยต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ผลการศึกษาพบว่า พริกสดก่อนอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 276-288 % d.b. และความชื้นสุดท้ายหลังอบแห้งอยู่ในช่วง 27-29 % d.b. ใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 300, 240, 210, 270 และ 600 min ที่สภาวะ M60 H60, M90 H60, M120 H60, M90 และ H60 ตามลำดับ ในสภาวะการทดลองอบแห้งโดยเปิดไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อระยะเวลาการทำงานของแมกนีตรอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง และการอบแห้งโดยเปิดไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีระยะเวลาการอบแห้งต่ำกว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว 1.1 เท่า และลมร้อนเพียงอย่างเดียว 2.5 เท่า ดังแสดงใน Figure 4 เนื่องจากอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการระเหยน้ำจากภายนอกผิวเข้าสู่ภายในเซลล์ที่ลึกเข้าไป เมื่อเวลาผ่านไปผิวภายนอกจะเกิดการหดตัวเป็นสาเหตุให้น้ำระเหยออกยากจึงต้องใช้เวลามากในการอบแห้ง (Ozkan et al, 2005 ) ส่วนการทำแห้งด้วยไมโครเวฟนั้นเกิดขึ้นในเซลล์พริกที่มีความชื้น ดูดซับพลังงานจากคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ จนทำให้เป็นไอน้ำลอยตัวออกมานอกผิวของพริก (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน) ในการอบแห้งที่ผนวกทั้ง 2 ระบบเข้าด้วยกัน และเพิ่มระบบระบายความชื้นให้ระบบฯ จะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งได้

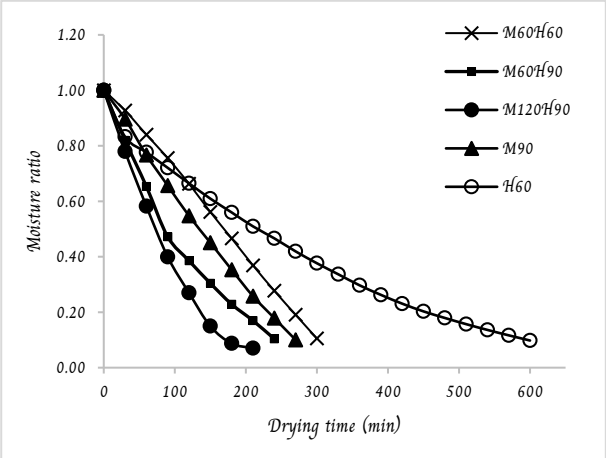


Figure 4 Effect of microwave and hot air on drying of chilies using the pilots-scale hot air and microwave dryer at M60 H60, M90 H60, M120 H60, M90 and H60 condition.

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังพบว่า สภาวะการทดลอง M120 H60 ที่ช่วงระยะเวลาการอบแห้งประมาณ 30 min แรก มีการถ่ายเทไอน้ำจากภายในเซลล์ออกสู่ภายนอกอย่างรวดเร็วเมื่อพริกได้รับพลังงานไมโครเวฟ พริกจึงมีลักษณะแตกที่บริเวณผิว คล้ายกับงานวิจัยของ Tulasidas et al.(1995) สูญเสียลักษณะทางกายภาพ เนื่องจากพริกรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟแล้วน้ำภายในเซลล์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นไอน้ำระเบิดออกสู่ภายนอกผิวพริก (จันทรา, 2549) ดังแสดงใน Figure 5 แสดงให้เห็นว่าการเปิดแมกนีตรอนในระยะเวลาดังกล่าวเป็นการปล่อยคลื่นไมโครเวฟสูงเกินกว่าน้ำภายในเซลล์จะระบายออกได้ทัน ส่งผลให้คุณภาพของผลผลิตลดลง ในทางตรงกันข้ามการเปิดไมโครเวฟ ที่เวลาน้อยเกินไปนั้นจะส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเซลล์พริกเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาการอบแห้งนาน

Figure 5 Effect of microwave 120 s on chilies.

