

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร :
พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและแบบจำลองจลนศาสตร์
การอบแห้ง

ยุทธนา ฐิระวณิชยกุล¹ สุภววรรณ ฐิระวณิชยกุล² และ อีลีหัยะ สนิโซ³

Abstract

Tirawanichakul, Y.¹, Tirawanichakul, S.² and Saniso, E.¹

Moisture removal of paddy by agricultural residues: basic physical parameters and drying kinetics modeling

Songklanakar J. Sci. Technol., May 2007, Suppl 2 : 347-363

The objectives of this research were to study basic physical parameters of three agricultural residues that could be used for prediction of paddy drying kinetics using desiccants, to investigate a suitable method for moisture reduction of fresh paddy using 3 absorbents, and to modify the drying model of Inoue *et al.* for determining the evolution of moisture transfer during the drying period. Rice husk, sago palm rachis and coconut husk were used as moisture desiccants in these experiments. From the results, it was concluded that the apparent density of all adsorbents was a linear function of moisture content whilst an equilibrium moisture content equation following Henderson's model gave the best fit to the experimental results. From

¹Department of Physics, Faculty of Science, ²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

¹ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ³นักศึกษาลัทธิสุตร วท.ม. สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ²ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: yutthana.t@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 21 เมษายน 2550 รับลงพิมพ์ 28 พฤษภาคม 2550

studying the relationship between moisture ratio and drying time under the condition of drying temperatures of 30, 50 and 70°C, air flow rate of 1.6 m/s and initial moisture content of absorbents of 15, 20 and 27% dry-basis, it was shown that the moisture ratio decreased when drying time increased. In addition, the thin-layer desiccant drying equation following of the Page model can appropriately explain the evolution of moisture content of paddy over the drying time. The diffusion coefficient of all absorbents, which was in the range of 1×10^{-8} to 6×10^{-8} m²/h, was relatively dependent on drying temperature and inversely related to drying time. The diffusivity of coconut husk had the highest value compared to the other absorbents.

The simulating modified mathematical model to determine drying kinetics of paddy using absorption technique and the simulated results had good relation to the experimental results for all adsorbents.

Key words : agricultural residues, drying, equilibrium moisture content, diffusion coefficient, Mathematical model

บทคัดย่อ

ยุทธนา ฐิระวิชย์กุล สุภวรรณ ฐิระวิชย์กุล และ อีลีหัยะ สนิโซ
การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร : พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพ
และแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง

ว. สงขลานครินทร์ วิทยาเขต. พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2 : 347-363

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อใช้ในการทำนายจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับ และหาแนวทางที่เหมาะสมในการลดความชื้นข้าวเปลือกสดด้วยเทคนิคการดูดซับความชื้นจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด และในส่วนสุดท้ายคือ การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inoue และคณะ เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้ง วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เลือกใช้เป็นวัสดุดูดซับมี 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาธู และกาบมะพร้าว ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์กายภาพเชิงความร้อนต่างๆ สรุปได้ว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดแปรโดยตรงกับความชื้นในวัสดุ ขณะที่ผลการคำนวณค่าความชื้นสมดุลของวัสดุดูดซับที่ได้จากการสร้างสมการรูปแบบของ Henderson สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด สำหรับการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C ความเร็วลม 1.6 ม./วินาที ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุดูดซับเท่ากับ 15 20 และ 27 % มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งชั้นบาง พบว่า สมการของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ใกล้เคียงที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น และแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ออบแห้งโดย พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-8} ถึง 6×10^{-8} ตร.เมตร/ชม. และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกาบมะพร้าวมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับที่เหลือ

การจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์การอบแห้ง พบว่า ผลการทำนายสอดคล้องได้ดีกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

ข้าวเป็นธัญพืชที่สำคัญและทำรายได้ให้ประเทศปีละหลายพันล้านบาท ข้าวเปลือกส่วนใหญ่ที่เก็บเกี่ยวได้จะมีความชื้นสูง (อยู่ในช่วง 22-33% มาตรฐานแห้ง) เสี่ยงต่อความเสียหายและความสูญเสียทั้งจากการรบกวนของแมลง

หนู เชื้อรา และการสะสมของความร้อนและความชื้นจากการหายใจในกองข้าวเปลือก (สมชาติ, 2540) ซึ่งทำให้ข้าวมีสีเหลืองขึ้นในระยะเวลาเพียง 1-3 วัน ดังนั้นจึงต้องลดความชื้นให้ข้าวเปลือกแห้งเพียงพอที่จะเก็บรักษาไว้โดยไม่

เสี่ยงต่อการเสื่อมคุณภาพ โดยปกติความชื้นที่ปลอดภัยในการเก็บรักษาข้าวเปลือกมีค่าประมาณ 15-16% มาตรฐานแห้ง ขณะนี้การค้าข้าวในตลาดโลกต้องแข่งขันกับประเทศในเอเชียที่ส่งออกข้าวเช่นเดียวกับประเทศไทย (ได้แก่ สาธารณรัฐเวียดนามและสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น) ดังนั้นจึงควรพัฒนากระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งข้าวเปลือกให้ใช้พลังงานต่ำและใช้เทคโนโลยีไม่ซับซ้อน งานวิจัยด้านนี้ยังมีแนวทางที่สามารถพัฒนาต่อไปได้ เช่น งานของ Yamaguchi และ Kawasaki (1994) ที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้น ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาเจลต่อข้าวเปลือกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.8 ต่อ 1.0 ตามลำดับ โดยศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกให้ข้าวเปลือกสดและสารดูดซับอยู่แยกชั้นกันเรียงกันในแนวตั้งสลับชั้นกัน และกรณีที่สองจัดการทดลองโดยการผสมคลุกเคล้าข้าวเปลือกสดและซิลิกาเจลเข้าด้วยกัน ผลการทดลองพบว่ากรณีการผสมคลุกเคล้ากรณี 2 นี้ จะลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณี 1 และที่อัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาเจลต่อข้าวเปลือกเป็น 0.8:1.0 สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นจาก 41% มาตรฐานแห้ง ลดลงเหลือเพียง 17% มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิแวดล้อมขณะอบแห้งและเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 5 23 และ 45°C และ 40 18 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

นอกจากนี้โครงการวิจัยของ Soponronnarit (2005) ระหว่างหน่วยงาน JIRCAS ประเทศญี่ปุ่นกับหลายสถาบันวิชาการในประเทศไทย ได้สรุปไว้ในรายงานถึงแนวทางการใช้เทคโนโลยีการอบแห้งที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสำหรับข้าวเปลือกชื้น โดยบางส่วนของงานวิจัยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบและเม็ดแป้งสาคู มาลดความชื้นข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 22% มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่า เทคนิคการอบแห้งนี้สามารถใช้งานได้และมีความสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำ และมีการออกแบบเครื่องต้นแบบในการแยกสารดูดซับจากข้าวเปลือกไว้ในโครงการ คุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกหลังการลดความชื้นในงานวิจัยนี้ คือ ค่าความขาวและร้อยละข้าวเต็มเมล็ด สรุปได้ว่า เทคนิคการลดความชื้นข้าวเปลือกสดด้วยแกลบและเม็ดแป้งสาคูไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว และคุณภาพทางกายภาพทั้งสองค่ามีค่ายัง

อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางการค้า Tirawanichakul (2003) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกชื้นภายใต้สภาวะอากาศเขตร้อนชื้นในภาคสนาม ด้วยการเป่าอากาศแวดล้อมและใช้สารดูดซับความชื้น คือ ซิลิกาเจล กับข้าวเปลือกปริมาณ 100-250 กก./งวดการทดลอง โดยทำงานวิจัยนี้ภายใต้โครงการวิจัยชุดเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 20-25% มาตรฐานแห้ง สรุปได้ว่า ความชื้นข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมและแบบใช้สารดูดซับซิลิกาเจลอยู่ในช่วง 16.0±1.5% และ 17.0±2.3% มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า ความชื้นสุดท้ายภายหลังการอบแห้งทั้งสองแบบมีการกระจายความชื้นสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน แต่กลุ่มข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล มีแนวโน้มจะมีความเหลืองกว่าข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม และ Inoue และคณะ (2005) ได้รายงานการทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกสดด้วยการผสมกับเม็ดสาคูโดยข้าวเปลือกสดและเม็ดสาคูถูกคลุกเคล้าผสมกันอย่างดีบรรจุอยู่ในกระสอบขนาด 500 กก. ในอัตราส่วน 1:1 ถึงอัตราส่วน 1:1.5 โดยปริมาตร ผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ถึง 5-8% มาตรฐานแห้ง ซึ่งข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นนี้ มีค่าความเหลืองของข้าวที่ระดับความลึกต่างๆ ของชั้นข้าวเปลือก ไม่แตกต่างกันในแต่ละระดับชั้นและข้าวอ้างอิง การทดลองลดความชื้นข้าวเปลือกใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ภายใต้อุณหภูมิในกองข้าวเปลือกยังคงค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับอากาศแวดล้อมในช่วงฤดูหนาวที่ทำการทดลอง (ต่างกันประมาณ 15-20°C) และ Inoue และคณะ (2005) รายงานการวิจัยการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้สารดูดซับความชื้นที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ แกลบ ที่อัตราส่วนระหว่างข้าวเปลือกกับแกลบ 1.0:1.5 และ 1.0:2.0 โดยปริมาตร โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 29.0% และ 49.3% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ และความชื้นเริ่มต้นของแกลบเท่ากับ 11.1% มาตรฐานแห้ง เมื่อทำการทดลองลดความชื้นด้วยแกลบได้ 4 ชั่วโมง จะทำการเปลี่ยนแกลบที่ความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 12.0% มาตรฐานแห้ง) ลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้น ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงแปรตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยความชื้นของข้าวเปลือก

จะลดลงได้มากกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวเปลือกกับแกลบสูงขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีการทดสอบใช้สารดูดซับอีกหนึ่งชนิด ได้แก่ เม็ดสาคุ โดยใช้อัตราส่วนของข้าวเปลือก (ที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 28% มาตรฐานแห้ง) ต่อเม็ดแป้งสาคุ (ความชื้นเริ่มต้น 11% มาตรฐานแห้ง) เท่ากับ 2,200 กก. และ 200 กก. ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า เม็ดแป้งสาคุสามารถลดความชื้นได้เช่นเดียวกับแกลบแต่มีข้อเสียที่ว่าเม็ดสาคุแตกหักเป็นส่วนๆ ได้ง่ายมาก ไม่เหมาะกับการนำมาลดความชื้นและนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับลดความชื้นข้าวเปลือกเพราะยุ่งยากในการจัดการ

กิตติศักดิ์ และคณะ (2547) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบเป็นตัวกลางดูดซับความชื้น โดยทดลองในภาชนะปิดสนิทและหุ้มฉนวน ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเท่ากับ 33% มาตรฐานแห้ง อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบต่อข้าวเปลือกเป็น 0.8:1.0, 1.5:1.0 และ 2.0:1.0 โดยปริมาตร (0.14:1.0, 0.26:1.0 และ 0.34:1.0 โดยมวล) อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบ 33, 45, 60 และ 90°C สรุปได้ว่า ที่ความชื้นเริ่มต้นของแกลบต่ำจะสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วกว่าที่ความชื้นเริ่มต้นของแกลบสูง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของแกลบต่อข้าวเปลือกให้สูงขึ้นจาก 0.8:1.0 เป็น 1.5:1.0 โดยปริมาตร จะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนที่มากเกินไป จาก 1.5:1.0 เป็น 2.0:1.0 โดยปริมาตร จะไม่สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากนักเมื่อเทียบกับการเพิ่มอัตราส่วนจาก 0.8:1.0 เป็น 1.5:1.0 โดยปริมาตร นอกจากนี้เมื่อนำข้าวเปลือกมาทำการทดสอบคุณภาพของข้าว พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบและอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละข้าวเต็มเมล็ดและความขาวของข้าว และภาวิกา (2547) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบและข้าวเปลือกผลของความหนาแน่นของแกลบที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33% มาตรฐานแห้ง แกลบแห้งที่อุณหภูมิบรรยากาศความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10% มาตรฐานแห้ง โดยเลือกใช้แกลบที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 105, 160 และ 230 กก./ลบ.ม. อัตราส่วนผสมของแกลบและข้าวเปลือกเท่ากับ 1.0:1.0, 1.5:1.0 และ 2.0:1.0 โดยปริมาตร ผลการทดลองพบว่า

การเพิ่มความหนาแน่นของแกลบและอัตราส่วนผสมของแกลบต่อข้าวเปลือกที่สูงขึ้นจะสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการใช้อัตราส่วนผสมและความหนาแน่นต่ำ แต่ที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบและข้าวเปลือกสูงกว่า 1.5:1.0 โดยปริมาตร พบว่า อัตราการอบแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อทำการเปลี่ยนแกลบชุดใหม่เข้าไปแทนที่ โดยทดลองเปลี่ยนแกลบ 6 รอบๆ ละ 2 ชั่วโมง รวมเวลา 12 ชั่วโมง สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 32.5% มาตรฐานแห้ง เป็น 25.2, 23.8 และ 22.8% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ ผลการทดสอบคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งในรูปของร้อยละข้าวเต็มเมล็ด พบว่า ข้าวเต็มเมล็ดหลังการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันกับตัวอย่างข้าวอ้างอิง นอกจากนั้นยังได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมมูลความร้อนมาใช้อธิบายผลการทดลอง และพบว่าสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกขณะทำการอบแห้งได้ดี

ประเทศไทยมีวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้และมีราคาถูกจำนวนมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ สามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นออกจากเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงได้เป็นอย่างดี เช่น ทางใบสาคุ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพดแห้ง และกามมะพร้าว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ทำการศึกษาวัดผลเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทยมีเพียงเล็กน้อย ไม่ว่าจะเป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ หรือการนำไปใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. หาพารามิเตอร์พื้นฐานของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับการอบแห้ง ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ ความชื้นสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุ และกามมะพร้าว
2. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างข้าวเปลือกกับสารดูดซับแต่ละชนิดโดยมุ่งประเด็นเพื่อหาแนวทางความเป็นไปได้ในการพัฒนา การลดความชื้นข้าวเปลือกสดด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
3. ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยสารดูดซับของ Inoue และคณะ (2002) พัฒนาแบบจำลองดังกล่าวเพื่อใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้สารดูดซับหลายชนิด

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

1.1 ข้าวเปลือกสด

ใช้ข้าวเปลือกสดพันธุ์เสี้ยนกปัตตานีจากศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง จังหวัดพัทลุง นำมาหาความชื้นตามมาตรฐานของ AOAC (1995) และเตรียมความชื้นให้อยู่ในช่วง 18-33% มาตรฐานแห้ง เพื่อให้ได้ความชื้นที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ จะนำข้าวเปลือกไปทำความสะอาดแยกสิ่งเจือปนและนำไปใส่ไว้ในภาชนะปิด และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4-5°C เป็นระยะเวลา 5-7 วัน โดยต้องมีการคลุกเคล้าข้าวเปลือกในกระบะ (ซึ่งใช้เป็นภาชนะปิด เวล่านำข้าวเปลือกไปเก็บในห้องเย็นก่อนการทดลอง) ให้ผสมกันดีทุกวันจนครบระยะเวลาที่กำหนด และก่อนนำมาทดลองทุกครั้ง จะนำข้าวเปลือกออกจากกระบะและวางไว้ให้สมดุลกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม จึงนำไปใช้ทดลองต่อไป

1.2 วัสดุดูดซับ : แกลบ ทางใบสาकु และกาบมะพร้าว

แกลบได้มาจากการกะเทาะข้าวเปลือกผสมหลายสายพันธุ์ของศูนย์เมล็ดพันธุ์พืชพัทลุง และจากพื้นที่การเกษตรในบริเวณจังหวัดพัทลุง โดยนำแกลบมาอุ่นด้วยตะแกรงร้อนทำความสะอาดเอาสิ่งเจือปนออก วัดความยาว ความกว้าง และความหนาของแกลบด้วยเวอร์เนียร์แคลิเปอร์ที่มีความถูกต้อง ± 0.05 มม. ในทำนองเดียวกันได้เลือกใช้วัสดุที่นำมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ได้แก่ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าว โดยนำทางใบสาकुและกาบมะพร้าวมาตัดเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาดมิติด้านละประมาณ 4.2-4.7 มม. มิติต่าง ๆ ของวัสดุดูดซับจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์การแพร่ในหัวข้อต่อไป จากนั้นจะเตรียมความชื้นเริ่มต้นของวัสดุดูดซับให้อยู่ในช่วง 5-11% มาตรฐานแห้ง โดยจะนำไปเติมน้ำหากความชื้นต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือตากผึ่งลมหรือตากแดดกรณีความชื้นของวัสดุสูงกว่าค่าที่กำหนด เสร็จแล้วจะใส่ไว้ในภาชนะปิดและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4-5°C เป็นระยะเวลา 5-7 วัน เพื่อให้ความชื้นของวัสดุกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีการสุ่มเพื่อหาความชื้นตามมาตรฐานของ AOAC (1995) และก่อนนำมาทดลอง จะนำวัสดุดูดซับมาวางไว้ให้เข้าสู่สมดุลกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (ในภาชนะปิด) ก่อนนำไปใช้ทดลองต่อไป

