วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 26:1(9-19)

การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล
Moisture Dehydration of Rough Rice by Recycle Material Desiccant

อีลีหย๊ะ สนิโซ[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองศึกษาการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับความชื้นเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง ความร้อนของระบบอบแห้ง และคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก จากการทดลองพบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่วิเคราะห์ขึ้นสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้และเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้ $M_r = A_r \cdot EXP(-K_r t^{N_r}) + B_r^2$ สำหรับข้าวเปลือก และ $M_d = A_d \cdot EXP(-K_d t^{N_d}) + B_d^2$ สำหรับวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล เมื่อ M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง), t คือ เวลา (นาที), A, B, K และ N คือ ค่าคงที่ของสมการ, r และ d คือ ข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล ตามลำดับ ในขณะที่ความร้อนของระบบอบแห้งจะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 3-4 องศาเซลเซียส และคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้น อันได้แก่ ร้อยละความขาว ร้อยละการงอก และร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกควบคุมที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ : แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง / ข้าวเปลือก / วัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล / คุณภาพทางกายภาพ

Abstract

This research was carried out the moisture dehydration of rough rice using recycle material adsorbents, in terms of drying kinetic modeling, heat of drying system and physical qualities of paddy. The results have shown that the new model was proposed for simulating the drying behavior as follow $M_r = A_r \cdot EXP(-K_r t^{N_r}) + B_r^2$ for rough rice and $M_d = A_d \cdot EXP(-K_d t^{N_d}) + B_d^2$ for recycle material desiccant, when M is moisture content (% dry-basis), t is time (min), A, B, K and N is arbitrary constant of model, r and d is rough rice and adsorbent respectively. While the heat of drying system is increased about 3-4°C from the initial temperature and the physical quality of rough rice after drying such as percentage of head rice yield, germination and percentage of whiteness is not significantly influenced from control sample paddy at 95% ($p < 0.05$)

Keywords : Drying kinetic modeling / Rough rice / Recycle material desiccant / Physical quality

[1]สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000. E-mail: Saniso.E@hotmail.com

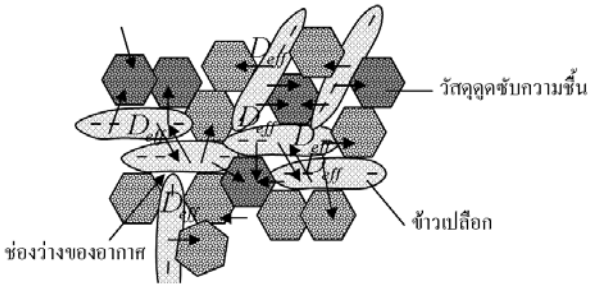
คำนำ

ข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นประมาณ 25.0-33.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ถือว่าเป็นความชื้นที่สูงสำหรับการเก็บรักษาโดยไม่ให้เสื่อมคุณภาพเพราะความชื้นที่สามารถเก็บรักษาไว้ได้อย่างปลอกภัยจะต้องอยู่ที่ประมาณ 14.0-16.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (สมชาติ, 2540; Amalendu and Paul, 2001) จึงจำเป็นที่จะต้องทำการลดความชื้นให้เร็วที่สุดเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกไว้ กระบวนการลดความชื้นมีหลายลักษณะที่แตกต่างกัน อาทิเช่น การตากแดดข้าวเปลือกเป็นชั้นบางๆ บนลานคอนกรีตหรือการใช้เครื่องอบแห้งอบข้าวเปลือกให้แห้ง เป็นต้น แต่การลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมนั้นต้องทำด้วยวิธีที่เหมาะสมและถูกวิธี ไม่เช่นนั้นจะทำให้ข้าวเปลือกเสื่อมคุณภาพเพิ่มมากขึ้นได้ (กิติยา, 2545; Amalendu and Paul, 2001) โดยเฉพาะการลดความชื้นด้วยการตากแดดและการใช้เครื่องอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความร้อนซึ่งทำให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นทั้งสิ้นการที่อุณหภูมิในเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้นขณะทำการอบแห้งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของเมล็ดข้าว กล่าวคือ อุณหภูมิที่สูงจะส่งผลต่อการแตกร้าวและเกิดการแตกหักในเมล็ดข้าว เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทำให้ข้าวสารที่ได้มีสีเหลือง รวมถึงมีผลต่อความสามารถในการงอกของข้าวเปลือกอีกด้วย ดังนั้น เพื่อลดปัญหาและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับข้าวเปลือกเนื่องจากความร้อนจากการลดความชื้นดังกล่าวการศึกษาหาแนวทางใหม่ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวกลางดูดซับความชื้นออกจากข้าวเปลือกชั้นซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้คุณภาพและมูลค่าหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกลดลงแล้วยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกทางหนึ่ง โดยมุ่งทำการศึกษาทดลองเพื่อ (1) ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสม (2) ศึกษาความร้อนของระบบอบแห้ง และ (3) ศึกษาคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้น

1. แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง

การวิเคราะห์สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งเมล็ดธัญพืชนับเป็นหัวใจสำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบระบบอบแห้งและระบบการจัดเก็บผลผลิตทางการเกษตรที่เหมาะสม เพื่อคงคุณภาพและมูลค่าเชิงพาณิชย์ไว้ให้ได้มากที่สุด โดยมีแบบจำลองจลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง ทั้งแบบจำลองทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และแบบจำลองแบบเอ็มพิริคัล (สมชาติ, 2540) เป็นแบบจำลองที่วิเคราะห์ขึ้นโดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างวัสดุและอากาศแวดล้อมเป็นหลักในขณะที่แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่เกิดจากการผสมกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ที่มีความชื้นแตกต่างกันในระบบปิด ดังในงานของ Sturton *et al*. (1983) ที่ได้ทำการทดลองและพัฒนาสมการในการหาความชื้นที่ถ่ายโอนระหว่างข้าวโพดและเบนโตไนท์ เมื่อผสมกันในโอ่งที่ถูกปิดสนิท ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วสุ่มตัวอย่างเพื่อหาความชื้นที่เวลาต่างๆ ซึ่งพบว่า ความชื้นของข้าวโพดจะลดลงอย่างรวดเร็วใน 20 นาทีแรก โดยสามารถอธิบายด้วยสมการ ดังนี้ $m = m_0 - a_c(1-e^{-b_c t})$ ในขณะที่ความชื้นของเบนโตไนท์สามารถอธิบายด้วยสมการ $m = m_0 - a_b(1-e^{-b_b t})$

เมื่อ m คือ ปริมาณความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง), m_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง), t คือ เวลา (ชั่วโมง), a_b, a_c, b_b และ b_c คือ ค่าคงที่ของสมการ แต่แบบจำลองจลศาสตร์การอบแห้งในลักษณะดังกล่าวนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายและมีการศึกษาที่จำกัด ดังนั้น การทดลองนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกที่ผสมกันโดยตรงกับวัสดุดูดซับความชื้นในภาชนะที่ปิดสนิท โดยถือว่าช่องว่างของอากาศระหว่างวัสดุในระบบอบแห้งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดและสมมติให้การถ่ายโอนมวลมีเฉพาะข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการ จากนั้นนำค่าคงที่ที่ได้มาแทนกลับในสมการความสัมพันธ์แล้วนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ R^2, RMSE และ E(%) (ทรงศิริ, 2549) พิจารณาคัดเลือกแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 1 แสดงช่องว่างของอากาศและผิวสัมผัสระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิลในระบบอบแห้ง

2. ความร้อนของระบบอบแห้ง

สมชาติ (2540) ได้กล่าวว่า ในระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดพืชหรือผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวนั้นเมล็ดพืชจะมีการหายใจอยู่ตลอดเวลา ทำให้มวลแห้งที่มีอยู่มีค่าลดน้อยลงเนื่องจากการเผาผลาญแป้งอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและความร้อน ดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2.84\ MJ \quad (1)$$

ความร้อนที่เกิดขึ้นในสมการ (1) สามารถทำให้เมล็ดพืชร้อนขึ้นได้ ดังสมการ

$$\Delta T = 15778DML/c_p \quad (2)$$

ถ้าสมมติให้น้ำที่เกิดขึ้นสมการ (1) สามารถคืนกลับเข้าไปในเมล็ดพืชได้อีก จะเขียนสมการแสดงความชื้นของเมล็ดพืชที่เพิ่มขึ้นได้ ดังนี้

$$\Delta M = 0.6DML \quad (3)$$

โดย DML หมายถึง มวลแห้งที่สูญเสียเนื่องจากการหายใจของเมล็ดพืช ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ความชื้น อุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของเมล็ดพืช สำหรับเมล็ดข้าวเปลือกสามารถคำนวณค่า DML ได้ ดังนี้

$$DML = 1 - \exp[-[A(t/100)^{c} \cdot \exp[D(1.8T - 28)]\exp[E(M - 0.14)]] \quad (4)$$

