

**การศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการของสารดูดความชื้น
สำหรับอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น**
**The study of Some Physical Properties of Desiccant
for Paddy Drying Using Adsorption Technique**

อีลีหัยะ สนิโซ (Eleeyah Saniso)^{1*}

ยุทธนา ฐิระวณิชยกุล (Yutthana Tirawanichakul)²

สุภาวรรณ ฐิระวณิชยกุล (Supawan Tirawanichakul)³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความจุความร้อนจำเพาะ ความชื้นสมดุล และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศและความจุความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับความชื้น ในขณะที่ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นในช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 30–50°C และ 10–90% ตามลำดับ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นและรูปแบบสมการของ Henderson (1952) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่อุณหภูมิในช่วง 31–90°C ความเร็วลม 1.5 m/s จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลกับอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ออบแห้ง

Abstract

The objectives of this research were to determine some physical properties of agriculture residues such as bulk density, voids fraction, specific heat capacity, equilibrium moisture content (EMC) and moisture diffusion coefficient. The results show that the bulk density, voids fraction and specific heat capacity varied as a linear function of moisture content. To determine the adsorption EMC of adsorbents, it was shown that the EMC increases with increased relative humidity under conditions in the range of 30–50°C and 10–90% relative humidity. The Henderson model (1952) is the best fit to the experimental data. The diffusion coefficient of adsorbents shows that the increased moisture diffusion coefficient varies exponentially with drying temperature in the range of 31–90°C and 1.5 m/s air velocity.

คำสำคัญ: วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สมบัติทางกายภาพ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

Keywords: Agriculture residue, Physical properties, Moisture diffusion coefficient

¹อาจารย์ สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

*corresponding author, e-mail: Saniso.e@hotmail.com

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีทรัพยากรทางธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ประเทศหนึ่งของโลก มีการปลูกธัญพืชและพันธุ์ไม้มาชนิด เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่ว สับปะรด มะม่วง (สมชาติ, 2540) ยางพารา มะพร้าว เงาะ ลองกอง ทุเรียน มังคุด และอื่น ๆ เป็นต้น

หลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิตจะทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรขึ้นเป็นจำนวนมากในแต่ละปี เช่น แกลบ กาบมะพร้าว ฟางข้าว กากถั่วเหลือง ขานอ้อย และทางใบสาคุ ซึ่งถูกทิ้งไว้โดยไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อแต่อย่างใด ในขณะที่วัสดุเหลือใช้เหล่านี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น นำแกลบทางใบสาคุ กาบมะพร้าว ฟางข้าว มาทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทน นำกากมะพร้าวมาเอาเส้นใยทำไม้กวาด เชือก หรืองานจักสานต่าง ๆ หรือแม้แต่ทางใบสาคุแห้งมาทำรั้วและอื่น ๆ ก็ยังได้ เป็นต้น

แกลบ กาบมะพร้าวและทางใบสาคุเป็นวัสดุทางการเกษตรที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับ ซิลิกาเจล แคลเซียมออกไซด์ และโมเลกุลสารซีพีที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ สารทั้งสองประเภทสามารถดูดซับน้ำของเหลว หรือความชื้นได้ จะเห็นจากการนำวัสดุรูพรุนชนิดต่าง ๆ มาใช้ดูดซับสารพิษ อาทิเช่น สารตะกั่ว แคดเมียม เหล็ก และอื่น ๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมรถยนต์และการผลิตเยื่อกระดาษ (ภุชงค์ และศิริพร, 2545) ดูดซับธาตุทอง (Nakbanpote et al., 2002) และใช้ในการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือก ถั่วและเมล็ดข้าวโพดโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น (จิณฉกร์, 2531; ภาวิกา, 2547) แต่อย่างไรก็ดีการนำซิลิกาเจล แคลเซียมออกไซด์ และโมเลกุลสารซีพีมาเป็นสารดูดซับนั้นจะประสบปัญหาในเรื่องของการกลายสภาพเป็นสารกึ่งเหลว (Swell) และแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อดูดซับความชื้นจนอิ่มตัว นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงและมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกมาเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 25°C (อิลีหะยะ, 2549; Yamaguchi and Kawasaki, 1994) ยิ่งกว่านั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับสุขอนามัย เช่น

