

การศึกษาความชื้นสมดุลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

The study of equilibrium moisture content and mathematical of *Andrographis paniculate* herb

จินตนา แสนสุข¹, สราวุธ นิบเนียน^{2*}Jintana Sansuk¹, Sarawut Nabnean^{2*}

รับบทความ 24 เมษายน 2568 แก้ไขบทความ 25 กรกฎาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 1 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในจังหวัดลพบุรี โดยใช้อุปกรณ์ 3 ชุด ได้แก่ ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งขดลวดให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาด 1,500 วัตต์ กล้องบรรจุตัวอย่าง มีฝาปิดป้องกันอากาศไหลผ่าน จำนวน 6 กล้อง แต่ละกล้องบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ภายในกล้อง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทดลองสำหรับหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร เท่ากับ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ระหว่าง 0.112 – 0.966 จะได้กราฟ sorption ไอโซเทอม มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี จากนั้นได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 แบบจำลอง จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลอง Modified Halsey มีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยมีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.992 และมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 8.667% และ 1.190% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุล, ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี, สมุนไพรฟ้าทะลายโจร, ความชื้นสัมพัทธ์, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

¹สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์วิชาเอกฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย

Abstract

This research investigates the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata*. The samples used in this research were *Andrographis paniculata* plants cultivated in Lopburi Province. Three sets of equipment. The setup includes an electric oven with a 1,500 att electric heater, six airtight sample containers to prevent air exchange, each containing a saturated salt solution to control the relative humidity inside the containers. The air temperatures used in the experiments to determine the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata* were 30 °C, 40 °C, and 50 °C, with water activity values ranging 0.112 – 0.966. The sorption isotherm curves obtained displayed an inverse relationship with temperature at constant water activity. Subsequently, the mathematical relationship between the equilibrium moisture content and water activity was studied. Six mathematical models were compared. The results revealed that the Modified Halsey model showed the best fit to the experimental data in describing the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata*, with an average R^2 value of 0.992, and RMSD and MBD are 8.667% and 1.190% respectively.

Keywords: Equilibrium moisture content, Water activity, *Andrographis paniculata*, Relative humidity, Mathematical models

¹Division of Science Education, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

²Division of Science, Major in Physics, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

*Corresponding author e-mail address: sarawut.n@lawasri.tru.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก ทั้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร เนื่องจากตั้งอยู่ในภูมิประเทศ และมีภูมิอากาศเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืชสมุนไพร [1] ซึ่งผลผลิตที่ได้มีทั้งนำมาบริโภคสด นำไปแปรรูปเพื่อยืดอายุผลผลิต และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตนั้น ๆ ผลผลิตทางการเกษตรมักประสบปัญหาการเสื่อมคุณภาพหรือเน่าเสียภายหลังการเก็บเกี่ยว หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม เนื่องจากมีความชื้นสูง เกษตรกรจึงนำผลผลิตมาแปรรูปโดยการตากแห้ง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสามารถทำได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือน ไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม แต่การตากแห้งมีข้อเสียคือ ปัญหาในเรื่องของการปนเปื้อนของฝุ่นละออง แมลง หรือนกที่มากทำลายผลผลิตทันที ซึ่งจะส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก [2]