เมื่อ c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชชื้น (กิโลจูล/กิโลกรัม-องศาเซลเซียส), T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), DML คือ มวลแห้งที่สูญเสีย (อัตราส่วน), M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก), t คือ เวลาการเก็บรักษา (ชั่วโมง), A , C , D และ E คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.000914, 0.654, 0.03756 และ 33.61 ตามลำดับ

3. คุณภาพทางกายภาพ

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้นในภาพของร้อยละการงอก ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด และร้อยละความขาว ดังนี้

3.1 การทดสอบร้อยละข้าวเต็มเมล็ดและร้อยละการงอก ทำตามมาตรฐาน ISTA (2003) แล้วคำนวณค่าดังนี้

ร้อยละข้าวเต็มเมล็ด = (มวลข้าวเต็มเมล็ด/มวลข้าวเปลือก) × 100 (5)

ร้อยละการงอก = (จำนวนเมล็ดงอก/400) × 100 (6)

3.2 การทดสอบร้อยละความขาว ทำได้โดยใช้เครื่องวัดความขาวรุ่น Kett Electric laboratory C-300-3 (ทดสอบที่ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุง)

4. สถิติวิเคราะห์

การทดลองนี้ได้พิจารณาค่าทางสถิติในภาพของ Coefficient of correlation (R^2), Root mean square error (RMSE) และ Mean relative deviation modulus (E) เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้ง โดยถือว่าแบบจำลองที่ให้ค่า R^2 สูงสุด และให้ค่า RMSE และ E(%) ต่ำสุด เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด (ทรงศิริ, 2549; Singh and Gupta, 2007) และสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E(\%) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{E_i - P_i}{E_i}\right| \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - P_i)^2\right]^{1/2} \quad (8)$$

เมื่อ P_i คือ ข้อมูลจากแบบจำลอง, E_i คือ ข้อมูลจากการทดลอง, n คือ จำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์ และ i คือ จำนวนเต็มบวก

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ข้าวเปลือก ได้แก่ ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดพัทลุง) และพันธุ์เล็บนกปัตตานี (ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดปัตตานี)

1.2 วัสดุดูดซับความชื้น ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคู และกาบมะพร้าว

1.3 ภาชนะอบแห้ง แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1.3.1 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นที่เหมาะสม ใช้ภาชนะบรรจุความจุ 430 ลูกบาศก์เซนติเมตร หุ้มด้วยฉนวนหนา 1 เซนติเมตร

1.3.2 การทดลองระดับขยายสเกล ใช้ภาชนะบรรจุความจุ 20,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร หุ้มด้วยชนวนหนา 2 เซนติเมตร

2. การเตรียมวัสดุ

2.1 ข้าวเปลือก เตรียมได้โดยการนำข้าวเปลือกสดมาทำความสะอาดเพื่อแยกสิ่งเจือปนออกแล้วนำไปทำความชื้นให้อยู่ในช่วงประมาณ 25.0-30.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

2.2 วัสดุดูดซับความชื้น

2.2.1 แกลบ เตรียมได้โดยการนำแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกมาทำความสะอาดโดยการแยกเศษวัสดุและสิ่งเจือปน เช่น เศษดิน หญ้า กิ่งไม้ ออก แล้วนำไปวัดขนาด ดังภาพที่ 2 (ก)

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 2 แสดงวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล

2.2.2 ทางใบสาคูและกาบมะพร้าว เตรียมได้โดยการนำมาตัดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาดความยาวด้านละประมาณ 0.50 เซนติเมตร ดังภาพที่ 2 (ข) และ (ค)

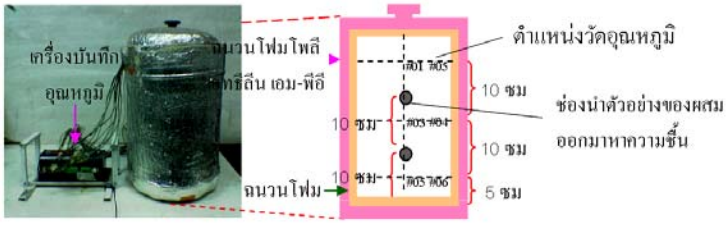
2.2.3 นำวัสดุดูดซับความชื้นทั้ง 3 ชนิด ไปทำความชื้นให้อยู่ในช่วงประมาณ 4.0-10.0 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (ความชื้นจริงในสภาพแวดล้อม)

