การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแบบถังทรงกระบอกหมุน

MATHEMATICAL MODELING FOR PADDY DRYING BY ROTARY DRIER

ศราวุธ รัตนวงษ์[1,*] , วีรชัย แผ่นอุไร[1], พงษ์พันธ์ พรมพิพักต์[1] และ เกยูร ดวงอุปมา[2]
Sarawut Rattanawong[1,*], Wirachai Phaenurai[1], Phongphan Promphiphak[1] and Keyoon Duanguppama[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, North Eastern University
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kalasin University

บทคัดย่อ

ประเทศไทยผลิตข้าวเพื่อใช้บริโภคเป็นอาหารหลักและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ ผลผลิตข้าวที่ดีต้องมาจากการดูแลขณะเจริญเติบโตและเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการอบแห้งมาช่วยในขั้นตอนการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว โดยนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ความชื้นเริ่มต้น 30-35% มาอบแห้งด้วยลมร้อนในถังทรงกระบอกหมุนภายในระยะเวลา 90 นาที เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ คือ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส ที่ส่งผลต่อความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งเปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล ผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิอบแห้งสูงส่งผลให้ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งที่เหมาะสมคือ Page เพราะว่าผลทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกมีค่า R^2 สูง อยู่ในช่วง 0.9949-0.9977 และค่า RMSE ต่ำ อยู่ในช่วง 0.0110-0.0139 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลพบว่า อุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งการระเหยของน้ำที่ผิว

* ผู้ประสานงาน: ศราวุธ รัตนวงษ์
อีเมล์: sarawut.rat@neu.ac.th

เมล็ดข้าวเปลือกส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น จึงทำให้การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ระยะเวลาอบแห้งน้อยลง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้งกับผลิตผลทางการเกษตรที่ต้องการอุณหภูมิการอบแห้งสูงได้อีกด้วย เช่น พริก ลำไย และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ข้าวเปลือก, สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, ถังทรงกระบอกหมุน

Abstract

Thailand has produced rice for consumption as the main food and an important export product. Highly qualified rice production was obtained from caring as growing and prolongation after rice harvest with the appropriate procedure. This research aimed to present drying techniques to help in paddy prolongation after harvest. The procedure began by drying rice cultivars KDML105 with hot air in a rotary dryer within 90 min to study 3-level results of drying temperature at 80°C, 100°C and 120°C affecting the moisture of paddy. The results of the experiment were compared with analysis by mathematical model of empirical drying equation. The research results were found that high drying temperature reduced moisture and moisture ratio as an exponential function curve. The appropriate mathematical model of the drying equation was Page's drying equation because the paddy moisture change prediction was high at 0.9949-0.9977 and the low RMSE value was at 0.0110-0.0139 which was most similar to the results of the experiment. The effective moisture diffusivities were found that increasing the drying temperature would accelerate the evaporation of water at the surface of paddy resulting in higher effective moisture diffusivities. Furthermore, this research can be applied to estimate the results obtained for the drying process for agricultural products that require a high drying temperature, such as chili, longan and legumes, etc.