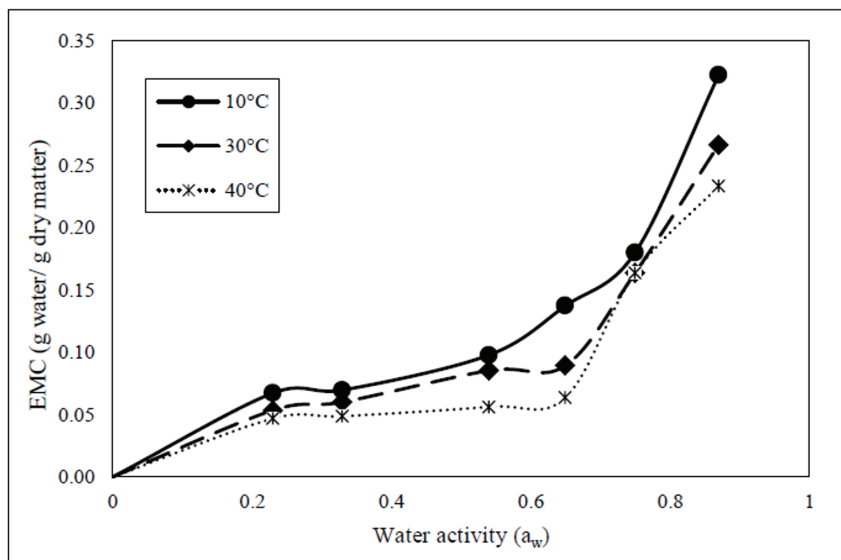
ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) มีการนำสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมาช่วยในการรักษา [3-5] เนื่องจากฟ้าทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่ถูกบรรจุอยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ เป็นสมุนไพรที่มีความต้องการตามแผนแม่บทแห่งชาติ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [1] ในบางพื้นที่จึงมีการปลูกสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเป็นจำนวนมาก ซึ่งในจังหวัดลพบุรี มีการปลูกสมุนไพรแบบเกษตรอินทรีย์ ณ โรงทหารสาธิตประจำ กว่า 70 ไร่ ให้เกษตรกรจำนวน 25 ราย ปลูกสมุนไพร 2 ชนิด คือ ฟ้าทะลายโจร และขมิ้นชัน เพื่อผลิตวัตถุดิบสมุนไพรที่มีคุณภาพสำหรับผลิตยาสมุนไพร เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตตากแห้ง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโรงเรือน ซึ่งยังไม่มีข้อมูลชัดเจนเกี่ยวกับระยะเวลาการจัดเก็บที่เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้ผลผลิตเกิดความเสียหายไม่สามารถจำหน่ายได้ และยังมีข้อมูลเชิงวิชาการเกี่ยวกับความชื้นที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

วัตถุประสงค์หลักของการอบแห้ง คือ ลดความชื้นเพื่อรักษาคุณสมบัติทางยาของสมุนไพร และเพื่อรักษาวัตถุดิบไว้เป็นระยะเวลานาน [6] ความชื้นจะมีผลมากที่สุดต่อการเก็บรักษาผลผลิตจากสมุนไพร คุณภาพสมุนไพรที่เก็บรักษาไว้นานอยู่ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ของผลิตภัณฑ์นั้น และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity, a_w) [6]

1.1 ความชื้นสมดุล

ผลผลิตทางการเกษตรจัดเป็นวัสดุประเภทไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) [7] โดยมีสมบัติดูดและคายความชื้นจากอากาศบริเวณโดยรอบ ด้วยกระบวนการถ่ายเทความชื้นระหว่างวัสดุทางการเกษตรกับอากาศโดยรอบ จนกระทั่งมีความดันไอของวัสดุทางการเกษตรเท่ากับค่าความดันไอของอากาศ จึงหยุดการถ่ายเทความชื้น เรียกสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อมนี้ว่า ความชื้นสมดุล [8]

ความชื้นสมดุลจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบวัสดุนั้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอีกด้วย [6] ถ้านำความชื้นสมดุลมาเขียนกราฟกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟซอร์ปชันไอโซเทอม (Sorption isotherm) [7] โดยเส้นอุณหภูมิสูงจะอยู่ล่างสุด ดังรูปที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับความชื้นของใบชุมเห็ดเทศ (*C. alata*) แสดงลักษณะเป็นแบบ Sigmoid ซึ่งจัดอยู่ในประเภทไอโซเทอมของ Brunauer, Emmet และ Teller (BET) ประเภทที่ II ไอโซเทอมประเภทที่ II และ III นั้น มักพบในผลผลิตทางการเกษตร การอบแห้งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทราบความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดสภาวะของอากาศแวดล้อมขณะนั้น ความชื้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิต อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [8-9] ประเทศต่าง ๆ จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับความชื้นสมดุลกับผลผลิตทางการเกษตรเพื่อประโยชน์ในทางเศรษฐกิจ



รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิต่อไอโซเทอมการดูดซับความชื้นของใบชุมเห็ดเทศ (*C. alata*) ที่ผ่านการอบแห้ง [6]

สำหรับประเทศไทย มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตรมีจำนวนไม่มากนัก โดยเฉพาะการหาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ซึ่งมีความสำคัญในทางการแพทย์ที่ช่วยในการรักษาผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการรักษาผู้ป่วย ทั้งนี้ จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่รายงานค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อศึกษาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร และ 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ซึ่งผลการศึกษานี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอบแห้ง และกำหนดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการจัดเก็บสมุนไพร เพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และยืดอายุการเก็บรักษาให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์และเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเตรียมตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองเพื่อหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี โดยใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ใช้ปลูกในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี การเตรียมตัวอย่างใช้สมุนไพรฟ้าทะลายโจรทั้งต้น ซึ่งประกอบด้วยส่วนของใบ ลำต้น และกิ่ง นำมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดสิ่งสกปรกหรือสารปนเปื้อนที่อาจมีอยู่ แล้วผึ่งให้สะเด็ดน้ำในอุณหภูมิห้อง ก่อนทำการชั่งมวลเริ่มต้นของตัวอย่างแต่ละชุด โดยใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรในปริมาณ 15 กรัมต่อหน่วยทดลอง

