

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า

The Study of Mathematical Equilibrium Moisture Content for Banana (*Musa sapientum* L.)

เพ็ญพร นิมนวล¹ นภาลัย เหล่ามะลอ² และสรารวุฒิ แนนเนียร^{3*}

Phenphorn Nimnuan¹ Napalai Laomalaw² and Sarawut Nabnean^{3*}

¹สาขาวิชาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

³สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹Division of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

²Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

³Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

*Email: n_sarawut@hotmail.com

Received: February 01, 2022; Revised: March 31, 2022; Accepted: April 22, 2022

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า สำหรับการหาค่าความชื้นสมดุลนั้น ผู้วิจัยได้ทำการสร้างอุปกรณ์สำหรับหาความชื้นสมดุล จำนวน 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยตู้อบไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ ภายในตู้ที่ติดตั้งขดลวดให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาด 1,500 วัตต์และกล่องบรรจุตัวอย่างที่มีฝาปิดป้องกันอากาศไหลผ่านจำนวน 6 กล่อง ภายในกล่องบรรจุตัวอย่างแต่ละกล่องบรรจุสารละลายอิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในกล่อง อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลนี้เท่ากับ 30°C 40°C และ 50°C กับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, a_w) แปรค่าระหว่าง 0.11-0.97 เส้นกราฟขอบชั้นไอโซเทอมที่ได้มีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี สุดท้ายผู้วิจัยได้หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตีตามแบบจำลองขอบชั้นไอโซเทอม 5 แบบจำลอง แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง modified GAB มีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.99 และมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 8.17% และ 1.58% ตามลำดับ

คำสำคัญ : ความชื้นสมดุล, กล้วยน้ำว้า, ความชื้นสัมพัทธ์, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

In this study, mathematic models of equilibrium moisture content of banana (*Musa sapientum* L.) were investigated. To determine the equilibrium moisture content, three sets of equipment was constructed. Each set consist of a controllable temperature hot air chamber. The hot air chamber equipped with a 1,500 W electrical heater and six sample airtight plastic boxes. In each sample box, saturated salt solution is used to control relative humidity. After that the equilibrium moisture content was determined

using standard oven method. The air temperature in this study are 30°C, 40°C, and 50°C and water activity is in the range of 0.11-0.97. The sorption isotherm curves obtained displayed an inverse relationship with temperature at constant water activity. Finally, five selected sorption isotherm model were tested to fit the experiment. The results shown that the modified GAB model fitted the best to the experimental data of banana with R^2 of 0.99, and the value of RMSD and MBD are 8.17% and 1.58%, respectively.

Keywords : Equilibrium moisture content, *Musa sapientum* L., Relative humidity, Mathematic models

1. บทนำ

ภูมิภาคตะวันตกเป็นแหล่งผลิตพืชผลทางการเกษตรที่สำคัญ โดยเฉพาะประเทศไทยมีการผลิตพืชผลทางการเกษตรจำนวนมาก ทั้งผลไม้ ผัก และสมุนไพร โดยผลิตผลที่ได้จะมีทั้งการบริโภคผลสดและผลิตผลที่แปรรูป โดยกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การแช่แข็ง การอบแห้ง การบรรจุกระป๋อง เป็นต้น สำหรับการแปรรูปด้วยวิธีการอบแห้งนั้นมีการผลิตในระดับครัวเรือนและการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตผลไม้อบแห้งขนาดใหญ่หลายแห่งในแต่ละภูมิภาคของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมการแปรรูปกล้วยอบแห้ง ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก [1] เป็นต้น