2. อุปกรณ์

อุปกรณ์อบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง (สุภวรรณ และยุทธนา, 2537) มีรายละเอียดแสดงใน Figure 1 ประกอบด้วยหน่วยสำคัญๆ ได้แก่ หน่วยถ่วงอบแห้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 ม. สูง 0.4 ม. หน่วยทำความร้อน ประกอบด้วยขดลวดทำความร้อนไฟฟ้าขนาด 1,200 วัตต์ จำนวน 3 ชุด และพัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาด 1 แรงม้า การวัดอุณหภูมิของเมล็ดพืชหรือวัสดุดูดซับ อากาศแวดล้อม กระเปาะแห้ง-กระเปาะเปียก และอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง จะใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัววัดอุณหภูมิ และต่อสายเทอร์โมคัปเปิลกับเครื่องบันทึกสัญญาณเวลาชื่อ Wisco (ความละเอียด $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$) เป็นตัวเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 นาที ขณะที่อัตราเร็วของลม จะใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบแอนนิโมมิเตอร์ ชื่อ OMEGA รุ่น HHF 300 ซึ่งมีค่าความละเอียด ± 0.1 ม./วินาที

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของสารดูดซับ

การหาความชื้นของวัสดุและข้าวเปลือกจะใช้วิธีการตามมาตรฐานของ AOAC (1995) และโดยปกติวัสดุดูดซับความชื้นแกลบ ทางใบสาकुและกาบมะพร้าวจะมีความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 14-17% มาตรฐานแห้ง เพื่อให้สามารถดูดความชื้นจากข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพ วัสดุดูดซับจะถูกนำมาลดความชื้นจนมีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5-11% มาตรฐานแห้ง

3.2 การหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density, ρ)

นำตัวอย่างสารดูดซับที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน ใส่ภาชนะกระบอกตวงขนาด 250 มล. จนเต็มปริมาตร และชั่งน้ำหนักเครื่องชั่งน้ำหนัก ชื่อ A&D รุ่น 3000 มีค่าความละเอียด ± 0.01 กรัม คำนวณหาความหนาแน่นปรากฏ ทำเช่นเดิมแต่เปลี่ยนไปใช้ตัวอย่างวัสดุดูดซับที่มีความชื้นเริ่มต้นอื่นๆ ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.1 และทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นในหน่วย กก./ลบ.เมตร ผลการทดลองจะสามารถนำมาใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นปรากฏกับค่าความชื้นของวัสดุดูดซับในรูปแบบการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสมการที่ความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายผลการทดลองได้

ใกล้เคียงที่สุด จะพิจารณาจากสมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สูงสุด และมีค่าความผิดพลาดรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ที่มีค่าน้อยที่สุด เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา

3.3 การหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, M)

นำตัวอย่างวัสดุดูดซับซึ่งมีความชื้นต่างๆ กัน ทำการหาความชื้นสมดุลโดยชั่งตัวอย่างประมาณ 15-20 กรัม ใส่ลงในตะแกรงรูปทรงกระบอกและชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปแขวนไว้ในขวดโหลแก้วที่บรรจุสารละลายเกลืออิมัลชันคลอไรด์ (LiCl), โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), โพตัสเซียมไนเตรท (KNO_3), แมกนีเซียมไนเตรท ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) และแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ทำอย่างละ 2 ขวด ตัวอย่าง ปิดฝาขวดให้แน่นสนิทและนำไปใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยตั้งช่วงอุณหภูมิที่ 30, 40 และ 50°C วางไว้ในตู้จนระบบ (ขวดแก้ว) เข้าสู่สมดุล จึงนำตัวอย่างมาหาค่าความชื้นสมดุล ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุทั้งกรณีดูดและคายความชื้น ผลจากการทดลองจะนำมาหาสมการความชื้นสมดุลโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ (และแสดงผลการทดลองเฉพาะสมการที่ให้ผลของค่า R^2 มากกว่า 0.9) และผลต่างของค่าความชื้นสมดุลทั้งสองค่า นั้น จะนำไปใช้ในพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแนวคิดของ Inoue และคณะ (2002) สำหรับสมการความชื้นสมดุลที่เหมาะสมในการทดลองนี้มี 4 สมการ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (Shivhare และคณะ 2004; สมชาติ, 2540; สุภวรรณ และยุทธนา, 2537)

Henderson (1952)

$$1 - RH = \exp(-ATM_{eq}^B) \quad (1)$$

Chung & Pfof (1967)

$$\ln(RH) = \left(\frac{-A}{RT}\right) \exp(-BM_{eq}) \quad (2)$$

Halsey (1948)

$$RH = \exp\left[\left(\frac{-A}{RT}\right) M_{eq}^B\right] \quad (3)$$

Modified Brunauer et al. (1938) [BET]

$$\frac{RH}{(1-RH)M_{eq}} = \frac{1}{AB} + \frac{RH(B-1)}{AB} \quad (4)$$

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลของสารดูดซับ

สำหรับกรณีศึกษาสมการอบแห้งชั้นบางนี้ก็เพื่อประโยชน์ในการทำนายการอบแห้งวัสดุดูดซับหลังจากนำใช้ลดความชื้นข้าวเปลือกแล้วนำวัสดุดูดซับความชื้นเหล่านั้นกลับมาใช้งานอีก (regeneration) จึงเตรียมความชื้นของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดในช่วง 14-17% มาตรฐานแห้ง การทดลองนี้ใช้เครื่องอบแห้งชั้นบางดัง Figure 1 โดยกำหนดค่าความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1.6 ม./วินาที และใช้ช่วงอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30 ถึง 70°C ขณะทำการทดลองจะบันทึกน้ำหนักตลอดเวลาและหยุดการทดลองเมื่อน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ไม่เกิน 0.05 กรัม) ซึ่งผลการทดลองจะนำมาสร้างรูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลในรูปแบบการของ Henderson และ Pabis (1956); Newton (Mujumdar, 1987); Page (1949); Modified Page และ Wang และ Singh (1978) ดังสมการที่ (5)-(9) Henderson และ Pabis (1956)

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} = a \exp(-kt) \quad (5)$$

Newton (Mujumdar, 1987)

$$MR = \exp(-kt) \quad (6)$$

Page (1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (7)$$

Modified Page

$$MR = \exp[(-kt)^n] \quad (8)$$

Wang และ Singh (1978)

$$1 + at + bt^2 \quad (9)$$

โดยที่

MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)

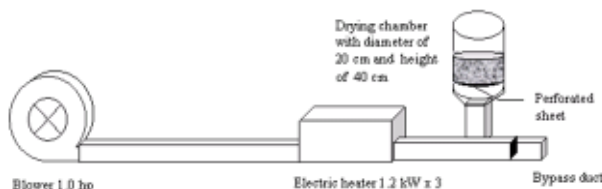


Figure 1. Thin layer drying experimental set-up

M_t, M_{eq}, M_0 คือ ค่าความชื้นที่เวลา t ใดๆ,
ความชื้นสมดุล และความชื้นเริ่มต้น
(เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วินาที)

a, n คือ ค่าคงตัว

k คือ ค่าคงตัวของสมการการอบแห้ง ซึ่ง
สามารถเขียนเป็นสมการอาร์เรเนียสของ
ฟังก์ชันอุณหภูมิ ดังนี้

$$k = c[\exp(-d/T)] \quad (10)$$

เมื่อ c, d คือ ค่าคงตัว

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

3.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) ของวัสดุดูดซับความชื้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ได้จาก
การทดลองอบแห้งชั้นบางของวัสดุดูดซับทั้งสามเช่นเดียวกัน
กับกรณีการหาสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลด้วย
เครื่องอบแห้งชั้นบางที่ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1.6 ม./วินาที
อุณหภูมิของอากาศอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 30-70°C บันทึก
น้ำหนักในระหว่างการทดลองทุกๆ 5 นาทีในช่วง 60 นาที
แรก และหยุดการทดลองเมื่อน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อย
มาก (ไม่เกิน 0.05 กรัม) โดยปกติ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (Crank, 1975;
สมชาติ, 2540) และพบอีกว่าค่าขึ้นกับความสัมพันธ์
ของอากาศแวดล้อม ซึ่งจากการทดลองอบแห้งชั้นบางในช่วง
อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับการถ่ายเท
มวล จะสามารถพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
เป็นไปตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's second law
of diffusion) ตามสมการที่ (11)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \nabla^2 M \quad (11)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

