การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

สมการจลศาสตร์การอบแห้งใบหม่อน

Drying Kinetics of Mulberry Leaves

ณัฐพล ภูมิสะอาด[1] ธนากร บูรณเพชร[2] เจริญพร เลิศสถิตยธนากร[1]
[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์
[2]นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ 043-754364 ต่อ 3028 โทรสาร 043-754316 E-mail: nattapol.p@msu.ac.th[1]

Nattapol Poomsa-ad[1] Thanakorn Buranaphat[2] Charoenporn Lertsatitthanakorn[1]
[1]Faculty of Engineering
[2]Graduate Student, Faculty of Engineering
Mahasarakham University,
KhamLeang, Kuntarawichai, Mahasarakham, 44150 Thailand
Tel: 043-754364 Ext. 3028 Fax: 043-754316 E-mail: nattapol.p@msu.ac.th[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างสมการจลศาสตร์ของการอบแห้งใบหม่อนอบแห้งซึ่งประกอบไปด้วยสมการความชื้นสมดุล และสมการอบแห้งชั้นบาง โดยความชื้นสมดุลทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35-65°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10-90%พบว่า ความชื้นสมดุลย์ของใบหม่อนลดลงตามอุณหภูมิ แต่ลดลงตามความชื้นสัมพัทธ์ สมการในรูปแบบของ Halsey สามาถทำนายผลการทดลองความชื้นสมดุลย์ได้ดีที่สุด ในส่วนของการอบแห้งชั้นบางซึ่งทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 40-60°C ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง 0.4 m/s พบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สมการของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่าสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

Abstract

Drying characteristic of Mulberry leaves (*Moraceae*) including equilibrium moisture content and the thin layer drying was investigated. Equilibrium moisture contents at temperature between 35-65°C and relative humidity between 10-90% were determine. The result found that equilibrium moisture contents were decreased with the temperature but increased with the relative humidity. Halsey's equation which provided best fit were used to represent the experimental data. The thin layer drying experiments were conducted with a constant air velocity at 40, 50 and 60°C. If found that the drying rate was increase with the temperature and the page's equation were suitable used to predict the drying rate of mulberry leaves.

1. บทนำ

หม่อนเป็นพืชอยู่ในวงศ์ *Moraceae* เป็นไม้ยืนต้นประเภทพุ่ม ใบหม่อนสามารถนำเป็นอาหารสำหรับใช้เลี้ยงหนอนไหม (Silkworm) และนอกจากนี้ยังนำมาใช้เป็นพืชสมุนไพร ทำเป็นชาเขียวโดยนำยอดอ่อนของหม่อนไปอบแห้ง ซึ่งชาวจีนนิยมดื่มกันมากโดยเชื่อว่าจะบำรุงสายตา ในใบหม่อนมีสารอาหารมากมายหลายชนิด เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามินและเกลือแร่ และรวมถึงแร่ธาตุต่างๆมากมาย

ในปัจจุบันได้มีการค้นคิดอาหารเทียม (Artificial diet) มาใช้เลี้ยงไหมเพื่อแก้ปัญหาในด้านผลผลิตใบหม่อนไม่เพียงพอในบางฤดูกาลและง่ายต่อการควบคุมเชื้อโรคที่มาจากใบหม่อนอีกด้วย ในอาหารเทียมมีส่วนประกอบหลักคือ ผงใบหม่อน (Mulberry leaf powder) ซึ่งได้จากการนำใบหม่อนมาอบแห้งแล้วนำไปบดให้ละเอียด

จากที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าการอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการแปรรูปใบหม่อน วิธีการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของผงใบหม่อนหรือชาใบหม่อน จึงควรมีการศึกษาและสร้างเครื่องอบแห้งใบหม่อนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ใบหม่อนหลังการอบแห้งที่มีคุณภาพดีเหมาะสมสำหรับทำผงใบหม่อนหรือชาใบหม่อน และยังทำให้สามารถเก็บใบหม่อนในช่วงฤดูการที่มีผลผลิตมาก มาแปรรูปเพื่อใช้ในช่วงฤดูการที่ขาดแคลนได้อีกด้วย