2.2 การใช้สารละลายเกลือควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ผู้วิจัยได้เตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวโดยนำสารแต่ละชนิดมาละลายน้ำ พร้อมให้ความร้อนและกวนสารละลายอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องให้ความร้อนและกวนสาร (Hot plate stirrer) โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ที่ 30 °C, 40 °C และ 50 °C ตามลำดับ เพื่อให้ได้สารละลายเกลืออิ่มตัวในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อได้สารละลายเกลืออิ่มตัวแล้ว จึงนำไปบรรจุในภาชนะปิดสนิทชนิดซูเปอร์ล็อก (Super lock) และจัดวางตะแกรงไว้เหนือผิวหน้าของสารละลาย ผิวหน้าของสารละลายโดยตรง แล้วปิดฝาภาชนะซูเปอร์ล็อก (Super lock) ให้สนิท เพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนอากาศกับสภาพแวดล้อมภายนอก

การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะทำการทดลอง เราสามารถใช้สารละลายกรด หรือสารละลายเกลือ อิ่มตัวได้ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ระหว่าง 0 – 100% [11] แต่โดยทั่วไปไม่นิยมใช้กรด เพราะอันตรายมากกว่าการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว ความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดลอง และการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีกว่าสารละลายกรดเพราะความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งสามารถเลือกใช้เกลือชนิดต่าง ๆ ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ระหว่าง 10 – 97% หรือค่าวอเตอร์แอกทิวิตี อยู่ในช่วง 0.112 – 0.9660 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายชื่อเกลือและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่ได้จากสารละลายอิ่มตัวของเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ [12]

สารละลายเกลือ	ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี		
	อุณหภูมิ 30 °C	อุณหภูมิ 40 °C	อุณหภูมิ 50 °C
LiCl	0.112	0.112	0.112
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.328	0.321	0.314
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.520	0.492	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 การหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรด้วยวิธีการทดลองแบบสมดุลนิ่ง (Static method) คือ วิธีการหาความชื้นสมดุลของวัสดุ โดยใส่ภาชนะแบบปิดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของมวลตัวอย่างวัสดุเป็นระยะโดยการนำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุคงที่ ซึ่งภาวะดังกล่าวถือว่าเป็นสภาวะสมดุล ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

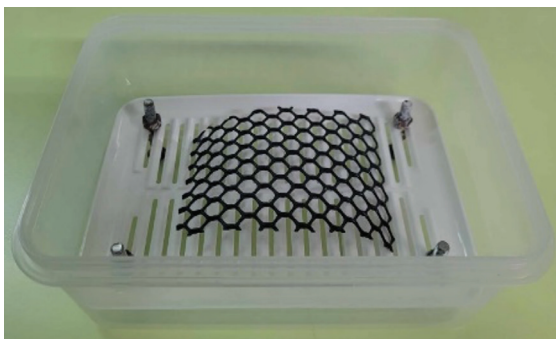
2.3.1 นำสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ทั้งต้นที่ชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองไปใส่ในภาชนะแบบปิดหรือกล่องซูเปอร์ล็อก (Super lock) โดยทำตะแกรงไว้ด้านบนสำหรับวางตัวอย่าง (ดังรูปที่ 2) สารละลายเกลืออิ่มตัวอยู่ด้านล่าง ไม่ให้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรสัมผัสกับสารละลายเกลืออิ่มตัว

2.3.2 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว จำนวน 6 ชนิด ดังตารางที่ 1 [10]

2.3.3 การจัดระบบดังกล่าวเป็นการควบคุมทั้งอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในกล่องตัวอย่างไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (ดังรูปที่ 3) จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างเกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างคงที่ จึงสามารถวัดค่าความชื้นสมดุลได้จำนวน 18 ค่า โดยใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น 4 สัปดาห์

2.3.4 จากนั้นนำตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเข้าสู่กระบวนการอบแห้งในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC เพื่อหามวลแห้งของตัวอย่าง ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลในลำดับต่อไป