ที่เวลา $t = 0$

$$M = M_0 \quad \text{สำหรับ } -1 < z < 1$$

ที่เวลา t ใดๆ

$$\frac{\partial M}{\partial z} = 0 \quad \text{ที่ } z = 0 \quad (12)$$

ที่เวลา $t > 0$

$$-\frac{\partial M}{\partial z} = \frac{k_c}{KD} (M_t - M_{eq}) \quad \text{ที่ } z = \pm 1 \quad (13)$$

เมื่อ

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ
(% มาตรฐานแห้ง)

M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลา t ใดๆ
(% มาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ
(% มาตรฐานแห้ง)

K, k_c คือ ค่า equilibrium distribution constant
และค่าสัมประสิทธิ์การพามวล
(เมตร²/วินาที)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุ
(เมตร²/วินาที)

ผลเฉลยของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสำหรับวัสดุที่มี
รูปทรงเป็นแผ่นแบนราบ แสดงได้ดังนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cos\left[\beta_n\left(\frac{z}{1}\right)\right]}{(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha) \cos\beta_n} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{1^2}\right) \quad (14)$$

เมื่อ

α คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล
(กก./ตร.ม.-วินาที)

β_n คือ ค่าของรากของสมการ (11) ซึ่งเขียนเป็น
สมการได้ว่า (Crank, 1975)

1 คือ มิติของวัสดุดูดซับ (ม.) ได้จากการวัด

$$\beta_n \tan \beta_n = \alpha = \frac{k_c 1}{KD} \quad (15)$$

โดยการอินทิเกรตสมการ (14) จากที่ระยะ z จาก 0
ถึง 1 จะได้ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสำหรับวัสดุ
ดูดซับความชื้นได้ดังนี้ (Crank, 1975)

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \int_0^1 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha \cos\left[\beta_n\left(\frac{z}{1}\right)\right]}{(\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha) \cos\beta_n} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{1^2}\right) \right] dz \quad (16)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha \tan \beta_n}{\beta_n (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (17)$$

จากนิยามในสมการที่ (15) แทนลงในสมการที่ (16) จะได้สมการที่ (17) และเพื่อให้ง่ายจะจัดรูปและเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (18)$$

สำหรับทรงลูกบาศก์สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน สมการ (18) จะกลายเป็น

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2\alpha^2}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} \right]^3 \exp\left(-\frac{3\beta_n^2 Dt}{l^2}\right) \quad (19)$$

ซึ่งสมการรอบข้างข้างบนนี้ จำเป็นต้องใช้ค่าความชื้นสมดุลที่หามาได้จากผลการทดลองในหัวข้อ (3.3) และเมื่อนำผลการทดลองหาค่าความชื้นที่เวลาใดๆ ค่าความชื้นสมดุลพารามิเตอร์ต่างๆ และเวลามาแทนในสมการที่ (17) และสมการที่ (19) จะหาค่าความชื้นที่เวลาใดๆ สำหรับวัสดุรูปทรงแบนราบและทรงลูกบาศก์ได้ ตามลำดับ

3.6 การทดลองหาอัตราส่วนเหมาะสมสำหรับอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการดูดซับความชื้น

การทดลองตอนนี้เพื่อหาความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และอัตราส่วนของปริมาณสารดูดซับกับข้าวเปลือกที่มีแนวโน้มจะพัฒนาไปใช้งานจริง ทำการทดลองด้วยการคลุกเคล้าข้าวเปลือกสดกับสารดูดซับความชื้นแต่ละชนิดโดยค่อยๆ เทผสมรวมกันและคลุกเคล้าไปด้วยกันอย่างช้าๆ ลงในภาชนะขวดโหลแก้วจนเต็มขวด เพื่อให้เกิดการกระจายของวัสดุทั้งสองอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงปิดผนึกฝาเพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนมวลกับอากาศแวดล้อมภายนอกด้วยยางวงแหวน (rubber o-ring) และหุ้มด้วยฉนวนความร้อน อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและสารดูดซับเลือกใช้เป็น 1.0:0.5, 1.0:1.0, 1.0:1.5, 1.0:2.0

และ 1.0:2.5 โดยปริมาตร[@] ที่เลือกใช้ในช่วงอัตราส่วนนี้ เพราะงานวิจัยที่ผ่านมา (Inoue และคณะ, 2002) แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนผสมช่วงที่ดำเนินการในการทดลองนี้ มีความเหมาะสมกว่าอัตราส่วนผสมในช่วงอื่นสำหรับแลกเปลี่ยนอย่างใดก็ได้ในส่วนของทางใบสาคุและกามมะพร้าวยังไม่มีการดำเนินการทดลอง ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 20-25% มาตรฐานแห้ง วัสดุดูดซับมีความชื้นเริ่มต้นในช่วง 5-11% มาตรฐานแห้ง ทำการทดลองที่สภาวะอากาศแวดล้อมเก็บข้อมูลเมื่อครบกำหนดเวลา 5, 10, 30, 120, 300 และ 600 นาที นำของผสมมาคัดแยกออกจากกัน แล้วนำไปหาค่าความชื้น ค่าความชื้นที่ได้นี้ถือเป็นความชื้นที่เวลาต่างๆ ระหว่างการทดลอง ทำการบันทึกอุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง และอุณหภูมิภายในภาชนะทดลอง

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยสารดูดซับความชื้น

แบบจำลองการอบแห้งโดยสารดูดซับความชื้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Inoue และคณะ (2002) เพื่อใช้ทำนายจลนศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือก โดยทำการทดลองในภาชนะที่ปิดสนิทหุ้มฉนวน โดยมีสมมติฐานว่า

- 1) ระบบอบแห้งไม่มีการแลกเปลี่ยนความชื้นและความร้อนกับสิ่งแวดล้อมตลอดระยะเวลาของการทดลอง
- 2) ถ้าพิจารณาให้ช่องว่างระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้การพิจารณาสมการการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นคิดเพียงแค่วัสดุดูดซับกับข้าวเปลือกเท่านั้น (อย่างไรก็ดี กรณีของวัสดุดูดซับที่มีรูปทรงเป็นลูกบาศก์ขนาดใหญ่ อาจไม่เป็นเช่นนั้นจริง เป็นเพียงสมมติฐานเบื้องต้น ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองดูรายละเอียดได้จากหัวข้อต่อไป) ดังนั้นในงานวิจัยนี้พิจารณากรณีที่ว่าปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างอากาศ (void) มีค่าน้อยมากและการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างวัสดุดูดซับกับข้าวเปลือก โดย

@ หมายถึง อัตราส่วนโดยปริมาตร คิดเป็นอัตราส่วนโดยมวล ดังนี้

อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและกลบเท่ากับ 1:0.07, 1:0.15, 1:0.22, 1:0.29 และ 1:0.37 โดยมวล

อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและทางใบสาคุเท่ากับ 1:0.03, 1:0.06, 1:0.09, 1:0.12 และ 1:0.15 โดยมวล

อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและกามมะพร้าวเท่ากับ 1:0.05, 1:0.09, 1:0.14, 1:0.19 และ 1:0.23 โดยมวล

เฉพาะอย่างยิ่งถ้าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุสดมีความชื้นค่าต่ำ

3) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุสด ความชื้นและข้าวเปลือกมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

4) การเคลื่อนที่ของน้ำในเมล็ดข้าวมายังเปลือก และวัสดุสดความชื้นอยู่ในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น และเมื่อน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวของวัสดุแล้วจึงระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งอัตราการระเหยน้ำจะถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ของความชื้น จึงอนุมานว่าอัตราการระเหยของน้ำในรูปการส่งผ่านมวลแบบ การพา แปรผันโดยตรงกับการส่งผ่านมวลโดยการนำที่เกิด ขึ้นในเนื้อวัสดุ

5) การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก และวัสดุสดความชื้น อาศัยหลักความแตกต่างของความ คัดไอ และความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวของข้าวเปลือกและ วัสดุสดความชื้น จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ จุดนี้ จะไม่มีการถ่ายเทความชื้นระหว่างผิวของข้าวเปลือก และวัสดุสดความชื้นอีกต่อไป

6) วัสดุสดความชื้นมีความเป็นรูปพรุนสูง ดังนั้นความชื้นที่เคลื่อนที่ออกจากข้าวเปลือกจะสามารถถูก ดูดซับได้ด้วยวัสดุสดความชื้นทั้งหมด สามารถเขียน สมการความชื้นสมดุลรวมของระบบได้ดังนี้

ปริมาณน้ำทั้งหมดในสภาวะสมดุล =

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ข้าวเปลือก + ปริมาณน้ำที่มีอยู่ใน เนื้อวัสดุสด

$$M_{eq,total} = \frac{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) M_{d,P} + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right) M_{d,A}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)}$$

(20)

เมื่อ

$M_{eq, total}$ คือ ค่าความชื้นทั้งหมดขณะเข้าสู่สภาวะสมดุล ระหว่างข้าวเปลือกกับวัสดุสดความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

$$W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) M_{d,P}, W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)$$

คือ มวลแห้งของข้าวเปลือกและสารดูดซับ ความชื้น, ตามลำดับ (กก.)

W_P, W_A คือ มวลเปียกของข้าวเปลือกและวัสดุสด ตามลำดับ (กก.)

$M_{w,P}, M_{w,A}$ คือ ค่าความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับ ตามลำดับ (% มาตรฐานฐานเปียก)

$M_{d,P}, M_{d,A}$ คือ ค่าความชื้นของข้าวเปลือกและสารดูดซับ ตามลำดับ (% มาตรฐานฐานแห้ง)

สมการคำนวณหาความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุลของข้าว เปลือกและวัสดุสดความชื้นในระบบปิด ก็จะสามารถ คำนวณได้จากสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ

$$M_{eq,P} = M_{eq,total} - \frac{W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right) \Delta M_{eq,A}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)}$$

(21)

$$M_{eq,A} = M_{eq,total} - \frac{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) \Delta M_{eq,P}}{W_P \left(1 - \frac{M_{w,P}}{100}\right) + W_A \left(1 - \frac{M_{w,A}}{100}\right)}$$

(22)

เมื่อ $\Delta M_{eq,A}, \Delta M_{eq,P}$ คือ ฮีสเทอรีซิสของสารดูดซับและ ข้าวเปลือก ตามลำดับ (% มาตรฐานแห้ง)

ค่าฮีสเทอรีซิสนี้ เกิดขึ้นจากผลต่างของค่าความชื้น สมดุลขณะที่มีการคายและการดูดความชื้นของวัสดุที่อยู่ใน สมดุลไอโซเทอม ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุอาหารและเมล็ดพืชหลาย ๆ ชนิดที่มีรายงานไว้ (สมชาติ, 2540) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำ การทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของแกลบ ทางใบสาคุ และ กาบมะพร้าว ทั้งกรณีคายและดูดความชื้น และนำมาใช้ใน สมการที่ (17) [การทดลองหัวข้อ (3.3)] ขณะที่ค่าฮีสเทอรี- ซิสของข้าวเปลือก ได้นำงานของสมชาติ (2540) ที่ศึกษา ข้าวเปลือกเมล็ดยวสายพันธุ์ กข 23 มาใช้ในการวิเคราะห์ ในสมการที่ (22)

จากสมการที่ (21) และ (22) เป็นสมการที่นำไปใช้ ในการคำนวณหาความชื้นสมดุลระหว่างข้าวเปลือกและ วัสดุสดความชื้นในระบบอบแห้งที่เวลาใด ๆ จะนำค่า ดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณความชื้นสุดท้ายที่เปลี่ยนแปลง ของข้าวเปลือกและวัสดุสดความชื้นตลอดระยะเวลาการ

อบแห้งได้ ตามลำดับดังนี้

ค่าความชื้นที่เวลาต่างๆ ของข้าวเปลือก

$$M_p(t) = (M_{0,p} - M_{eq,p}) \sum_{i=1}^n MR + M_{eq,p} \quad (23)$$

ความชื้นที่เวลาต่างๆ ของวัสดุดูดซับความชื้น

$$M_A(t) = (M_{0,A} - M_{eq,A}) \sum_{i=1}^n MR + M_{eq,A} \quad (24)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ความหนาแน่นปรากฏ

จากผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นปรากฏ พบว่าความหนาแน่นปรากฏของแกลบ ทางใบสาคุและกามมะพร้าว มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้นเริ่มต้นสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ดังนี้

ที่ความชื้นอยู่ในช่วง 5 ถึง 20% มาตรฐานแห้ง

แกลบ $\rho = 1.226M + 80.805 \quad (25) \quad R^2 = 0.985$

ทางใบสาคุ $\rho = 0.275M + 34.342 \quad (26) \quad R^2 = 0.959$

กามมะพร้าว $\rho = 0.094M + 57.161 \quad (27) \quad R^2 = 0.948$

เมื่อ M คือ ค่าความชื้นของวัสดุ (% มาตรฐานแห้ง)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ช่วงความชื้นระหว่าง 5-20% มาตรฐานแห้ง ค่าความหนาแน่นปรากฏของแกลบ ทางใบสาคุและกามมะพร้าว มีค่าอยู่ในช่วง 86.9-105.7, 35.7-39.8 และ 57.6-59.0 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ สรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของแกลบมีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ กามมะพร้าวและทางใบสาคุ ตามลำดับ

2. ค่าความชื้นสมดุล

จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลแบบคายและดูดความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและกามมะพร้าวที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 12-85% พบว่า ค่าความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้น และที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเดียวกัน ค่าความชื้นสมดุลจะมีลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้น ซึ่งก็เป็นไปตามสภาพความเป็นจริงคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุดูดซับย่อมมีความชื้นที่เข้าสู่สมดุลที่ค่าความชื้น

สมดุลต่ำกว่ากรณีที่ว่าวัสดุดูดซับไว้ในอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952); Chung และ Pfoist (1967); Halsey (1948); สมการดัดแปลงของ Brunauer และคณะ (1938) [BET] ดังสมการที่ (1)-(4) ตามลำดับพบว่า สมการของ Henderson (1952) จะให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่า R² และค่า RMSE ใน Table 1 จากผลการทดลองจะเห็นว่ากรณีของกามมะพร้าวนั้นค่าความผิดพลาดยังมีค่าสูง ซึ่งน่าจะมีการศึกษาในงานต่อไป

ค่าคงที่ A และ B จาก Table 1 นี้เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (1) ที่อุณหภูมิของลมร้อนต่างๆ (อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง) จะหาค่าความชื้นสมดุลได้ แล้วจึงนำค่าความชื้นสมดุลนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสมการที่ (5) และ (18)-(19) ตามลำดับ ต่อไปดังแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ (3.4) และ (3.5)

3. สมการการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางของแกลบ ทางใบสาคุและกามมะพร้าว เลือกใช้ความชื้นเริ่มต้น 15 20 และ 27% มาตรฐานแห้ง (ที่เลือกค่าความชื้นเหล่านี้เนื่องจากจะเป็นช่วงความชื้นช่วงเดียวกับที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุดูดซับภายหลังจากนำไปใช้ในดูดความชื้นข้าวเปลือกเรียบร้อยแล้ว และต้องการนำมาไล่ความชื้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่) และเลือกอุณหภูมิคือ

Table 1. Example data of equilibrium moisture content coefficients of Henderson model for coconut husk, rice husk sago and palm rachis in temperature range of 30-50°C

| Adsorbents | Arbitrary constants of Henderson model | | R ² | RMSE |
|------------------|--|-------|----------------|------|
| | A | B | | |
| Coconut husk | 1.608x10 ⁻⁶ | 2.374 | 0.77 | 2.34 |
| Rice husk | 2.750x10 ⁻⁴ | 1.130 | 0.99 | 0.86 |
| Sago palm rachis | 1.289x10 ⁻⁵ | 2.257 | 0.99 | 0.39 |

