



การหาไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี

Determination of Moisture Sorption Isotherm for Hygroscopic Materials

ชนันท์ ราชัญนิยม*, สุนทร สืบคำ

Chanun Rardniyom*, Sunate Surbkar

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiang Mai, 50290

*Corresponding author: Tel: 086-6592018 E-mail: chanun@mju.ac.th

บทคัดย่อ

ไอโซเทอมความชื้นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุกับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศหรือค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาแบบจำลองการอบแห้ง บทความวิชาการเรื่องนี้นำเสนอวิธีการหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี 3 วิธี คือ (1) วิธีสถิตย ซึ่งทำได้โดยการใส่วัสดุ (แห้งหรือชื้น) ในภาชนะปิดสนิทที่ควบคุมให้มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลายๆ ค่า ณ อุณหภูมิหนึ่ง แล้ววัดค่าน้ำหนักที่แตกต่างกันไปเมื่อวัสดุเข้าสู่จุดสมดุลในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน, (2) วิธีจลน เป็นวิธีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคทิวิตีแบบอัตโนมัติพร้อมๆ กับการวัดค่าน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลในระดับที่ยอมรับได้ และ (3) วิธีการวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตีจากจุดกลั่นตัวของน้ำโดยเซนเซอร์ Chilled mirror dewpoint พร้อมๆ กับการวัดค่าความชื้นของวัสดุซึ่งวัดได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องรอให้วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อม การหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุกับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศหรือค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งดังกล่าวเข้ากับสมการไอโซเทอมจะได้ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอม ทั้งนี้พารามิเตอร์ทางสถิติจะเป็นเครื่องมือในการตัดสินความสามารถของสมการไอโซเทอมในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุล, วัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี, ไอโซเทอมความชื้น

Abstract

Moisture sorption isotherm is the relationship between equilibrium moisture content (EMC) of a sample and equilibrium relative humidity or water activity at a specific temperature, which is essential for developing drying models. This article describes three methods for determining EMC of hygroscopic materials. (1) The static desiccator isotherm method is performed by placing the product (dried or hydrated) into a humidity control chamber at constant temperatures and followed by measurements of the weight gain or loss with time until equilibrium is reached. (2) The dynamic sorption method is an automated determination of water activity simultaneously with measurements of the sample's weight changes until an acceptable level is reached. (3) The dynamic dewpoint isotherm method measures water activity directly by using a standard chilled mirror dewpoint sensor and moisture content is gravimetrically tracked using an electronic balance. In the last method, the sample is not required to equilibrate to a known water activity level; rather its water activity is directly measured at each point. By fitting the experimental equilibrium moisture content – equilibrium relative humidity (water activity) data acquired by any method of isotherm determinations to the selected isotherm equation(s), isotherm equation constants are obtained. The level of discrepancy between the proposed model and the experimental data is explained by statistical parameters.

Keywords: Equilibrium moisture content, Hygroscopic material, Moisture sorption isotherm

1 บทนำ

ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC หรือ M_e) คือ ค่าปริมาณความชื้นของวัสดุที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะสามารถทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้ ณ ความชื้นและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมในขณะนั้น ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษากระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะการศึกษาคาบเวลาการอบแห้ง (Drying period) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งขณะอบแห้งกับความชื้นสมดุลของวัสดุ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะทำให้ความชื้นมีการถ่ายเทจากวัสดุออกไปสู่อากาศที่อยู่แวดล้อมในขณะนั้นได้ นอกจากนี้ความชื้นสมดุลยังมีความสำคัญต่อการผสม (Mixing), การบรรจุ (Packaging) และการเก็บรักษา (Storage) ของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี (Hygroscopic material) ด้วย เนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามสภาวะแวดล้อมตลอดเวลา จึงทำให้มีผลต่อความสามารถในการดูดความชื้นของวัสดุในกระบวนการผสม หรืออาจส่งผลให้วัสดุที่ผ่านกระบวนการบรรจุแล้วคายความชื้นกลับออกมาสะสมอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ และอาจส่งผลทำให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สั้นลง ทั้งนี้ ความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุต่างๆ อาจจะเป็นน้ำ, น้ำมันหอมระเหย, ไขมัน, ยางเหนียว, แอลกอฮอล์, ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือสารให้กลิ่น ก็ได้ แต่ในจำนวนนี้ น้ำถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดซึ่งในวัสดุเกษตรอาจมีปริมาณน้ำมากถึง 50-80% ของน้ำหนักของวัสดุ ขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของเซลล์ ดังนั้นการแลกเปลี่ยนความชื้นจะเกิดขึ้นระหว่างตัววัสดุเองกับสิ่งแวดล้อมจนกว่าจะเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีการเพิ่มหรือสูญเสียความชื้นอีกต่อไป

