

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง
โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง

MATHEMATICAL DEVELOPMENT OF THIN LAYER MODEL OF CHILI DRYING
USING CONTINUOUS FLUIDIZED BED TECHNIQUE

ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์^{1,*2}, กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย² ณัฐกิต ฝอยทอง¹ เจษฎา สุขะจักร¹ และ ประเสริฐ โสภภาพ¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

*E-mail: Supchar_2005@yahoo.com, โทร 0-433-6371 ต่อ 2601, เบอร์โทรสาร 0-4323-7483

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งพริกแบบชั้นบางโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดต่อเนื่อง โดยพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 50,60,70,80,90 และ 100 °C ความเร็วอากาศร้อน 4,5 และ 6 m/s ในการพัฒนาแบบจำลองนี้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งหมด 10 แบบจำลองและมีการพัฒนาแบบจำลองใหม่ขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ 3 ตัวด้วยกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($Adj.R^2$) และ ค่าผลรวมของความผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) ที่ใช้ในการ แบบจำลองใหม่นี้พัฒนามาจากสมการของ Henderson, Two-term และ Aghabashlo และคณะ ซึ่งแบบจำลองใหม่นี้ใช้สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้น จากผลของการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองใหม่นี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอบแห้งพริกภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิอบแห้ง 50,60,70,80,90 และ 100 °C ความเร็วอากาศร้อน 4, 5 และ 6 m/s ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถอธิบายผลการทดลองได้

คำหลัก: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อบแห้ง พริก ฟลูอิดไดซ์เบด การถดถอย

Abstract

The objective of this research was to developed the mathematical model of thin layer chili drying using continuous fluidized bed technique. Based on the drying temperature 50,60,70,80,90 and 100 °C drying air velocity 4 , 5 and 6 m/s and developed mathematical model. The effect of drying temperature were at 50, 60, 70, 80, 90 and 100 °C and drying air velocity were at 4, 5 and 6 m/s. Ten different mathematical drying models were compared and developed new model from experiment data according to three statistical parameters, i.e. coefficient of determination (R^2) , adjusted coefficient of determination ($Adj.R^2$) and summation of square error (SSE) . The new model was developed from the Henderson, Two-term and Aghabashlo et al., model. The new model for predicting the change of moisture content ratio was developed. Non-linear regression analysis results showed that the new model was

predicted best drying curves of chili under the drying temperature of 50, 60, 70, 80, 90 and 100 °C and drying air velocity of 4, 5 and 6 m/s. Simulated results obtained from a developed mathematical model were in good agreement with the experimental results.

Keywords: mathematical models, drying, chili, fluidized bed and non-linear regression

คำอธิบายสัญลักษณ์

M	ความชื้น (% มาตรฐานเปียก)	a, b, c, n	empirical coefficients in the drying model(dimensionless)
MR	อัตราส่วนความชื้น		
M_{in}	ความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง(%มาตรฐานเปียก)	$k, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$	empirical constants in the drying model(min ⁻¹)
M_t	ความชื้นหลังการอบแห้ง(%มาตรฐานเปียก)	SSE	ค่าดัชนีบ่งชี้
M_{eq}	ความชื้นสมดุล(% มาตรฐานเปียก)	SST	total sum square
M_{exp}	อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง	n	ค่าคงที่
M_{pre}	อัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลอง	R^2	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
t	เวลาอบแห้ง(นาที)	Adj. R^2	ค่าปรับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
v	ความเร็วอากาศร้อน(m/s)	T	อุณหภูมิการอบแห้ง (°C)

