

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ทินกร เพ็งประโคน¹ กระวี ตรีอำนรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำนรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 24 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 7 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างข้าวถูกบรรจุในกล่องปิดผนึกที่เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อใช้ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศให้อยู่ในช่วงร้อยละ 5.32 – 84.34 โดยประมาณใช้ตู้อบลมร้อนจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ข้าวตัวอย่างเข้าสู่สมดุลความชื้นกับอากาศในกล่องจนคงที่ บันทึกค่าน้ำหนักเพื่อคำนวณเป็นความชื้นของข้าว ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวลดลง ซึ่งแตกต่างกับที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลข้าวเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfoest มีความเหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ : ไอโซเทอมความชื้น; ข้าวขาวดอกมะลิ 105; ความชื้นสมดุล; สารละลายเกลืออิ่มตัว

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Moisture Sorption Isotherms of Khao Dawk Mali 105 Paddy

Tinnakorn Pengprakhon¹ Krawee Treeamnu^{1*} Tawarat Treeamnu²
and Nuttapong Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Moo 6 Chumko Pathio Chumphon, 86160, Thailand

Received 24 July 2021; Revised 7 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

The objectives of this research were the determination of sorption isotherms and the comparison of mathematical models to determine a suitable model in different temperature ranges for Khao Dawk Mali 105. This experiment was made by placing samples in containers which were contained saturated salt solutions to control the humidity in the ranges of 5.32 – 84.34 %RH and the hot air oven was used to provide temperature conditions at 25 and 70 °C. The samples were in containers until the mass of samples was constant so the equilibrium between the samples and the surrounding was reached and then the equilibrium moisture content was determined. The experiment found that for the same relative humidity in the air when the temperature increased, the equilibrium moisture content would decrease and for the same temperature in the air when the relative humidity increased, the equilibrium moisture content would increase. Furthermore, the comparison of models by analysis from R-Squared (R^2) and Chi-Square (χ^2) in each temperature found that Henderson model was a suitable model at 25 °C and Chung & Pfoest was a suitable model at 70 °C.

Keywords : Moisture Sorption Isotherms; Khao Dawk Mali 105; Equilibrium Moisture Content; Saturated Salt Solution

** Corresponding Author. Tel.: +664 224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว ถือเป็นธัญพืชอาหารหลักของมนุษย์มาช้านาน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีที่ตั้งทางภูมิศาสตร์เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าวทำให้สามารถผลิตข้าวได้เพียงพอแต่เฉพาะเพื่อบริโภคภายในประเทศเท่านั้น แต่ยังสามารถส่งออกข้าวเพื่อไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้อีกด้วย โดยพันธุ์ข้าวที่มีชื่อเสียงและเป็นอาหารหลักของคนไทยมาอย่างยาวนานคือข้าวหอมมะลิไทย (Khao Dawk Mali 105) ซึ่งเป็นข้าวที่มีเมล็ดมีลักษณะรูปร่างเรียวยาว เมล็ดใส มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ และข้าวที่หุงสุกแล้วจะมีความอ่อนนุ่มมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้เป็นที่นิยมไม่เพียงแต่เฉพาะคนไทยเท่านั้นแต่ยังรวมถึงชาวต่างชาติอีกด้วย โดยในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวสูงถึง 1.19 ล้านตัน ซึ่งมีมูลค่ากว่า 40,999 ล้านบาท [1] ซึ่งสามารถสร้างรายได้มากมายให้แก่เกษตรกรไทยและประเทศไทย ดังนั้น ข้าวจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญต่อประเทศไทยอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วผลผลิตข้าวหลังการเก็บเกี่ยวนั้นจะมีค่าความชื้นที่สูง ซึ่งความชื้นนี้ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวที่เร็วขึ้น อันเป็นสาเหตุให้ราคาจำหน่ายข้าวลดลงอีกด้วย ดังนั้นข้าวภายหลังจากการเก็บเกี่ยวจะต้องถูกนำมาลดความชื้นลงก่อนทำการเก็บรักษา โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษามีค่าประมาณร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก [2] การลดความชื้นในข้าวที่สำคัญและได้รับความนิยมนมากที่สุดในระดับอุตสาหกรรมคือกระบวนการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งเพราะสามารถทำงานได้ทุกสภาวะอากาศและยังสามารถควบคุมความชื้นหลังการอบแห้งให้ได้ค่าตามที่ต้องการได้