ผลการวิเคราะห์หาสมการการอบแห้งที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกที่สภาวะการทดลองต่างๆ และค่าคงที่ต่างๆ จาก 9 สมการ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่า แบบจำลอง Logarithmic, Wang and Singh และ Two term สามารถทำนายสภาวะ M60 H60, M90 และ H60 ได้เหมาะสมที่สุด ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง Logistic สามารถทำนายสภาวะ M90 H60 และ M120 H60 ได้เหมาะสมที่สุด ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมและความแม่นยำใช้การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) สูงสุด และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ต่ำสุด ดังรายละเอียดแสดงใน Table 2

Table 2 Drying model contants and statical parameter of chili drying using the pilots-scale hot air and microwave dryer at M60 H60, M90 H60, M120 H60, M90 and H60 condition.

| Model name | Parameter | M60H60 | M90H60 | M120H60 | M90 | H60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Newton | k | 0.0050 | 0.0080 | 0.0110 | 0.0060 | 0.0030 |
| | $R^2$ | 0.9886 | 0.9984 | 0.9955 | 0.9927 | 0.9958 |
| | RMSE | 0.0811 | 0.0228 | 0.0425 | 0.0577 | 0.0475 |
| Page | k | 0.0000 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0010 | 0.0030 |
| | n | 1.6380 | 1.1250 | 1.2280 | 1.4120 | 1.0060 |
| | $R^2$ | 0.7885 | 0.9979 | 0.9988 | 0.9819 | 0.9970 |
| | RMSE | 0.5271 | 0.0309 | 0.5515 | 0.0921 | 0.0387 |
| Henderson and Pabis | k | 0.0050 | 0.0080 | 0.0110 | 0.0060 | 0.0030 |
| | a | 1.0880 | 1.0250 | 1.0380 | 1.0640 | 0.9790 |
| | $R^2$ | 0.9886 | 0.9984 | 0.9955 | 0.9927 | 0.9958 |
| | RMSE | 0.0674 | 0.0229 | 0.0379 | 0.0518 | 0.0400 |
| Logarithmic | k | $4.1100 \times 10^{-5}$ | 0.0070 | 0.0090 | 0.0020 | 0.0030 |
| | a | 74.8200 | 1.1240 | 1.1050 | 2.4250 | 1.1010 |
| | c | -73.8020 | -0.1150 | -0.0820 | -1.4170 | -0.1490 |
| | $R^2$ | 0.9998 | 0.9988 | 0.9969 | 0.9898 | 0.9890 |
| | RMSE | 0.0080 | 0.0210 | 0.0323 | 0.0673 | 0.0635 |
| Two term | a | 6.7160 | 3.6870 | 20.8120 | 5.3450 | 0.9790 |
| | $k_1$ | 0.0000 | 0.0040 | 0.0060 | 0.0010 | -0.0020 |
| | $k_0$ | $9.5860 \times 10^{-5}$ | 0.0050 | 0.0060 | 0.0010 | 0.0030 |
| | b | -5.7040 | -2.6790 | -19.7910 | -4.3370 | -0.0240 |
| | $R^2$ | 0.8394 | 0.9982 | 0.9397 | 0.8310 | 0.9987 |
| | RMSE | 0.4243 | 0.0254 | 0.1892 | 0.4220 | 0.0205 |
| Wang and Singh | a | -0.0030 | -0.0070 | -0.0080 | -0.0040 | -0.0030 |
| | b | $8.5000 \times 10^{-7}$ | $1.2060 \times 10^{-5}$ | $1.8550 \times 10^{-5}$ | $2.6660 \times 10^{-6}$ | $2.234 \times 10^{-6}$ |
| | $R^2$ | 0.9967 | 0.9862 | 0.9953 | 0.9996 | 0.9770 |
| | RMSE | 0.0363 | 0.6668 | 0.0408 | 0.0091 | 0.0758 |
| Modified Henderson and Pabis | a | 1.1240 | 1.7290 | 1.4380 | 1.1560 | 0.0880 |
| | b | 1.0300 | -1.6010 | 1.0160 | 1.0580 | 36.2310 |
| | k | 0.0010 | 0.0050 | 0.0070 | 0.0020 | 0.4600 |
| | g | 0.0010 | 0.0040 | 0.0070 | 0.0020 | 0.0010 |
| | c | -1.1420 | 0.8800 | -1.4320 | -1.2050 | -35.3190 |
| | h | -0.0010 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0010 |
| | $R^2$ | 0.9980 | 0.9946 | 0.9983 | 0.9996 | 0.8807 |
| | RMSE | 0.0342 | 0.0492 | 0.0231 | 0.0126 | 0.2925 |
| Midilli et al. | a | 1.0300 | 1.0030 | 0.9940 | 1.0020 | 0.9870 |
| | b | -0.0030 | 0.0000 | 0.0000 | -0.0010 | 0.0000 |
| | k | 1779.1110 | 0.0050 | 0.0030 | 0.0020 | 0.0080 |
| | n | -3.5670 | 1.0790 | 1.3150 | 1.1260 | 0.7810 |
| | $R^2$ | 0.9992 | 0.9974 | 0.9941 | 0.9987 | 0.9593 |
| | RMSE | 0.0203 | 0.0327 | 0.0504 | 0.0246 | 0.1331 |