European Commission และ International Agent for Research on Cancer ได้จัดสารโคบอลท์คลอไรด์ (Cobalt chloride) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ทำให้ซิลิกาเจลมีสีน้ำเงินไว้ในประเภทของสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogen) หากสูดดมเข้าไป ซึ่งตรงข้ามกับวัสดุดูดซับเหลือใช้ทางการเกษตรที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (จิณฉกร์, 2531; ภาวิกา, 2547)

วัสดุรูพรุนแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ ดังที่ สมชาติ (2540) และผดุงศักดิ์ (2547) ได้กล่าวไว้ว่า ในกระบวนการลดความชื้นวัสดุที่อัตรา การลดความชื้นจะมีค่าคงที่ในระยะแรกหลังจากนั้น อัตราการลดความชื้นจะลดลง โดยอัตราการลดความชื้น วัสดุจะถูกจำกัดด้วยอัตราการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นที่เก็บสะสมอยู่ในเนื้อของวัสดุ ถ้าสมมุติว่าการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในรูปของของเหลวเมื่อทำการลดความชื้น จะทำให้น้ำเกิดการเคลื่อนที่ออกจากวัสดุทำให้ปริมาตร และมวลของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของวัสดุ เช่น ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความจุความร้อนจำเพาะ ความชื้นสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เป็นต้น ในทำนองเดียวกันการออกแบบระบบลดความชื้น เพื่อที่จะให้สามารถนำวัสดุรูพรุนที่เหลือใช้ทางการเกษตรดังกล่าวมาใช้เป็นสารดูดซับความชื้นนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติทางกายภาพบางประการของวัสดุ นั้น ๆ ด้วย (Chakraverty and Paul, 2001)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาทดลองเพื่อหาความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความจุความร้อนจำเพาะ ความชื้นสมดุล และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ของสารดูดซับความชื้น 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ทางใบสาคุ และกากมะพร้าว ดังนี้

1. ความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นปรากฏ หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด โดยรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุ

และปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของเม็ดวัสดุนั้น ๆ สำหรับวัสดุที่มีค่าความชื้นแตกต่างกัน อาจมีค่าความหนาแน่นปรากฏแตกต่างกันตามไปด้วย (Chakraverty and Paul, 2001) สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$\rho = \frac{m}{V_b} \quad (1)$$

2. เฟอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

เฟอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ หมายถึง อัตราส่วน ของปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำวัสดุมาบรรจุลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอนต่อ ปริมาตรของภาชนะนั้น ๆ โดยทั่วไป จะขึ้นกับความชื้นของวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (สมชาติ, 2540) ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{V_{oi}}{V_b} \times 100 \quad (2)$$

3. ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวล มีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ โดยมาก จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการความดันคงที่มากกว่า ปริมาตรคงที่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุโดยจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้นของวัสดุ และสามารถคำนวณได้ตามสมการ (สมชาติ, 2540) ดังนี้

$$c_p = - \frac{[m_c c_c (T_{eq} - T_{ci}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{wi})]}{m_p (T_{eq} - T_{pi})} \quad (3)$$

4. ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุล หมายถึง สภาวะที่เมื่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่แล้วความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงหรือเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป โดยในขณะนั้นความชื้นในวัสดุจะมีความ

ดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และ อุณหภูมิของวัสดุ ก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย (สมชาติ, 2540) ซึ่งคำนวณตามสมการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนี้