Keywords: drying, paddy, effective moisture diffusivities, rotary dryer

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยประเทศไทยผลิตข้าวเพื่อใช้บริโภคเป็นอาหารหลักและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศ ดังนั้นการเพิ่มผลผลิตในนาข้าวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆมาใช้อย่างหลากหลาย เช่น การค้นคว้าเมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพที่ดีขึ้น ระบบการปลูกพืชหมุนเวียน วิธีการปรับปรุงดินโดยใช้สารเคมี การใช้เครื่องจักรกลทางการเกษตร ทั้งหมดนี้ล้วนถูกนำมาใช้ในการเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้แล้ว การดูแลและเก็บรักษาก็มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นหลังการเก็บเกี่ยวข้าวก็คือ ปัญหาเรื่องความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงเกินกว่าปริมาณที่พอเหมาะจึงส่งผลต่อราคารับซื้อข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวลดลง โดยทั่วไปข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวในระยะเวลาที่เหมาะสมจะมีความชื้นอยู่ในช่วง 20-25% ถ้าหากประสบกับสภาวะฝนตกหรือน้ำท่วมอาจทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นสูงถึง 28-33% ธนากรณ์ อุ่นพินิจ และคณะ (2560) ซึ่งโดยปกติหลังการเก็บเกี่ยว เกษตรกรจะนำข้าวมาตากแห้งบนลานเพื่อลดความชื้น ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยธรรมชาติที่จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของแหล่งพลังงานความร้อนและไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัดในด้านแรงงานและการใช้พื้นที่ตากจำนวนมาก อีกทั้งใช้เวลานาน เนื่องจากความไม่แน่นอนของแสงแดดในแต่ละวันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝน จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเครื่องอบแห้ง (Artificial drying) มาช่วยในการลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยการให้ความร้อนถ่ายเทไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อนำความชื้นออกโดยการระเหย ทำให้ลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้งานได้ทุกสภาวะอากาศ สามารถควบคุมความชื้นได้ตามระดับที่ต้องการมากกว่าการตากแดดในลาน

ปัจจุบันการอบแห้งข้าวเปลือกมีหลายวิธี ซึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก เช่น การอบแห้งแบบฟลูอิดไดเบด ธัชพล จุ้งเจริญ และคณะ (2560) ศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นและความสูงเบดของข้าวเปลือกต่อความเร็วลมต่ำสุดในเครื่องทดลองการเกิดฟลูอิไดเซชัน พบว่าความเร็วลมต่ำสุดที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความสูงเบด 5 10 และ 15 เซนติเมตร มีค่าอยู่ในช่วง 3.0-4.8 3.1-5.1 และ 3.2-5.3 เมตร/วินาที ที่ความชื้นเริ่มต้น 15 20 และ 26% ตามลำดับ, การอบแห้งแบบสเปาเท็ดเบด กิตติ สถาพร ประสาธน์ และโพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง (2560) ศึกษาการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น โดยแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของข้าวเปลือกได้เหมาะสมที่สุด, การอบแห้งแบบร่วม ทรงพล วิจารณ์จักร และคณะ (2560) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้อินฟราเรดแผ่รังสีความร้อนร่วมกับลมร้อน โดยประเมินจากเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และคุณภาพของข้าว พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการลดความชื้นให้เหลือเพียง 1-2 วัน จากปกติที่เกษตรกรนำมาตากแดด 2-3 วัน นอกจากนั้นยังสามารถลดเปอร์เซ็นต์การแตกหักได้ถึง 90.15 เปอร์เซ็นต์ และการอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน สุชีวา สิทธิจินดา และคณะ (2559) ศึกษาเพื่อหาความชื้นของเครื่องอบข้าวเปลือกในภาคครัวเรือนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 33-45 องศาเซลเซียส พบว่าความชื้นลดลงเฉลี่ย 39% ภายในเวลา 3 ชั่วโมง

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้สำหรับเกษตรกรภาคครัวเรือน จึงได้นำวิธีการอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยลมร้อนเข้ามาใช้ในการลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งข้อดีของการใช้วิธีนี้คือ กระบวนการอบไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานในการเฝ้าพลิกกลับผลิตผล เนื่องจากมีการกระจายลมร้อนสัมผัสกับผลิตผลได้อย่างทั่วถึงทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ลดเวลาการทำงาน ใช้แรงงานคนน้อยเฉพาะเวลาที่เอาผลิตผลเข้าและออกถัง และค่าใช้จ่ายโดยรวมไม่สูงเมื่อเทียบกับอายุการใช้งาน ในส่วนของการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ พื้นที่ที่ใช้อบแห้ง ความเร็วลมร้อน และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบที่สำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสม เพื่อใช้ประมาณค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวที่นิยมปลูกมากในประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ด้วยคุณลักษณะสำคัญคือ ทนแล้งได้ดี ได้ผลผลิตมาก