1. บทนำ

พริกเป็นผักตระกูล Solanaceae ซึ่งอยู่ในตระกูลเดียวกับ มะเขือ มะเขือเทศ มันฝรั่ง และยาสูบ ส่วนใหญ่ปลูกได้ดีในเขตร้อน มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตร้อนของทวีปอเมริกาใต้จากนั้นได้แพร่กระจายไปยังหมู่เกาะอินเดียตะวันตก เม็กซิโก และแถบอเมริกากลางจากนั้นได้แพร่กระจายไปยังประเทศ ในทวีปแอฟริกา และเอเชีย พริกยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและอยู่คู่สังคมไทยมานาน คนไทยนิยมใช้พริกในการปรุงรสอาหาร ซึ่งในพริกมีสารที่ทำให้ความเผ็ดร้อน แคปไซซินซึ่งมีประโยชน์ทางการแพทย์ สารดังกล่าวจะออกฤทธิ์ต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ระบบทางเดินอาหาร ระบบไหลเวียนของเลือด ระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาทและอุณหภูมิของร่างกาย ดังนั้นสารแคปไซซินจึงมีความสำคัญในวงการเภสัชกรรม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบางนั้นแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบไปด้วย ทางทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และเอ็มไพริคัล(Hii, 2009) ในการศึกษาการอบแห้งพริกของ

Doymaz(2002) ได้นำเสนอคุณลักษณะการอบแห้งพริกแบบชั้นบางซึ่งลักษณะของพริกที่ใช้ในการอบเป็นแบบแผ่น ซึ่งได้เปรียบเทียบสมการของ Page และ Exponential ส่วน Akpinar(2003) ได้เสนอการเปลี่ยนแปลงของการอบแห้งพริกโดยใช้สมการของ approximation of diffusion การศึกษาของ Susana(2005) ได้อธิบายคุณลักษณะการอบแห้งพริกโดยใช้สมการของ Peleg และ การศึกษาของ Kalemullah(2005) ได้เลือก 3 แบบจำลองแบบชั้นบางซึ่งประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Lewis(1921), Hustrulid and Flikke(1959) และ Page(1949) สำหรับใช้ในการพิตกราฟในการอบแห้งและเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบเอ็มไพริคัลของ Kalemullah(2002) โดยใช้เครื่องอบแห้งพริกแบบโรตารี จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกแบบชั้นบางโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งทฤษฎีของการอบแห้งพริกแบบชั้นบางซึ่งใช้เทคนิคในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง เพื่อใช้

ทำนายการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและ
อัตราการอบแห้ง

2. วัสดุ การทดลองและเครื่องมือทดลอง

2.1 วัสดุและการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้พริกที่นิยมขายใน
ท้องตลาด ซึ่งก็คือพริกชี้ฟ้าใหญ่พันธุ์จินดา ซึ่งมี
ลักษณะทางกายภาพคือผลสุกมีสีแดงสดเข้ม มีรสเผ็ด
จัด มีเมล็ดมาก และมีน้ำหนักมาก ขนาดความยาว
ประมาณ 5-10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนที่
โตที่สุดเฉลี่ย 0.9 เซนติเมตร เมื่อทำเป็นพริกแห้งจะ
ได้พริกที่มีผลสีแดงเข้ม เป็นมันกรอบ เขียวสดตรง ผิว
เรียบ เป็นมันวาว คุณภาพดีตรงตามตลาดต้องการ
โดยพริกที่จะนำมาทดสอบนี้จะต้องผ่านการคัดก่อน
และเด็ดขั้วทุก ๆ เม็ด พริกที่ทดสอบนี้มีความชื้น
เริ่มต้นที่ 72.98% มาตรฐานเปียก ทดสอบตาม
มาตรฐาน AOAC(2000) ใช้วิธีการ 930.04 ซึ่งเป็นค่า
ความชื้นที่ได้จากห้องปฏิบัติการกลาง น้ำหนักเริ่มต้น
ในการอบแห้งคือ 1000 กรัม และทดลองจนพริกแห้ง
ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของพริกแห้งหรือ มอก.
456-2526 คือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 13% มาตรฐาน
เปียก ในการทดลองนี้ควบคุมอุณหภูมิของการ
อบแห้งอยู่ 6 ระดับคือ 50 60 70 80 90 และ 100 °C
ความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 3 ระดับ
คือ 3 4 และ 5 m/s โดยมีการชั่งน้ำหนักพริกทุก ๆ 5
นาที่ ทดลองจนกว่าเม็ดพริกทั้งหมดนั้นจะเคลื่อนที่
ออกจากห้องอบแห้งได้โดยอัตโนมัติ และบันทึกค่า
อุณหภูมิโดยเครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ เมื่อได้ผลการ
ทดลองของน้ำหนักของพริกที่หายไปนำไปคำนวณหา
ค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาและนำ
ข้อมูลในแต่ละเงื่อนไขการทดลองที่ทุก ๆ อุณหภูมิการ
อบแห้งทั้ง 6 ระดับ และ ความเร็วลมร้อน 3 ระดับ
นำไปวิเคราะห์ค่าการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้
โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบค่าทางสถิติ 3 ค่า
ซึ่งก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(R^2) ค่าปรับแก้
สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ($Adj.R^2$) และ ค่าผลรวมของ
ความผิดพลาดยกกำลังสอง(SSE) แล้วเปรียบเทียบ