4.1 สมการของ BET (1938) ดังนี้

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

4.2 สมการของ Chung & Pfof (1967) ดังนี้

$$\ln(RH) = \left(\frac{-A}{RT} \right) \exp(-BM_{eq}) \quad (5)$$

4.3 สมการของ Henderson (1952) ดังนี้

$$1 - RH = \exp(-ATM_{eq}^B) \quad (6)$$

4.4 สมการของ Halsey (1948) ดังนี้

$$RH = \exp \left[\left(\frac{-A}{RT} \right) M_{eq}^B \right] \quad (7)$$

5. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น หมายถึง สมบัติทางกายภาพเฉพาะที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ เป็นต้น (สมชาติ, 2540 และ Crank, 1975) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ ดังนี้

5.1 สำหรับวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \left[\frac{\exp \left(-\frac{\pi^2 Dt}{L^2} \right) + \frac{1}{9} \exp \left(-\frac{9\pi^2 Dt}{L^2} \right)}{+ \frac{1}{25} \exp \left(-\frac{25\pi^2 Dt}{L^2} \right)} \right] \quad (8)$$

5.1 สำหรับวัสดุทรงลูกบาศก์

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^3 \left[\frac{\exp \left(-\frac{3\pi^2 Dt}{L^2} \right) + \frac{3}{9} \exp \left(-\frac{11\pi^2 Dt}{L^2} \right)}{+ \frac{3}{25} \exp \left(-\frac{27\pi^2 Dt}{L^2} \right)} \right] \quad (9)$$

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แกลบ
ทางใบสาคุ และกากมะพร้าว

1. การเตรียมวัสดุ

1.1 แกลบ

นำแกลบจากการสีข้าวเปลือกมาทำความสะอาด
โดยการแยกเศษวัสดุ เช่น เศษดิน หญ้า กิ่งไม้และสิ่ง
เจือปนออก

1.2 ทางใบสาคุและกากมะพร้าว

นำทางใบสาคุและกากมะพร้าวแห้งมาตัดเป็น
ทรงลูกบาศก์ขนาดความยาวด้านละประมาณ 0.45
เซนติเมตร

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การหาความชื้น

นำวัสดุที่ได้ตามข้อ 1.1-1.2 มาหาค่าความชื้น
เริ่มต้นตามมาตรฐานของ Association of Official
Agricultural Chemists (AOAC, 2005) ซึ่งสามารถ
คำนวณค่าความชื้นได้ 2 แบบ ดังนี้

2.1.1 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% db.)

$$M = \frac{m-d}{d} \times 100 \quad (10)$$

2.1.2 ความชื้นมาตรฐานเปียก (% wb.)

$$M = \frac{m-d}{w} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อทราบค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุแต่ละชนิด
แล้วจึงนำมาหาความชื้นให้อยู่ในช่วง 4-47% db.

2.2 การหาความหนาแน่นปรากฏ

ทดลองหาความหนาแน่นปรากฏโดยการ
นำตัวอย่างวัสดุที่มีความชื้นต่าง ๆ ในช่วง 4-47% db.
เทลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรจนเต็ม จากนั้นนำไปชั่ง
น้ำหนักแล้วคำนวณค่าความหนาแน่นปรากฏตาม
สมการ (1)

2.3 การหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

ทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศโดยเท
ตัวอย่างวัสดุที่มีความชื้นต่าง ๆ ในช่วง 4-47% db.
ลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรแล้วค่อย ๆ เทน้ำมันพืช

ลงไปจนเต็มภาชนะพอดี วัดปริมาตรน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว
คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศตามสมการ (2)

2.4 การหาความจุความร้อนจำเพาะ

ทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะโดย
นำตัวอย่างวัสดุที่มีความชื้นต่าง ๆ ในช่วง 4-47% db.
มาทดสอบในแคลอรีมิเตอร์แล้วคำนวณค่าความจุความร้อน
จำเพาะตามสมการ (3)