กล้วยน้ำว้ามีการปลูกทุกพื้นที่ของประเทศไทย เนื่องจากสามารถปลูกง่าย และบริโภคง่าย ไม่ว่าจะบริโภคผลสุก หรือแม้กระทั่งการแปรรูป โดยเฉพาะการแปรรูปเป็นกล้วยตากแห้ง ซึ่งเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากสำหรับคนไทย ซึ่งเป็นการนำเอากล้วยสุกกอมนำมาปอกเปลือกและนำไปตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แต่สำหรับการขายกล้วยตาก และการส่งออกในปัจจุบันจำเป็นต้องทำให้กล้วยตากมีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องทำให้กล้วยตากที่ได้มีคุณภาพ เนื่องจากการตากแห้งตามธรรมชาตินั้นอาจปนเปื้อนฝุ่นละออง และมีแมลงมารบกวนรวมทั้งการเปียกเนื่องจากฝน เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นเชื้อราที่เป็นอันตรายก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ เช่น อะฟลาทอกซิน (Aflatoxins) [2-3] เป็นต้น ผู้ผลิตในปัจจุบันจึงหันมาใช้เครื่องอบแห้งกันเป็นจำนวนมาก

กระบวนการอบแห้ง นอกจากจะต้องทำการควบคุมคุณภาพแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ด้วย ทั้งนี้เพราะการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานสูง โดยเฉพาะการอบแห้งกล้วย ซึ่งทำให้มีผลต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องอบแห้ง หรือแม้แต่การออกแบบเครื่องอบแห้งให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและใช้พลังงานน้อยสุด จำเป็นต้องเข้าใจกลไกของการอบแห้งและทราบคุณสมบัติการดูดและคายความชื้นของผลิตภัณฑ์

ผักและผลไม้โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในประเภทไฮโกรสโคปิก (hygroscopic materials) กล่าวคือ สามารถดูดและคายความชื้นได้ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ หรือวัสดุทางการเกษตรประเภทผักและผลไม้ไปวางในบริเวณที่มีสภาวะของอากาศซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดให้ ผลิตภัณฑ์จะมีการดูดหรือคายความชื้นจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล โดยความชื้นนี้เรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) [4-6] ในกรณีความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าสูง ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นี้จะคายความชื้นให้กับอากาศบริเวณโดยรอบผลิตภัณฑ์ ในทางกลับกันถ้าผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นสมดุล ผลิตภัณฑ์ก็จะดูดความชื้นจากอากาศเข้าไป ดังนั้นความชื้นสมดุลจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดสภาวะของอากาศในกระบวนการอบแห้ง เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุด และมีประโยชน์ต่อการจัดทำบรรจุภัณฑ์เพื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งให้มีอายุยาวนานยิ่งขึ้น

ความชื้นสมดุลของผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่จะขึ้นกับชนิดของผลิตผล อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องหาโดยวิธีการทดลอง ดังนั้นในประเทศต่าง ๆ จึงได้มีการหาความชื้นสมดุลของผลิตผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ซึ่งในกรณีประเทศไทย ข้อมูลความชื้นสมดุลของผลิตผลทางการเกษตรในประเทศไทยยังมีค่อนข้างจำกัด ซึ่งใน

กรณีกล้วยน้ำว้าเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่มีการผลิตเพื่อบริโภครวมถึงการส่งออกไปยังประเทศต่าง ๆ หลายประเทศทั่วโลก ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองของความชื้นสมมูลของกล้วยน้ำว้า โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมมูลจำนวน 5 แบบจำลอง ที่ได้มีการพัฒนามาจากแบบจำลองแบบเก่า และยังใช้งานสำหรับการหาความชื้นสมมูลของผลิตผลทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ [7-9] ทั้งนี้เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้ในงานวิจัยด้านการอบแห้งและการเก็บรักษากล้วยน้ำว้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความชื้นสมมูล

วัสดุขึ้นเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยของแข็งและน้ำที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งผลิตผลทางการเกษตรเป็นวัสดุประเภทไฮโกรสโคปิก (hygroscopic) คือสามารถดูดและคายความชื้นจากอากาศบริเวณโดยรอบได้ โดยการถ่ายเทความชื้นระหว่างผลิตผลทางการเกษตรกับอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นค่าหนึ่ง จนกระทั่งมีความดันไอ (vapor pressure) ของวัสดุทางการเกษตรเท่ากับค่าความดันไอของอากาศ ผลิตผลทางการเกษตรนี้จึงจะหยุดการถ่ายเทความชื้น เราจึงเรียกสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อมนี้ว่า ความชื้นสมมูล