ค่าทางสถิติต่าง ๆ ในแต่ละแบบจำลองและแบบจำลองที่
พัฒนาขึ้นมาใหม่

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 1
ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบด้วย ขด
ลวดความร้อนขนาด 1500 วัตต์ จำนวน 8 แท่ง ห้อง
อบแห้งขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 0.3 x 1.0 x 0.5
เมตร โบลเวอร์ขนาด 3 แรงม้า 1450 rpm

เครื่องมือวัดประกอบไปด้วย เทอร์โมคัปเปิลชนิด
K สำหรับวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิระบบ
พีไอดี ยี่ห้อ Shinko รุ่น MCD-130-R/E-Japan มี
ความแม่นยำ ± 1 °C เครื่องมือสำหรับบันทึกอุณหภูมิ
32 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ Hioki รุ่น 8422-51 ผลิตใน
ประเทศญี่ปุ่น เครื่องมือวัดความเร็วลมร้อนยี่ห้อ
Digicon รุ่น DA-45-Japan ซึ่งมีย่านในการวัด 0.8-
12.0 m/s มีความละเอียด 0.01 m/s ค่าความไม่
แน่นอน $\pm(2\%+0.2$ m/s) เครื่องมือวัดความชื้นของ
อากาศ ยี่ห้อ Digicon รุ่น T-126TH-S-Japan ย่านการ
วัด 0-100%RH ค่าความไม่แน่นอน $\pm 2.5\%$ RH(30-90
RH) และเครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Ohaus รุ่น ARC210-
USA ย่านการวัด 0-2100 กรัม ความละเอียด 0.01
กรัม

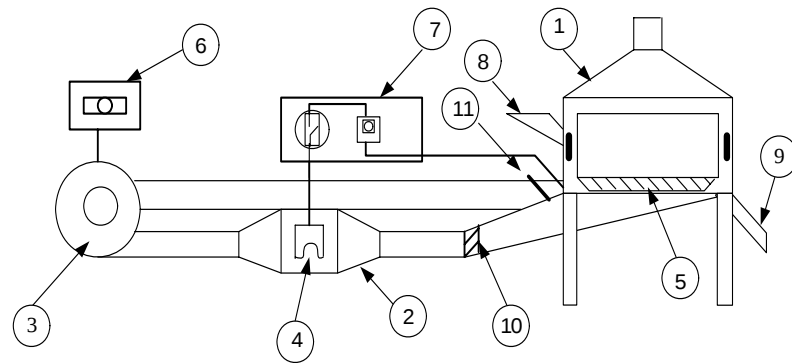
3. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองของ Lewis ได้อธิบายว่าการ
ถ่ายเทความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร
สามารถมองให้เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนของ
วัตถุที่จมอยู่ในของไหลเย็นจากการเปรียบเทียบกับ
ปรากฏการณ์นี้ด้วยกฎการเย็นตัวของนิวตัน อัตราการ
อบแห้งเป็นอัตราส่วนของผลต่างระหว่างปริมาณ
ความชื้นของวัสดุที่อบแห้งแล้วกับความชื้นที่สมดุล ที่
สถานะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเป็นดังสมการ

$$\frac{dM}{dt} = -k(M_t - M_{eq}) \quad (1)$$

หรือเมื่ออินทิเกรตสมการ(1) จะได้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = e^{-kt} \quad (2)$$