2.5 การหาความชื้นสมดุล

ทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น
โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวของ KNO_3 , $NaCl$,
 $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ $LiCl$ เป็นตัวควบคุม
ความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 10-90% โดยบรรจุ
สารละลายเกลือและวัสดุในภาชนะปิดสนิทแล้วนำไปตั้ง
ที่อุณหภูมิแวดล้อม (ประมาณ $30^\circ C$) และในตู้อบ
(Oven) ที่อุณหภูมิ 40 และ $50^\circ C$ เป็นเวลาประมาณ
10 วัน ระหว่างนี้ทำการชั่งน้ำหนักทุกวันจนน้ำหนักวัสดุ
ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ประมาณ
0.02 กรัม) จึงนำวัสดุมาหาความชื้นสุดท้ายซึ่งถือเป็น
ความชื้นสมดุล ตามสมการที่ (10) หรือ (11)

2.6 การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดย
นำวัสดุที่มีความชื้น 15, 20 และ 27% db. ไปอบแห้งด้วย
เครื่องอบแห้งชั้นบางด้วยความเร็วลม 1.5 m/s
ที่อุณหภูมิแวดล้อม ($31^\circ C$) และ อุณหภูมิลมร้อน
เท่ากับ 50, 70 และ $90^\circ C$ ตามลำดับ แล้วคำนวณหา
สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นตามสมการ (8) และ (9)

ผลการทดลองและวิเคราะห์

1. ผลการหาความหนาแน่นปรากฏ

จากการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏของ
แกลบ ทางใบสาคุและกากมะพร้าว ที่มีค่าความชื้น
ต่างกัน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1
เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น
ปรากฏกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและกาก
มะพร้าว จะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดย
ความหนาแน่นปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้น

ดังรูปที่ 1 (a-c) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

1.1 แกลบ

$$\rho = 1.269M + 80.644, R^2 = 0.973 \quad (12)$$

1.2 ทางใบสาคุ

$$\rho = 0.274M + 34.343, R^2 = 0.921 \quad (13)$$

1.3 กาบมะพร้าว

$$\rho = 0.263M + 55.977, R^2 = 0.922 \quad (14)$$

2. ผลการหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

จากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ กัน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว จะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2 (a-c) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

2.1 แกลบ

$$\epsilon = -0.092M + 98.745, R^2 = 0.952 \quad (15)$$

2.2 ทางใบสาคุ

$$\epsilon = -0.048M + 69.748, R^2 = 0.973 \quad (16)$$

2.3 กาบมะพร้าว

$$\epsilon = -0.089M + 81.190, R^2 = 0.974 \quad (17)$$

3. ผลการหาความจุความร้อนจำเพาะ

จากการทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว ที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุ ความร้อนจำเพาะกับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว จะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยความจุความร้อนจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3 (a-c) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

3.1 แกลบ

$$C_p = 0.029M + 1.669, R^2 = 0.953 \quad (18)$$

3.2 ทางใบสาคุ

$$C_p = 0.034M + 2.299, R^2 = 0.935 \quad (19)$$

3.3 กาบมะพร้าว

$$C_p = 0.023M + 2.233, R^2 = 0.948 \quad (20)$$

4. ผลการหาความชื้นสมดุล

ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของวัสดุดูดซับความชื้นทั้ง 3 ชนิด ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-6 โดยความชื้นสมดุลจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิคงที่ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นและที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4 (a-c) และเมื่อนำมาวิเคราะห์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองของ Henderson (1952) สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

4.1 แกลบ

$$1 - RH = \exp[-2.75 \times 10^{-4} (T + 273.15) M_{eq}^{1.13}], R^2 = 0.988 \quad (21)$$

4.2 ทางใบสาคุ

$$1 - RH = \exp[-1.29 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{2.26}], R^2 = 0.999 \quad (22)$$