กระบวนการอบแห้งหรือลดความชื้นคือ ความพยายามลดความชื้นของอากาศในห้องอบแห้ง เพื่อทำให้อากาศซึ่งมีสภาพเปียกที่อยู่ในห้องอบคายความชื้นให้กับอากาศ ทุกขณะที่ความชื้นของอากาศในห้องอบลดลง วัสดุที่ถูกอบจะพยายามปรับสมดุลความชื้นลดลงตาม เพื่อให้เข้าสู่สมดุลใหม่ของอากาศแวดล้อม ส่วนกระบวนการเพิ่มความชื้นคือ ความพยายามเพิ่มความชื้นของอากาศในห้องขึ้น เพื่อทำให้อากาศซึ่งมีสภาพแห้งดูดความชื้นจากอากาศ โดยทุกขณะที่ความชื้นของอากาศในห้องเพิ่มขึ้น วัสดุที่อยู่ในห้องจะพยายามปรับสมดุลความชื้นเพิ่มขึ้นตาม เพื่อให้เข้าสู่สมดุลใหม่ของอากาศแวดล้อม

ไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุ (EMC of material) กับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium

relative humidity, ERH, of air) ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง หากทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่เปียกในขณะปิดสนิทที่มีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศสูงมาก (ค่า RH เริ่มต้นใกล้เคียงหนึ่ง) จะได้ค่า EMC สูงมาก เมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง จะได้ค่า EMC ลดลงตาม และเมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่เกือบไม่มีความชื้นอยู่เลย (ค่า RH ใกล้เคียงศูนย์) ค่า EMC ก็จะใกล้เคียงศูนย์ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่กำลังลดลงกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่กำลังลดลงเรียกว่า ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในทางตรงกันข้าม หากทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แห้งในขณะปิดสนิทที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ (ค่า RH เริ่มต้นใกล้เคียงศูนย์) จะได้ค่า EMC ใกล้เคียงศูนย์ เมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูงขึ้น จะได้ค่า EMC สูงขึ้นตาม และเมื่อทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก (ค่า RH ใกล้เคียงหนึ่ง) ค่า EMC ก็จะสูงมากด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่เพิ่มขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่เพิ่มขึ้นเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) (Figure 1)

วัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดีแต่ละชนิดจะมีไอโซเทอมความชื้นที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับส่วนประกอบที่เป็นของแข็งแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากผลของสมบัติคอลลิเกทีฟ (Colligative effect) ผลของแรงแคปิลลารี (Capillary effect) และผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของความชื้นกับโมเลกุลที่ผิวของวัสดุ (Surface interaction) ที่แตกต่างกัน แม้จะเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ก็ยังมีเส้นกราฟไอโซเทอมการคายและการดูดความชื้นที่ไม่ซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการคายและดูดความชื้นของวัสดุเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ย้อนกลับ (Hysteresis effect) (Figure 1) โดยขนาดของช่วงห่างระหว่างไอโซเทอมทั้งสองนี้จะบ่งบอกถึงความคงตัวของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา (Storage stability) โดย Chen (2000) ศึกษาการดูดและคายความชื้นของถั่วลิสงพบว่า Hysteresis เกิดในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0.30-0.75 สำหรับถั่วทั้งฝัก แต่สำหรับเมล็ดถั่วและเปลือกถั่ว Hysteresis เกิดขึ้นตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ (0-1) โดยขนาดของ Hysteresis ลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 5°C มีขนาดของ Hysteresis ใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 45°C

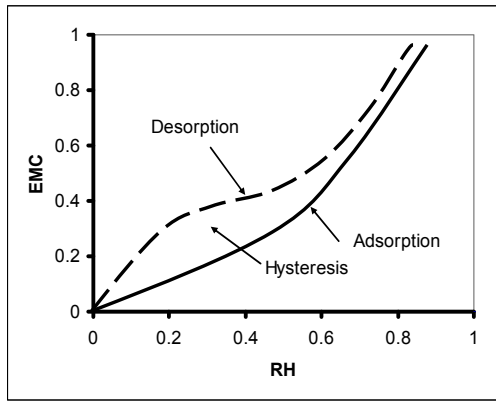


Figure 1 Typical equilibrium moisture content isotherms (adapted from Henderson et al., 1997).