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลี่ยนนั้นมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อัตราการป้อนข้าว ขนาดของห้องอบแห้ง อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง [4] และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการ

ประเมินกระบวนการอบแห้งปัจจัยหนึ่ง ค่าความชื้นสมดุล คือปริมาณความชื้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อมขณะนั้น [5] โดยค่าความชื้นสมดุลนี้เป็นส่วนหนึ่งของไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium Relative Humidity) ที่อุณหภูมินั้น ๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่ลดลงที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศเรียกว่า ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) และความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศขึ้นเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) [6] โดยไอโซเทอมความชื้นนี้ถูกใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้ง และการเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาข้าวได้อีกด้วย [7] จากการศึกษางานวิจัยไอโซเทอมความชื้นของวัสดุต่าง ๆ เช่น ไอโซเทอมของใบกระวาน [8] การหาไอโซเทอมของใบสะระแหน่ [9] การหาไอโซเทอมของเมล็ดผักโขม [10] และการหาไอโซเทอมของข้าวฟ่างไข่มุก [11] พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าและอธิบายไอโซเทอมความชื้นของวัสดุ ซึ่งความแม่นยำในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิและชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป [9] โดยพิจารณาความแม่นยำจากค่าทางสถิติที่สำคัญ ๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงโคกำลังสอง งานวิจัยในปัจจุบันนักวิจัยได้ทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวชนิดต่าง ๆ หลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวสายพันธุ์ Lido Cultivar [12] หรือจะเป็นการหาไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์ Kaybonnet และ Cypress รวมไปถึงข้าวสายพันธุ์ Bengal [13] และการหาไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์

Baldo [14] ปัจจุบันยังไม่พบรายงานวิจัยการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเมล็ดยาวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ของประเทศไทย มีเพียงการหาไอโซเทอมความชื้นของผลิตภัณฑ์จากข้าวหอมมะลิ ได้แก่ ข้าวพอง (Rice Cracker) [15] และ ฟลาวร์ข้าว (Rice Flours) [16] ซึ่งไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนากระบวนการผลิตโดยเฉพาะกระบวนการอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิต

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายและเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สภาวะการเก็บรักษาทั่วไป และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและสภาวะการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ซึ่งเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเป็นเวลา 8 เดือน จากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่ใช้ในการทดลอง ได้ถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ ข้าวขึ้นสำหรับการหาไอโซเทอมการคายความชื้น ถูกเตรียมโดยนำข้าวเปลือกไปคั้นความชื้นกลับด้วยการสเปรย์น้ำและคลุกเคล้าให้ทั่วกัน ก่อนนำไปบรรจุในถุงทึบแสงปิดสนิท จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ในที่อุณหภูมิต่ำ (ตู้เย็น) เพื่อให้น้ำซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวและกลายเป็นข้าวขึ้น [18], [19] และอีกกลุ่มคือ ข้าวแห้งสำหรับการหาไอโซเทอมการดูดความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยการนำข้าวเปลือกไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20]

