KKU Engineering Journal

http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสำหรับยางพาราแผ่น

Comparison of mathematical models equilibrium moisture content for sheet rubber

วสันต์ จีนธาดา* ทศพร จันทร์กระจ่าง สุเทพ ชูกลิ่น และ เฉลิม ศิริรักษ์

Wasan Jeentada*, Thossaporn Chankrachang, Sutep Chooklin and Chalerm Sirirak

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา 90000

Received October 2011

Accepted January 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับยางพาราแผ่น โดยเปรียบเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 ^{O}C ในช่วงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ 0.10-0.82 ซึ่งใช้วิธีสถิต (static method) ในการหาค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นและนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล 12 แบบ คือ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson –Thompson, Chung and Pfost, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost และ Modified GAB มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เพิ่มขึ้นและจากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลอื่นๆ

คำสำคัญ : ความชื้นสมดุล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ยางพาราแผ่น

Abstract

The objective of this research was to comparison mathematical models equilibrium moisture content appropriate for sheet rubber by various experiment temperatures 40, 50, 60 and 70 ^{O}C at water activity (a_w) range 0.10-0.82. The static method investigate the equilibrium moisture content of sheet rubber, and the 12 models of mathematical models equilibrium moisture content were used; Oswin, Halsey, Henderson, Henderson –Thompson, Chung and Pfost, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost and Modified GAB, that comparison the results of the

*Corresponding author. Tel.:074-317100 to 1915; fax: 074-315185

Email address: wasan.jeen@gmail.com

experiments. The equilibrium moisture content were decreased, when temperature was increased at constant water activity. In contrast, at the same temperature the equilibrium moisture was increased, when increased water activity, and comparison of the mathematical models equilibrium moisture content, Showed that Peleg model was proper prediction for the equilibrium moisture content of sheet rubber when comparison with other models.

Keywords : Mathematical model, Equilibrium moisture content, Sheet rubber

1. บทนำ

การผลิตยางพาราประมาณ 35% ของโลกมาจากประเทศไทยทำให้อุตสาหกรรมยางพาราในประเทศไทยมีความสำคัญทางเศรษฐกิจและสังคม จากมูลค่าการผลิตของยาพาราที่ได้จากการส่งออกและการจ้างงาน [1] การส่งออกยางพาราของประเทศไทยส่วนใหญ่ส่งออกในรูปของวัตถุดิบ ได้แก่ ยางแท่ง ยางแผ่นรมควัน น้ำยางข้นและยางชนิดอื่นๆ โดยจะผลิตยางแผ่นรมควันมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำยางขน ยางแท่งเอสทีอาร์และยางแผ่นผึ่งแห้งตามลำดับ [2] การผลิตยางแผ่นรมควันนั้นเป็นกระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้พลังงานรูปแบบต่างๆ ในการอบแห้ง เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวล ในการออกแบบและการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งของวัสดุแต่ละชนิดนั้นต้องรู้ถึงพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อกระบวนการอบแห้ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อกระบวนการอบแห้ง คือ ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)

ความชื้นสมดุล (EMC) คือปริมาณความชื้นเมื่อความดันของน้ำในวัสดุไปถึงจุดสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเพื่อบอกปริมาณความชื้นน้อยสุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ของสภาวะสิ่งแวดล้อม [3] โดยช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นของวัสดุตามที่ต้องการและช่วยในการจัดเก็บรักษาวัสดุที่ควบคุมความชื้นของผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ทำนายความชื้นสมดุลของวัสดุเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิด จากการทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่สามารถทำนายความชื้นสมดุลของวัสดุได้ดี คือ แบบจำลองของ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson –Thompson, Chung and Pfost, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost และ Modified GAB [4-11] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นและนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Oswin, Halsey, Henderson, Henderson –Thompson, Chung and Pfost, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung-Pfost และ Modified GAB มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับยางพาราแผ่น

2. ทฤษฎี

ความชื้นในวัสดุ คือ ปริมาณน้ำหรือของเหลวที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุ ความแห้งของวัสดุนั้นมักบอกเป็นเปอร์เซ็นความชื้น คือ ความชื้นฐานแห้ง

$$MC_{db} = \left(\frac{m_w}{m_d} \right) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ MC_{db} คือ ความชื้นฐานแห้ง (%d.b.)
m_w คือ มวลของน้ำ (kg)
m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