สำหรับทางเทคโนโลยีการอาหารจะบอกปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุหรือผลิตผลทางการเกษตรด้วยค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity) ซึ่งเป็นค่าของอัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในวัสดุหรือผลิตผลทางการเกษตรต่อความดันไอน้ำของน้ำอิสระ (free water) หรือน้ำที่อยู่ในตัววัสดุ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [10]

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

โดยที่ a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี

P คือ ความดันไอน้ำในวัสดุขึ้น [Pa]

P_0 คือ ความดันไอน้ำของน้ำอิสระ [Pa]

การนำผลิตผลทางการเกษตรหรือวัสดุขึ้นไปไว้ในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (rh) และมีอุณหภูมิ (T) จะ

ทำให้วัสดุมีการกระตุ้นในการดูดหรือคายความชื้นจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [11] ดังสมการที่ (2)

$$a_w = \frac{rh}{100} \quad (2)$$

โดยที่ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [%]

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเป็นค่าความดันไอน้ำในผลิตผลทางการเกษตรหรือวัสดุทางการเกษตรเทียบกับความดันไอน้ำของน้ำอิสระ เป็นสาเหตุให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์และชีวเคมีของวัสดุทางการเกษตร ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ แบคทีเรีย และรา ทำให้ไม่สามารถเก็บผลิตผลทางการเกษตรในรูปแบบผลิตผลสดได้ในสภาวะอากาศปกติ โดยทั่วไปความชื้นสมมูลของวัสดุทางการเกษตรมีความสัมพันธ์กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมมูลกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีคือกราฟขอบชั้นไอโซเทอม (sorption isotherm) ซึ่งจะมีลักษณะกราฟเป็นรูปซิกมอยด์ (sigmoid)

สำหรับกล้วยน้ำว้าที่นำมาใช้ในการทดลองหาค่าความชื้นสมมูลจะใช้กล้วยน้ำว้าสายพันธุ์มะลิทองโดยการเตรียมตัวอย่างจะใช้กล้วยสุกมาทำการปอกเปลือกออกโดยใช้กล้วยทั้งลูก และทำการทดสอบหาค่าความชื้นสมมูล ซึ่งกล้วยน้ำว้าที่นำมาทดลองนี้จะมีค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นอยู่ที่ 77% (wb.)

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าความชื้นสมมูลของกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีการแบบวิธีสถิติกส์ (statics method) กล่าวคือ การนำผลิตภัณฑมาใส่ในภาชนะในระบบปิด ที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระยะเวลาหนึ่งจนผลิตภัณฑนั้นเกิดสภาวะสมดุลคือมีความชื้นของผลิตภัณฑคงที่ซึ่งวิธีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระบบปิดนั้นจะใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว และนำไปใส่ในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิเพื่อใช้ในการสร้างสภาวะอากาศในรูปแบบต่าง ๆ

2.2 สารละลายเกลืออิ่มตัว

การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถทำได้โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันออกไปเพื่อใช้สร้างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วง 0-100% ซึ่งสามารถควบคุมความชื้นได้ดีกว่าสารละลายกรดหรือค่าวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการรวบรวมข้อมูลสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้ได้ช่วงกว้างมากที่สุด (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของสารละลายเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ [12]

ชนิดสารละลาย	ค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิ		
	30°C	40°C	50°C
เกลือ			
LiCl.H ₂ O	0.118	0.116	0.114
MgCl ₂ .6H ₂ O	0.328	0.321	0.314
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	0.525	0.498	0.463
NaCl	0.756	0.754	0.745
KNO ₃	0.907	0.879	0.850
K ₂ SO ₄	0.966	0.962	0.958

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขอบชั้นไอโซเทอมจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์กับค่าวอเตอร์แอกติวิตีตามอุณหภูมิที่กำหนด [13] โดยผู้วิจัยได้ทำการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าขอบชั้นไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้าดังตารางที่ 2

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของกล้วยน้ำว้า ที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี กล้วยน้ำว้าที่นำมาใช้ในการทดลองหาค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้กล้วยน้ำว้าสายพันธุ์