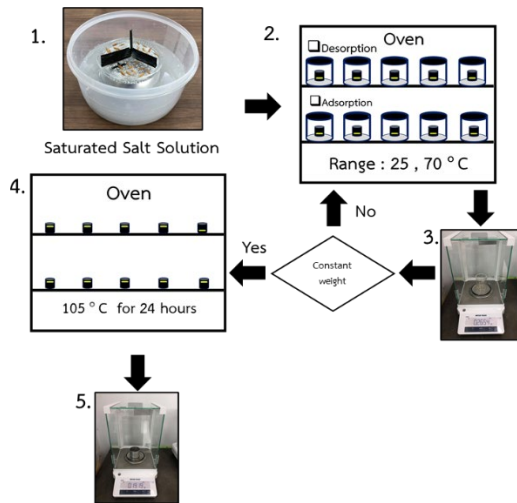
จากนั้น แบ่งข้าวออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 เม็ด บรรจุในภาชนะทนความร้อนแบบโปร่งแสงมีฝาปิดสนิท ปริมาตร 1,360 ลูกบาศก์เซนติเมตร [21] ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Solution) สำหรับควบคุมสภาวะความชื้นภายในกล่อง ซึ่งสารละลายเกลืออิ่มตัวมีคุณสมบัติในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายได้ โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอบ ๆ สารละลายด้วย สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด สำหรับสร้างสภาวะความชื้นดังตารางที่ 1 ดัดแปลงจาก [9], [17]

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว [9], [17]

Salt solution	25°C	70°C
KOH	8.23	5.32
MgCl ₂	32.78	27.77
Mg(NO ₃) ₂	52.89	-
NaCl	75.29	75.06
KCl	84.34	79.49

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

จากรูปที่ 1 บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Solutions) ปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังหมายเลข 1 ในภาชนะแล้วปิดให้สนิท นำภาชนะดังกล่าวใส่ในตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert เพื่อจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 สภาวะด้วยกันคือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ดังหมายเลข 2 ตัวอย่างข้าวที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักทุกวัน ด้วยเครื่อง Analytical Balance ME204/M ของบริษัท Mettler Toledo (ความละเอียด 0.0001 กรัม) ดังหมายเลข 3 โดยก่อนชั่งแต่ละครั้งจะรอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลง



รูปที่ 1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

จนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง และจะซึ่งจนกว่าน้ำหนักของข้าวจะคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 กรัม ใช้เวลาประมาณ 14-18 วัน) ซึ่งหมายถึงความชื้นในข้าวถึงจุดสมดุลแล้ว หลังจากนั้นข้าวจะถูกนำมาหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) โดยการนำไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ

105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20] ดังหมายเลข 4 ต่อจากนั้นจึงนำข้าวแห้งมาชั่งน้ำหนัก ดังหมายเลข 5 และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) ดังสมการที่ (1) ดัดแปลงจาก [22]

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

โดยที่

M_d = ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

w = น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (กรัม)

d = น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง (กรัม)

สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวที่ได้จากการทดลองนั้น จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 6 แบบ สำหรับใช้ทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

Model	Equation	Reference
GAB	$EMC = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot RH}{(1 - B \cdot RH)(1 - B \cdot RH + B \cdot C \cdot RH)}$	[23]
Oswin	$EMC = A \left[\frac{RH}{(1 - RH)} \right]^B$	[24]
Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-AT} \right]^{\frac{1}{B}}$	[25]
Henderson & Thompson	$EMC = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[26]
Chung & Pfof	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[\frac{(T + B) \ln RH}{-C} \right]$	[26]
Halsey	$EMC = \left[\frac{-A}{T \ln(RH)} \right]^{\frac{1}{B}}$	[27]

โดยที่

EMC = ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุแบบมาตรฐาน
แห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

A, B, C และ D = ค่าคงที่ของแบบจำลอง

T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

RH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ทศนิยม)

ประเมินค่าความแม่นยำของสมการในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ว่าสมการใดมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับช่วงอุณหภูมินั้นโดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงไคกำลังสอง ซึ่งสมการทางสถิติดังกล่าวมีดังนี้ [28], [29]