วอเตอร์แอคติวิตี้ (Water activity, a_w) เป็นคุณสมบัติที่อธิบายถึงอัตราส่วนความดันไอของน้ำในวัสดุต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งเป็นตัวชี้วัดและเกณฑ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในวัสดุ [3] ดังแสดงในสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

ชื่อของแบบจำลอง	สมการของแบบจำลอง	อ้างอิง
Oswin	$EMC = A\left[\frac{a_w}{(1-a_w)}\right]^B$	[4, 12, 13, 14]
Halsey	$EMC = \left[\frac{-A}{T\ln(a_w)}\right]^{\frac{1}{B}}$	[12, 14]
Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-AT}\right]^{\frac{1}{B}}$	[5, 13, 15]
Henderson –Thompson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)}\right]^{\frac{1}{C}}$	[5, 10, 11]
Chung and Pfost	$EMC = \frac{1}{-A}\ln\left[\frac{(T+B)\ln(a_w)}{-C}\right]$	[5, 8, 11]
GAB	$EMC = \frac{ABCa_w}{(1-Ba_w)(1-Ba_w+BCa_w)}$	[9, 11, 15, 16]
Peleg	$EMC = A(a_w)^B + C(a_w)^D$	[4, 10, 12]
Modified Oswin	$EMC = (A+BT)\left[\frac{a_w}{(1-a_w)}\right]^{\frac{1}{C}}$	[6, 7, 8, 17]
Modified Halsey	$EMC = \left[\frac{-\exp(A+BT)}{\ln(a_w)}\right]^{\frac{1}{C}}$	[5, 9, 11, 17]
Modified Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)}\right]^{\frac{1}{C}}$	[4, 8, 16, 17]
Modified Chung-Pfost	$EMC = \frac{1}{-C}\ln\left[\frac{(T+B)\ln(a_w)}{-A}\right]$	[6, 7, 16, 17]
Modified GAB	$EMC = \frac{AB\left(\frac{C}{T}\right)a_w}{(1-Ba_w)\left[1-a_w+\left(\frac{C}{T}\right)Ba_w\right]}$	[7, 16, 17]

(2)

เมื่อ a_w คือ วอเตอร์แอคติวิตี้ (ไม่มีหน่วย)
p คือ ความดันไอของน้ำในวัสดุ (Pa)
p_o คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (Pa)
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
ERH คือ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (%)

ความชื้นสมดุลมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 1

เมื่อ EMC คือ ความชื้นสมดุล (%d.b.)
a_w คือ วอเตอร์แอคติวิตี้ (ไม่มีหน่วย)
T คือ อุณหภูมิ (K)
A, B, C, D คือ ค่าคงที่

3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การหาความชื้นสมดุลของวัสดุมีหลักการคือปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศจนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การหาความชื้นสมดุลนี้จะใช้วิธีสถิต (static method) เป็นวิธีการปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศในขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยการทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศส่วนอุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมด้วยตู้อบ

3.1 วัสดุ

(1) ยางพาราแผ่นที่ได้จากกระบวนการรีดแผ่นแล้วจากสหกรณ์สวนยางตำบลทุ่งขมิ้น อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา มีความหนาประมาณ 0.3 เซนติเมตร

(2) สารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด คือ ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2$), แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ($Mg(NO_3)_2$), โปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI), โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), และไดแอมโมเนียมซัลเฟส ($(NH_4)_2.SO_4$ ซึ่งมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อยู่ในช่วง 0.10-0.82 ดังแสดงในตารางที่ 2

3.2 อุปกรณ์

(1) ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ BINDER

(2) ตาชั่ง ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น ED224S สามารถอ่านมวลได้ 4 ตำแหน่ง มีค่าความผิดพลาด ± 0.0001 กรัม

(3) ขวดโหลแบบมีฝาปิดชนิดมียางกันรั่ว ขนาดความจุ 1 ลิตร

3.3 วิธีการทดลอง

(1) นำสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดใส่ในขวดโหล ในปริมาณขวดละ 200 มิลลิลิตร โดยขวดโหล 1 ใบจะใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว 1 ชนิด

(2) นำยางพาราแผ่นมาตัดให้มีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร เพื่อให้ยางพาราแผ่นใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดลของความชื้นกับสิ่งแวดล้อมในขวดโหลได้เร็วขึ้นและความชื้นที่ถ่ายเทออกจากยางพาราแผ่นไม่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในขวดโหลโดยไม่ทำให้สารสารละลายเกลืออิ่มตัวในขวดโหลละลายเป็นของเหลวจนหมดก่อนสภาวะการสมดุลของความชื้น นั่นหมายความว่าค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นขนาด 22 เซนติเมตร มีค่าเหมือนกันกับยางพาราแผ่นขนาดจริง จากนั้นแบ่งออกเป็น 6 ส่วนๆ ละประมาณ 10 กรัม