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นที่เหมาะสม ทำได้โดยการผสมข้าวเปลือก (ความชื้น 23-24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) กับวัสดุดูดซับความชื้น (ความชื้น 7-8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) โดยตรงที่อัตราส่วน 1:0.5, 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร แล้ว

นำไปบรรจุลงในภาชนะตามข้อ 1.3.1 ปิดให้สนิท ตั้งที่อุณหภูมิแวดล้อม เมื่อครบกำหนดเวลา 5, 10, 30, 120, 300 และ 600 นาที จึงนำของผสมมาแยกเพื่อหาความชื้นที่เวลาต่างๆ พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 1.0:1.5 โดยปริมาตร (Saniso *et al*., 2005) นำอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ไปทดลองในระดับขยายสเกลเพื่อศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง ความร้อนของระบบอบแห้ง และคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือก ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

3.2 ทดลองผสมข้าวเปลือก (ประมาณ 4.3 กิโลกรัม ความชื้น 24-25 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) เข้ากับวัสดุดูดซับความชื้น (ประมาณ 5.5 กิโลกรัม ความชื้น 5-7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) โดยตรงจากนั้นบรรจุลงในภาชนะตามข้อ 1.3.2 ปิดให้สนิท นำไปตั้งไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อม ทำการบันทึกอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก และอุณหภูมิภายในระบบอบแห้ง ดังภาพที่ 3 เมื่อครบกำหนดเวลา 5, 10, 30, 120, 300 และ 600 นาที จึงนำของผสมมาคัดแยกออกจากกันแล้วนำไปหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) บันทึกเป็นความชื้นที่เวลาต่าง ๆ นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมและและนำตัวอย่างข้าวเปลือกหลังการทดลองนี้ไปทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกในภาพของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละการงอก และร้อยละความขาว ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

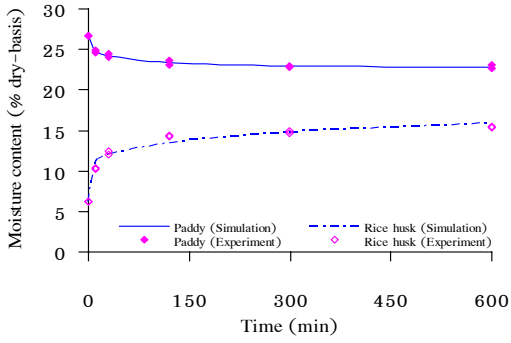


ภาพที่ 3 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล

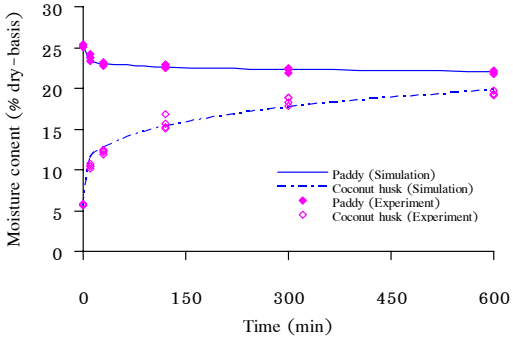
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. จลนศาสตร์การอบแห้ง

จากการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับรีไซเคิล พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 200 นาทีแรก จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ จนเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 300 นาที การเปลี่ยนแปลงความชื้นของระบบอบแห้งจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (Henderson, 1952; Halsey, 1948) ดังแสดงในภาพที่ 4 และภาพที่ 5 โดยที่กาบมะพร้าวสามารถดูดซับความชื้นได้ดีที่สุดรองลงมาคือ แกลบ และทางใบสาคู ตามลำดับ



ภาพที่ 4 แสดงผลการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยแกลบเปรียบเทียบกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนศาสตร์ที่วิเคราะห์ขึ้น



ภาพที่ 5 แสดงผลการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกสายพันธุ์เล็บนกปัตตานีด้วยกาบมะพร้าวเปรียบเทียบกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนศาสตร์ที่วิเคราะห์ขึ้น

2. แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง

เมื่อนำข้อมูลการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับรีไซเคิลมาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อมูลการทำนายด้วยแบบจำลองที่วิเคราะห์ขึ้นกับผลจากการทดลองด้วยค่าทางสถิติในภาพของค่า R^2, E(%) และ RMSE (โดยแบบจำลองที่ให้ค่า E(%) ไม่เกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ถือว่ายอมรับได้ (Singh and Gupta, 2007) พบว่า ค่า R^2, E(%) และ RMSE อยู่ในช่วง 0.976-0.999, 0.040-1.221 และ 0.067-0.965 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่วิเคราะห์ขึ้นสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ทุกสภาวะการทดลองและสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น เวลา และค่าคงที่ต่างๆ ของสมการได้ ดังนี้

2.1 ข้าวเปลือก

$$M_r = A_r \cdot EXP(-K_r t^{N_r}) + B_r^2 \quad (9)$$

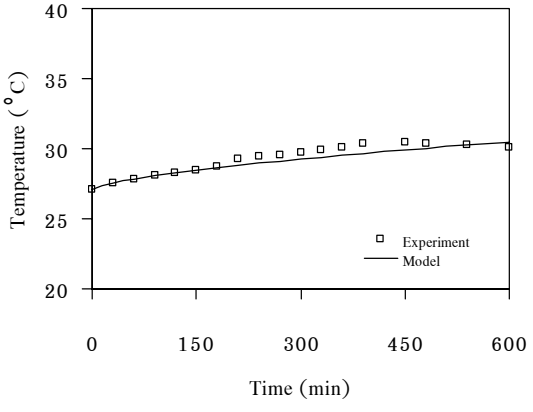
2.2 วัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล

$$M_d = A_d \cdot EXP(-K_d t^{N_d}) + B_d^2 \quad (10)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง), t คือ เวลา (นาที), A, B, K และ N คือ ค่าคงที่ของสมการ, r และ d คือ ข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล ตามลำดับ

3. ความร้อนของระบบอบแห้ง

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของขงผสมที่บันทึกได้ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data loger) ที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 6 ตำแหน่งในระบบอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิโดยเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลอง 600 นาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นประมาณ 3-4 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับความร้อนที่ได้คำนวณจากสมการการสูญเสียมวลแห้งซึ่งได้อธิบายไว้โดย สมชาติ (2540) ตามสมการที่ (1) - (4) พบว่า ข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในภาพที่ 6 และเป็นไปในทำนองเดียวกันนี้สำหรับข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิลอื่นๆ

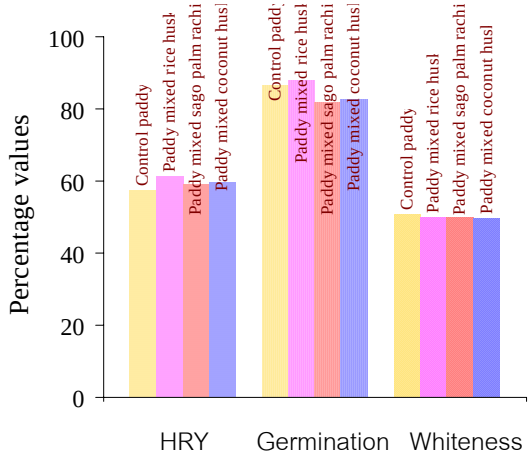


ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปัตตานี (ความชื้นเริ่มต้น 23.5 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) ด้วยทางใบสาคู (ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 5.9 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการการสูญเสียมวลแห้ง

4. คุณภาพทางกายภาพ

ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้นในภาพของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ร้อยละความขาว และร้อยละการงอก พบว่า คุณภาพทางกายภาพทั้งสามชนิด มีค่าใกล้เคียงกันกับ

ข้าวเปลือกควบคุม (มีความแตกต่างกันประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์) ดังแสดงในภาพที่ 7 อันเนื่องมาจากการอบแห้งโดยใช้วัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิลนั้นไม่มีการป้อนพลังงานความร้อนเข้าไปในระบบอบแห้งจะมีเฉพาะความร้อนเนื่องจากกระบวนการการหายใจของเมล็ดพืชเท่านั้นซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม (ประมาณ 29-34 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน ทำให้คุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งแตกต่างจากการลดความชื้นโดยการอบแหงด้วยลมร้อนที่มีแนวโน้มจะทำให้คุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกลดต่ำลง (สมชาติ, 2543; Imoudu and Olufayo, 2000)



