

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่นไมโครเวฟ Microwave Drying of Pepper

ณรงค์ อึ้งกิม้วน^{1*} และ ภาณุพงศ์ บุญเพียร²

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

² คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว อ.วัฒนานคร จ.สระแก้ว 27160

*E-mail: uengkimbuan@gmail.com, โทรศัพท์: 0 3810 3152, โทรสาร: 0 3839 3493

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของพริกไทยและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเงื่อนไขที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 160 320 และ 480 วัตต์ ความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยประมาณร้อยละ 190 มาตรฐานแห้ง จากผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งพริกไทยด้วยไมโครเวฟประกอบด้วยช่วงของการอบแห้ง 3 ช่วงได้แก่ ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยการเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ให้ค่าความถูกต้องของการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งพริกไทยดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงมากกว่าร้อยละ 99.5 และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: พริกไทย ไมโครเวฟ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

Abstract

The objectives of this research were to study the effect of microwave power levels on drying kinetics and moisture diffusivity of pepper and to compare the experimental data with the predicted values obtained by mathematical models. The experimental conditions conducted by the microwave output powers of 160, 320, and 480 W, initial moisture content of pepper about 190 %d.b. The experimental results showed that microwave drying of pepper consisted of three drying periods, including heating up, constant rate, and falling rate periods. The drying time significantly decreased with the increase of microwave output powers. The mathematical models used to describe the drying kinetics of pepper provided good agreement between experimental and predicted data with high correlation coefficient ($R^2 > 95\%$). The effective moisture diffusivity of pepper increased with the increase of microwave output power.

Keywords: pepper, microwave, moisture diffusivity.

1. บทนำ

พริกไทย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Piper nigrum* L. เป็นพืชสมุนไพรที่นิยมปลูกในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยเฉพาะแถบจังหวัด ระยอง จันทบุรี และตราด เมล็ดพริกไทยมีสรรพคุณทั้งเป็นเครื่องเทศ และสรรพคุณทางยา โดยรูปแบบการใช้ประโยชน์จาก เมล็ดของพริกไทยที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายได้แก่ พริกไทยอ่อนหรือพริกไทยสด พริกไทยขาว และ พริกไทยดำ กระบวนการผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งของ เกษตรกรทำได้โดยวิธีการตากแดดธรรมชาติซึ่ง ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 7 วัน ในสภาพ อากาศปกติ แต่เนื่องจากพื้นที่เขตภาคตะวันออกเป็น พื้นที่ที่มีฝนตกชุกทำให้การทำแห้งพริกไทยแต่ละครั้ง ต้องใช้เวลามากขึ้นมีผลให้พริกไทยที่ได้มีคุณภาพ ลดลง อีกทั้งการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนจะทำให้ ประสิทธิภาพทางพลังงานต่ำในช่วงสุดท้ายของการ อบแห้ง (ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง) [1] ดังนั้นจึงมี การนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้สำหรับการ อบแห้งผลิตผลทางการเกษตร เนื่องจากมีการกระจาย พลังงานสม่ำเสมอและมีค่าการนำความร้อนเข้าสู่ ภายในของวัสดุสูง ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วมีผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง และยังช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์บางชนิด จาก ข้อดีของคลื่นไมโครเวฟที่กล่าวมา จึงมีการนำคลื่น ไมโครเวฟมาอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางอาหารหลายชนิด ดังรายงานวิจัยที่ผ่านมาเช่น สมุนไพร[2] กระเทียม [3,4] ชา [5] และผักกระเจียว [6,7]

จากที่กล่าวมาข้างต้นดังนั้นงานวิจัยนี้มี วัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง พริกไทยโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับพลังงานค่า ต่างๆ กันได้แก่ 160, 320 และ 480 วัตต์ (2) ทดสอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง และ (3) หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนและแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของ พริกไทย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

พริกไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพริกไทยแก่จาก สวนของเกษตรกรจังหวัดตราด ทำการคัดแยกเฉพาะ เมล็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5 มิลลิเมตร

ระบบอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะใช้ แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจากเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ ในครัวเรือนทั่วไป (LG model MS2447BW) โดยมี รายละเอียดดังนี้ เป็นเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ไฟฟ้า กระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 Hz กำลังไฟฟ้า 1200 วัตต์ ผลิตคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz กำลังคลื่นสูงสุด 800 วัตต์ ขนาดของเครื่องที่ใช้ทำการ อบแห้งกว้าง 485 มิลลิเมตร สูง 280 มิลลิเมตร ลึก 377 มิลลิเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ระดับพลังงาน ของคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำการอบแห้งพริกไทยจำนวน 3 ระดับได้แก่ 160, 320 และ 480 วัตต์