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งนั้นข้อมูลพื้นฐานที่ต้องคำนึงถึงคือ สมการจลศาสตร์ของการอบแห้ง ซึ่งจะได้มาจาก ความชื้นสมดุล และสมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากข้อมูลในส่วนนี้ยังไม่มีมากนัก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างสมการจลศาสตร์ของการอบแห้งใบหม่อน

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ใบหม่อน

ใบหม่อนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากสถานีวิจัยหม่อนไหมขอนแก่น และศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นใบหม่อนพันธุ์ บร.60 ซึ่งทางการได้ส่งเสริมแนะนำให้เกษตรกรปลูก นำใบหม่อนมาตัดหั่นก้านใบทิ้งและนำเฉพาะใบมาหั่นให้มีความกว้างประมาณ 4-5 mm จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างส่วนหนึ่งไปทำการอบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้าโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความชื้นเริ่มต้น ส่วนที่สองจะนำไปทำทองลองหาสมการอบแห้งชั้นบางโดยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และส่วนที่สามจะนำไปทดลองในการหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)

2.2 สมการความชื้นสมดุล

นำตัวอย่างใบหม่อนที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองการคายความชื้นของใบหม่อนพันธ์ บร. 60 ประมาณ 2-3 กรัม มาบรรจุไว้ในกระบอกพลาสติกที่มีการเจาะรูโดยรอบ ชั่งน้ำหนักรวมกับภาชนะบรรจุ นำไปบรรจุในขวดขนาดความจุ 10 oz. ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวของ Lithium chloride (LiCl), Magnesium chloride ($MgCl_2.6H_2O$), Sodium chloride (NaCl), Ammonium sulphate ($(NH_4)_2SO_4$) , Potassium nitrate (KNO_3) , Potassium bromide (KBr) และ Potassium chloride (KCl) ปิดฝาขวดให้แน่น และกระบอกพลาสติกวางอยู่บนขาตั้งสูงจากสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 15-20 mm ปรับอุณหภูมิเป็น 35°C เมื่ออบได้ 1 สัปดาห์ก็นำกระบอกพลาสติกที่บรรจุใบหม่อนไปชั่งน้ำหนักซึ่งต้องชั่งให้เร็วที่สุด เพราะว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ ไอน้ำจะระเหยได้เร็วทำให้ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งผิดพลาดได้ ทำการบันทึกค่าที่อ่านได้ ทำเช่นนี้ไปทุกวันเว้นวันจนกว่าน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับค่าวันที่ผ่านมาและทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับอุณหภูมิ 45°C และ 55°C

American Society of Agricultural Engineering (ASAE)[1]ได้นำเสนอสมการเพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีค่าคงที่ 3 ค่า (Three parameters) เป็นสมการที่เป็นไปได้เพื่อหาค่าความเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ทดลองได้ดังสมการต่อไปนี้

สมการดัดแปลงของ Henderson

$$RH = 1 - \exp\left[-A \times (T + C) \times (M_e)^B\right] \quad (1)$$

สมการดัดแปลงของ Chung and Pfost

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{T + C}\exp\left(-B \times M_e\right)\right] \quad (2)$$

สมการดัดแปลงของ Halsey

$$RH = \exp\left[-\frac{\exp\left(A + B \times T\right)}{\left(M_e\right)^C}\right] \quad (3)$$

สมการดัดแปลงของ Oswin

$$M_e = \frac{A + B \times T}{\left(\frac{1}{RH} - 1\right)^{\frac{1}{C}}} \quad (4)$$

สมการ Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB)

$$M_e = \left(\frac{A \times B \times C \times RH}{\left(1 - B \times RH\right)\left(1 - B \times RH + B \times C \times RH\right)}\right) \quad (5)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ ,decimal
T คือ อุณหภูมิ ,°C
M_e คือ ความชื้นสมดุล , % dry basis
A,B,C คือ ค่าคงที่

ในการหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของสมการความชื้นสมดุลได้ใช้เทคนิคของการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) และ SSE (Summation of Square Error) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง ค่าของ SSE มีค่าต่ำแสดงว่าแบบจำลองนั้นอธิบายผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ นิยามของ SSE เป็นดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}\left(M_e\left(Experiment\right) - M_e\left(\Pr ediction\right)\right)^2 \quad (6)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุล , % dry basis
n คือ จำนวนข้อมูลในการวิเคราะห์

2.3 สมการอบแห้งชั้นบาง

นำตัวอย่างใบหม่อนที่เตรียมไว้สำหรับอบแห้งประมาณ 125 g มาทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ นำตัวอย่างบรรจุในตะแกรงที่ทราบน้ำหนักแล้วปรับความเร็วลมที่ใช้อบแห้งประมาณ 0.4 m/s โดยใช้ Hot wire

anemometer อุณหภูมิลมร้อนที่ 40^{O}C จากนั้นจะทำการนำตะแกรงบรรจุใบหม่อนออกจากห้องอบมาทำการชั่งน้ำหนักใบหม่อนที่เวลา 3,6,9,12,15,20,25,30 และที่ทุก ๆ 10 นาที โดยการชั่งน้ำหนักจะต้องรับชั่งทันทีเมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้ และจะต้องชั่งด้วยความระมัดระวังไม่ให้ตัวอย่างร่วงหล่นลงไปได้ ความละเอียดของตาชั่งที่ใช้มีความละเอียด 0.01 g ทำเช่นนี้กระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงหยุดการทดลองและนำใบหม่อนไปหาความชื้นโดยวิธีเดียวกับหาความชื้นเริ่มต้น และทำการทดลองเช่นเดิมแต่ปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ใช้เป็น 50^{O}C และ 60^{O}C ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางตามที่แนะนำไว้โดย ASAE [2] ซึ่งได้เสนอสมการพื้นฐานในการอบแห้งชั้นบาง เพื่อแสดงข้อมูลอัตราการอบแห้ง ดังสมการของ Page และสมการกึ่งทฤษฎีซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

สมการของ Page (Page's Equation)

$$MR = \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp\left(-kt^n\right) \quad (7)$$

สมการกึ่งทฤษฎี (Semi Theoretical Equation)

$$MR = \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp\left(-kt\right) \quad (8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
M คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ , % dry basis
M_e คือ ความชื้นสมดุล , % dry basis
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น , % dry basis
t คือ เวลา , นาที
k,n คือ ค่าคงที่

ในการหาค่าคงที่ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางได้ใช้เทคนิคของการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) และ Summation of Square Error (SSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลองเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสมการความชื้นสมดุล

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลในใบหม่อนด้วยวิธีสถิตโดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 35^{O}C 45^{O}C และ55^{O}C พบว่าความชื้นสมดุลของใหม่อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นให้ผลเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ [3,4] จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาค่าคงที่ของสมการต่าง ๆ ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

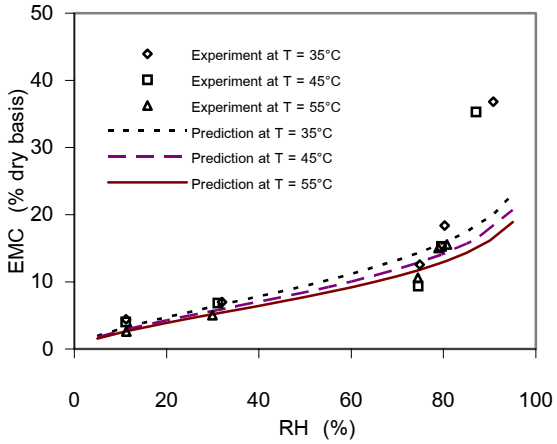
จากตารางค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบเมื่อพิจารณาจากค่า Summation of Square Error (SSE) ว่าสมการของของ GAB มีค่าน้อยที่สุด แต่สมการของ Halsey มีค่า coefficient of determination (r^2) ต่ำที่สุด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถอดถอยมาสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของอากาศกับความชื้นสมดุล (EMC) ของใบหม่อนอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดลองและผลการทำนายรูปแบบสมการต่าง ๆได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นค่ารูปแบบสมการของ Henderson, Chung and Pfost และ Halsey สามารภแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของใบหม่อนได้ดีกว่าสมการของ Oswin และ GAB แต่อย่างไรก็ต่ามสมการทั้งสองสามารถทำนายความชื้นสมดุลของใบหม่อนที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มากกว่า 90% ได้ดี ในขณะที่สมการของ Halsey ทำนายได้ดีพอสมควร