ได้ราคาดี เมื่อนำมาหุงกลิ่นจะหอมจึงเป็นที่นิยมต่อผู้บริโภค

2. เงื่อนไขในการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก มีดังนี้

2.1 อุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังอบแห้ง 3 ระดับคือ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ระยะเวลาในการอบน้อยกว่าแล้ว ถ้าพิจารณาถึงคุณภาพทางด้านการหุงต้ม การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการขยายปริมาตรและการอุ้มน้ำของข้าวสุกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นลักษณะของข้าวหุงสุกที่ดี (ละมุล วิเศษ, 2555)

2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศป้อนในช่วง 42-56%

2.3 ความเร็วรอบในการหมุนถังอบแห้งที่ 20 รอบ/นาที

2.4 ความเร็วลมร้อน 4.25 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมร้อนที่เหมาะสมไม่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกขณะเริ่มอบที่มีความชื้นสูงโดนลมร้อนพาไปตามกระแสความเร็ว (ทรงพล วิจารณ์จักร และคณะ, 2560)

2.5 ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 30-35% และความชื้นสุดท้ายในการอบไม่เกิน 15% (พระราชบัญญัติมาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551, 2560)

3. วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

3.1 โครงสร้างถังอบแห้ง (Drying tank) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร ยาว 75 เซนติเมตร ภายนอกเจาะช่องขนาดกว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร จำนวน 4 ช่อง ติดตะแกรงเพื่อใช้เป็นที่ระบายความชื้น และภายในติดตั้งใบตักโปรย (Flight) 3 ใบ รูปตัว L ขนาด 2 x 15 เซนติเมตร เพื่อทำหน้าที่พาเมล็ดข้าวเปลือกให้เคลื่อนที่ตามการการหมุนของถังและตกกลับลงมาที่ผิวด้านล่างของถัง ซึ่งจะช่วยให้เมล็ดข้าวเปลือกไม่เกาะตัวและเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวของเมล็ดข้าวเปลือกและลมร้อน เพื่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น

3.2 พัดลม (Blower) ขนาด 250 วัตต์ ทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ถังอบแห้งที่ควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ VSD Inverter

3.3 ขดลวดความร้อนไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 3 ตัว

3.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) แบบ PID

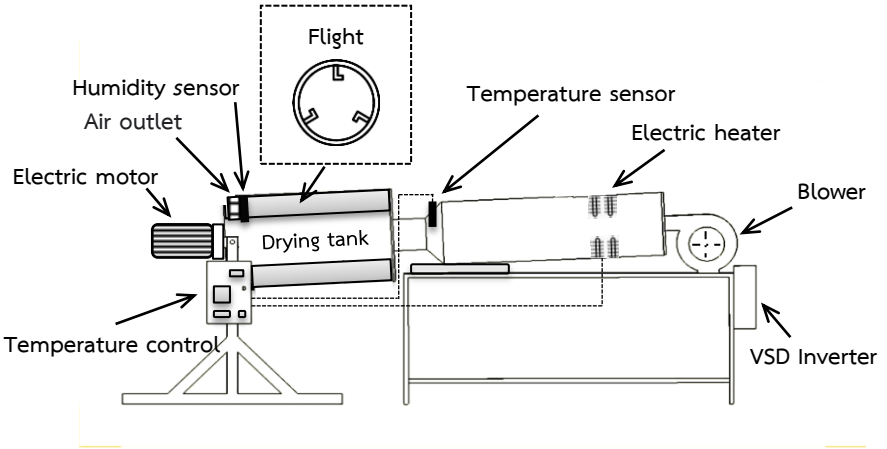
3.5 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor) ขนาด 250 วัตต์

3.6 อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer)