มะลิองโดยการเตรียมตัวอย่างที่ใช้กล้วยสุกมาทำการลอกเปลือกออกและทำการทดสอบหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งกล้วยน้ำว้าที่นำมาทดลองนี้จะมีค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นอยู่ที่ 77% (wb.) โดยการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยวิธีการทดลองแบบสแตติกส์ ในการทดลองใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจำนวน 6 ชนิด ดังตารางที่ 1 โดยเทสารละลายลงในกล่องพลาสติกแบบซูปเปอร์ล็อก (super lock) และใช้ตู้อบไฟฟ้าเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C 40°C และ 50°C จำนวน 3 ตู้ สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ใช้เพื่อให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการศึกษากระบวนการอบแห้งต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิ จะได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 18 ค่า



รูปที่ 1 กล่องพลาสติกแบบซูปเปอร์ล็อกบรรจุสารละลายเกลือสำหรับใส่กล้วยน้ำว้าในการทดลอง



รูปที่ 2 ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทดลอง

สำหรับการทดลองผู้วิจัยได้นำเกลือแต่ละชนิดมาละลายน้ำในบีกเกอร์โดยให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้า (hot plate) ตามอุณหภูมิที่กำหนดที่ 30°C 40°C และ 50°C ตามลำดับ หลังจากที่ได้สารละลายเกลืออิ่มตัวตามอุณหภูมิดังกล่าว จึงนำสารละลายเกลือบรรจุลงกล่องพลาสติกแบบซูปเปอร์ล็อก

และนำมวลตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือกล้วยน้ำว้า ที่ปอกเปลือกออกแล้วนำมาวางลงบนตะแกรงที่อยู่เหนือชั้นสารละลายเกลือ ไม่ให้มวลตัวอย่างสัมผัสสารละลายเกลือ ที่สำคัญควรระมัดระวังไม่ให้มวลตัวอย่างสัมผัสสารละลายเกลือ หลังจากนั้นจึงทำการปิดฝากล่องพลาสติกซูปเปอร์ล็อกเพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปยังภายในกล่องได้ และนำกล่องพลาสติกนี้เข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิให้ตรงกับสารละลายเกลืออิมตัวที่อุณหภูมินั้น ๆ และปล่อยให้มวล

ตัวอย่างเกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลหรือมวลของกล้วยไม่ลดลงจึงหยุดการทดลอง ซึ่งใช้ระยะเวลา 3 สัปดาห์ หลังจากนั้นนำมวลตัวอย่างเข้าไปทำการอบแห้งที่ตู้อบแห้งอุณหภูมิ 103°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [14] เพื่อหามวลแห้งสำหรับใช้คำนวณความชื้นสมดุลต่อไป โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองการหาค่าความชื้นสมดุลซ้ำจำนวน 3 รอบ

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

ลำดับที่	แบบจำลอง	สมการทางคณิตศาสตร์	เอกสารอ้างอิง
1	Modified Oswin Equation	$M_e = (A + BT) \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^C$	[15]
2	Modified Handerson Equation	$M_e = \left[\frac{-\ln(1 - a_w)}{A(T + B)} \right]^{1/C}$	[16]
3	Modified Chung-Pfost Equation	$M_e = -\frac{1}{C} \ln \left[\frac{-(T + B) \ln(a_w)}{A} \right]$	[17]
4	Modified Halsey Equation	$M_e = \left[-\frac{\ln(a_w)}{\exp(A + BT)} \right]^{-1/C}$	[18]
5	Modified GAB	$M_e = \frac{AB \left(\frac{C}{T} \right) a_w}{(1 - Ba_w)(1 - Ba_w + \frac{C}{T} Ba_w)}$	[19]

หมายเหตุ : M_e คือ ความชื้นสมดุล [%, db] T คือ อุณหภูมิ [K], a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี [-], A, B, C คือ ค่าคงที่ของสมการ หรือค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองในตารางที่ 2 ใช้วิธีการนำค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้ คือ 30°C 40°C และ 50°C โดยใช้วิธีการทางสถิติ ซึ่งการคำนวณหาค่าคงที่ของสมการสามารถหาได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root Mean Square Difference, RMSD, %) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference, MBD, %) สามารถหาได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)})^2} \quad (3)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)})^2}{N}} \quad (4)$$