4.3 กาบมะพร้าว

$$1 - RH = \exp[-1.61 \times 10^{-5} (T + 273.15) M_{eq}^{2.37}], R^2 = 0.773 \quad (23)$$

5. ผลการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิ ของแกลบ ทางใบสาคุและกาบมะพร้าว จะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล โดยเมื่ออุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับ

ผลการทดลองของ McMinn et al. (2003) และ Doymaz (2005) ดังรูปที่ 5 (a-c) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

5.1 แกลบ

$$D = 0.815e^{0.00969 T}, R^2 = 0.997 \quad (27)$$

5.2 ทางใบสาคุ

$$D = 1.260e^{0.01598 T}, R^2 = 0.998 \quad (28)$$

5.3 กาบมะพร้าว

$$D = 0.914e^{0.02012 T}, R^2 = 0.997 \quad (29)$$

บทสรุป

จากการทดลองหาสมบัติทางกายภาพ ต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความจุความร้อนจำเพาะ ความชื้นสมดุล และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด คือ แกลบ ทางใบสาคุและก้ามมะพร้าว พบว่า สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับความชื้น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ดังนี้

1. ความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นปรากฏของแกลบ ทางใบสาคุ และก้ามมะพร้าว จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ความชื้นใกล้เคียงกัน แกลบจะมีความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุด รองลงมา คือ ก้ามมะพร้าว และทางใบสาคุ ตามลำดับ

2. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของแกลบ ทางใบสาคุ และก้ามมะพร้าว จะมีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยที่ความชื้นใกล้เคียงกัน แกลบจะมีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศสูงที่สุด รองลงมา คือ ก้ามมะพร้าว และทางใบสาคุ ตามลำดับ

3. ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะของแกลบ ทางใบสาคุ และก้ามมะพร้าว จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะ เชิงเส้นตรงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ความชื้นใกล้เคียงกัน ทางใบสาคุจะมีความจุความร้อนจำเพาะสูงที่สุด รองลงมา คือ ก้ามมะพร้าว และแกลบ ตามลำดับ

4. ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้น

ความชื้นสมดุลแบบดูดซับความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุ และก้ามมะพร้าว จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

5. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแกลบ ทางใบสาคุและก้ามมะพร้าว จะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยในช่วงอุณหภูมิ 31°C ถึง 90°C ทางใบสาคุจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงที่สุด รองลงมา คือ ก้ามมะพร้าวและแกลบ ตามลำดับ

สัญลักษณ์

| | |
|-----------------|---|
| C_p | ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg°C) |
| d | มวลแห้ง (kg) |
| D | สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m ² /s) |
| L | ความยาว (m) |
| m | มวลเปียก (kg) |
| MC | ความชื้น (% db.) |
| EMC | ความชื้นสมดุล (% db.) |
| \overline{MR} | อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (decimal) |
| R | ค่าคงที่สากลของก๊าซ (8.314 J/mol K) |
| RH | ความชื้นสัมพัทธ์ (% or decimal) |
| T | อุณหภูมิ (°C) |
| t | เวลา (s) |
| V | ปริมาตร (m ³) |
| ρ | ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m ³) |
| ε | เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ (%) |
| A, B | ค่าคงที่สมการ |

สัญลักษณ์กำกับล่าง

| | | | |
|-----|---------------|-----|---------------|
| c | แคลอรีมิเตอร์ | w | น้ำ |
| oil | น้ำมันพืช | p | วัสดุ |
| eq | สภาวะสมดุล | i | สภาวะเริ่มต้น |
| b | ภาษาชะ | t | เวลาที่ใด ๆ |

Table 1. Bulk density of agriculture residue for moisture content in rang of 4-47% db..

| Agriculture residue | Bulk density (kg/m ³) | Moisture content (% db.) |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Sago-palm rachis | 35.54 to 46.72 | 4.38 to 44.34 |
| Coconut husk | 57.38 to 70.88 | 4.38 to 43.13 |
| Rice husk | 83.48 to 132.29 | 4.14 to 45.38 |