3.7 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert ทำหน้าที่อบข้าวเปลือกเพื่อวัดหาค่าความชื้น

3.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ SUNFORD รุ่น FEH300 ค่าความละเอียด 0.01 กรัม

(ก)



(ข)

รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยลมร้อน
(ก) รูปภาพของเครื่องอบแห้ง (ข) รายละเอียดของเครื่องอบแห้ง

4. การวิเคราะห์ผล

4.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content) คือ ค่าที่บ่งชี้ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis, M_w) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, M_d) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ความชื้นมาตรฐานแห้งในการวิเคราะห์ เนื่องจากในขณะที่อบมวลรวมจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานเปียกจะทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการคำนวณทางอุตสาหกรรมจะใช้ค่าความชื้นที่คำนวณแบบมาตรฐานแห้ง เนื่องจากขนาดมวลแห้งจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากในกระบวนการอบ จึงมีความสะดวกมากกว่า (สมพจน์ คำแก้ว, 2564) โดยความชื้นมาตรฐานแห้งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$M_d\,(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.), w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กิโลกรัม) และ d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

4.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ (อีลีหยัะ สนิโซ และคณะ, 2555) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \qquad (2)$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเริ่มต้น $(M_{eq} \ll M_0)$ และค่าความชื้นที่เวลาใดๆ $(M_{eq} \ll M_t)$ จึงสามารถเขียนสมการที่ (2) ใหม่ ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t)}{(M_0)} \qquad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (% d.b.), M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% d.b.)

4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ของฟิคก์ (Fick's second low of diffusion) สำหรับวัสดุที่เป็นทรงกลม (Ademiluyi et al., 2013) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\frac{\left(\partial^2 M\right)}{\left(\partial r^2\right)} + \frac{2}{r}\frac{\left(\partial M\right)}{\left(\partial r\right)} \qquad (4)$$

เมื่อ M คือ ค่าความชื้น, D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (เมตร^2/นาที), t คือ เวลา (นาที) และ r คือ รัศมีสมมูลของข้าวเปลือก (เมตร) (พิศมาส หวังดี, 2558)

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าคงตัว การกระจายความชื้นในวัสดุสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัว ไม่เกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่วัสดุ และอุณหภูมิคงที่ รวมไปถึงเวลาในการอบแห้งเป็นเวลานาน สามารถหาผลเฉลยจากสมการที่ (4) โดยตั้งสมมุติฐานข้าวเปลือกที่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นทรงกลม (โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง และกิตติ สถาพรประสาธน์, 2560) ซึ่งจะได้สมการเป็น

$$MR = \frac{6}{\pi^2}\exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff}\, t}{r^2}\right] \qquad (5)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน ด้วยวิธีการหาลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการเพื่อแปลงให้เป็นสมการเชิงเส้น จะได้

$$\ln(MR) = A - Bt \qquad (6)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่

โดยที่

$$D_{eff} = \frac{B \cdot r^2}{\pi^2} \qquad (7)$$

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

สมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลคือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ใช้อบแห้งเพื่อใช้สำหรับทำนายอัตราการอบแห้ง โดยรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยลมร้อน ในงานวิจัยนี้เลือกสมการที่นิยมใช้ทางงานด้านอบแห้ง 5 สมการ แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) โดยรูปแบบสมการมีดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Aviara et al., 2016)

Model name	Model equation	Equation no.
Newton	$MR=\exp(-kt)$	(8)
Page	$MR=\exp(-kt^n)$	(9)
Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$	(10)
Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c$	(11)
Two term	$MR=a\exp(-k_1t)+b\exp(-k_2t)$	(12)

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที) และ k, n, a และ b คือ ค่าคงที่ใดๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนว่าแบบจำลองที่สร้างมานั้นมีความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองเพียงใด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) (Aviara et al., 2016) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) (กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง, 2560) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (13) - (14) ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i}\right)^2} \quad (13)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(MR_{pred,i} - MR_{exp,i}\right)^2\right]^{1/2} \quad (14)$$