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)})}{\sum_{i=1}^N M_{eq(meas,i)}} \quad (5)$$

เมื่อ $M_{eq(mod,i)}$ คือ ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าจากแบบจำลองของข้อมูลที่ i [%, db]

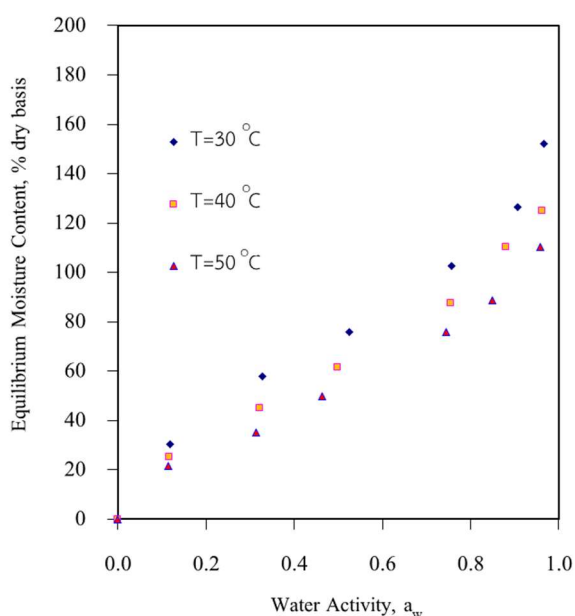
$M_{eq(meas,i)}$ คือ ความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าจากการทดลองของข้อมูลที่ i [%, db]

N คือ จำนวนข้อมูล

i คือ ลำดับที่ของข้อมูล

4. ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองการหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C โดยมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ในช่วง 11%-97% หรือค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.11 – 0.97 ดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีลักษณะของกราฟเป็นแบบซิกมอยด์ โดยที่กราฟจะมีลักษณะเรียงลำดับเป็นเส้นไอโซเทอมโดยเรียงลำดับของอุณหภูมิต่ำอยู่เส้นบนลงมาถึงเส้นล่างจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าลักษณะของกราฟซอบชันไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้ามีลักษณะของกราฟสอดคล้องกับซอบชันไอโซเทอมของผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไป [20]



รูปที่ 3 ซอบชันไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้า

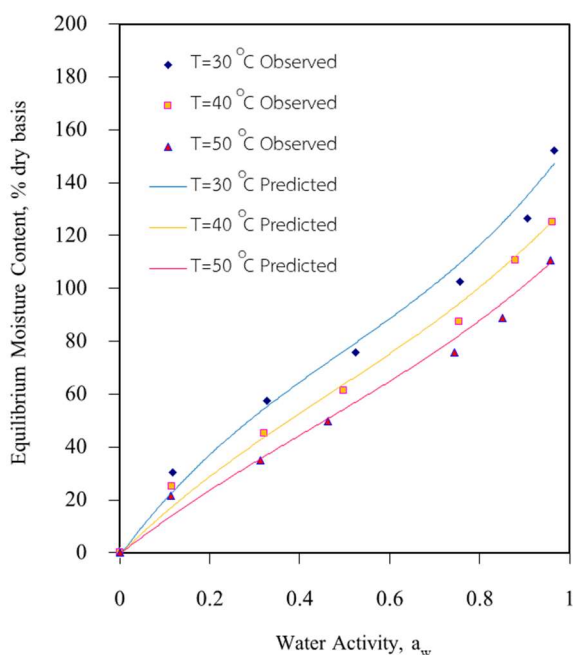
จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี หรือเรียกว่าแบบจำลองของซอบชันไอโซเทอม (sorption isotherm model) โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองซอบชันไอโซเทอมจำนวน 5 แบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิ พบว่าแบบจำลองซอบชันไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้าของ Modified GAB มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด โดยมีค่าของสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หรือค่า R^2 สูงที่สุดอยู่ที่ 0.99 และค่าของรากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง หรือค่า RMSD อยู่ที่ 8.17 และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย หรือค่า MBD ต่ำสุด อยู่ที่ 1.58 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวมีความเหมาะสมที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงต่าง ๆ โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลองซอบชันไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้าแสดงดังตารางที่ 3