อากาศแวดล้อมปกติเฉลี่ยเท่ากับ 30°C และอุณหภูมิลมร้อน 2 ค่า คือ 50 และ 70°C โดยกำหนดความเร็วลมเท่ากับ 1.6 เมตร/วินาที ตัวอย่างของผลการทดลองและผลการคำนวณของทางใบสาคุแสดงดัง Figure 2 ผลการทดลองสรุปว่า ค่าความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิอบแห้งสูง ค่าคงที่ของการอบแห้งมีค่าสูงกว่ากรณีที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า และพบว่าสมการในรูปแบบจำลองของ Page (1949) อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยที่ค่าคงตัวของสมการอบแห้งของวัสดุสดชื้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนี้

แกลบ

$$k = 142.1 \exp\left(-\frac{2121.8}{T}\right) \quad (28) \quad R^2 = 0.995$$

$$n = 0.5912 \exp(0.0096T) \quad (29) \quad R^2 = 0.977$$

ทางใบสาคุ

$$k = 180843.2 \exp\left(-\frac{4375.6}{T}\right) \quad (30) \quad R^2 = 0.997$$

$$n = 0.3178 \exp(0.199T) \quad (31) \quad R^2 = 0.784$$

กามมะพร้าว

$$k = 370920.6 \exp\left(-\frac{4654.6}{T}\right) \quad (32) \quad R^2 = 0.946$$

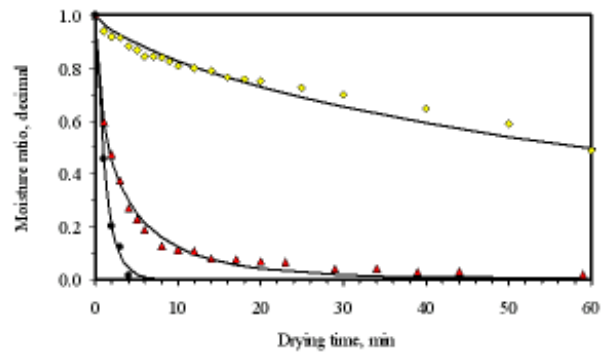
$$n = 0.3260 \exp(0.0146T) \quad (33) \quad R^2 = 0.982$$

4. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางของวัสดุสดชื้นตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.5 เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จากสมการที่ (18)-(19) แสดงดัง Figure 3 สรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด จะแปรกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และเขียนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิแสดงดังสมการข้างล่าง โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแกลบมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกามมะพร้าวและทางใบสาคุ ตามลำดับ

$$D = 0.814660 \exp(0.009689T) \quad (34) \quad R^2 = 0.997$$

กามมะพร้าว



Sago palm rachis with initial moisture content of 14.9% (d.b.) [\diamond , drying temperature of 30°C; \blacktriangle , drying temperature of 50°C; \bullet , drying temperature of 70°C; —, simulation]

Figure 2. Comparison between experimental data and simulated data from modified Henderson and Pabis empirical model of sago palm rachis at various drying times, drying temperatures of 30-70°C and constant air flow rate of 1.6 m/s

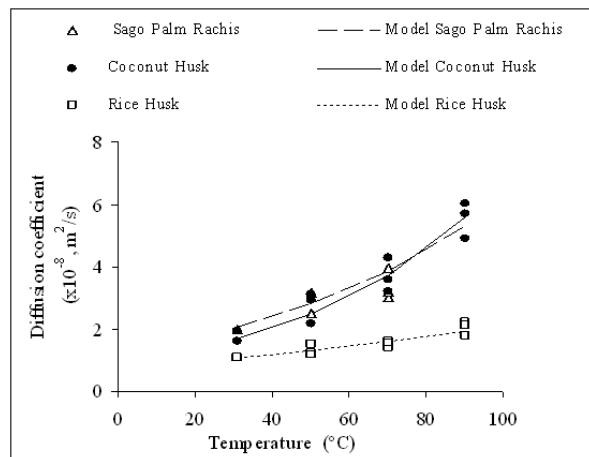


Figure 3. Relationship between diffusion coefficient and drying temperature of rice husk, coconut husk and sago palm rachis.

$$D = 0.914213 \exp(0.020123T) \quad (35) \quad R^2 = 0.997$$

ทางใบสาคุ

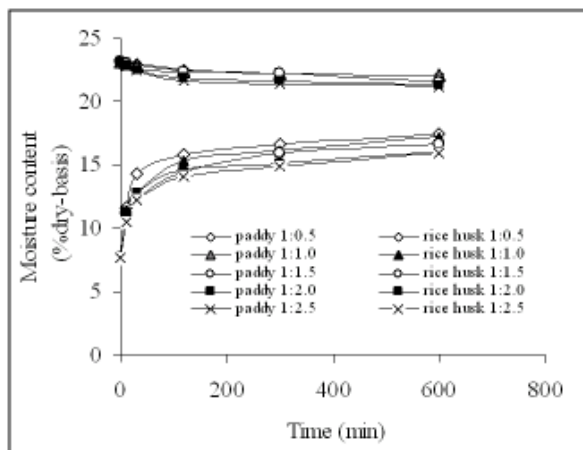
$$D = 1.260106 \exp(0.015983T) \quad (36) \quad R^2 = 0.998$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร²/ชม.)
T คือ อุณหภูมิ (°C)

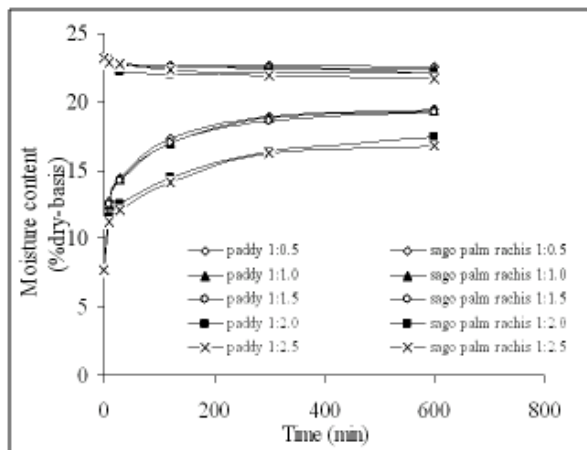
5. ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการดูดซับความชื้น

จากการทดลองแสดงผลการทดลองได้ดัง Figure 4 สำหรับวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งในการทดลองนั้นได้เลือกใช้วัสดุดูดซับความชื้นที่มีช่วงกว้างมากตั้งแต่ 5-11% มาตรฐาน

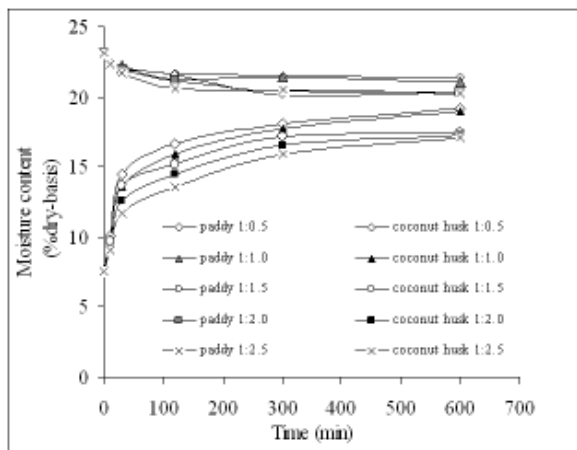
แห้ง เนื่องจากตามสภาพอากาศแวดล้อมในประเทศไทย วัสดุดูดซับเหล่านี้มีความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 9-11% มาตรฐานแห้ง อย่างไรก็ตามในพื้นที่ภาคกลางนั้น แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวมักจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศแวดล้อมปกติเล็กน้อย ทำให้ค่าความชื้นของแกลบต่ำกว่า 9% มาตรฐานแห้งได้ อีกทั้งในงานของ Inoue และคณะ (2005) รายงานถึงการนำแกลบที่มีความชื้นต่ำกว่า 9% มาตรฐานแห้งมาใช้ลดความชื้นข้าวเปลือก และได้ผลดีกว่ากรณีที่ใช้วัสดุดูดซับที่มีความชื้นเริ่มต้น



(a) paddy and rice husk



(b) paddy and sago-palm rachis



(c) paddy and coconut husk

Figure 4. Evolution of moisture profile of paddy and adsorbents in various volumetric ratios of paddy and adsorbents (a) paddy and rice husk, (b) paddy and sago palm rachis and (c) paddy and coconut husk (initial moisture content of paddy and adsorbents is 23.2% and 7.7% dry-basis, respectively) and ambient air temperature of 30°C).