ในการศึกษาไอโซเทอมความชื้น บางครั้งค่า ERH อาจแสดงอยู่ในรูปค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, a_w) (Gennadios and Weller, 1994; Yu et al., 1999) โดยค่า a_w นี้หมายถึงปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ค่า a_w สามารถนิยามได้ว่าเป็นความชื้นสัมพัทธ์สมดุล ณ จุดที่วัสดุไม่มีการดูดหรือคายความชื้น นั่นคือ a_w จึงสามารถหาได้จากอัตราส่วนของความดันไอสูงสุดที่วัสดุหนึ่งๆ มี (P) ต่อความดันไอของไอน้ำ (P_o) ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังสมการ

$$a_w \times 100 = \%ERH = \frac{P}{P_o} \times 100 \quad (1)$$

Brunauer et al. (1940, อ้างโดย Jayas et al., 1988) แบ่งลักษณะของไอโซเทอมการคายความชื้นเป็น 5 ลักษณะดัง Figure 2 ไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นลักษณะของแบบจำลอง Langmuir ซึ่งถือว่าเป็นแบบแรกและดั้งเดิมที่สุดของไอโซเทอมเหมาะสำหรับพวกอนินทรีย์วัตถุ (Inorganic material) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ค่อยมีน้ำเป็นส่วนประกอบเช่น หินทราย หรือ วัสดุเส้นใยชนิดต่างๆ แบบที่ 2 เป็นรูปตัวเอส (Sigmoid) ซึ่งวัสดุทางการเกษตรส่วนมากมักมีไอโซเทอมเป็นแบบนี้ ส่วนแบบที่ 3 ถึง 5 จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ายังไม่มีการตั้งชื่อสำหรับไอโซเทอมของการดูดความชื้นนั้นยังไม่มีแบ่งลักษณะเส้นกราฟอย่างชัดเจน ดังนั้นการแบ่งตามลักษณะของไอโซเทอมการคายความชื้นของ Brunauer et al. (1940 อ้างโดย Jayas et al., 1988) น่าจะใช้ได้

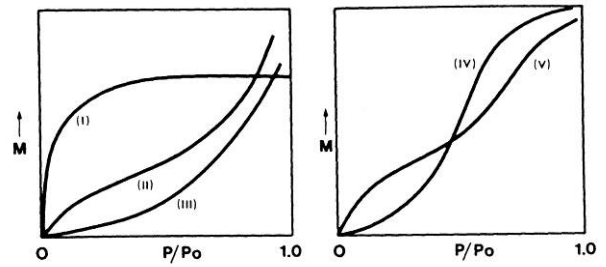


Figure 2 Five classes of the moisture sorption isotherms classified by Brunauer et al. (1940 cited by Jayas et al., 1988).

สัมประสิทธิ์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศร้อน สามารถหาได้จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้รับการยอมรับและตีพิมพ์ในวารสารอ้างอิง โดยในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการไอโซเทอม อาจใช้การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ซึ่งค่อนข้างใช้เวลามากและยุ่งยาก หรืออาจใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติหลายโปรแกรมเช่น SAS, STATPACK, STATVIEW, STATICA, SPSS หรือ, Excel เป็นต้น

2 สมการไอโซเทอม (Isotherm equations)

Van den Berg and Bruin (1981) กล่าวว่า มีสมการมากกว่า 77 สมการที่ใช้ทำนายไอโซเทอมการคายความชื้นของผลผลิตเกษตร แต่มาตรฐาน ASAE Standards (2003) แนะนำรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เลือกมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับผลผลิตทางการเกษตรจากพืช ดังต่อไปนี้

สมการดัดแปลงของ Henderson

$$1 - RH = \exp(-A \cdot (T + C) \cdot M_e^B) \quad (2)$$

สมการดัดแปลงของ Chung-Pfost

$$RH = \exp\left(-\frac{A}{(T + C)} \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot M_e}{100}\right)\right) \quad (3)$$

สมการดัดแปลงของ Halsey

$$RH = \exp(-\exp(A + B \cdot T) \cdot M_e^{-C}) \quad (4)$$

สมการดัดแปลงของ Oswin

$$RH = \left[\left(\frac{A + B \cdot T}{M_e} \right)^C + 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

สมการของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)

$$M_e = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot RH}{(1 - B \cdot RH) \cdot (1 - B \cdot RH + B \cdot C \cdot RH)} \quad (6)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%), A , B , C คือ ค่าคงที่ (dimensionless), RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเป็นทศนิยม (dimensionless) และ T คือ อุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

วิล (2552) รายงานว่าสมการที่เหมาะสมกับอาหารแห้งมากที่สุดคือสมการ GAB และสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$M_e = \frac{D \cdot M_o \cdot RH}{(1 - RH) \cdot (1 + (D - 1) \cdot RH)} \quad (7)$$

เมื่อ M_o คือ ความชื้นที่อยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่อวัสดุ หรือ Monolayer moisture (%) และ D คือ ค่าคงที่ของสมการ BET