ในรูปที่ 4 จะเป็นผลการเปรียบเทียบการแปรค่าความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Modified GAB ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยหิน (Saba Banana) หรือในภาษาอินโดนีเซียเรียกว่า “Kepok Banana” ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในการควบคุมอุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ที่วอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.11 – 0.97 พบว่า แบบจำลองซอบชันไอโซเทอมของ GBA ให้ค่าความสัมพันธ์กับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด [21]

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลของกล้วย

แบบจำลอง	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง			RMSD (%)	MBD (%)	R^2
	A	B	C			
Modified Oswin Equation	97.59710	-0.88422	0.25234	10.95	5.90	0.98
Modified Handerson Equation	0.00001	-0.57028	2.10313	45.36	40.40	0.98
Modified Chung-Pfost Equation	376.07790	-14.69540	0.08530	52.34	43.82	0.94
Modified Halsey Equation	16.21884	-0.04785	3.37665	34.35	29.33	0.97
Modified GAB	172.14850	0.27500	122.90160	8.17	1.58	0.99

สำหรับแบบจำลองของซอบซันไอโซเทอมมีความสำคัญสำหรับการอบแห้ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้แบบจำลองของซอบซันไอโซเทอมยังสามารถใช้คำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time) ใช้คำนวณอายุของผลิตภัณฑ์แห้งซึ่งเก็บอยู่ในช่องหรือห้องชนิดต่าง ๆ และยังสามารถใช้ประโยชน์ในการหาสภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์อาหารได้



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้ากับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองซอบซันไอโซเทอมของ Modified GAB

5. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้า และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลองซอบซันไอโซเทอม ซึ่งมีความสำคัญต่องานในด้านการอบแห้ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และค่าวอเตอร์แอกติวิตีแปรค่าระหว่าง 0.11-0.97 และนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีและค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ และความชื้นต่าง ๆ พบว่า กราฟซอบซันไอโซเทอมที่ได้มีลักษณะเส้นกราฟเป็นแบบซิกมอยด์ โดยเส้นกราฟที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่ด้านล่างขึ้นไปยังเส้นกราฟ

อุณหภูมิต่ำซึ่งจะอยู่ด้านบนสุด และค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นสมดุล จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิคงที่พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified GAB มีความเหมาะสมในการทำนายความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดในรูปแบบของ RMSD และ MBD เท่ากับ 8.17% และ 1.58% ตามลำดับ และค่าของสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หรือค่า R^2 สูงที่สุดอยู่ที่ 0.99 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับกล้วยน้ำว้า จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าความชื้นสมดุลของกล้วยน้ำว้าขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามในการทดลองหาผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ต้องทำการหาค่าซอบซันไอโซเทอมของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น ๆ

6. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

สำหรับการหาค่าความชื้นสมดุลในการทดลองในครั้งนี้เป็นการทดลองหาค่าความชื้นสมดุล และการหาแบบจำลองซอบซันไอโซเทอมของกล้วยน้ำว้า ถ้าเป็นกล้วยชนิดอื่น หรือผลิตภัณฑ์อื่น ผู้วิจัยขอแนะนำให้ทำการทดลอง และทดสอบหาแบบจำลองซอบซันไอโซเทอมของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยเฉพาะ จะทำให้ได้แบบจำลองซอบซันไอโซเทอมที่มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Udomkun, S. Romuli, S. Schock, B. Mahayothee, M. Sartas, T. Wossen, E. Njukwe, B. Vanlauwe, and J. Müller, "Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach," *Journal of Environmental Management*, Vol. 268, 110730, pp.1-14, May. 2020.
- [2] O. Olagunju, N. Mchunu, N. Durand, N. Spigolon, P. Alter, D. Montet, and O. Ijabadeniyi, "Effect of