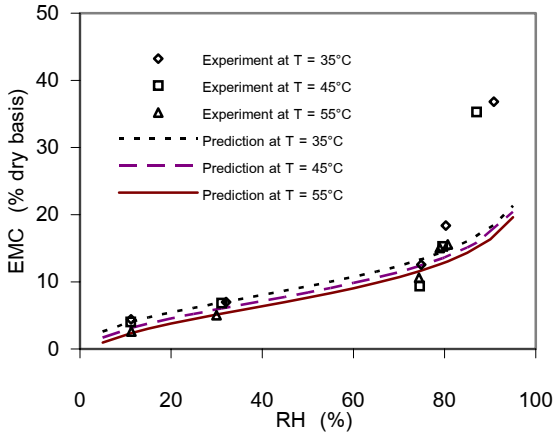
ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์สมการถดถอยและพิจารณาจากกราฟแสดงผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการทำนาย พบว่าสมการของ Halsey ซึ่งมีค่า r^2 สูงสุดนั้นมีความเหมาะสมที่นำมาใช้ทำนายความชื้นสมดุลของใบหม่อนที่สุด ถึงแม้ว่าค่า SSE ไม่น้อยที่สุดก็ตามเนื่องไม่สามารถทำนายความชื้นสมดุลซึ่งมีค่าสูงได้ดี แต่โดยภาพรวมสามารถทำนายได้ดีกว่าสมการของ GAB ซึ่งมีค่า SSE น้อยที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ความชื้นสมดุล

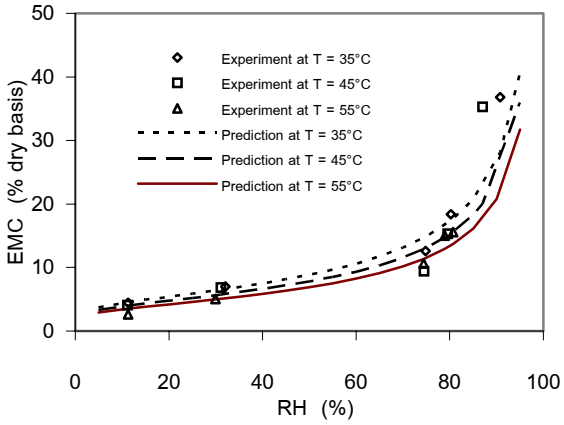
รูปแบบสมการ	A	B	C	r^2	SSE
Henderson (Eq. 1)	0.000324805	1.619890963	21.290115623	0.92104	677.33
Chung and Pfost (Eq.2)	241.99598155	0.214500765	11.844355366	0.92985	758.76
Halsey (Eq. 3)	4.055040243	0.020906439	1.691778141	0.95775	336.74
Oswin(Eq. 4)	6.635911324	0.022843357	1.213055866	0.89091	166.26
GAB(Eq. 5)	3.239816082	1.010952627	37574643.178	0.92380	116.09