Colley et al. (2006) ใช้สมการที่ 2 ถึง 5 ในการศึกษาไอโซเทอมความชื้นของ Switchgrass pellets พบว่า สมการดัดแปลง Chung-Pfost ใช้ได้ดีในช่วง $0.2 \leq a_w \leq 0.85$ ส่วน Yu et al. (1999) ศึกษาพบว่าไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลของซีเรียและบลูเบอร์รี่ได้ตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ โดยแบบจำลองดัดแปลง Henderson ทำนายได้ดีในช่วง $a_w < 0.8$ แบบจำลองดัดแปลง Oswin and Halsey ให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ และแบบจำลอง Halsey สำหรับ $a_w > 0.8$ สุเนตร (2548) พบว่า สมการดัดแปลง Halsey สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของลำไยอบแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ดอได้ถูกต้องที่สุด ($R^2 = 0.964$) ในช่วงอุณหภูมิ 20-40 $^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งควบคุมโดยสารละลายเกลืออิ่มตัว 8, 22.5, 44, 68.5, 75.5, 84.3 และ 98%

3 การประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นสมดุลที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (Sharma et al., 2005; Jain and Pathare, 2004; Lin et al., 2005; Waewsak et al., 2006) ค่า R^2 เป็น

ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลอง โดยยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองยิ่งมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย โดยสมการแสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังกล่าวมีดังนี้

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_{e,ex} \cdot M_{e,pred})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n M_{e,ex}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n M_{e,pred}^2 \right)}} \right]^2 \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N - n} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N}} \quad (10)$$

เมื่อ $M_{e,ex}$ คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง (% มาตรฐานแห้ง), $M_{e,pred}$ คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย (% มาตรฐานแห้ง), N คือ จำนวนค่าสังเกต และ n คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

4 วิธีการหาความชื้นสมดุล

การศึกษาความชื้นสมดุลของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดีสามารถทำได้หลายวิธี มีทั้งวิธีที่ใช้เวลายาวนานด้วยอุปกรณ์พื้นฐานอย่างง่าย และประหยัดค่าใช้จ่ายไปจนถึงวิธีที่ใช้เวลาสั้นๆ ด้วยอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูงแต่มีราคาแพง ทั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

1) Static desiccator isotherm method หรือ วิธีเชิงสถิติ เป็นวิธีที่วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาพแวดล้อมโดยปราศจากการรบกวนทางด้านพลศาสตร์ของอากาศ นั่นคือ การปล่อยให้ผลผลิตสัมผัสกับอากาศแวดล้อมจนกว่าจะถึงจุดสมดุล หลังจากนั้นจึงมีการวัดความชื้นของวัสดุ ณ จุดสมดุล (Figure 3) โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดความชื้นส่วนเกินมาใช้ได้แก่ สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด โดยทั่วไปนิยมใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเพราะว่าการกัดกร่อนน้อยและราคาถูกกว่า ส่วนสารละลายกรดนั้นกัดกร่อนโลหะง่ายจึงไม่นิยม

ใช้ อย่างไรก็ตามวัสดุเกษตรจะใช้เวลาอย่างมากในการเข้าสู่จุดสมดุลภายใต้สารละลายทั้งสองชนิด จึงทำให้เกิดเชื้อราขึ้นได้ในระหว่างที่วัสดุอยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ ดังนั้นควรใส่สารเคมีต่อไปในอุปกรณ์ที่ปิดสนิทได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ 0.12, 0.18 และ 0.45% โดยปริมาตร สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ 69, 74 และ 87.5% ตามลำดับ (Henderson, 1973) ไธมอล (Thymol) ที่บรรจุในหลอดทดลอง (Yu et al., 1999; Rahman et al., 2002) หรือ โทลูอิน (Toluene) ที่บรรจุในหลอดทดลอง (Labuza, 1984; Maskan and Göğüş, 1998; Fan et al., 1998) หรือคลุกตัวอย่างกับสารละลาย 2% ของสารละลายผสมระหว่างกรด Propionic 40% และ กรดน้ำส้ม (Acetic acid) 60% ในสารละลาย 2% Sodium benzoate โดยน้ำหนัก (Zuritz et al., 1979)

สารละลายเกลืออิมิตัวที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติคือสามารถรักษาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายเกลือโดยไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิ

เปลี่ยนไป ความสามารถของสารละลายเกลืออิมิตัวแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ และอุณหภูมิรอบๆ สารละลาย ตัวอย่างสารละลายเกลืออิมิตัวที่ใช้ในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลองหาความชื้นสมดุลแสดงใน Table 1 ซึ่งรวบรวมจากผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในระดับนานาชาติหลายเรื่อง แต่ส่วนใหญ่ดัดแปลงจาก AOAC (1995)

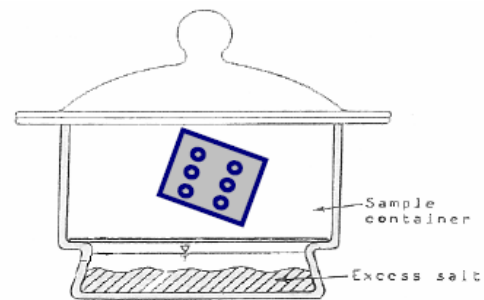


Figure 3 Schematic diagram of the static desiccator isotherm method. (Carter, 2008).