สูงๆ คณะผู้วิจัยจึงเลือกช่วงความชื้นเริ่มต้นของที่กว้าง สำหรับผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับเป็น 1:0.5, 1: 1.0, 1:1.5, 1:2.0 และ 1:2.5 โดยปริมาตร พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ขณะที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ คงที่ในช่วงหลัง ตั้งแต่ที่ระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที และเมื่อพิจารณาผลต่างของความชื้นในข้าวเปลือกที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 5 อัตราส่วน พบว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนจาก 1:1.0 ไปเป็น 1:1.5 จะมีค่าสูงกว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนจาก 1:0.5 ไปเป็น 1:1.0, 1:1.5 ไปเป็น 1:2.0 และ 1:1.5 ไปเป็น 1:2.5 และเมื่อระยะเวลาการอบแห้งดำเนินไปประมาณ 200 นาที การเปลี่ยนแปลงความชื้นของระบบจะเริ่มมีค่าคงที่สำหรับกรณีข้าวเปลือกกับแกลบ ขณะที่กรณีข้าวเปลือกกับกาบมะพร้าว และข้าวเปลือกกับทางใบสาकु การเปลี่ยนแปลงความชื้นยังคงไม่คงที่ แต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นน้อยเมื่อเทียบกับช่วง 200 นาทีแรกของการทดลอง (ดังแสดงใน Figure 4) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นเท่ากับ 1:1.5 โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้นด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรทั้ง 3 ชนิด โดยที่อุณหภูมิประมาณ 30°C จะเห็นว่ากาบมะพร้าวสามารถดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ทางใบสาकुและแกลบ ตามลำดับ ซึ่งแม้ว่าตามรูปแบบสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (สมการที่ 34-

36) นั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทางใบสาकुสูงกว่า กาบมะพร้าวก็ตาม (ดังแสดงผล Figure 3) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากสมมติฐานข้อที่ 2 มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงในการทดลอง ดังนั้นในงานต่อเนื่องต่อไป หากมีการลดขนาดของทางใบสาकुและกาบมะพร้าว ก็น่าจะให้ผลการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองขึ้น หรือมีการศึกษาโดยมีการตั้งสมมติฐานที่แตกต่างไปจากข้อที่ 2 ดังกล่าวคือ พิจารณาถึงรอยละช่องว่างของอากาศระหว่างเม็ดข้าวเปลือกกับกาบมะพร้าวและทางใบสาकु

จากผลการทดลองในหัวข้อ (1), (2) และ (4) ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานเหล่านี้จะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะทำให้ทราบค่าความหนาแน่นปรากฏของวัสดุดูดซับความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการอบแห้ง และสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าที่จะใช้ค่าคงที่ ค่าความชื้นสมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุดูดซับจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในสมการอบแห้งชั้นบาง [สมการที่ (18)-(19)] ซึ่งทำให้ทราบค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปของข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้น ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงไว้ในสมการที่ (23) และ (24) จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับผลการทดลองจริงในหัวข้อต่อไป

6. ผลการทดลองเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนแผนภาพการทำงานของโปรแกรมได้ดังแผนภาพ Figure 5 และเมื่อ

Table 2. Average absolute difference (AAD) value and mean relative percentage error (S.E.) value between measured results and simulated results of moisture content for different volumetric ratios.

| Adsorbents | Statistical error Analysis | Volumetric ratio between paddy and adsorbents | | | | |
|------------------|----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | 1:0.5 | 1:1.0 | 1:1.5 | 1:2.0 | 1:2.5 |
| Rice husk | AAD (% dry-basis) | 0.34 | 0.93 | 1.35 | 1.57 | 1.88 |
| | S.E. (% dry-basis) | 0.82 | 2.28 | 3.12 | 3.84 | 4.60 |
| Sago palm rachis | AAD (% dry-basis) | 0.18 | 0.18 | 0.45 | 0.58 | 0.61 |
| | S.E. (% dry-basis) | 0.44 | 0.43 | 1.10 | 1.42 | 1.49 |
| Coconut husk | AAD (% dry-basis) | 0.59 | 0.29 | 0.30 | 0.21 | 0.39 |
| | S.E. (% dry-basis) | 1.45 | 0.70 | 0.73 | 0.50 | 0.95 |

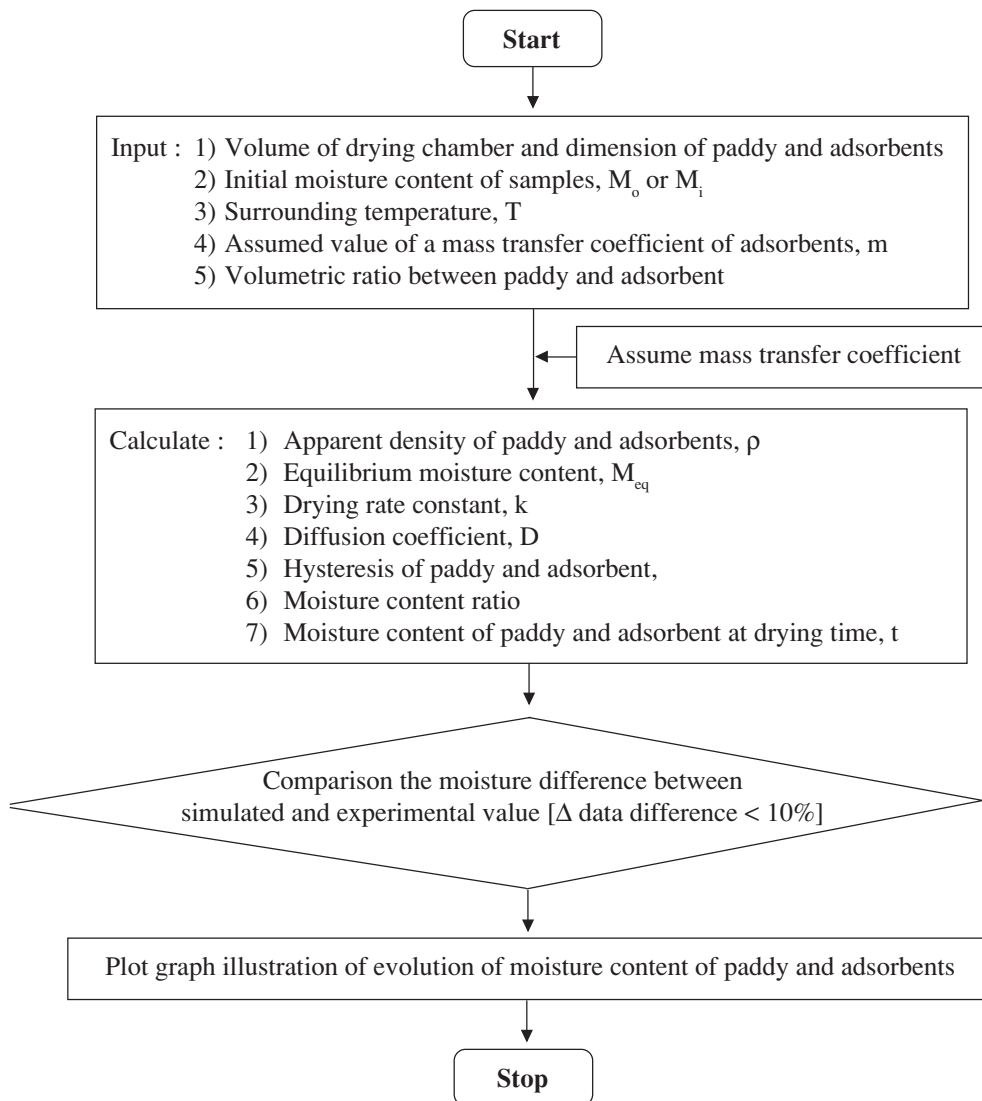


Figure 5. Illustration of flow chart of mathematical model for the paddy drying with adsorption technique

นำผลการทดลองอบแห้งเปรียบเทียบที่ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงตาม Figure 6-8 โดยเลือกใช้สมการอบแห้งชั้นบางทางทฤษฎีซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องมาทำนายการทดลอง สมการที่ (23) และ (24) จะทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นและโดยการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่า ค่า AAD และ S.E. อยู่ในช่วง 0.18-1.88 และ 0.43-4.60 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายผลได้ใกล้เคียงทุกสภาวะการทดลองพอสมควร