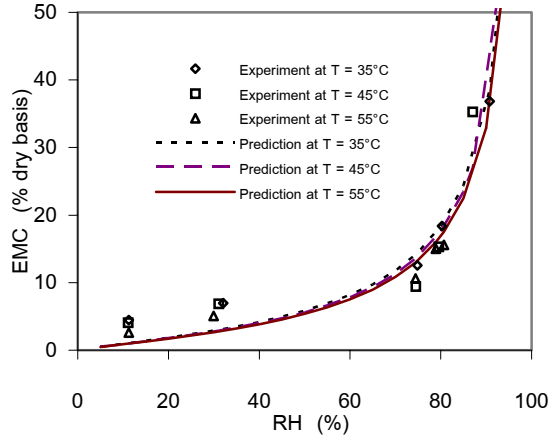
a) Henderson's Equation



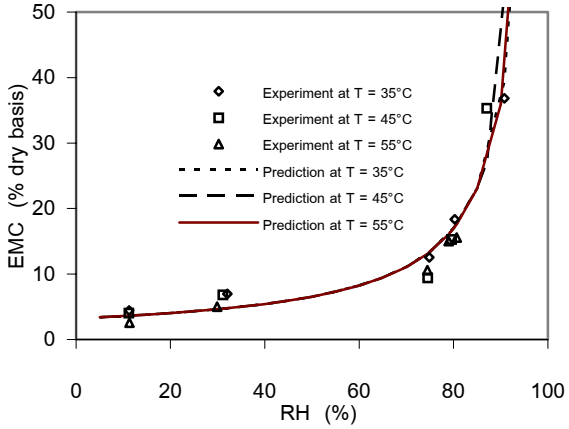
b) Chung and Pfost's Equation



c) Halsey's Equation



d) Oswin's equation

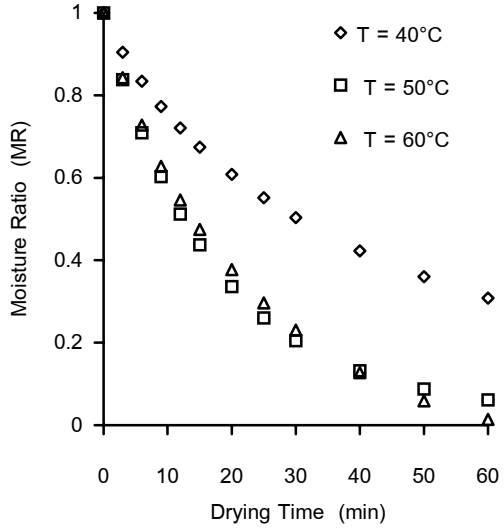


e) GAB's Equation

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของอากาศกับความชื้นสมดุล (EMC) ของใบหม่อนอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดลองและผลการทำนายรูปแบบสมการต่าง ๆ

3.2 สมการอบแห้งชั้นบาง

เมื่อผลการทดลองอบแห้งใบหม่อนแบบชั้นบางและค่าความชื้นสมดุลย์ทำนายจากสมการของ Halsey มาคำนวณอัตราส่วนความชื้นที่ระยะเวลาอบแห้งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าอัตราการอบแห้งแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 60°C อัตราการอบแห้งไม่แตกต่างกันมากนัก ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ FIck ซึ่งอัตราการแพร่ของน้ำขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2 อัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนระหว่างการอบแห้งที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาค่าคงที่ของสมการกึ่งทฤษฎีและสมการของ Page แล้วนำค่าคงที่ที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง (T) ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับที่สาม จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมกการดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า SSE ของสมการกึ่งทฤษฎีและสมการของ Page มีค่า 0.00122 และ 0.000126 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการของ Page สามารถทำนายผลการทดลงได้ดีกว่าสมการกึ่งทฤษฎี

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลของ Semi Theoretical Equation

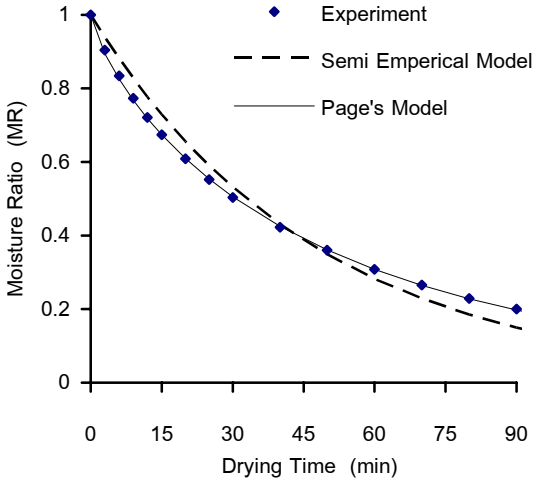
$$k = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$