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N - n} \quad (3)$$

โดยที่

$M_{e,ex}$ = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

$M_{e,pred}$ = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

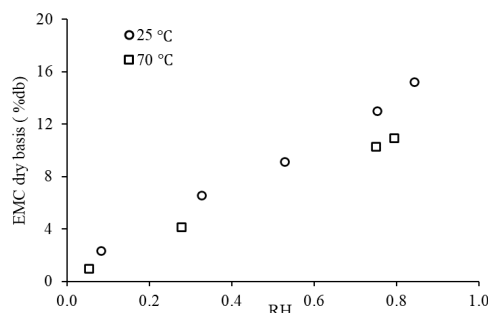
N = จำนวนค่าที่สังเกต

n = จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

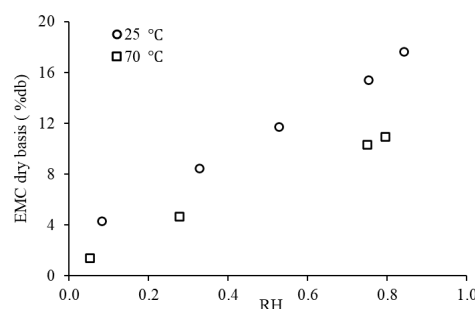
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการทดลองหาไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 5.32 – 84.34 ได้

ความสัมพันธ์ของค่าไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการคายความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 และ 3 พบว่าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ของข้าวลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำในข้าวเปลือกได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้น้ำบางส่วนระเหยออกไปสู่อากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ดังกล่าว สอดคล้องกับทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ

ไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) [30] และยังพบอีกว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นในกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นเนื่องจากเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอของไอน้ำในอากาศสูงขึ้น ทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการถ่ายโอนเข้าสู่ข้าวเปลือกที่น้ำมีความดันไอน้ำน้อยกว่าเพิ่มมากขึ้น และสำหรับกรณีไอโซเทอมการคายความชื้นเมื่อความดันไอของไอน้ำในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้น้ำในข้าวเปลือกที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่าถ่ายโอนออก

สู่อากาศรอบนอกได้ลดลง

จากกราฟไอโซเทอมความชื้นที่แสดงในรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้นั้นเป็นรูปตัวเอส (S-Sigmoid) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของไอโซเทอมความชื้นสำหรับวัสดุทางการเกษตร [31]

จากผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 2 และ 3 ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น โดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 2 ด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติ ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงไคกำลังสอง ในแต่ละแบบจำลองได้ดังตารางที่ 3

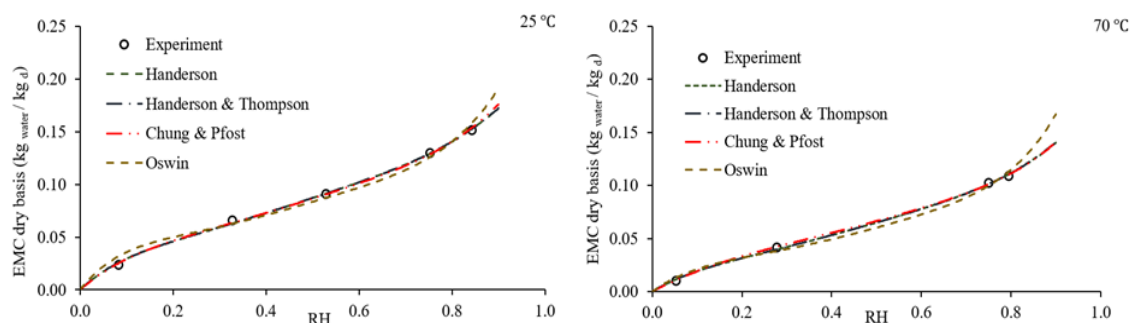
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ และค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Model	Adsorption			Desorption		
	Constant	25 °C	70 °C	Constant	25 °C	70 °C
GAB	A	0.027	0.017	A	-0.108	0.017
	B	0.976	1.071	B	-4.359	1.067
	C	-4.073	-4.860	C	1.123	-4.527
	R ²	0.950	0.978	R ²	0.999	0.974
	χ^2	0.00131808	0.00027773	χ^2	0.00005253	0.00033150
Oswin	A	0.083	0.060	A	0.106	0.064
	B	0.379	0.467	B	0.316	0.415
	R ²	0.997	0.998	R ²	0.998	0.998
	χ^2	0.00005227	0.00003019	χ^2	0.00004041	0.00002850
Henderson	A	2.011	0.692	A	3.097	1.108
	B	1.754	1.553	B	2.149	1.766
	R ²	1.000	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00000724	0.00000623	χ^2	0.00000267	0.00000546
Henderson & Thompson	A	1.925	0.682	A	2.962	1.093
	B	1.110	0.996	B	1.141	1.000
	C	1.754	1.553	C	2.149	1.766
	R ²	0.997	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00001448	0.00000623	χ^2	0.00000534	0.00000546
Chung & Pfoest	A	20.988	25.323	A	20.029	26.559
	B	3.610	-32.943	B	-22.431	-35.495
	C	121.627	138.406	C	15.719	149.478
	R ²	1.000	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00001017	0.00000174	χ^2	0.00002739	0.00000205
Halsey	A	0.112	0.676	A	0.081	0.466
	B	1.980	1.458	B	2.343	1.628
	R ²	0.991	0.992	R ²	0.994	0.993
	χ^2	0.00025309	0.00009211	χ^2	0.00024532	0.00009261