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการอบแห้งแต่ละการทดลองจะใช้เมล็ด พริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 190 มาตรฐานแห้งและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.65 ± 0.30 มิลลิเมตร จำนวน 100 กรัม เข้าทำการอบแห้ง ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ โดยการ เปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยขณะทำการอบแห้ง จะทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ความละเอียด ± 0.01 กรัม ทุกๆ 1 นาทีใน 10 นาที แรก ทุกๆ 2 นาทีใน 20 นาทีต่อมา ทุกๆ 5 นาทีใน 30 นาทีต่อมาและทุกๆ 10 นาทีจนสิ้นสุดการทดลอง หลังจากนั้นนำพริกไทยที่ได้มาทำการอบแห้งด้วยลม ร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหา มวลแห้งของพริกไทย ในการทดลองนี้ความชื้น สุดท้ายของพริกไทยมีค่าประมาณร้อยละ 4 มาตรฐาน แห้ง

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการ เปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในกระบวนการอบแห้ง แบบชั้นบางได้แก่ แบบจำลองทางทฤษฎี แบบจำลอง กึ่งทฤษฎี และแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ซึ่งใน งานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองของ Page [8] เพื่อศึกษา

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยขณะทำการอบแห้ง ดังแสดงตามสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-k t^n) \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, ไรต์หน่วย
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, มาตรฐานแห้ง
 M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น, มาตรฐานแห้ง
 M_e คือ ความชื้นสมดุล, มาตรฐานแห้ง
 t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, นาที
 k, n คือ ค่าคงที่ใดๆ

สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเมื่อเวลานานๆ สามารถลดความชื้นสุดท้ายให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์ได้ จึงกำหนดให้ความชื้นสมดุลของพริกไทยมีค่าเท่ากับศูนย์ [1]

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ (k, n) จากสมการที่ (1) จะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองและโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ ทำการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงที่สุด

2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

แบบจำลองการอบแห้งทางทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุใดๆ สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการแพร่ความชื้นตามกฎข้อที่สองของ Fick ดังสมการที่ 2

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 สามารถหาผลเฉลยทั่วไป [9] สำหรับการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดพริกไทย ได้ดังสมการที่ 3 ภายใต้สมมติฐานที่ว่าเมล็ดพริกไทยมีรูปทรงเป็นทรงกลมสม่ำเสมอและกำหนดให้การแพร่ความชื้นเกิดขึ้นเฉพาะในแนวรัศมีเท่านั้น ในขณะที่ทำการอบแห้ง อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงที่และไม่เกิดการหดตัวของเมล็ดพริกไทย

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (3)$$

เมื่อใช้เวลาในการอบแห้งนานพอ สามารถพิจารณาเฉพาะพจน์แรก ($n=1$) ของผลเฉลยจากสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (4)$$

สมการที่ (4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติได้เป็น

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - F_0 \pi^2 \quad (5)$$

เมื่อกำหนดให้ F_0 คือ Fourier number มีค่าเป็น

$$F_0 = \frac{D_{eff} t}{r^2} \quad (6)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$F_0 = -0.1012 \ln(MR) - 0.0504 \quad (7)$$

$$\text{และ} \quad D_{eff} = \frac{F_0}{(t/r^2)} \quad (8)$$

เมื่อ

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, ตารางเมตรต่อวินาที

r คือ รัศมีของพริกไทย, เมตร

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, วินาที

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ทำได้โดยการแทนค่า F_0 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและรัศมีของพริกไทยลงในสมการที่ (8) จะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ความชื้นและเวลาอบแห้งต่างๆ จากนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ขึ้นกับความชื้นของพริกไทยในรูปของสมการกำลังสองได้ดังสมการที่ (9)

$$D_{eff} = aM^2 + bM + c \quad (9)$$

M คือ ความชื้นของพริกไทยที่เวลาใดๆ, ร้อยละมาตรฐานแห้ง

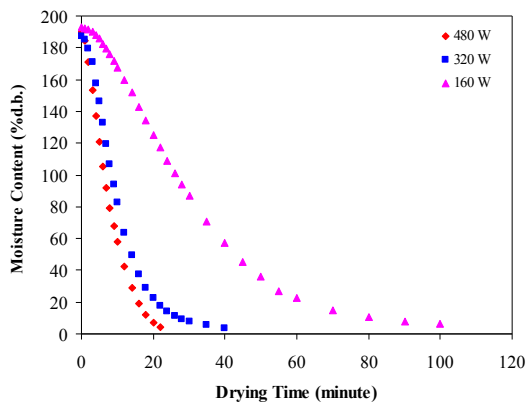
a, b, c คือ ค่าคงที่ใดๆ

จากสมการที่ (9) สามารถหาค่าคงที่ a, b, c ได้โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติและพิจารณาความถูกต้องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