(3) นำยางพาราแผ่นที่แบ่งแล้วมาใส่ในตะแกรงแล้วนำไปวางไว้ในขวดโหล โดยไม่ให้ตะแกรงสัมผัสกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จากนั้นปิดฝาขวดโหลให้สนิท

(4) นำขวดโหลใส่ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิในตู้อบไว้ที่ 40 ^{O}C

ตารางที่ 2 วอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ [18]

Salts	10 ^{O}C	20 ^{O}C	30 ^{O}C	40 ^{O}C	50 ^{O}C	60 ^{O}C	70 ^{O}C
(LiCl)	0.113	0.113	0.113	0.112	0.111	0.110	0.108
($MgCl_2$)	0.335	0.331	0.324	0.316	0.305	0.292	0.277
($Mg(NO_3)_2$)	0.574	0.544	0.514	0.484	0.454	0.424	0.394
(KI)	0.721	0.699	0.679	0.661	0.645	0.631	0.619
(NaCl)	0.757	0.755	0.751	0.747	0.744	0.741	0.736
($(NH_2)_2.SO_4$)	0.821	0.813	0.806	0.799	0.792	0.786	0.779

(5) นำยางพาราแผ่นในขวดโหลแต่ละขวดโหลมาชั่งน้ำหนักทุกวันจนกว่านำหนักของยางพาราแผ่นแต่ละขวดโหลมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 0.002 กรัม

(6) นำยางพาราแผ่นในขวดโหลออกจากขวดโหลแล้วทำการอบแห้งในตู้อบต่อไปเพื่อหาน้ำหนักแห้งของยางพาราแผ่น แล้วนำไปคำนวณค่าความชื้นสมดุล

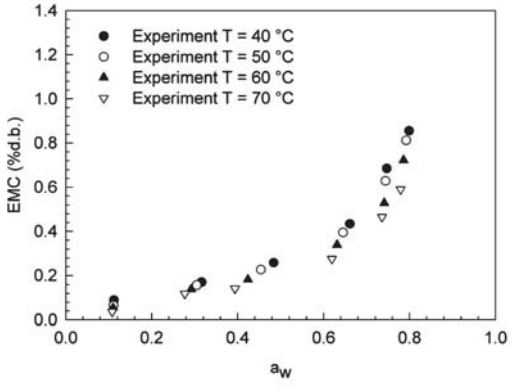
(7) ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 50, 60 และ 70 ^{O}C เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยวิธีลมร้อนอยู่ที่ประมาณ 45-65 ^{O}C ส่วนการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยวิธีรมควันอยู่ที่ประมาณ 50-60 ^{O}C [2]

(8) หาพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลโดยเทียบกับความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB version 7 นำค่า Coefficient of Determination (R^2), Adjusted Coefficient of Determination (Adjusted R^2), Sum of Squared Error (SSE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ของแบบจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกัน โดยสังเกตค่า R^2 กับ Adjusted R^2 มากสุดและ SSE กับ RMSE น้อยสุด

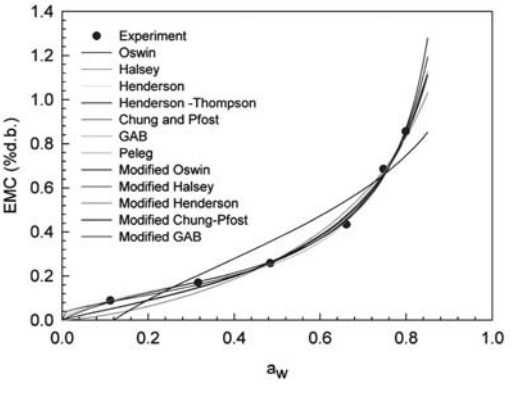
4. ผลและการวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 ^{O}C ในช่วงของค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ 0.10-0.82 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ นั่นคือ ถ้าค่าวอเตอร์แอคติวิตี้มีค่าน้อยจะส่งผลให้ยางพาราแผ่นมีค่าความชื้นสมดุลต่ำและถ้าค่าวอเตอร์แอคติวิตี้สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ยางพาราแผ่นมีค่าความชื้นสมดุลสูงขึ้น เพราะที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้สูงนี้ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมก็จะสูงขึ้นด้วยส่งผลให้การถ่ายเทความชื้นระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมได้น้อยกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า ส่วนที่ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เท่ากันนั้นพบว่าค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคือเมื่ออุณหภูมิมีค่าน้อยจะส่งผลให้ยางพาราแผ่นมีค่าความความชื้นสมดุลสูงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ยางพาราแผ่นมีค่าความชื้นสมดุลต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะการกระตุ้นที่สูงขึ้นของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นนำไปสู่การลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ

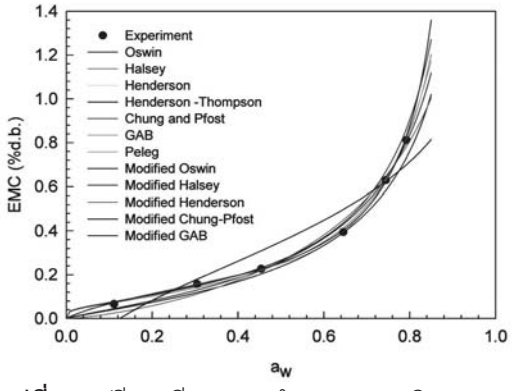
การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล 12 แบบกับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2-5 และมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Oswin, Halsey, Henderson,Henderson–Thompson, GAB, Peleg, Modified Oswin, Modified Halsey, Modified Henderson และ Modified GAB ยกเว้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Chung and Pfost และ Modified Chung-Pfost สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองและมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้าหากทำการเปรียบเทียบค่า R^2 กับ Adjusted R^2 ที่มีค่ามากสุดและค่า SSE กับ RMSE ที่มีค่าน้อยสุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลทั้ง 12 แบบ พบว่าที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 70 ^{O}C นั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg มีค่า R^2 กับ Adjusted R^2 มากสุดและค่า SSE กับ RMSE น้อยสุด ส่วนที่อุณหภูมิ 60 ^{O}C พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ GAB มีค่า R^2 = 0.999 กับ Adjusted R^2 = 0.9984 สูงที่สุดและค่า SSE = 0.0003201 กับ RMSE = 0.01033 น้อยที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg มีค่า R^2 = 0.9987, Adjusted R^2 = 0.9968, SSE = 0.0004202, RMSE = 0.0145 จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg นั้นสามารถนำมาทำนายค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นในทุกช่วงอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการนำไปใช้งานเพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ของสภาวะสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลที่ได้จากการทดลองในแต่ละอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6



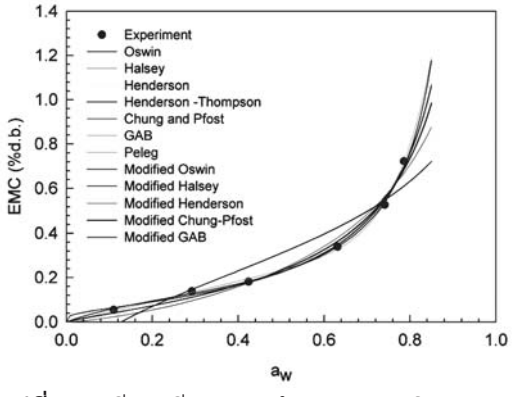
รูปที่ 1 ความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่น



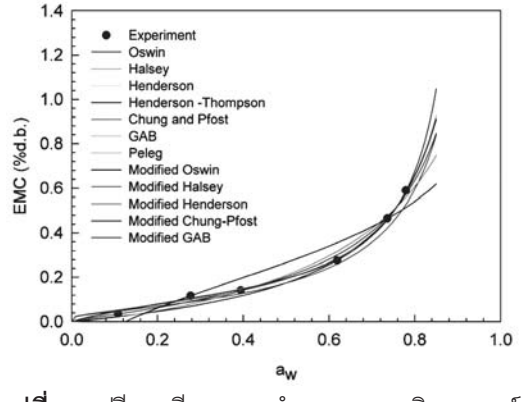
รูปที่ 2 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C



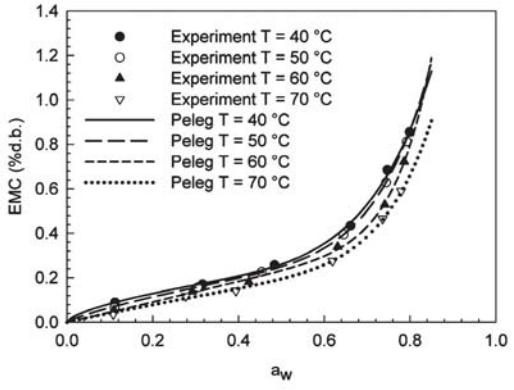
รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C



รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 ^{O}C



รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ Peleg กับผลที่ได้จากการทดลอง

5. สรุป

ความชื้นสมดุลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ค่า วอเตอร์แอคติวิตี้เดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกันความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เพิ่มขึ้นและจากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นกับผลที่ได้จากการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 40-70 ^{O}C และในช่วงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ 0.10-0.82 นั้นพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Peleg นั้นสามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลอื่นๆ และมีรูปแบบสมการที่ง่ายไม่ซับซ้อนสะดวกต่อการนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่นที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ของสภาวะสิ่งแวดล้อม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณนายอดิศักดิ์ ชะนะถาวร นายโฆษิต จันทกาญจน์ และนายวีระชัย ดิสระ ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลเพื่อการทดลองซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ

Equation	Parameter	Temperature			
		T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C	T = 70 °C
Oswin	A	0.2781	0.2608	0.2317	0.2018
	B	0.8075	0.8398	0.8316	0.8273
	R^2	0.991	0.9902	0.9925	0.9932
	Adjusted R^2	0.9888	0.9877	0.9907	0.9915
	SSE	0.00416	0.004075	0.002461	0.001604
	RMSE	0.03225	0.03192	0.0248	0.02003
Halsey	A	60.64	62.37	57	51.94
	B	0.978	0.9299	0.9317	0.9229
	R^2	0.9969	0.9963	0.9969	0.9968
	Adjusted R^2	0.9961	0.9953	0.9961	0.996
	SSE	0.001445	0.001554	0.001015	0.0007525
	RMSE	0.01901	0.01971	0.01593	0.01372
Henderson	A	0.005913	0.005852	0.006303	0.006955
	B	0.7675	0.753	0.7699	0.7897
	R^2	0.9773	0.9756	0.9791	0.9815
	Adjusted R^2	0.9717	0.9695	0.9738	0.9768
	SSE	0.01051	0.01012	0.006886	0.004354
	RMSE	0.05126	0.0503	0.04149	0.03299
Henderson –Thompson	A	0.006068	0.006002	0.006458	0.006997
	B	-8	-8	-8	-2
	C	0.7673	0.7533	0.7699	0.7898
	R^2	0.9773	0.9756	0.9791	0.9815
	Adjusted R^2	0.9622	0.9593	0.9651	0.9691
	SSE	0.01051	0.01012	0.006886	0.004354
	RMSE	0.05919	0.05808	0.04791	0.0381
Chung and Pfost	A	3.018	3.131	3.516	4.116
	B	-81.87	-158.4	-254.7	-79.12
	C	492.1	343.1	161.4	548.7
	R^2	0.9003	0.9029	0.9166	0.927
	Adjusted R^2	0.8339	0.8382	0.8609	0.8784
	SSE	0.04621	0.04023	0.02746	0.01713
	RMSE	0.1241	0.1158	0.09568	0.07557

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

Equation	Parameter	Temperature			
		T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C	T = 70 °C
GAB	A	0.15	0.1368	0.1228	0.1068
	B	1.041	1.06	1.056	1.059
	C	7.154	6.675	5.854	5.383
	R^2	0.9963	0.9976	0.999	0.9985
	Adjusted R^2	0.9939	0.9959	0.9984	0.9976
	SSE	0.001706	0.001015	0.0003201	0.0003448
	RMSE	0.02384	0.01839	0.01033	0.01072
Peleg	A	2.179	2.671	4.223	0.3516
	B	6.108	7.258	10.25	0.925
	C	0.3561	0.3996	0.4606	2.142
	D	0.6293	0.7782	1.003	7.783
	R^2	0.9984	0.9989	0.9987	0.9989
	Adjusted R^2	0.9959	0.9974	0.9968	0.9974
	SSE	0.0007613	0.0004363	0.0004202	0.0002478
	RMSE	0.01951	0.01477	0.0145	0.01113
Modified Oswin	A	200.5	140	90.01	-49.56
	B	-0.6397	-0.4327	-0.2696	0.145
	C	1.238	1.191	1.203	1.051
	R^2	0.991	0.9902	0.9925	0.9863
	Adjusted R^2	0.985	0.9836	0.9875	0.9772
	SSE	0.00416	0.004075	0.002461	0.003211
	RMSE	0.03724	0.03686	0.02864	0.03272
Modified Halsey	A	550.8	-290	-290	-503.1
	B	-1.765	0.8929	0.8656	1.461
	C	0.978	0.9299	0.9317	0.9229
	R^2	0.9969	0.9963	0.9969	0.9968
	Adjusted R^2	0.9948	0.9938	0.9949	0.9947
	SSE	0.001445	0.001554	0.001015	0.0007525
	RMSE	0.02195	0.02276	0.01839	0.01584