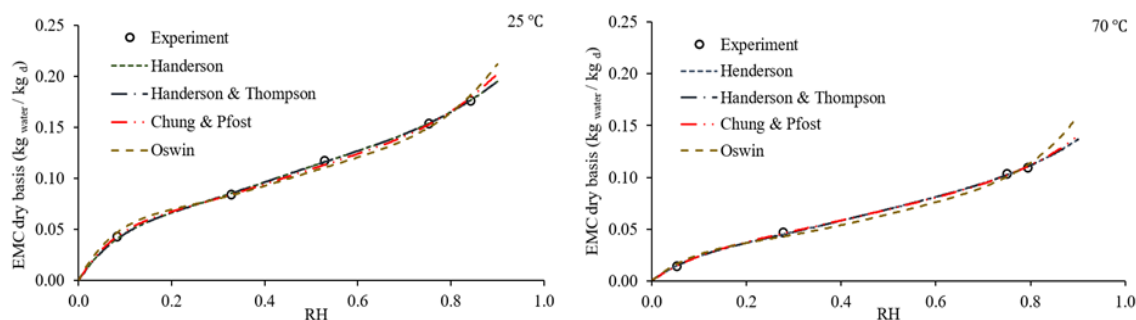
จากการแก้สมการหาค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นทั้ง 6 แบบคือ GAB, Oswin, Henderson, Henderson & Thompson, Chung & Pfof และ Halsey พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองจริง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงไคกำลังสอง ในแต่ละแบบจำลอง โดยพบว่า กรณิไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000724 และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เท่ากับ 1.000 และมีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000174 และที่กรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000267 และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000205

จากตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดทั้ง 4 แบบ ของแต่ละอุณหภูมิได้ถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเทียบกับผลการทดลองจริงทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ได้ดัง รูปที่ 4 - 5



รูปที่ 4 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



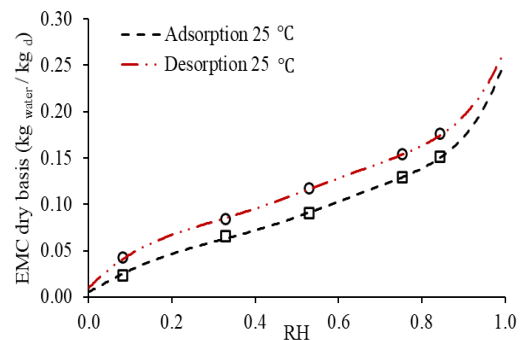
รูปที่ 5 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4 - 5 พบว่าเกิดฮิสเทอรีซิส (Sorption Hysteresis) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความแตกต่างของค่าความชื้นสมดุลระหว่างพฤติกรรมไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุชนิดเดียวกันที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดจากผลของแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุที่มีรูพรุน โดยที่ไอโซเทอมการคายความชื้นมีค่าความชื้นสมดุลที่สูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่สภาวะเริ่มต้นของไอโซเทอมการคายความชื้น รูพรุนในวัสดุจะเต็มไปด้วยน้ำที่ถูกดึงดูดด้วยแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุ ซึ่งการที่น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไปได้ก็ต่อเมื่อความดันไอของน้ำในรูพรุนสูงกว่าความดันไอของอากาศรอบ ๆ วัสดุ ซึ่งแตกต่างจากกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ในสภาวะเริ่มต้นรูพรุนในวัสดุนั้นว่างเปล่า ไอโซเทอมการคายความชื้นนั้นน้ำในรูพรุนของวัสดุจะระเหยออกมาได้ยากกว่ามาก เนื่องจากมีแรงแคปิลลารีดึงดูดเอาไว้จึงทำให้ในสภาวะสมดุลค่าความชื้นสมดุลของวัสดุในไอโซเทอมการคายความชื้นจึงสูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้น [9]