ภาพที่ 7 แสดงคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้น

สรุป

จากการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวัสดุรีไซเคิลทางการเกษตรสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิของระบบอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3-4 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิตอนเริ่มต้น
2. ร้อยละการงอก ร้อยละความขาว และร้อยละข้าวเต็มเมล็ด ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกควบคุมที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)
3. แบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งที่วิเคราะห์ขึ้นสามารถทำนายผลได้สอดคล้องกับทุกสภาวะการทดลอง

คำขอบคุณ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัด

พัทลุงและจังหวัดปัตตานี ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กิติยา กิจควรดี. 2545. การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. หน้า 54. *ใน* งามชื่น คงเสรีและคณะ. คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย. จิรวัฒน์เอ็กซ์เพรส จำกัด, กรุงเทพฯ.

ทรงศิริ แต้สมบัติ. 2549. การพยากรณ์เชิงปริมาณ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2543. เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก. ว. วิทยาศาสตร์ 54(5) : 288-292.

Amalendu, Chakraverty. and Paul, S.R. 2001. Postharvest technology : cereals, pulses, fruits and vegetables. Science Publishers, USA.

AOAC. 2005. Official methods of analysis. association of official analytical chemists, Washington, D.C.

Halsey, G. 1948. Physical adsorption on non-unifrom surface. J. Chem. Phys. 16 : 83-92.

Henderson, S.M.A. 1952. Basic concept of equilibrium moisture. Agril. Eng. 3 : 29-32.

Imoudu, P.B. and Olufayo, A.A. 2000. The effect of sun drying on milling yield and quality of rice. Bioresource Technology. 74 : 267-269.

ISTA. 2003. The Germination Test 5A-1. The international seed testing association. Basserdorf, CH-Switzerland.

Saniso, E., Tirawanichakul, S. and Tirawanichakul, Y. 2005. Novel moisture removal of paddy by agricultural residue. 21-26. *In* Regional symposium on chemical engineering. Hanoi Horision Hotel, Hanoi, Vietnam.

Singh, B. and Gupta, A.K. 2007. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. Journal of Food Engineering. 79 : 459-470.

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่สมการจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์เล็บนกปัตตานีและวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล (แกลบ ทางใบสาคู และกาบมะพร้าว)

ค่าคงที่สมการ	แกลบ	R^2	E(%)	RMSE	เล็บนกปัตตานี	R^2	E(%)	RMSE
A	1.011586	0.991	0.100	0.169	-0.000009	0.998	0.173	0.124
K	-0.955066				-11.62550			
N	0.116574				0.014762			
B	2.216176				4.840472			
ค่าคงที่สมการ	**ทางใบสาคู**	R^2	E(%)	RMSE	**เล็บนกปัตตานี**	R^2	E(%)	RMSE
A	0.000011	0.976	1.221	0.965	-0.324557	0.992	0.055	0.086
K	-12.49020				-1.334350			
N	0.017552				0.063995			
B	2.358264				4.888150			

ค่าคงที่สมการ	กาบมะพร้าว	R^2	E(%)	RMSE	เล็บนกปัตตานี	R^2	E(%)	RMSE
A	5.678033	0.994	0.669	0.613	25.115560	0.998	0.082	0.182
K	-0.498837				0.055909			
N	0.144122				0.140127			
B	0.000020				0.292420			

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่สมการจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และวัสดุดูดซับความชื้นรีไซเคิล (แกลบ ทางใบสาคู และกาบมะพร้าว)

ค่าคงที่สมการ	แกลบ	R^2	E(%)	RMSE	ขาวดอกมะลิ 105	R^2	E(%)	RMSE
A	6.205734	0.988	0.528	0.494	4.073679	0.999	0.040	0.067
K	-0.110165				0.238301			
N	0.118343				0.395562			
B	0.000015				4.748916			
ค่าคงที่สมการ	**ทางใบสาคู**	R^2	E(%)	RMSE	**ขาวดอกมะลิ 105**	R^2	E(%)	RMSE
A	5.978787	0.993	0.511	0.598	2.396256	0.992	0.063	0.104
K	-0.563037				0.029487			
N	0.125620				0.710884			
B	0.000046				4.912914			
ค่าคงที่สมการ	**กาบมะพร้าว**	R^2	E(%)	RMSE	**ขาวดอกมะลิ 105**	R^2	E(%)	RMSE
A	5.955343	0.993	0.611	0.594	26.88456	0.996	0.049	0.594
K	-0.454436				0.031161			
N	0.160911				0.229220			
B	0.000070				0.309169			