Table 1 Standard saturated salt solutions to maintain desired relative humidity in a sealed chamber (สุนทร, 2548).

Saturated salt solution	%RH	Saturated salt solution	%RH
Sodium hydroxide (NaOH)	6.0	Strontium chloride (SrCl_2)	70.9
Potassium hydroxide (KOH)	8.0	Sodium nitrate (NaNO_3)	74.3
Lithium chloride (LiCl)	11.3	Sodium chloride (NaCl)	75.3
Potassium acetate (CH_3COOK)	22.5	Ammonium sulphate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	81.0
Magnesium chloride (MgCl_2)	32.8	Potassium chloride (KCl)	84.3
Potassium carbonate (K_2CO_3)	44.0	Strontium nitrate ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$)	85.1
Magnesium nitrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)	52.8	Barium chloride (BaCl_2)	90.2
Sodium bromide (NaBr)	57.6	Potassium nitrate (KNO_3)	93.6
Cobalt chloride (CoCl_2)	64.9	Zinc sulphate (ZnSO_4)	95.0
Magnesium acetate ($\text{Mg}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$)	65.0	Potassium sulphate (K_2SO_4)	97.3
Potassium iodide (KI)	68.9	Copper sulphate (CuSO_4)	98.0

วสันต์ และคณะ (2555) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นโดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัว 6 ชนิด คือ LiCl , MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, KI , NaCl และ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ในขวดโหลที่ใส่ในตู้อบที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 40-60°C เพื่อสร้างบรรยากาศที่มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.10-0.82 Menkov et al. (2004) ศึกษาไอโซเทอมความชื้นของแป้งมันฮ้อ (Walnut) โดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัว 7 ชนิดคล้ายๆ กัน คือ LiCl , MgCl_2 , CH_3COOK , K_2CO_3 , NaBr , NaCl และ KCl แต่ศึกษาที่อุณหภูมิ

10, 25 และ 40°C เพื่อให้ได้ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.11-0.85 แต่ก่อนการศึกษาไอโซเทอมการคายความชื้น แป้งมันฮ้อถูกทำให้แห้งโดยเก็บไว้ในบรรยากาศของ Phosphorus pentoxide (P_2O_5) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 d AhmadiChenarbon and Hasheminia (2011) ศึกษาไอโซเทอมความชื้นของใบลาเวนเดอร์ในช่วงค่า a_w ระหว่าง 0.11-0.85 ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C ซึ่งก็ใช้สารละลายเกลืออิมิตัวของ LiCl , MgCl_2 , CH_3COOK , K_2CO_3 , NaCl และ KCl ดังเช่นการทดลองอื่น แต่ใช้

สารละลายเกลือ Sodium nitrite (NaNO_2) แทนที่จะเป็น Sodium nitrate (NaNO_3)

2) Dynamic sorption method หรือวิธีจลน์ เป็นการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศแวดล้อม โดยทำให้อากาศหรือผลผลิตเกิดการเคลื่อนไหว แล้วตรวจวัดน้ำหนักของวัสดุเพื่อหาค่าความชื้นสมดุล โดยความชื้นของอากาศจะถูกวัดด้วยเซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH sensor) ดังแสดงใน Figure 4 วิธีนี้การเข้าสู่จุดสมดุลจะเป็นไปอย่างรวดเร็วจึงเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูง เพราะการใช้วิธีสถิตยผลผลิตอาจจะเสียหายได้จากการเจริญเติบโตของเชื้อรา ค่าความชื้นที่วัดได้ก็อาจจะไม่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีความเที่ยงตรงสูงซึ่งส่วนมากมีราคาแพง โดย Kacharu and Matthes (1976) ใช้วิธีการนี้ในการศึกษาการดูดความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าใช้เวลาประมาณ 24-60 h ข้าวเปลือกก็เข้าสู่จุดสมดุล Chen and Vance Morey (1989) ใช้เซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้นวัดค่าในภาชนะบรรจุเมล็ดข้าวโพดที่ปิดสนิทที่มีความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ใส่ไว้ในตู้ควบคุมความชื้น (Figure 5) พบว่าใช้เวลาเพียง 6-18 h สำหรับแต่ละอุณหภูมิ แต่ Garg et al. (2006) ซึ่งศึกษาการดูดความชื้นของเมล็ดข้าวโพดเช่นเดียวกัน รายงานว่าในแต่ละขั้นของการเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเพียง 2 h เท่านั้น Fasino (2004) รายงานว่าการใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter) ที่สามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์และติดตามน้ำหนักของวัสดุได้ด้วยสามารถช่วยทำให้การศึกษาไอโซเทอมการคายความชื้นของมันเทศซึ่งเป็นวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูงได้อย่างรวดเร็วภายใน 12 h Koor et al. (2006) ใช้วิธีนี้ศึกษาไอโซเทอมการดูดและคายความชื้นของบัควีท (Buckwheat) พบว่าแต่ละสภาวะอากาศที่ศึกษา บัควีทใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลแตกต่างกันมากคือ ตั้งแต่ 3-7 d นอกจากนี้ สุเนตร (2548) ใช้วิธีจลนศาสตร์เพื่อหาไอโซเทอมความชื้นของลำไยแห้งทั้งเปลือกพันธุ์ดอโดยการติดตั้งพัดลมคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก 35 W ในภาชนะปิดสนิท โดยลำไยตัวอย่างใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลประมาณ 20-30 d