- mulling, fermentation of roasting on water activity, fungal growth, and aflatoxin contamination of Bambara groundnut (*Vigna subterranean* (L.) Verdc),” *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 98, pp.533-539, December. 2018.
- [3] S. Valente, G.R. Meloni, S. Prencipe, N. Spigolon, M. Somenzi, M. Fontana, M.L. Gullino, and D. Spadaro, “Effect of drying temperatures and exposure times on aspergillus flavus growth and aflatoxin production on artificially inoculated hazelnuts,” *Journal of Food Protection*, Vol. 83, no. 7, pp.1241-1247, March. 2020.
- [4] J. Yang, A. Martin, S. Richardson, and C.H. Wu, “Microstructure investigation and its effects on moisture sorption in fried potato chips,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 214, pp.117-128, December. 2017.
- [5] K. Fan, M. Zhang, and B. Bhandari, “Osmotic-ultrasound dehydration pretreatment improves moisture adsorption isotherms water state of microwave-assisted fried purple-fleshed sweet potato slices,” *Food and Bioprocess Processing*, Vol. 115, pp.154-164, April. 2019.
- [6] J.A.C. Echavarria, A.M.R. Torres, and J.E.Z. Montoya, “Sorption isotherms and thermodynamic properties of the dry silage of red tilapia viscera (*Oreochromis* spp.) obtained in a direct solar dryer,” *Heliyon*, Vol. 7, e06798, pp.1-8, April. 2021.
- [7] S. Basu, U.S. Shivhare, and A.S. Mujumdar, “Models for sorption isotherms for foods: A review,” *Drying Technology*, Vol. 24, pp.917-930, February. 2006.
- [8] A. Iguaz, and P. Virseda, “Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, pp.794-802, April. 2007.
- [9] N.A. Aviara, “Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products,” *In Sorption in 2020s*, pp.1-33, IntechOpen. 2020.
- [10] H.A. Iglesias, and J. Chirife, “An empirical for fitting water sorption isotherms of fruits and related products,” *Canadian Institute of Food and Technology Journal*, Vol. 11, pp.12-15, April. 1978.
- [11] S. Janjai, K. Tohsing, and B.K. Bala, “Moisture sorption isotherms of Lincheu Mushroom (*Ganoderma lucidum*),” *Food Science and Technology Research*, Vol. 13, no. 4, pp.315-320, May. 2007.
- [12] S. Janjai, B.K. Bala, K. Tohsing, B. Mahayothee, M. Haewsungcharern, W. Mühlbauer, and J. Müller, “Equilibrium moisture content and heat of sorption of longan (*Dimocarpus longan* Lour.),” *Drying Technology*, Vol. 24, no. 12, pp.1691-1696, April. 2007.
- [13] S. Nabnean, S. Thepa, and S. Janjai, “Sorption Isotherm of osmotic dehydration of cherry tomato,” in *Proceeding of The 5th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, Kanchanaburi Thailand*, December. 18-20, 2013, pp. 219-224.
- [14] AOAC, *Official Methods of Analysis (17th ed.)*, Association of Official Analytical Chemists, Washington. DC, 2000.
- [15] C. Chen, “A study of equilibrium relative humidity for yellow-dent corn kernels,” *Ph.D. thesis*, University of Minnesota: St. Paul, 1988.
- [16] T.L. Thompson, R.M. Peart, and G.H. Foster, “Mathematical simulation of corn drying a new

- model,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 11, no. 4, pp.582-586, November. 1968.
- [17] H.B. Pfost, S.G. Mourer, D.S. Chung, and G.A. Milliken, “Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains,” *ASAE meeting*, St. Joseph, Mi. (Paper,76-3520), 1976.
- [18] H.A. Iglesias, and J. Chirife, “Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material,” *Journal of Food Technology*, Vol. 11, pp.109-116, April. 1976.
- [19] D.S. Jayas, and G. Mazza, “Comparison of five three-parameter equations for the description of adsorption data of oats,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 36, pp.119-125, February. 1993.
- [20] H.A. Iglesias, and J. Chirife, “Water sorption parameters for food and food components,” *Handbook of Food Isotherm*, Academic Press, New York, 1982.
- [21] B. Susilo, D.M. Maharani, L.C. Hawa and D.N.K. Fitri, “Study of sorption isotherm and isosteric heat of Kepok Banana (*Musa paradisiaca* F.) slice,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 230, 012017, pp.1-10, September. 2019.