| Model name | Parameter | M60H60 | M90H60 | M120H60 | M90 | H60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Logistic | a | 2.1180 | 1.9800 | 2.0140 | 2.0660 | 1.8650 |
| | k | 0.0080 | 0.0120 | 0.0160 | 0.0090 | 0.0050 |
| | $R^2$ | 0.9937 | 0.9990 | 0.9993 | 0.9976 | 0.9975 |
| | RMSE | 0.0524 | 0.0174 | 0.0154 | 0.0296 | 0.2860 |

*3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และต้นทุนพลังงาน*

ผลการศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า เมื่อเวลาการเปิดแมกนีตรอนเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการอบแห้งจะมีค่าลดลง แต่ จะใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบใช้พลังงานในการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำกว่า และเมื่อเทียบการอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำกว่าเช่นกัน ดังแสดงใน Table 3 เนื่องจากในขณะทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อนและการแผ่คลื่นไมโครเวฟไปยังวัสดุพร้อมๆ กัน ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุได้รับพลังงานจากลมร้อนที่ผิวสัมผัสและคลื่นไมโครเวฟภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ทำให้น้ำในวัสดุถูกถ่ายเทไปยังอากาศแวดล้อมเร็ว การอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจึงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ แต่อย่างไรก็ดีการอบพริกแห้งถ้าให้พลังงานจากไมโครเวฟสูงเกินไปกว่าไอน้ำจะระบายออกจากผิวพริกได้ พริกจะเกิดการระเบิดของไอน้ำทำให้พริกเกิดความเสียหาย ดังเช่นที่สภาวะ M120 H60 ขณะเดียวกันหากให้อุณหภูมิลมร้อนสูงเกินไป พริกก็จะมีสีแดงปนดำหรือสีดำ ทำความเสียหายให้พริกแห้งเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีที่ให้พลังงานคลื่นไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อนน้อย การอบแห้งก็ใช้ระยะเวลานาน (Soysal, 2004 ) ดังนั้นการอบแห้งวัสดุแต่ละชนิดด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะต้องทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับในงานวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะ M90 H60 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพริกแห้งด้วยต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนี้ โดยที่สภาวะนี้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้รอบการผลิตละ 60 s กำลังการผลิต (Yeild) จึงสูงขึ้น 1.78 kg เมื่อเทียบกับ M60 H60 แต่ต้องใช้พลังงานสำหรับแมกนีตรอนสูงขึ้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) สูงขึ้น 2.89 $MJkg^{-1}_{water\ evaporated}$ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาต้นทุน (Costs) จะพบว่าสภาวะ M90 H60 มีต้นทุนการผลิตพริกแห้งสูงกว่า สภาวะ M60 H60 เพียงกิโลกรัมละ 1 baht เท่านั้น ดังแสดงใน Table 3

การอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยแล้วยังส่งผลให้ต้นทุนพลังงานมีค่าน้อยอีกด้วยเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวหรือไมโครเวฟอย่างเดียว

Table 3 SEC, Yeild and costs of dry chilies using the pilots-scale hot air and microwave dryer.

| Condition | Drying time (min) | Weight of dry chilies (kg) | SEC ($MJkg^{-1}_{water\ evaporated}$) | Yeild ($kg_{dry\ chilies}\ day^{-1}$) | Costs (baht $kg^{-1}_{dry\ chilies}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| M60 H60 | 300 | 1.13±0.02 | 15.90±0.08 | 5.42±0.04 | 37.00±1.50 |
| M90 H60 | 240 | 1.20±0.08 | 18.79±0.01 | 7.20±0.06 | 38.00±0.96 |
| M120 H60 | 210 | 1.26±0.02 | 19.93±0.05 | 8.64±0.04 | 42.00±1.89 |
| M90 | 270 | 1.29±0.01 | 23.77±0.05 | 6.88±0.05 | 45.00±1.71 |
| H60 | 600 | 1.28±0.02 | 20.15±0.15 | 3.07±0.04 | 40.00±1.73 |

*3.3 สี*

พริกแห้งที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใส ขั้วเขียว และไม่แตก มีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 24.81±1.30 ค่าสีแดง (a*) เท่ากับ 21.64±1.86 และค่าสีเหลือง (b*) เท่ากับ 12.49±1.17 ดังแสดงใน Table 4 เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับพริกแห้งในท้องตลาดพบว่า พริกแห้งที่อบด้วย

ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีค่าความสว่างน้อยกว่า ทั้งนี้หากจำเป็นสามารถปรับปรุงได้โดยนำการนึ่งหรือลวกพริกก่อนเข้ากระบวนการอบแห้ง (นาริสา และคณะ, 2553) หรืออาจจะประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อทำการนึ่งพริกก่อนแล้วจึงเข้ากระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนต่อไป อย่างไรก็ดี แม้ว่าพริกแห้งตามท้องตลาดจะมีค่าความสว่างสูง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของพริกแห้งพบว่า ผิวจะเหี่ยวและขั้วดำต่างจากพริกแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยลักษณะทางกายภาพของพริกแห้ง ดังแสดงใน Figure 6-7

## 4 สรุป

การอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ให้ระยะเวลาการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และต้นทุนพลังงานต่ำกว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว และลมร้อนอย่างเดียว โดยสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกโดยใช้ต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในงานวิจัยนี้ คือ ระบบแมกนีตรอนเปิดทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบน้อยกว่า 60 ºC และปิดเมื่อแมกนีตรอนทำงานครบเวลา 90 s ระบบลมร้อนเปิดทำงาน เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบน้อยกว่า 60 ºC และปิดเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ºC โดยระยะเวลาการทำงานของแมกนีตรอน รอบละ 90 s ความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยค่าความชื้นของพริกลดลงจาก 284.6±0.1 ถึง 29.6±1.3 % d.b. ในเวลา 240 min หรือ 4 h โดยสมการ Logistic มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยให้ค่า $R^2$ (0.9990) มากที่สุด และ RMSE (0.0174) น้อยที่สุด ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 18.79±0.01 MJ $kg^{-1}_{water\ evaporated}$ พริกแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียว และไม่แตก มีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 24.81±1.30 ค่าสีแดง (a*) เท่ากับ 21.64±1.86 และค่าสีเหลือง (b*) เท่ากับ 12.49±1.17 มีอัตราการผลิตพริกแห้ง 7.2±0.06 $kg_{dry\ chilies}\ day^{-1}$ ต้นทุนพลังงาน 38±0.96 baht $kg^{-1}_{dry\ chilies}$ ไม่รวมค่าแรงงาน

Table 4 Color of chilies, dry chilies from market and dry chilies from the pilots-scale hot air and microwave dryer.

| Sample | color | | |
|---|---|---|---|
| | L* | a* | b* |
| Chilies | 29.70±1.42 | 36.92±1.37 | 19.76±1.42 |
| Dry chilies from market | 30.65±3.16 | 21.58±2.51 | 12.75±2.42 |
| Dry chilies from the pilots-scale hot air and microwave dryer | 24.81±1.30 | 21.64±1.86 | 12.49±1.17 |

Figure 6 Dry chilies from market.