สรุป

จากการทดลองหาพารามิเตอร์พื้นฐานและจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกโดยการดูดซับความชื้นด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาकुและกามะพร้าว สรุปได้ว่า

1. ค่าความหนาแน่นปรากฏของวัสดุดูดซับความชื้นทั้งสามชนิดมีความสัมพันธ์กับความชื้นในรูปแบบสมการเชิงเส้น

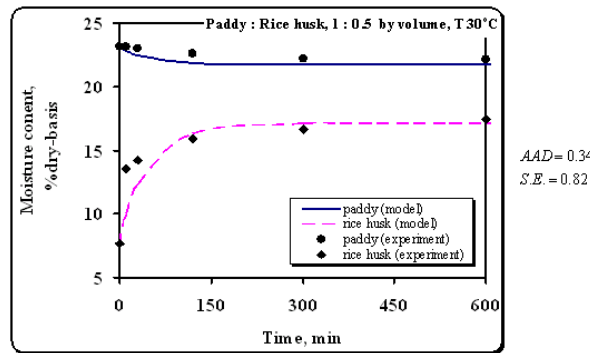


Figure 6. Simulated and measured data of paddy drying using rice husk at volumetric ratio of 1:0.5 by volume (M_0 of paddy and rice husk is 23.2% dry-basis and 7.7% dry-basis, respectively)

Note: $AAD = \frac{|M - M^*|}{n}$ and $S.E. = \sqrt{\frac{(M - M^*)^2}{n}}$

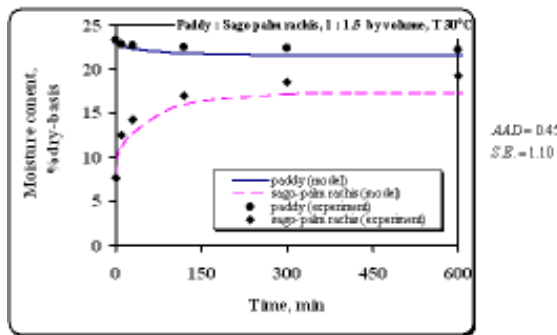


Figure 7. Simulated and measured data of paddy drying using sago-palm rachis at volumetric ratio of 1:1.5 by volume (M_0 of paddy and sago-palm rachis is 23.2% dry-basis and 7.6% dry-basis, respectively)

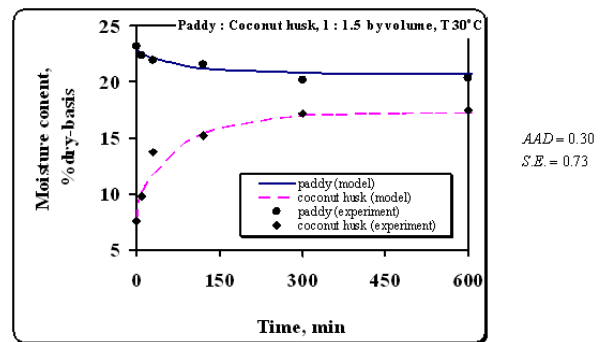


Figure 8. Simulation and measured data of paddy drying using coconut husk at volumetric ratio of 1:1.5 by volume (M_0 of paddy and coconut husk is 23.2% dry-basis and 7.6% dry-basis, respectively)

2. ค่าความชื้นสมดุลของแกลบ ทางใบสาकुและกามมะพร้าวจะมีค่าแปรตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30-50°C และพบว่าสมการความชื้นสมดุลในรูปแบบจำลองของ Henderson สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดกับวัสดุดูดซับความชื้นทั้งสามชนิด

3. ค่าคงที่ของการอบแห้งของวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้งมากกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ และเมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสม พบว่า สมการในรูป

แบบของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ครอบคลุมที่สุด โดยที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน แกลบมีอัตราการคายความชื้นได้เร็วกว่ากามมะพร้าวและทางใบสาकु

4. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแกลบมีค่าต่ำสุด ขณะที่ทางใบสาकुและกามมะพร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน

5. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการดูดซับความชื้น คือ 1:1.5 โดยปริมาตร โดยกามมะพร้าวสามารถดูดซับความชื้นข้าวเปลือกได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ทางใบสาकुและแกลบ

6. ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการดูดซับที่ปรับปรุงขึ้นสามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีทุกอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างข้าวเปลือกและวัสดุดูดซับความชื้นที่เลือกใช้

จากผลสรุปแต่ละประเด็น อาจกล่าวสรุปโดยรวมได้ว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคการดูดซับโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และสามารถนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้งานอีกเมื่อทำการลดความชื้นแล้ว ซึ่งผลการทดลอง (หัวข้อ 3) พบว่าการใช้อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50-70°C ก็เพียงพอต่อการลดความชื้น โดยอาจนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรบางส่วน หรือใช้วัสดุชนิดอื่นมาเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุดูดซับ จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนาแน่นของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดบอกแนวโน้มว่า มีความน่าสนใจที่จะเลือกใช้ทางใบสาकुและกามมะพร้าว อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี ต้องคำนึงถึงการจัดหาวัตถุดิบและขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้งานด้วย กล่าวคือ ควรมีการศึกษาด้านความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพของข้าวเปลือกในงานวิจัยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุนวิจัยวิจัยจากเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2548 และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย การไปนำเสนอผลงานวิชาการ ตลอดจนอุปกรณ์วิจัยและสถานที่ในการดำเนินการ

เอกสารอ้างอิง

กิตติศักดิ์ วินันทกิตต์ สมเกียรติ ปรัชญาวารการ อติศักดิ์ นาดกรณกุล และสมชาติ โสภณธฤทธิ. 2547. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบเป็นตัวกลางในการดูดซับ, งานประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ในหัวเรื่อง นวัตกรรมทางวิศวกรรมเกษตรเพื่อ

เพิ่มผลผลิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 26-27 เมษายน, นครปฐม: 15-21.

ภาวีกา วงศ์แก้ว. 2547. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบเป็นสารดูดความชื้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 98 หน้า.

สมชาติ โสภณธฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ, 300 หน้า.

สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล และยูทธนา ภูริระวิชย์กุล. 2537. เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง: พารามิเตอร์ของการอบแห้งชั้นบางของเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, ว.สงขลานครินทร์, 16 (4): 381-392.

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

Brunauer, S., Emmette, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption in multi-molecular layers, J. Am. Chem. Soc. 60: 309-319.

Chung, D.S. and Pfost, H.B. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. ASAE. 10: 549-557.

Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion, (2nd eds.), Oxford Clarendon Press, UK.

Halsey, G. 1948. Physical adsorption on non-uniform surfaces, J. of Chem. Phys., 16: 931.

Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium. J. of Agri. Eng., 33: 29-31.

Henderson, S.M. and Pabis, S. 1956. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficients. J. of Agri. Eng. Res. 6: 169-174.

Inoue, K., Tirawanichakul, Y., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2002. Analysis of dry processing of paddy in Thailand. Annual meeting of Japanese Society of Agricultural Machinery: 469-470.

Inoue, K., Soponronnarit, S., Witinantakit, K., Prachayawarakorn, S. and Tirawanichakul Y. 2005. Simple and low-input drying technology. Development of low-input technology for reducing postharvest losses of staples in Southeast Asia, JIRCAS Final report 2005: 53-72.

- Mujumdar, A.S. 1987. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker.
- Page, G.E. 1949. Factors influencing the maximum rate of drying shell corn in layers. M.Sc. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Shivhare, U.S., Arora, S., Ahmed, J. and Raghavan, G.S.V. 2004. Moisture adsorption isotherms for mushroom, *Lebensm-Wiss.u.-Technol.*, 37: 133-137.
- Soponronnarit, S. 2005. Strategy for paddy under hot and humid climates including some related ongoing research work. Development of low-input technology for reducing postharvest losses of staples in Southeast Asia. JIRCAS Final report 2005: 73-76.
- Tirawanichakul, Y. 2003. Managing moist paddy by in-store paddy drying under humid tropical atmosphere, Dissertation, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 143 pages.
- Wang, C.Y. and Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE, paper no. 78-3001, St. Joseph, Miami, USA.
- Yamaguchi, S. and Kawasaki, H. 1994. Basic research for rice drying with silica gel, *Int. J of Drying Technology*, 12(5): 1053-1067.