พารามิเตอร์	b_0	b_1	b_2
K	0.477069115	0.019778401	0.000183108

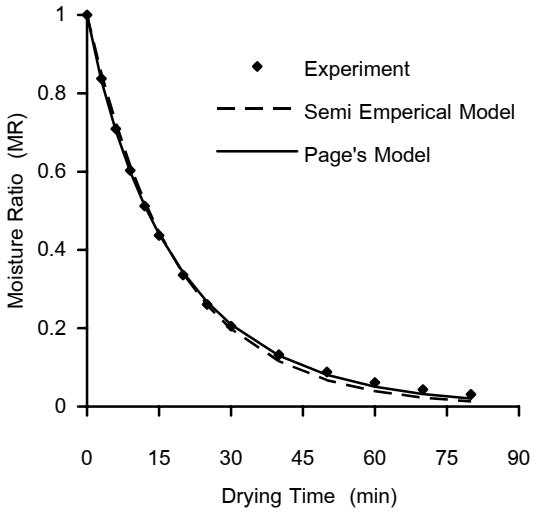
ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลของ Page's Equation

$$k = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$
$$n = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$

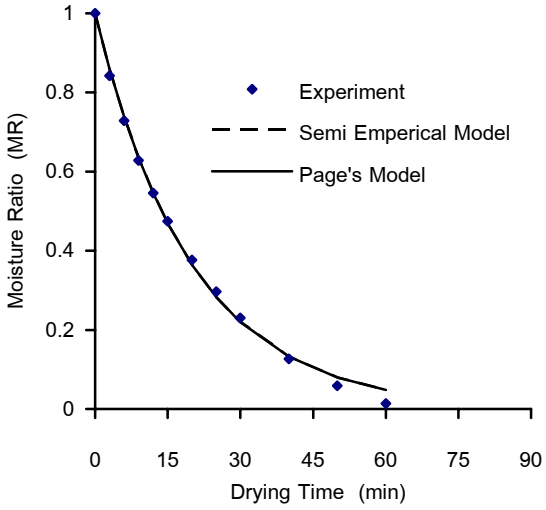
พารามิเตอร์	b_0	b_1	b_2
k	0.387561211	0.017977065	0.000177979
n	0.466734668	0.045195497	0.000345633



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนระหว่างการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนระหว่างการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 5 อัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนระหว่างการอบแห้งที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายที่อุณหภูมิ 60^{o}C

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ทำนายได้จากสมการในรูปแบบสมการทั้งสองสมการที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ มาเขียนกราฟได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3-5 พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ คือสมการของ Page ซึ่งสมารถทำนายผลการทดลองได้ดีในทุกอุณหภูมิและทุกช่วงเวลาของการทดลอง

4. สรุป

1. ความชื้นสมดุลย์ของใบหม่อนลดลงตามอุณหภูมิ แต่เพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสมการของ Halsey สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าสมการอื่น ๆ

2. ในการอบแห้งชั้นบางของใบหม่อนพบว่าพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สมการของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่าสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย สถานีวิจัยหม่อนไหมขอนแก่นและศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่อนุเคราะห์มอบใบหม่อนสำหรับใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] American Society of Agricultural Engineering “Moisture Relationships of Plant-base Agricultural Products.”, ASAE D245.5, 1999, pp. 512-528

[2] American Society of Agricultural Engineering, “Thin-Layer Drying of Grains and Crops.”, ASAE S448 DEC98, 1999. pp. 581-583.

[3] M. K. Krokida, V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis and D. Marinos-Kouris, “Drying kinetics of some vegetables.”, Journal of Food Engineering, 2003, Vol. 59 No. 4, pp.391-403

[4] Medeni Maskan and Fahrettin Göü, “Sorption Isotherms and Drying Characteristics of Mulberry (Morus alba).”, Journal of Food Engineering, 1998, Vol. 37 No. 4, pp. 437-449