Figure 7 Dry chilies from the pilots-scale hot air and microwave dryer.

## 5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

## 6 เอกสารอ้างอิง

คำนึง วาทโยธา. 2553. การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับขยายส่วน. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับขยายส่วน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

สนับสนุนงบประมาณวิจัย. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวมหาวิทยาลัย ขอนแก่น.

จันทรา ดิษฐนา. 2549. การทำแห้งดอกกุหลาบด้วยระบบปั๊มความร้อนและสูญญากาศ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จิรวัฒน์ กันต์เกรียงวงศ์ วรพจน์ สุนทรสุข และประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์. 2549. การผลิตพริกแห้งแบบใหม่โดยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 37 ฉบับที่ 2 (พิเศษ). 178-181.

เทวรัตน์ ทิพยวิมล.2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร.วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นาริสา บินหะยีดิง ปิยาภรณ์ ภาษิตกุล และวิภา พลันสังเกต. 2553. อิทธิพลของสารกับการเปลี่ยนแปลงสีของพริกชี้ฟ้าแห้ง. The 36th Congress on Science and Technology of Thailand 26-28 ตุลาคม 2553 กรุงเทพมหานคร.

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

พิชิต สอนทุย วิโรจน์ ไข่มุขเลิศฤทธิ์ ฤทธิชัย อัศวราชันย์.2556. จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ.การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 2 30 สิงหาคม 2556 กรุงเทพมหานคร.

วีระ ภาคอุทัย และ เยาวรัตน์ ศรีวรานันท์. 2557. พริกปลูกอย่างไรในสภาวะโลกกำลังร้อน.สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. เล่มที่ 4.

ศักชัย จงจำ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา.2553.การอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด.วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2553.

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. การถนอมผลิตผลการเกษตร . เล่มที่ 19, เรื่องที่ 3.

สาวิตรี คำหอม. 2552. การศึกษาการประยุกต์เตาอบไมโครเวฟในกระบวนการนึ่งปาล์มน้ำมัน.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สาวิตรี คำหอม, ธราวุธ บุญน้อม, ณัฐพงษ์ ประภาการ, พรรษา ลิบลับ และ วีรชัย อาจหาญ. 2555. การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตพริกแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟ ลมร้อน และเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย.

สุเนตร สืบค้า และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2554. แบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรุน.วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม-ธันวาคม 2554.

สุภวรรณ ฎิระวณิชย์กุล สลิลลา ชาญเชี่ยว และยุทธนา ฎิระวณิชย์กุล. 2013. การอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตใบบัวบกแห้งชงดื่มด้วยการแผ่รังสีอินฟาเรด : จลนพลศาสตร์ ความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพ. KKU Res . J . 18(2), 311-324.

เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ. 2545. การศึกษาแบบจำลองการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟกับพริกไทย.ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อีลีหย๊ะ สนิโซ ฟามีรา สะอุดี รัชดาภรณ์ ฮานาฟี.2555.สภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2555.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed. TheAssociation of Offi cial Analytical Chemists.Gaithersburg, MD, USA.

Funebo,T., Ohlsson,T. 1998. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. Journal of Food Engineering. 38, 353-367.

Ozkan, I.A., Akbudak, B., Akbudak N. 2005. Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering. 78, 577-583.

Soysal, Y. 2004. Microwave drying characteristics of parsiey. Biosystems engineering. 89, 2, 167-1.

Tulasidas, T.N., Raghavan, G.S.V., Mujumdar, A.S . 1995. Microwave drying of Grapes in a Single mode cavity at 2540 MHz I: Drying Kinetics. Drying Technology, 13, 1949-1971.