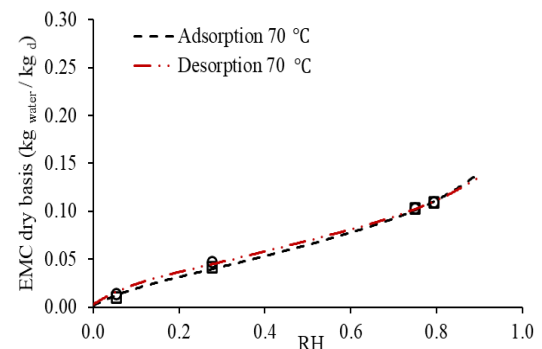
จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ที่ได้จากตารางที่ 3 มาใช้ในการหาค่าไอโซเทอมความชื้นทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นในแต่ละอุณหภูมิ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส ของแต่ละอุณหภูมิพร้อมกับแสดงผลการทดลองจริงประกอบ ทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นได้ผลดังรูปที่ 6 และ 7

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดฮิสเทอรีซิสลดลง สังเกตได้จากช่องว่างระหว่างไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำภายในรูพรุนของวัสดุที่ถูกดึงดูดไว้ด้วยแรงแคปิลลารี

ได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความดันไอของน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความดันของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกมาจากวัสดุเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุลดลง จากผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [11], [32]-[35] ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

4. สรุป

จากการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับร้อยละ 5.32 – 84.34 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อค่าไอโซเทอมความชื้น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

ค่าความชื้นสมดุลลดลงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน และ จากการแก้สมการหาค่าคงที่ และ หาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงไคกำลังสอง สำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดฮีสเทอรีซิส โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดฮีสเทอรีซิสลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association. "Rice Export Quantity and Value : 2020." http://www.thairiceexporters.or.th/statistic_2020.html (accessed 20 May 2021)
- [2] D. W. Hall, *Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas* (no. 90). Food & Agriculture Org., 1970.
- [3] Department of International Trade Promotion. "12th The Rice Trader World Rice Conference." https://www.ditp.go.th/korea/ewt_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer (accessed 20 May 2021).
- [4] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2204-2212, 2010.
- [5] U. Shivhare, S. Arora, J. Ahmed, and G. Raghavan, "Moisture adsorption isotherms for mushroom," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 133-137, 2004.
- [6] A. Al-Muhtaseb, W. McMinn, and T. Magee, "Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review," *Food and bioproducts processing*, vol. 80, no. 2, pp. 118-128, 2002.
- [7] O. Oyelade, T. Tunde-Akintunde, J. Igbeke, M. Oke, and O. Raji, "Modelling moisture sorption isotherms for maize flour," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 2, pp. 179-185, 2008.
- [8] N. Ouafi, H. Moghrani, N. Benaouada, N. Yassaa, R. Maachi, and R. Younsi, "Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (*Laurus nobilis*)," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 17, no. 4, pp. 759-772, 2015.
- [9] S. P. C. Andrade and O. Hensel, "Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.)," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 139-145, 2013.
- [10] A. M. Pagano and R. H. Mascheroni, "Sorption isotherms for amaranth grains," *Journal of Food Engineering*, vol. 67, no. 4, pp. 441-450, 2005.