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

Equation	Parameter	Temperature			
		T = 40 °C	T = 50 °C	T = 60 °C	T = 70 °C
Modified Henderson	A	0.005712	0.005643	0.006065	0.006683
	B	11	12	13	14
	C	0.7673	0.7533	0.7697	0.7897
	R^2	0.9773	0.9756	0.9791	0.9815
	Adjusted R^2	0.9622	0.9593	0.9651	0.9691
	SSE	0.01051	0.01012	0.006886	0.004354
	RMSE	0.05919	0.05808	0.04791	0.0381
Modified Chung-Pfost	A	293.8	308.4	421.5	198.6
	B	-175	-175	-128.5	-247.5
	C	3.018	3.131	3.516	4.116
	R^2	0.9003	0.9029	0.9166	0.927
	Adjusted R^2	0.8339	0.8382	0.8609	0.8784
	SSE	0.04621	0.04023	0.02746	0.01713
	RMSE	0.1241	0.1158	0.09568	0.07557
Modified GAB	A	0.15	0.1368	0.1228	0.1068
	B	1.041	1.06	1.056	1.059
	C	2238	2156	1949	1844
	R^2	0.9963	0.9976	0.999	0.9985
	Adjusted R^2	0.9939	0.9959	0.9984	0.9976
	SSE	0.001706	0.001015	0.0003201	0.0003448
	RMSE	0.02384	0.01839	0.01033	0.01072

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Jawjit W, Kroeze C, Rattanapan S. Greenhouse gas emissions from rubber industry in Thailand. Journal of Cleaner Production. 2010;18: 403-411.

[2] Rubber Research Institute of Thailand. Technical Information Rubber. 2010; (in thai)

[3] Shivhare U S, Arora S, Ahmed J, Raghavan G S V. Moisture adsorption isotherms for mushroom. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. 2004; 37:133–137.

[4] Sinija V R, Mishra H N. Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. Journal of Food Engineering. 2008;86: 494–50.

[5] Barrozo M A S, Silva A A M, Oliveira D T. The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed. Journal of Stored Products Research. 2008;44:65–70.

[6] Li X, Cao Z, Wei Z, Feng Q, Wang J. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China. Journal of Stored Products Research. 2011;47:39-47.

[7] Iguaz A, Virseda P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. Journal of Food Engineering. 2007;79:794–802.

[8] Chen C. Moisture sorption isotherms of pea seeds. Journal of Food Engineering. 2003; 58: 45–51.

[9] Ghodake H M, Goswami T K, Chakraverty A. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. Journal of Food Engineering. 2007;78:827–835.

[10] Bahloul N, Boudhrioua N, Kechaou N. Moisture desorption–adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (Olea europaea L.). Industrial Crops and Products. 2008;28:162–176.

[11] Cordeiro D S, Raghavan G S V, Oliveira W P. Equilibrium Moisture Content Models for Maytenus ilicifolia Leaves. Biosystems Engineering. 2006;94:221–228.

[12] Goula A M, Karapantsios T D, Achilias D S, Adamopoulos K G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. Journal of Food Engineering. 2008;85:73–83.

[13] Samapundo S, Devlieghere F, Meulenaer B D, Atukwase A, Lamboni Y, Debevere J M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. Journal of Food Engineering. 2007;79: 168–175.

[14] Al-Muhtaseb A H, McMinn W A M, Magee T R A. Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data. Journal of Food Engineering. 2004;61:297–307.

[15] Hossain M D, Bala B K, Hossain M A, Mondol M R A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. Journal of Food Engineering. 2001;48:103-107.

[16] Oyelade O J, Tunde-Akintunde T Y, Igbeka J C, Oke M O, Raji O Y. Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. Journal of Stored Products Research. 2008;44: 179–185.

[17] Raji A O and Ojediran J O. Moisture sorption isotherms of two varieties of millet. food and bioproducts processing. 2010:1-7.

[18] Sablani S S, Rahman M S, Labnza T P. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. John Wiley and Sons. 2001: A2.3.2.