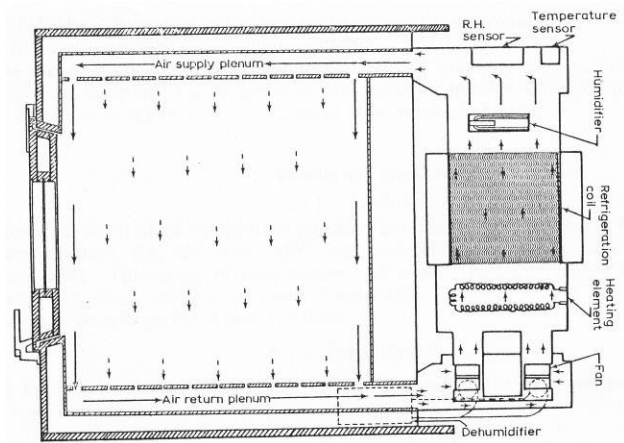
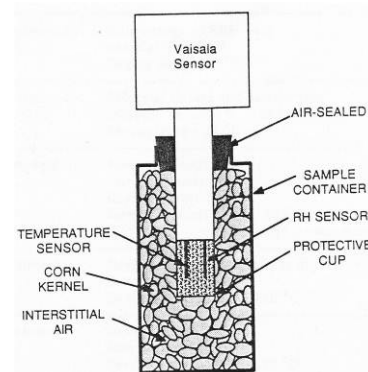
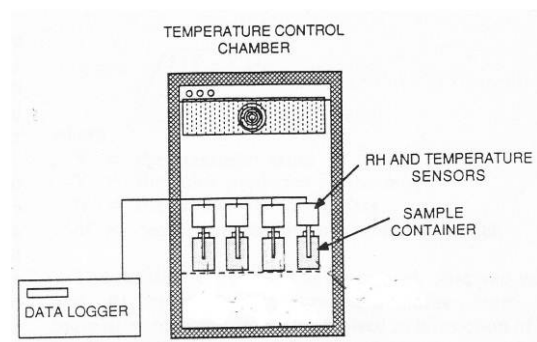


Figure 4 A cross-sectional view of environmental chamber showing air conditioning system and air flow pattern (Kacharu and Matthes, 1976).



(a) Sample container and measurement apparatus.



(b) The experimental setup.

Figure 5 A rapid method of collecting ERH data based on temperature and RH sensors (Chen and Vance Morey, 1989).

3) Dynamic dewpoint isotherm (DDI) method หรือวิธีการวัดจุดกลั่นตัวของน้ำ วิธีนี้วัสดุจะอยู่ในห้องควบคุมที่สามารถจำลองสภาวะอากาศได้ทั้งสภาวะเปียกและแห้ง และมีการวัดค่า a_w และค่าความชื้นของวัสดุ ซึ่งสามารถกระทำได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องรอให้วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับสภาวะอากาศ

โดยใช้เซนเซอร์ Chilled mirror dewpoint วัดค่า a_w ส่วนการวัดความชื้นของวัสดุ สามารถวัดได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักเชิงเลข (Electronic balance) (Figure 6) ทำให้การศึกษาความชื้นสมดุลโดยวิธีนี้ใช้เวลาสั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสองวิธีแรก (1-2 d ต่อตัวอย่าง) นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาได้ทั้งไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาปรากฏการณ์ที่ไม่ย้อนกลับ