Table 2. Void fraction of agriculture residue for moisture content in rang of 4-47% db..

| Agriculture residue | Void fraction (%) | Moisture content (% db.) |
|---------------------|-------------------|--------------------------|
| Sago-palm rachis | 67.56 to 69.50 | 4.56 to 44.32 |
| Coconut husk | 75.39 to 80.56 | 4.56 to 44.98 |
| Rice husk | 94.61 to 98.39 | 4.14 to 46.20 |

Table 3. Specific heat capacity of agriculture residue for moisture content in rang of 4-47% db..

| Agriculture residue | Void fraction (%) | Moisture content (% db.) |
|---------------------|-------------------|--------------------------|
| Sago-palm rachis | 2.27 to 3.77 | 4.56 to 44.32 |
| Coconut husk | 2.15 to 3.28 | 4.47 to 46.85 |
| Rice husk | 1.62 to 2.97 | 4.32 to 45.13 |

Table 4. Values of adsorption EMC coefficients of different models of coconut husk for 30-50°C and 12-85% RH.

| Model name | Model constants | | R ² |
|---------------------|------------------------|--------|----------------|
| | A | B | |
| Henderson (1952) | 1.608x10 ⁻⁶ | 2.374 | 0.773 |
| Chung & Pfof (1967) | 3.899x10 ⁴ | 0.393 | 0.731 |
| Halsey (1948) | 1.010x10 ⁶ | -3.103 | 0.842 |
| Modified BET (1938) | 0.613 | 1.557 | 0.902 |

Table 5. Values of adsorption EMC coefficients of different models of rice husk for 30–50°C and 12–85% RH.

| Model name | Model constants | | R ² |
|---------------------|------------------------|--------|----------------|
| | A | B | |
| Henderson (1952) | 2.750x10 ⁻⁴ | 1.130 | 0.988 |
| Chung & Pfof (1967) | 7.426x10 ³ | 0.199 | 0.996 |
| Halsey (1948) | 8.673x10 ³ | -1.017 | 0.995 |
| Modified BET (1938) | 0.998 | 1.638 | 0.815 |

Table 6. Values of adsorption EMC coefficients of different models of sago-palm rachis for 30–50°C and 12–85% RH.

| Model name | Model constants | | R ² |
|---------------------|------------------------|--------|----------------|
| | A | B | |
| Henderson (1952) | 1.289x10 ⁻⁵ | 2.257 | 0.999 |
| Chung & Pfof (1967) | 1.858x10 ⁴ | 0.240 | 0.996 |
| Halsey (1948) | 5.071x10 ⁵ | -2.528 | 0.999 |
| Modified BET (1938) | 0.725 | 1.415 | 0.944 |

Table 7. Diffusion coefficient of agriculture residue for moisture content of 15–27% db. and 1.5 m/s drying air velocity.

| Agriculture residue | Void fraction (%) | Moisture content (% db.) |
|---------------------|--|--------------------------|
| Sago-palm rachis | 2.92x10 ⁻⁸ to 5.26x10 ⁻⁸ | 31 to 90 |
| Coconut husk | 1.70x10 ⁻⁸ to 5.53x10 ⁻⁸ | 31 to 90 |
| Rice husk | 1.10x10 ⁻¹⁰ to 1.93x10 ⁻¹⁰ | 31 to 90 |