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง

$MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$\overline{MR}_{exp}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้วิเคราะห์

5. วิธีการทดลอง

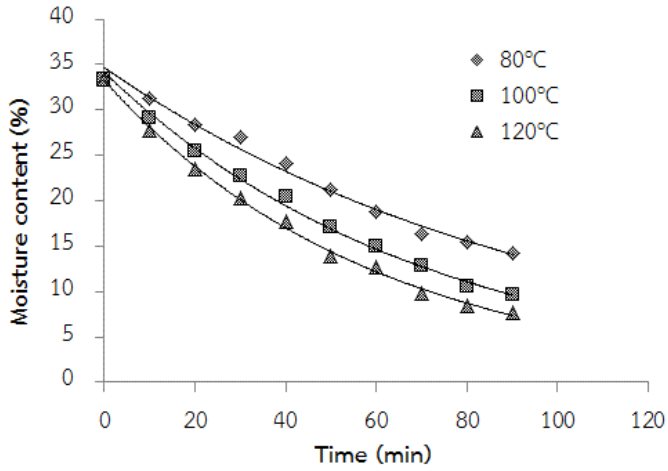
เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างควบคุม โดยนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 5 กิโลกรัม เข้าถังเพื่อทำการอบแห้ง ขณะเดียวกันให้เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกส่วนหนึ่งบรรจุใส่ถ้วยตัวอย่างแล้วปิดฝาและนำไปชั่งหาน้ำหนักก่อนอบแห้ง จากนั้นเริ่มทำการอบโดยตั้งความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าถังอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในระหว่างที่ทำการอบจะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที โดยนำข้าวเปลือกใส่ถ้วยตัวอย่างแล้วปิดฝาและชั่งหาน้ำหนักขณะนั้น ทำจนครบ 90 นาที แล้วนำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองทั้งหมดเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบเพื่อคำนวณหาความชื้นของข้าวตัวอย่างที่การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน AOAC (AOAC., 1995) จากนั้นจึงทำการทดลองในลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับต่อไป

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จลพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 , 100 และ 120 องศาเซลเซียส โดยความชื้นเริ่มต้น 30-35% และความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 15% มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 2 พบว่า ปริมาณ

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีลักษณะที่ลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล โดยในช่วงต้นของการอบ ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นสูง อีกทั้งผลต่างระหว่างอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบสูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลของน้ำจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอัตราเร็วในการถ่ายเทมวลของน้ำจะค่อยๆลดลงทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างช้าๆ และจากผลการทดลองยังพบอีกว่า การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงปริมาณความชื้นจะลดลงมากกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ปริมาณการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับผิวนอกของเมล็ดข้าวเปลือกจะสูงกว่า ดังนั้น ถ้าพิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นสุดท้ายเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

เมื่อนำข้อมูลปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะต่างๆ มาหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับปริมาณความชื้นเริ่มต้น แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทาง

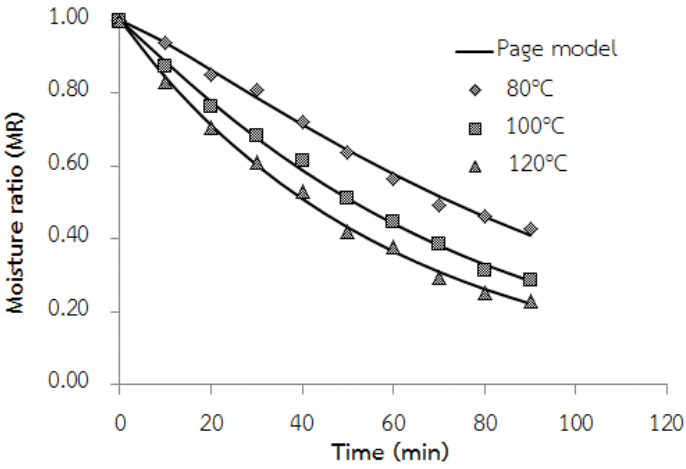
คณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล โดยเลือกสมการที่นิยมใช้ทางงานด้านอบแห้ง 5 สมการ มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะได้ค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ดังตารางที่ 2 และการเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ที่มีค่าสูงที่สุด และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุด

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

Model name	Temperature	Model Constants	R^2	RMSE
Newton	80°C	k = 0.0092	0.9840	0.0245
	100°C	k = 0.0135	0.9965	0.0136
	120°C	k = 0.0168	0.9974	0.0124
Page	80°C	k = 0.0041 , n = 1.1960	0.9949	0.0139
	100°C	k = 0.0105 , n = 1.0634	0.9977	0.0110
	120°C	k = 0.0176 , n = 0.9882	0.9975	0.0122
Henderson	80°C	k = 0.0097 , a = 1.0295	0.9889	0.0204
and Pabis	100°C	k = 0.0137 , a = 1.0082	0.9967	0.0132
	120°C	k = 0.0167 , a = 0.9946	0.9975	0.0122
Logarithmic	80°C	k = 0.0049 , a = 1.6918 , c = -0.6786	0.9927	0.0165
	100°C	k = 0.0104 , a = 1.1837 , c = -0.1882	0.9980	0.0093
	120°C	k = 0.0164 , a = 1.0038 , c = -0.0105	0.9975	0.0122
Two term	80°C	k_1 = 0.0033 , a = 7.2925	0.9928	0.0165
		k_2 = 0.0025 , b = -6.2792		
	100°C	k_1 = 0.0081 , a = 2.6619	0.9976	0.0115
		k_2 = 0.0055 , b = -1.6668		
	120°C	k_1 = 0.0162 , a = 1.0155	0.9975	0.0122
		k_2 = 0.0040 , b = -0.0222		

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Page มีค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด, ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Page และ Logarithmic มีค่า R^2 และ RMSE ใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในแต่ละแบบจำลอง มีค่า R^2 และ RMSE เท่ากัน ยกเว้นแบบจำลอง Newton ดังนั้น

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกได้ดีที่สุด ดังแสดงโดยเส้นแนวโน้มของแบบจำลองของ Page ในรูปที่ 3 ที่มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9949 - 0.9977 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0110 - 0.0139



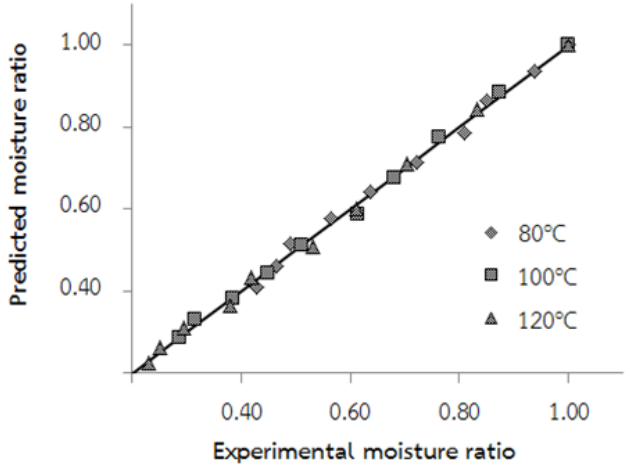
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุด