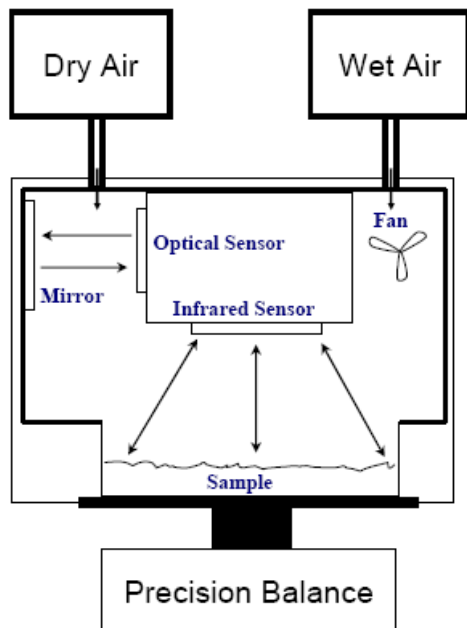


Figure 6 Schematic diagram of the dynamic dewpoint isotherm (DDI) method. (Carter, 2008).

5 สรุป

ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี หาได้จากการนำวัสดุไปวางไว้ในสภาวะอากาศที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์หรือค่า a_w ต่างๆ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ปล่อยให้วัสดุคายหรือดูดความชื้นจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลกับสภาวะแวดล้อมนั้นๆ แล้ววัดค่าน้ำหนักของความชื้นที่ยังหลงเหลืออยู่ในวัสดุ วิธีการหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุทั้ง 3 วิธี มีข้อดีข้อเสียต่างกัน คือ วิธีสถิติเป็นวิธีที่ประหยัด สามารถทดลองได้ด้วยเครื่องมือง่ายๆ แต่ใช้เวลาในการทดลองนานและไม่เหมาะกับวัสดุที่เสื่อมเสียได้ง่าย เหมาะกับการทดลองกับวัสดุขึ้นเล็กๆ มากกว่าการศึกษาวัสดุจำนวนมาก เนื่องจากข้อจำกัดของความสามารถของสารละลายเกลืออิ่มตัว ส่วนวิธีจลน์เป็นวิธีที่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนขึ้นและมีราคาแพงกว่า แต่มีความแม่นยำสูงและสามารถออกแบบภาชนะทดลองให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามวัสดุที่ต้องการศึกษา วิธีสุดท้ายคือ วิธีการวัดจุดกลั่นตัวของน้ำเป็นวิธีที่รวดเร็วที่สุด

เนื่องจากไม่ต้องรอให้วัสดุเข้าสู่จุดสมดุลกับอากาศแวดล้อม และสามารถศึกษาได้ทั้งไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้น อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่ใช้ก็มีราคาแพงที่สุดเช่นกัน

6 กิตติกรรมประกาศ

คุณูปการจากบทความฉบับนี้ ขอมอบให้คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้เขียน ขอขอบคุณเจ้าของผลงานทุกท่านที่ผู้เขียนใช้อ้างอิงในการเขียนบทความฉบับนี้

7 เอกสารอ้างอิง

- วสันต์ จินดาตา, ทศพร จันทรกระจ่าง, สุเทพ ชุกกลิน และเฉลิม ศิริรักษ์. 2555. การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับยางพาราแผ่น. วิศวกรรมสาร มช. 39(1): 11-21.
- วิไล สนิธิเพิ่มพูน. 2552. ขอฟื้นไอโซเทอมและกลาสทรานส์ชันในอาหารแห้ง. ว.เกษตรนเรศวร 12(1): 11-17.
- สุนทร ไม้ปราณีต. 2548. รายงานการดำเนินโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปี พ.ศ. 2548 เรื่อง วิธีการกึ่งจลนศาสตร์เพื่อหาไอโซเทอมความชื้นของลำไยแห้งทั้งเปลือก. เสนอต่อคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 60 หน้า.
- AhmadiChenarbon, H. and Hasheminia, S. M. 2011. Moisture desorption isotherm of *Lavandula officinalis* L. leaves at three temperature. African Journal of Agricultural Research 6(31): 6473-6476.
- AOAC. 1995. AOAC Official Method 978.18 (Location no. 42.1.03): Water Activity of canned vegetable. In Official Methods of Analysis of the Assoc. of Official Analytical Chemists, 16th ed. VA., USA.: AOAC.
- ASAE Standards. 2003. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASAE D245.5 DEC01. St. Joseph, MI: ASABE.
- Bhattacharya, S. C., Attalage, R. A., Augustus Leon, M., Amur, G. Q., Salam, P. A. and Thanawat, C. 1999. Potential of biomass fuel conservation in selected Asian countries. Energy Conversion & Management 40: 1141-1162.

- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. 1981. Drying cereal grains. Westport, CT: AVI.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. 1992. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, CT: AVI.
- Brunauer, S., L. S. Deming, Deming, W. E. and Teller, D. 1940. On theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society* 62: 1723-1732.
- Carter, B. 2008. Fundamentals of water activity - product characterization using moisture sorption isotherm. Paper presented at the Product Characterization Using Moisture Sorption Isotherm. March 28, 2008. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. 40 pp.
- CERES. 1977. Drying foodstuffs: Techniques, processes, equipment technical guidebook. Leiden, The Netherlands: Backhuys publishers.
- Chen, C. C. and Vance Morey, R. 1989. Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for yellow-dent corn. *Transactions of the ASAE* 23(3): 999-1006.
- Chen, C. 2000. A rapid method to determine the sorption isotherms of peanuts. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 75: 401-408.
- Colley, Z., Fasina, O. O., Bransby, D. and Lee, Y. Y. 2006. Moisture effect on the physical characteristics of switchgrass pellets. *Transactions of the ASABE* 49(6): 1845-1851.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. Oxford. Second edition. England. 414 pp.
- Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* 63: 349-359.
- Fan, J., Siebenmorgen, T. J. and Marks, B. P. 1998. Equilibrium moisture contents of long-and medium-grain rice varieties differing in harvest and drying conditions. ASAE Meeting Paper No. 986015. St. Joseph, MI: ASAE.
- Fasina, O. 2004. Moisture sorption properties of sweetpotato. ASAE/CSAE Meeting Paper No. 406096. St. Joseph, MI: ASAE.
- Garg, D., Larson, R. G. and Maier, D. E. 2006. Equilibrium moisture content (EMC) relationships of three popcorn grain varieties and their incorporation into in-bin grain conditioning strategies. 9th International Working Conference on Stored Product Protection, Campinas, São Paulo, Brazil, 15-18 October 2006.
- Gennadios, A. and Weller, C. L. 1994. Moisture adsorption by grain protein films. *Transactions of the ASAE* 37(2): 535-539.
- Henderson, S. M., Perry, R. L. and Young, J. H. 1997. Principles of Process Engineering, 4th Ed. St. Joseph, MI: ASAE.
- Jain, D. and Pathare, P. B. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*. 89: 289-296.
- Jayas, D. S., Kulkarni, D. A. and White, N. D. G. 1988. Equilibrium moisture-equilibrium relative humidity relationship for canola meal. *Transactions of the ASAE* 31(5): 1585-1588.
- Kacharu, R. P. and Matthes, R. K. 1976. The behavior of rough rice in sorption. *Journal of Agricultural Engineering Research* 21: 405-416.
- Kolloor, R. T., Jayas, D. S. and White, N. D. G. 2006. Adsorption and desorption characteristics of buckwheat. *International Journal of Agriculture & Biology* 8(3): 327-329.
- Labuza, T. P. 1984. Practical aspects of isotherm measurement and use. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- Lin, Y-P., Tsen, J-H. and An-Erl King, V. 2005. Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 68: 249-255.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H. and Buckle, K. A. 1994. Predicting of the sorption behavior of garlic slices. *Drying Technology* 12: 669-683.

- Maskan, M. and Göğüş, F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus alba*). *Journal of Food Engineering* 37: 437-449.
- Menkov, N. D., Durakova, A. G. and Krasteva, A. 2004. Moisture sorption isotherms of walnut flour at several temperatures. *Bioprocess Engineering and Modelling* 18: 201-205.
- Rahman, M. S., Sablani, S. S., Al-Ruzeiqi, M. H. and Guizani, N. 2002. Water adsorption isotherms of freeze-dried tuna meat. *Transactions of the ASAE* 45: 767-772.
- Sharma, G. P., Verma, R. C. and Pathare, P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 71: 282-286.
- Silakul, T. and Jindal, V. K. 2002. Equilibrium moisture content isotherms of the mungbean. *International Journal of Food Properties* 5: 25-35.
- Van den Berg, C. and Bruin, S. 1981. In: *Water activity: influence of food quality*. Ed. By Rockland, L. B. and Stewart, G. F. NY: Academic Press. 85-92 pp.
- Waewsak, J., Chindaruksa, S. and Punlek, C. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. *Thammasat International Journal of Science and Technology* 11: 14-18.
- Yu, L., Mazza, G. and Jayas, D. S. 1999. Moisture sorption characteristics of freeze-dried, osmo-freeze-dried, and osmo-air-dried cherries and blueberries. *Transactions of the ASAE* 42: 141-147.
- Zuritz, C., Paul Singh, R., Moini, S. M. and Henderson, S. M. 1979. Desorption isotherms of rough rice from 10°C to 40°C. *Transactions of the ASAE* 22: 433-436 & 440.