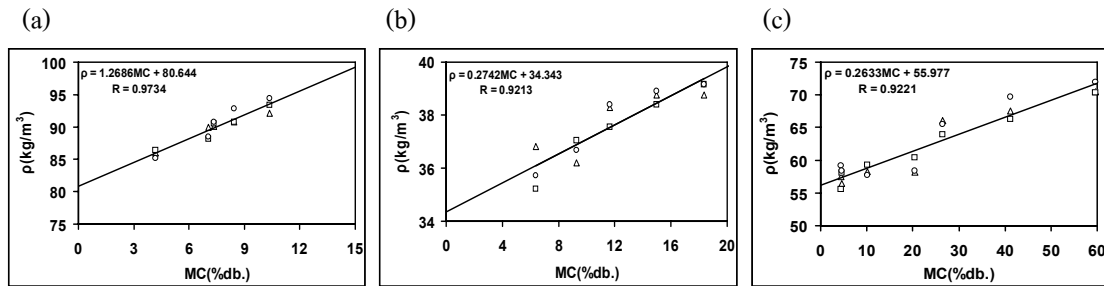


Figure 1. Relationship between bulk density and moisture content of (a) Rice husk (b) Sago-palm rachis and (c) Coconut husk.

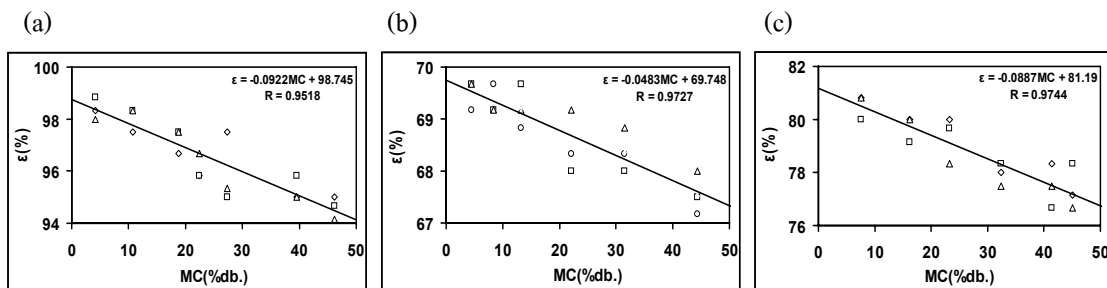


Figure 2. Relationship between void fraction and moisture content of (a) Rice husk (b) Sago-palm rachis and (c) Coconut husk.

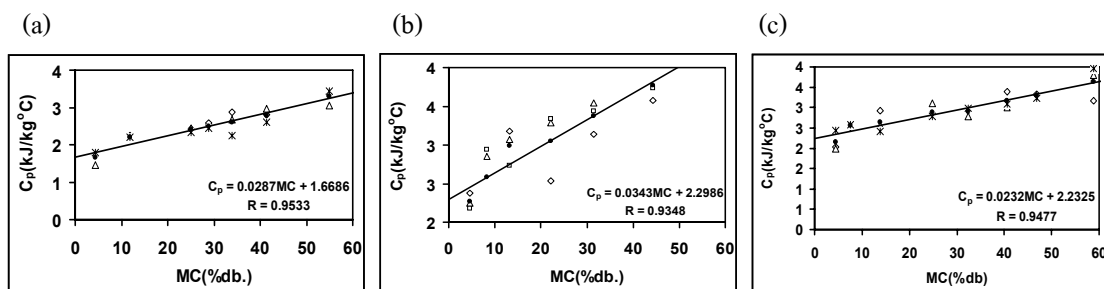


Figure 3. Relationship between specific heat capacity and moisture content of (a) Rice husk (b) Sago-palm rachis and (c) Coconut husk.