- [11] A. L. D. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. H. De Oliveira, C. F. Gomes, and F. M. Botelho, "Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain," *International journal of food science & technology*, vol. 45, no. 4, pp. 828-838, 2010.
- [12] A. Iguaz and P. Virseda, "Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures," *Journal of Food Engineering*, vol. 79, no. 3, pp. 794-802, 2007.
- [13] J. Fan, T. Siebenmorgen, and B. Marks, "Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, no. 3, p. 245, 2000.
- [14] H. Toğrul and N. Arslan, "Moisture sorption behaviour and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity," *Biosystems Engineering*, vol. 95, no. 2, pp. 181-195, 2006.
- [15] U. Siripatrawan and P. Jantawat, "Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models," *Food Science and Technology International*, vol. 12, no. 6, pp. 459-465, 2006.
- [16] T. Suwonsichon, P. Pongpangan, P. Chompreeda, and V. Haruthaithanasan, "Application of mathematical models to predict moisture sorption isotherm of rice flours," in *Proceedings of the 39th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries, Agro-Industry*, Bangkok (Thailand), 2001, Bangkok (Thailand): Ministry of University Affairs.
- [17] L. Greenspan, "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions," *Journal of research of the national bureau of standards*, vol. 81, no. 1, pp. 89-96, 1977.
- [18] T. Abe and T. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, no. 4, pp. 289-297, 1997.
- [19] N. Saelim, "Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique," Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2017.
- [20] O. AOAC, "Official Methods of Analysis," *Association of Official Analytical Chemists*, Arlington, VA, 1990.
- [21] G. Bingol, B. Prakash, and Z. Pan, "Dynamic vapor sorption isotherms of medium grain rice varieties," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 156-163, 2012.
- [22] A. K. Bejar, N. B. Mihoubi, and N. Kechaou, "Moisture sorption isotherms—Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves," *Food Chemistry*, vol. 132, no. 4, pp. 1728-1735, 2012.

- [23] S. Lahsasni, M. Kouhila, and M. Mahrouz, "Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 2, pp. 249-261, 2004.
- [24] F. Román and O. Hensel, "Sorption isotherms of celery leaves (*Apium graveolens* var. *secalinum*)," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 12, no. 3-4, pp. 137-141, 2010.
- [25] M. Barrozo, A. Silva, and D. Oliveira, "The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 1, pp. 65-70, 2008.
- [26] D. Cordeiro, G. Raghavan, and W. Oliveira, "Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves," *Biosystems Engineering*, vol. 94, no. 2, pp. 221-228, 2006.
- [27] A. M. Goula, T. D. Karapantsios, D. S. Achilias, and K. G. Adamopoulos, "Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 73-83, 2008.
- [28] D. Jain and P. B. Pathare, "Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices," *Biosystems Engineering*, vol. 89, no. 3, pp. 289-296, 2004.
- [29] G. Sharma, R. Verma, and P. Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," *Journal of food engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 282-286, 2005.
- [30] M. Hossain, B. Bala, M. Hossain, and M. Mondol, "Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 103-107, 2001.
- [31] S. Brunauer, L. S. Deming, W. E. Deming, and E. Teller, "On a theory of the van der Waals adsorption of gases," *Journal of the American Chemical society*, vol. 62, no. 7, pp. 1723-1732, 1940.
- [32] N. Aviara, O. Ajibola, O. Aregbesola, and M. Adediji, "Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50 C," *Journal of stored products research*, vol. 42, no. 3, pp. 290-301, 2006.
- [33] R. C. Campos, P. C. Corrêa, L. S. Fernandes, F. M. Baptestini, C. F. Costa, and J. D. Bustos-Vanegas, "Bean grain hysteresis with induced mechanical damage," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 10, pp. 930-935, 2016.
- [34] A. L. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. de Oliveira, O. Resende, and M. Mauad, "Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 8, pp. 751-756, 2016.

- [35] S. J. F. d. Souza, A. I. Alves, É. N. R. Vieira, J. A. G. Vieira, A. M. Ramos, and J. Telis-Romero, "Study of thermodynamic water properties and moisture sorption hysteresis of mango skin," *Food Science and Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 157-166, 2015.