2.3.5 นำตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาชั่งน้ำหนัก โดยถือว่ามวลที่ได้เป็นมวลของของแข็ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุขึ้น จากนั้นหาผลต่างระหว่างมวลของตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรขณะทำการทดลอง กับมวลของของแข็งดังกล่าว ซึ่งผลต่างที่ได้ถือเป็นมวลของน้ำในตัวอย่าง สมการนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content: EMC) ของวัสดุนั้นได้



รูปที่ 2 กล่องซูเปอร์ล็อก (Super lock) บรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวสำหรับใส่สารละลายฟ้าทะลายโจร



รูปที่ 3 ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิในการทดลอง

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาความขึ้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตร โดยทั่วไปมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของค่าความขึ้นสมดุลของวัสดุนั้นกับค่าความขึ้นสัมพัทธ์ของอากาศหรือค่าวอเตอร์แอกทिवิตีตามอุณหภูมิที่กำหนด โดยสมการที่ใช้ทำนายค่าความขึ้นสมดุลของผลผลิตแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่ต่างกัน สำหรับการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการหาความขึ้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร [13] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองคณิตศาสตร์จำนวน 6 แบบจำลอง [12]

ลำดับที่	แบบจำลอง	สมการทางคณิตศาสตร์
1	GAB	$M_e = \frac{ABCa_w}{(1-Ca_w)(1-Ca_w+BCa_w)} \quad (1)$
2	Modified GAB	$M_e = \frac{AB \left(\frac{C}{T}\right) a_w}{(1-Ba_w) \left(1-Ba_w + \frac{C}{T} Ba_w\right)} \quad (2)$
3	Modified Oswin	$M_e = (A+BT) \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^{1/C} \quad (3)$
4	Modified Handerson	$M_e = \left[\frac{-\ln(1-a_w)}{A(T+B)} \right]^{1/C} \quad (4)$
5	Modified Halsey	$M_e = \left[-\frac{\exp(A+BT)}{\ln(a_w)} \right]^{1/C} \quad (5)$
6	Modified Chung-Pfost	$M_e = -\frac{1}{C} \ln \left[\frac{-(T+B)}{A} \ln a_w \right] \quad (6)$

หมายเหตุ : M_e คือ ความขึ้นสมดุล [% , db], T คือ อุณหภูมิ, a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกทिवิตี, [-], A , B , C คือ ค่าคงที่ของสมการ

ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C โดยใช้วิธีการทางสถิติจากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSD) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference, MBD)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}^2}} \quad (7)$$

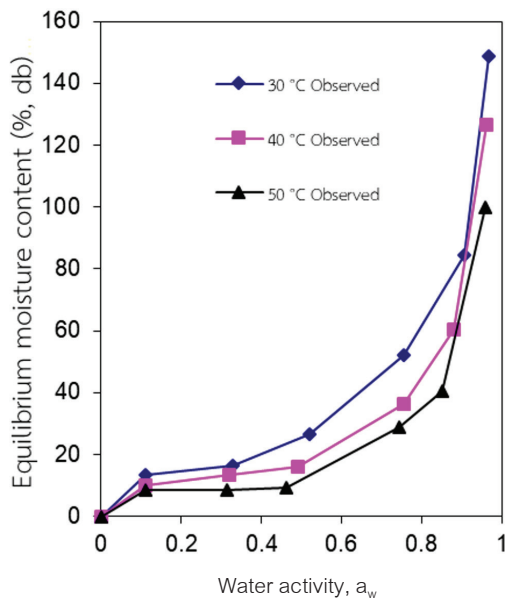
$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}^2}{N}} \quad (8)$$

$$MBD = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(meas,i)}}{N}} \quad (9)$$

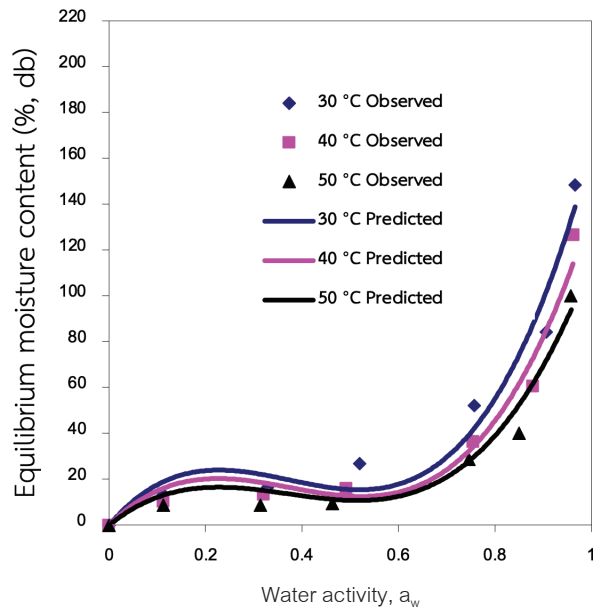
เมื่อ $M_{eq(mod,i)}$	คือ ความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรจากแบบจำลองข้อมูลที i (% , db)
$M_{eq(meas,i)}$	คือ ความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรจากการทดลองที i (% , db)
N	คือ จำนวนข้อมูล
i	คือ ลำดับทีของข้อมูล