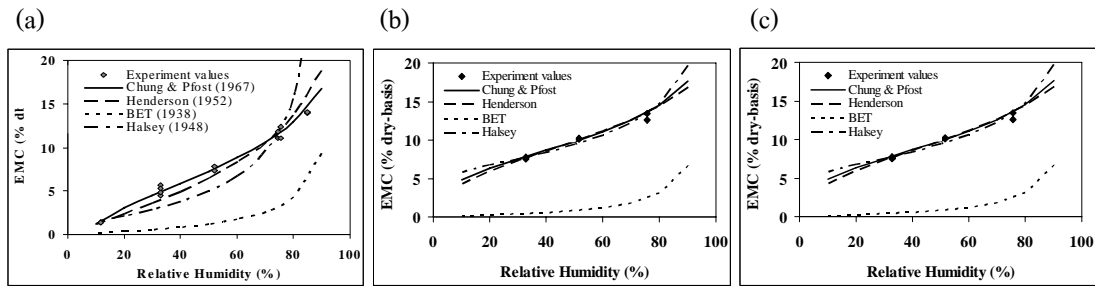


Figure 4. EMC values of (a) rice husk in various RH ranges of 12–85% at temperature of 30 to 50°C (b) sago-palm rachis in various RH ranges of 12–85% at temperature of 30 to 50°C and (c) coconut husk in RH ranges of 12–85% at temperature of 30 to 50°C.

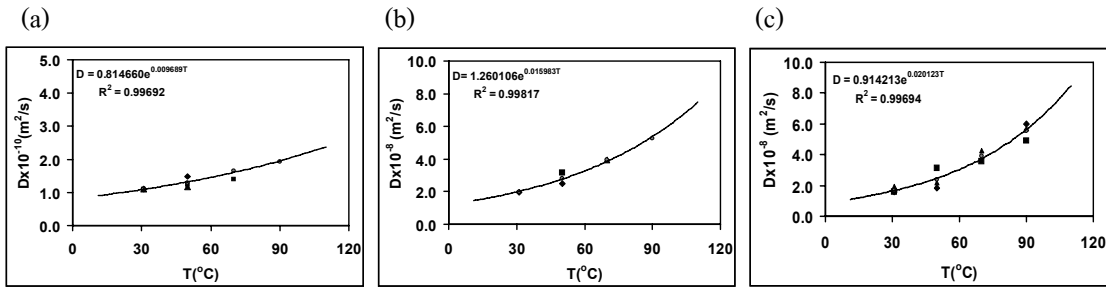


Figure 5. Relationship between Diffusion coefficient and Temperature of (a) Rice husk (b) Sago-palm rachis and (c) Coconut husk.

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณ์ เทียรฆประสิทธิ์ และศิริพร พงศ์สันติสุข. 2545. การกำจัดคราบน้ำมันในน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย). 1(2): 26-31.
- จิณฉกร์ เศรษฐสุข. 2531. การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองโดยใช้สารดูดความชื้นภายในภาชนะปิดผนึก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาวิกา วงศ์แก้ว. 2547. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แก๊สเป็นสารดูดซับความชื้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2547. การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน I : หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย). 12(1): 1-11.
- อิลีหัยะ สนิโซ. 2549. การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการดูดซับความชื้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- AOAC. 2005. *Official Methods of Analysis*. 18th edition. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists.

- Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Amer. Chem. Soc.* 6: 309-319.
- Chakraverty, A. and Paul, S.R. 2001. *Postharvest technology: Cereals, pulses, fruits and vegetables*. New Hampshire USA: Science publishers, Inc.
- Chung, D.S. and Pfof, H.B. 1967. Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grain and Their Products. *Trans. ASAE.* 10: 549-557.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Doymaz, I. 2005. Drying behavior of green beans. *Journal of food engineering.* 69: 161-165.
- Halsey, G. 1948. Physical Adsorption on Non-Uniform Surface. *J. Chem. Phys.* 16: 83-92.
- Henderson, S.M.A. 1952. Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agril. Eng.* 3: 29-32.
- McMinn, W.A.M., Khraisheh, M.A.M. and Magee, T.R.A. 2003. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. *Food research international* 36: 977-983.
- Nakbampote, W., Thiravetyan, P. and Kalambaheti, C. 2002. Comparison of Gold Adsorption by *Chlorella Vulgaris*, Rice Husk and Activated Carbon. *Minerals Engineering Journal* 15: 549-552.
- Yamaguchi and Kawasaki. 1994. Basic research for rice drying with silica gel. *Drying Technology* 12(5): 1053-1067.