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าคงที่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งพบว่า ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าคงที่ที่จะส่งผลต่อค่าอัตราส่วนความชื้น คือ อุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอื่นได้ จึงนำค่าคงที่ k และ n จากแบบจำลองของ Page มาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นตามรูปแบบสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) (Chakraborty et al., 2016) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$k = 1646.965 \exp\left(-\frac{4493.197}{T_{abs}}\right) \quad ; \quad R^2 = 0.985$$

$$n = 0.178 \exp\left(\frac{671.424}{T_{abs}}\right) \quad ; \quad R^2 = 0.990$$

สำหรับความน่าเชื่อถือของแบบจำลองของ Page สามารถพิจารณาจากค่า R^2 และ RMSE แล้ว ยังสามารถพิจารณาโดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการพิจารณาจากระยะห่างระหว่างจุดของอัตราส่วนความชื้นในแต่ละอุณหภูมิกับแนวเส้นตรง ถ้าค่า R^2 มีค่ามาก ระยะห่างระหว่างจุดกับแนวเส้นตรงจะน้อย และถ้าค่า R^2 มีค่าน้อย ระยะห่างระหว่างจุดกับแนวเส้นตรงจะมาก จากผลการทดลองพบว่า จุดของอัตราส่วนความชื้นอยู่ใกล้แนวเส้นตรงมาก จึงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

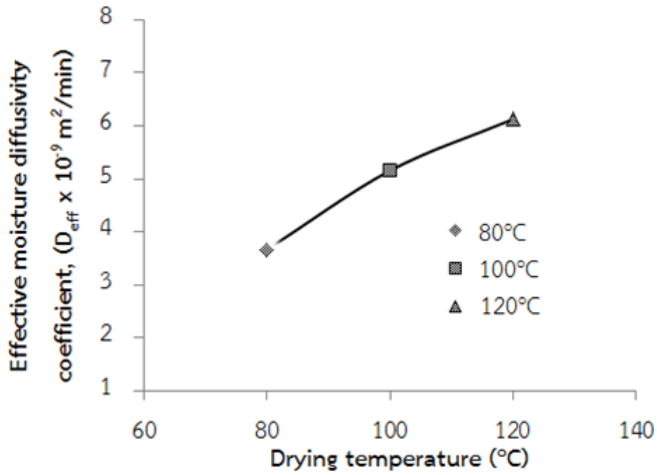


รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากผลการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนแบบถังทรงกระบอกหมุนที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่า 3.661×10^{-9}, 5.155×10^{-9} และ 6.127×10^{-9} เมตร^2/นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ความชื้นจะมีค่าสูงขึ้น สาเหตุเกิดจากอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงจะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำภายในเมล็ดข้าวเปลือกมายังผิวนอกสูงขึ้นและยังเป็นการเร่งการระเหยของน้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งก็คือการแพร่ความชื้นออกจากผิวได้ดีขึ้นด้วย



รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นสุดท้ายตามมาตรฐาน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าพิจารณาถึงคุณภาพทางด้านการหุงต้ม การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการขยายปริมาตรและการอุ้มน้ำของข้าวสุกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของข้าวหุงสุกที่ดีหรือที่เรียกว่า ข้าวหุงขึ้นหม้อ (ละมุล วิเศษ, 2555) แต่ถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากในช่วงแรกอุณหภูมิที่ผิวเมล็ดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการสัมผัสกับลมร้อน ยิ่งถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งสูงเกินไป ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแกนกลางและผิวของเมล็ดข้าวเปลือกจะยิ่งสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเค้นในเมล็ดสูงและเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เมล็ดข้าวแตกร้าว (ปรีดา ปรากฏมาก, 2559)

ในส่วนของวิธีการทดลองพบว่า ในการวัดแต่ละครั้งมีโอกาสที่จะได้ค่าไม่เท่าเดิม สาเหตุหนึ่งมาจากค่าความชื้นของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าแตกต่างกันเกินไป เพื่อให้การวัดมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ จึงทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในสภาพแวดล้อมและช่วงเวลาของการทดลองที่เหมือนกัน ดังนั้นการนำเสนอข้อมูลหรือค่าที่วัดได้จึงอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์จะพบว่า ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล โดยพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (RMSE) ดังตารางที่ 2 และจากการทดลองยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะช่วยเร่งการระเหยของน้ำที่ผิวเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกผลงานวิจัยของ (Chakraborty et al., 2016)