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ผลการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในช่วง 0.112 – 0.966 (ดังรูปที่ 4) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีลักษณะเป็นกราฟแบบซิกมอยด์ประเภทที่ II (Sigmoid type II isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในพืชสเมทไฟฟ้ท และผลิตภัณฑ์เกษตรที่มีเส้นใยสูง โดยเส้นโค้งมีลักษณะเรียงลำดับเป็นเส้นไฮโซเทอมโดยเส้นที่อยู่ด้านบนแสดงค่าที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่เส้นที่อยู่ด้านล่างแสดงค่าที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุเพิ่มขึ้น เมื่อค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มจะช้าลงในช่วงกลางของกราฟ ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วงปลายกราฟ ทำให้เกิดลักษณะของเส้นกราฟแบบซิกมอยด์อย่างชัดเจน ลักษณะของกราฟซอร์บชันไฮโซเทอมของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรมีลักษณะสอดคล้องกับซอร์บชันไฮโซเทอมของผลิตภัณฑ์เกษตร และพืชสเมทไฟฟ้ทชนิดอื่น



รูปที่ 4 ซอร์บชันไอโซเทอมของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรกับค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองซอร์บชันไอโซเทอมของ Modified Halsey

ผู้วิจัยได้หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอคติวิตี โดยวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองซอร์บชันไอโซเทอม จำนวน 6 แบบจำลอง กับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิพบว่า แบบจำลอง Modified Halsey มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด แบบจำลอง Modified Halsey มีประสิทธิภาพสูงในการอธิบายการดูดความชื้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ปานกลางถึงสูง (a_w ระหว่าง 0.2 – 0.94) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของพืชสมุนไพรทั่วไป ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.992 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 8.667 และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) เท่ากับ 1.190 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Modified Halsey มีความเหมาะสมที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงต่าง ๆ

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (ดังตารางที่ 3) สำหรับรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรกับค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้แบบจำลอง Modified Halsey ทั้งนี้ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของใบ และดอกคาร์โมมายล์ ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรเฉพาะถิ่นที่พบในแอฟริกาเหนือ โดยพบว่าแบบจำลอง Peleg และ Halsey มีความเหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายลักษณะกราฟของซอร์บชันไอโซเทอมได้อย่างเหมาะสมที่สุด [14]

การทราบลักษณะของความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการกำหนดค่าความชื้นที่ปลอดภัย ออกแบบเงื่อนไขในการอบแห้งให้เหมาะสม และควบคุมสภาพแวดล้อมในการจัดเก็บให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรไว้ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

Model	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง			R^2	RMSD(%)	MBD(%)
	A	B	C			
GAB	9.514	545.625	0.962	0.957	19.667	-0.195
Modified GAB	631.478	0.989	2.787	0.852	637.800	459.481
Modified Oswin	37.399	-0.378	1.819	0.992	13.362	7.522
Modified Handerson	0.001	34.291	0.781	0.980	17.333	2.856
Modified Halsey	5.619	-0.026	1.630	0.992	8.667	1.190
Modified Chung-Pfost	0.036	-10.045	51.460	0.892	27.259	5.365