3.1 อิทธิพลของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อการอบแห้งพริกไทย

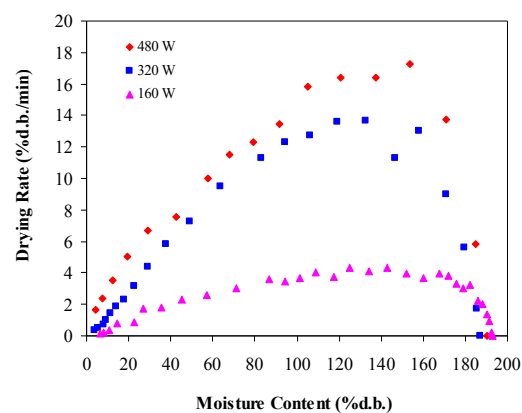
การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยเมื่ออบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160, 320 และ 480 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่าความชื้นของพริกไทยลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเหมือนกับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทั่วไป โดยอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น มีผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลในทำนองเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10] โดยเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของพริกไทยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 190 มาตรฐานแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 4 มาตรฐานแห้ง เมื่อใช้ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 160 320 และ 480 วัตต์ ได้แก่ 100 40 และ 22 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของพริกไทย เมื่ออบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถ

แบ่งได้เป็น 3 ช่วงได้แก่ (1) ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากพริกไทยยังมีความชื้นสูงจึงสามารถดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้มาก จึงทำให้พริกไทยมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น (2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงที่เมื่ออุณหภูมิของพริกไทยเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่จุดเดือดของน้ำ ดังนั้นพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะใช้ในการระเหยน้ำทำให้อัตราการระเหยน้ำคงที่ จากรูปจะเห็นว่าอัตราการอบแห้งคงที่จะเกิดขึ้นเมื่อพริกไทยมีความชื้นระหว่างร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง และค่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3.9 มาตรฐานแห้งต่อนาทีเมื่อใช้ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 160 วัตต์ เป็นร้อยละ 16.4 มาตรฐานแห้งต่อนาทีเมื่อใช้ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 480 วัตต์ ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Dadali [6] และ (3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เป็นช่วงที่ความชื้นของพริกไทยมีค่าน้อย ทำให้การดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลง ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลงและขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวของพริกไทย ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของพริกไทยจะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นของพริกไทยน้อยกว่าร้อยละ 90 มาตรฐานแห้ง

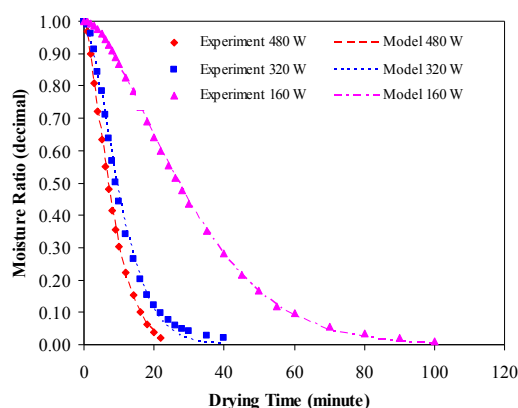


รูปที่ 2 อัตราการอบแห้งพริกไทยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์

นอกจากนี้จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะทำให้อัตราการอบแห้งพริกไทยสูงขึ้น และเห็นว่าระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะมีผลต่อระยะเวลาการอบแห้งของช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ โดยเมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาของช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ลดลง ดังนั้นจะเห็นว่าระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งพริกไทยอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 3, 8]

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์ และโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถหาค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page ได้ดังตารางที่ 1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ 99.75 ถึงร้อยละ 99.97 จากตารางจะพบว่าเมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าคงที่ k มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าเมื่อระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้เส้นกราฟมีค่าความชันมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงอัตราการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ค่าคงที่ n มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 3 เปรียบเทียบความชื้นของพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์