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแบบถังทรงกระบอกหมุนโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งจะลดลงเป็นเส้นโค้งแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งของ Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก เนื่องจากมีค่า R^2 สูง อยู่ในช่วง 0.9949 - 0.9977 และค่า RMSE ต่ำ อยู่ในช่วง 0.0110 - 0.0139 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด และการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้งกับผลิตผลทางการเกษตรที่ต้องการอุณหภูมิการอบแห้งสูงได้อีกด้วย เช่น พริก ลำไย และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง. (2560). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด. *วิศวสารลาดกระบัง*, *34*(4), 22-29.

ทรงพล วิจารณ์จักร, สุพรรณ ยั่งยืน และ จักรมาส เลาหวณิช. (2560). การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมลมร้อนปล่อยทิ้งในกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, *48*(3), 51-54.

ธนากรณ์ อุ่นพินิจ, วรินรำไพ เศรษฐ์ธนณบุตร, ทินกร คำแสน, พนมกร ขวาของ และ อภิชาติ อาจนาเสียว. (2560). การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบอัตโนมัติ. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, *7*(1), 124-139.

ธัชพล จุ้งเจริญ, การันต์ ดวงนิราส, วัชระ วงศ์สุกรี และ อนุพงศ์ มีโคตรกอง. (2560). *ผลของความชื้นเริ่มต้นและความสูงเบดของข้าวเปลือกต่อความเร็วลมต่ำสุดในเครื่องทดสอบการเกิดฟลูอิไดเซชัน*. น. 255-264. ใน: การประชุม การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2560. 20 เมษายา 2560. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

ปรีดา ปรากฏมาก. (2559). แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารและการเปลี่ยนแปลงทางกลของเมล็ดข้าวระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด. *วิศวสารลาดกระบัง*, *33*(2), 42-48.

พระราชบัญญัติ มาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551. (2560, 8 กันยายน). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่มที่ 134 ตอนพิเศษ 221 ง, หน้า 42.

พิศมาส หวังดี. (2558). คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือกและข้าวเปลือกนึ่ง. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*, *8*(1), 23-28.

โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง และ กิตติ สถาพรประสาธน์. (2560). การประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดร่วมกับคลื่นอัลตร้าซาวด์สำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, *12*(1), 163-175.

ละมุล วิเศษ. (2555). ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านการหุงต้มของข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, *17*(1), 172-180.

สมพจน์ คำแก้ว. (2564). อุณหภูมิการอบแห้งแบบหมุนเวียนของข้าวเปลือกมีผลต่อสารหอม (2AP). *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, *16*(3), 1-9.

สุชีวา สิทธิจินดา, คงฤทธิ์ รีวงษ์ และ ธราธิป ภู่ระหงษ์. (2559). *การพัฒนาเครื่องไล่ความชื้นข้าวเปลือกในครัวเรือนควบคุมอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino.* น. 436-443. ใน: การประชุม การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3. 22 ธันวาคม 2559. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, กำแพงเพชร.

อีลีหย๊ะ สนิโซ, ฟามีรา สะอุดี และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี. (2555). สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, *17*(1), 142-149.

Ademiluyi, F. T., & Abowei, M. F. N. (2013). Theoretical model for predicting moisture ratio during drying of spherical particles in a rotary dryer. *Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering*, Retrieved from https://doi.org/10.1155/2013/491843.

Association of Official Analytical Chemists. (1995). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Washington D.C., USA.

Aviara, N. A., & Igbeka, J. C. (2016). Modeling for drying of thin layer of native cassava starch in tray dryer. *Journal of Biosystems Engineering*, *41*(4), 342-356.

Chakraborty, S., Sarma, M., Bora, J., Faisal, S., & Hazarika, M. K. (2016). Generalization of drying kinetics during thin layer drying of paddy. *Agricultural Engineering International*, *18*(4), 177-189.