หมายเหตุ : A, B, C คือ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าพารามิเตอร์เอกทวิติระหว่าง 0.112 – 0.966 โดยกราฟซอร์บชันไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าพารามิเตอร์เอกทวิติในการวิเคราะห์ผลผู้วิจัยได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 6 แบบจำลอง โดยนำแบบจำลองทั้งหมดมาคำนวณค่าความชื้นสมดุล และเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าแบบจำลอง Modified Halsey มีสมรรถนะดีที่สุดในการหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) เท่ากับ 8.667 และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) เท่ากับ 1.190 รองลงมาคือ แบบจำลอง Modified Oswin มีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 ค่า RMSD เท่ากับ 13.362 และค่า MBD เท่ากับ 7.522 โดยแบบจำลองทั้งสองนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดค่าความชื้นที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการอบแห้ง และการเก็บรักษาลักษณะสมบัติสมุนไพรฟ้าทะลายโจร เพื่อรักษาคุณภาพและสรรพคุณของสารสำคัญที่พบในสมุนไพรฟ้าทะลายโจรให้คงอยู่ ลดความเสี่ยงจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา ป้องกันการเสื่อมสภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาลักษณะสมบัติสมุนไพรฟ้าทะลายโจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการดำเนินการทดลอง ตลอดจนขอขอบคุณ คุณพิมพ์ธญา ผาสุย ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อุษณา ลิ้มเกรียงไกร. การพัฒนาวัสดุอ้างอิงรับรองสำหรับการวัดปริมาณธาตุบางชนิดในผงฟ้าทะลายโจร. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2566;12(1):15-26. doi: 10.60136/bas.v12.2023.399.
- [2] นพมาศ ประทุมสูตร, ทวีเดช หมั่นภูเขียว. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของพริกขี้หนู. Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST). 2564;20(2):137-46. doi: 10.14456/jarst.2021.12.

- [3] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. กรมวิทยาศาสตร์ฯ ผลิตสารมาตรฐานฟ้าทะลายโจรและสารมาตรฐานฟ้าวิพิราเวียร์พร้อมจำหน่าย แก่หน่วยงานรัฐ เอกชน เพื่อใช้ในการวินิจฉัยและวิจัยเภสัชภัณฑ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dmsc.moph.go.th/th/detailAll/2120/nw/25>
- [4] จุฑามาศ สัตยวิวัฒน์. ฟ้าทะลายโจร: งานวิจัยบูรณาการสู่การใช้รักษาโรคติดเชื้อโควิด-19. The Journal of Chulabhorn Royal Academy. 2565;4(1):1-14.
- [5] ธรรมรัตน์ บุญสูง, สันต์ ใจยอดศิลป์, สมวงศ์ ใจยอดศิลป์, ขวัญศรี สราญกวิน, สุภัทสรณ์ แก้วกลิน. การศึกษาปริมาณ แอนโดรกราโฟไลด์ในส่วนต่าง ๆ ของฟ้าทะลายโจรในระยะเก็บเกี่ยวที่ต่างกันจากอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี. วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 2565;20(1):141-9.
- [6] Jolkil M, Shaari AR, Razak NA. Moisture adsorption isotherm of dried *Cassia alata* herbal leaves at different temperatures. Mater Sci Eng. 2020;932(1):012036. doi: 10.1088/1757-899X/932/1/012036.
- [7] Oduola AA, Luthra K, Atungulu GG. Determination of moisture sorption isotherms of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) flower and leaf composite powders. Ind Crops Prod. 2022;186:115201. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115201.
- [8] เพ็ญพร นิ่มนวล, นภาลย์ เหล่ามะลอ, สราวุฒิ แนนเนียร. การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ กัญชาน้ำว่า. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี. 2565;17(1):50-8.
- [9] Getahun E, Gabbiye N, Delele MA, Fanta SW, Gebrehiwot MG, Vanierschot M. Effect of maturity on the moisture sorption isotherm of chili pepper (*Mareko Fana variety*). Heriyon. 2020;6:1-14. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04608.
- [10] Meriama F, Said B, Akil L, Ahmed M, Houcine M, Abdelkrim D, et al. Experimental determination and modeling of the moisture sorption isotherms and isosteric heat of tobacco leaves. I2M. 2021;20(5):269-77. doi: 10.18280/i2m.200504.
- [11] Zhang X, Zillig W, Künzel HM, Zhang X, Mitterer C. Evaluation of moisture sorption models and modified Mualem model for prediction of desorption isotherm for wood materials. Build Sci. 2015;92(1):387-95. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.05.021.
- [12] เสริม จันทรฉาย. เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์; 2560.
- [13] ธวัชอรณัญช์ มุสิกะไชย, ยุทธนา ภูริวงษ์กุล, สุภวรรณ ภูริวงษ์กุล. การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความชื้นสมดุลของกัญชงไข่. NUEJ. 2561;13(1):25-32.
- [14] Saad A, Touati B, Seghir A, Abdenebi A. Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of *Matricaria pubescens* leaves. AgricEngInt: CIGR Journal. 2022;24(2):291-300.