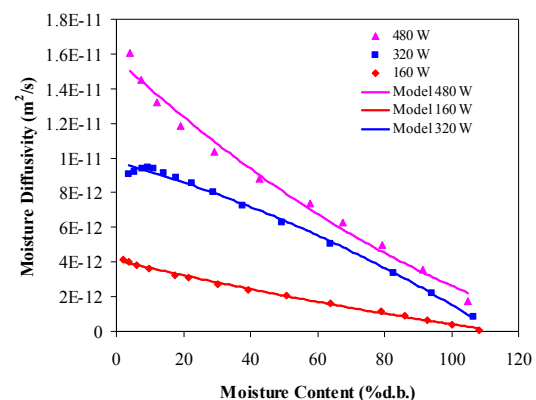
ตารางที่ 1 ค่าคงที่จากแบบจำลองการอบแห้งของ Page

Microwave power (W)	k	n	R ² (%)
160	4.03×10^{-3}	1.56	99.97
320	23.31×10^{-3}	1.52	99.75
480	45.99×10^{-3}	1.41	99.96

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page เมื่อใช้ค่าคงที่ k และ n จากตารางที่ 1 จากรูปจะเห็นได้ว่าผลการทำนายจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่าง ๆ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้จากสมการที่ (8) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและความชื้นของพริกไทยจะได้ดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อใช้ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น และ



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของพริกไทยที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการสัมประสิทธิ์การแพร่
ความชื้นของพริกไทย

MW power	160 W	320 W	480 W
a	8.16×10^{-17}	-4.50×10^{-14}	4.11×10^{-12}
b	-2.97×10^{-16}	-5.24×10^{-14}	9.76×10^{-12}
c	4.64×10^{-16}	-1.77×10^{-13}	1.57×10^{-11}
R ² (%)	99.97	99.53	99.81

เมื่อความชื้นของพริกไทยลดลงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์
การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นด้วย

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยของสัมประสิทธิ์
การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความชื้นของพริกไทย
ตามสมการที่ (9) จะได้ค่าคงที่ (a, b, c) และค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการแสดงดังตารางที่ 2
และจากรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
ความชื้นของพริกไทยที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับ
ที่ได้จากการทดลองทั้งการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ
ที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์ โดยมีค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นร้อยละ 99.97 99.53 และ
99.81 ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการอบแห้งพริกไทยด้วยคลื่น
ไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 160 320 และ 480 วัตต์
พบว่า อัตราการอบแห้งพริกไทยประกอบด้วยช่วงเพิ่ม
อุณหภูมิของพริกไทย ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และ
ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเมื่อระดับพลังงานของ
คลื่นไมโครเวฟมีค่ามากขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งจะ
มีค่าสูงขึ้นและระยะเวลาของช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
มีค่าน้อยลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page
ให้ค่าความถูกต้องของผลการทำนายจลนศาสตร์การ
อบแห้งพริกไทยดี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า
ร้อยละ 99.75

ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
ของพริกไทยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานของคลื่น
ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ของค่า
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับค่าความชื้นของ

พริกไทยในรูปของสมการกำลังสองให้ค่าสัมประสิทธิ์
สหสัมพันธ์มากกว่าร้อยละ 99.5

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์
สำหรับการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Maskan, M. (2000). Microwave/Air and microwave finish drying of banana, *Journal of Food Engineering*, vol. 44(2), May 2000, pp. 71 – 78.
- [2] Giese, J. (1992). Advances in microwave food processing, *Food Technology*, vol. 46(1), January 1992, pp. 118 - 122.
- [3] Sharma, G.P. and Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination, *Journal of Food Engineering*, vol. 50(2), November 2001, pp. 99 - 105.
- [4] Sharma, G.P. and Prasad, S. (2005). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves, *Journal of Food Engineering*, vol. 75(4), August 2006, pp. 441 - 446.
- [5] Panchariya, P.C., Popovic, P.C. and Sharma, A.L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, vol. 52(4), May 2002, pp.349 - 357.
- [6] Dadali, G., Apar, D.K. and Ozbek, B. (2007). Microwave drying kinetics of okra, *Drying Technology*, vol. 25(5), May 2007, pp. 917 – 924.
- [7] Dadali, G., Apar, D.K. and Ozbek, B. (2007). Estimation of effective moisture diffusivity of okra, *Drying Technology*, vol. 25(5), September 2007, pp. 1445 – 1450.
- [8] Soysal, Y. (2004). Microwave drying characteristics of parsley, *Biosystems*

Engineering, vol. 89(2), October 2004, pp. 167 - 173.

[9] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd edition, Clarendon Press: Oxford, UK.

[10] Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. and Hu, X. (2007). Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying, *Journal of Food Engineering*, vol. 80(2), May 2007, pp. 536 – 544.