รูปที่ 1. ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง (1) ห้องอบแห้ง, (2) ห้องชุดกำเนิดความร้อน, (3) พัดลม
หอยโข่ง, (4) ควบคุมความร้อน, (5) ถาดใส่ฟริกทดลอง, (6) ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์
ไฟฟ้า, (7) ชุดควบคุมอุณหภูมิ, (8) ทางเข้าฟริก, (9) ทางออกฟริก, (10) แผ่นกระจายลม, (11)
เทอร์โมคัปเปิล

ตารางที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
1	Henderson	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson, 1952
2	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz, 2001
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, 1949
4	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis, 1921
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang, 1978
6	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-b) \exp(-nt)$	Midilli et al., 2002
7	Two-term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Hii, 2009
8	Two-term Exponential	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Akpınar, 2003
9	Aghabashlo		Aghabashlo, 2008
10	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	$MR = a \exp(-(k_1 t)/(1 + k_2 t)) + b \exp(-(k_3 t)/(1 + k_4 t))$	บทความนี้

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น M_{in} , M_t คือความชื้นของวัสดุเริ่มต้นและสุดท้าย และ M_{eq} คือความชื้นที่สมดุล มาตรฐานเปียก และ k เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง t คือเวลาการอบแห้ง ได้มีการพัฒนาขึ้นอีกโดยแบบจำลองของ Handerson ได้มาจากเทอมแรกของของการแก้สมการทั่วไปจากสมการของ Lewis

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a e^{-kt} \quad (3)$$

แบบจำลองของ Page (1949) เป็นสมการอบแห้งที่พัฒนาจากรูปสมการ Lewis เพื่อใช้ทำนายผลอัตราการอบแห้ง แกไขจุดบกพร่องแบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนาย

การอบแห้งของธัญพืช, ข้าวกล้อง, ถั่วขาว และเมล็ดข้าวโพด มีรูปแบบการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = e^{-kt^n} \quad (4)$$

Sharaf-Eldeen, Blaisdell, and Hamdy ได้นำเสนอ Two-term model เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งของ Shelled corn ที่สัมผัสกับอากาศอย่างเต็มที่ แบบจำลองนี้เป็น 2 เทอมแรกของการแก้อนุกรมทั่วไปของสมการ Lewis อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ต้องให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ และต้องสมมติค่าการกระจายที่คงที่ แบบจำลอง two-term เป็นดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = ae^{-kt} + be^{-ct} \quad (5)$$

และในการศึกษานี้ได้มีการพัฒนาสมการของ (Aghabashlo et al., 2008) โดยมีรูปดังสมการ

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = e^{\left(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t}\right)} \quad (6)$$

สมการที่พัฒนาขึ้นนี้ได้พัฒนามาจากสมการของ Henderson, Two-term และ Aghabashlo et al., 2008 จึงได้ออกมาเป็นแบบจำลองในการศึกษานี้

$$MR = ae^{\left(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t}\right)} + be^{\left(-\frac{k_3 t}{1+k_4 t}\right)} \quad (7)$$

จากความสัมพันธ์อัตราส่วนของความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกนำข้อมูลจากการทดลองไปเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น เพื่อให้ได้สมการถดถอยสำหรับทำนายอัตราการอบแห้งพริก ในกระบวนการนี้ ตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ (กำหนดให้เป็นอัตราส่วนความชื้น MR) ส่วนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนาย (กำหนดให้เป็นอุณหภูมิ T และเวลาในการอบแห้ง t) สมการทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายผลการทดลองได้แม่นยำมากที่สุดจากสมการทั้งหมด 10 สมการ (ตารางที่ 1) โดยจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) และค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($Adj.R^2$) ที่มากที่สุด

และค่าดัชนีบ่งชี้ (Summation of Square Error: SSE) ที่น้อยและลู่เข้าศูนย์มาก (ค่า $Residual \rightarrow 0$) แสดงว่าแบบจำลองนั้นอธิบายผลการทดลองได้ดีหรือแบบจำลองนั้นมีความน่าเชื่อถือ

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left[MR_{(Experiment)} - MR_{(Model)} \right]^2 \quad (9)$$

ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การ

$$ตัดสินใจ Adj.R^2 = 1 - \frac{df(SSE)}{df(SST)} (1 - R^2) \quad (10)$$

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดลองอบแห้งพริกแบบต่อเนื่องโดยใช้กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ กันคือ ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 °C และที่ความเร็วอากาศร้อน 4, 5 และ 6 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าความเร็วลมร้อน ส่วนความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่อการเคลื่อนตัวแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการเคลื่อนตัวออกจากห้องอบแห้งอย่างต่อเนื่อง และเงื่อนไขที่ถือว่าเหมาะสมในการทดลองนี้ก็คือที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเร็วอากาศร้อน 5 m/s เนื่องจากให้ผลที่กายภาพของพริกแห้งที่อยู่ในสภาพที่ดี สีแดงสดเข้ม มีความมันวาว ไม่มีกลิ่นไหม้ และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดที่ 3 ชั่วโมง และความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 7.54% มาตรฐานเปียก จากการทดลอง และเท่ากับ 8.08% มาตรฐานเปียก จากการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการกลาง และใช้การทดสอบตามมาตรฐาน AOAC (2000) วิธีการ 930.04

จากการทดลองพบว่าผลของอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิ และความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่แตกต่างกัน กับเวลาที่เพิ่มขึ้นสามารถใช้แบบจำลองการอบแห้งที่มีผู้วิจัยที่ผ่านมาทั้ง 9 แบบจำลองและในการศึกษานี้มีการพัฒนาแบบจำลองจากแบบจำลองของ Henderson และ Aghabashlo และคณะ เพื่อนำมาใช้อธิบายผลของการทดลอง

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศร้อน 4 m/s

ที่	ชื่อสมการ	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่	R^2	Adjust R^2	SSE
1	Henderson	$a = 1.1505, k = 0.0905$	0.929	0.926	0.1715
2	Logarithmic	$a = 3.7375, c = -2.6803, k = 0.0153$	0.985	0.983	0.0345
3	Page	$k = 0.0085, n = 1.8839$	0.995	0.994	0.0110
4	Lewis	$k = 0.0775$	0.898	0.898	0.2476
5	Two-term	$a = 14.9871, b = 0.0099, k_1 = -13.9293, k = 0.0065$	0.985	0.983	0.0370
6	Wang and Singh	$a = -0.0471, b = 0.00003$	0.980	0.979	0.0474
7	Midilli and Kucuk	$a = 0.0699, b = -0.0468, k = -2.7073, n = -0.0064$	0.981	0.978	0.0412
8	Two-term Exp.	$a = -15.2465, b = -15.3042, k = 0.0067, n = 0.0098$	0.985	0.982	0.0314
9	Aghabashlo	$k_1 = 0.0388, k_2 = -0.0369$	0.991	0.990	0.0214
10	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	$a = 1.0038, k_1 = -0.0442, k_2 = -0.0409, b = 0.0016, k_3 = -0.1885, k_4 = -0.0057$	0.996	0.995	0.0086

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศร้อน 5 m/s

ที่	ชื่อสมการ	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่	R^2	Adjust R^2	SSE
1	Henderson	$a = 1.1692, k = 0.1122$	0.905	0.899	0.2128
2	Logarithmic	$a = 4.8084, c = -3.7341, k = 0.0146$	0.971	0.967	0.0655
3	Page	$k = 0.0064, n = 2.1689$	0.993	0.992	0.0164
4	Lewis	$k = 0.0949$	0.867	0.867	0.2953
5	Two-term	$a = 17.8672, b = 0.0096, k_1 = -16.7923, k = 0.0060$	0.971	0.965	0.0653
6	Wang and Singh	$a = -0.0544, b = -0.0002$	0.964	0.961	0.0807
7	Midilli and Kucuk	$a = 0.1185, b = -0.0610, k = -2.2012, n = -0.0048$	0.967	0.960	0.0654
8	Two-term Exp.	$a = -18.2148, b = -18.2899, k = 0.0062, n = 0.0095$	0.971	0.965	0.0653
9	Aghabashlo	$k_1 = 0.0376, k_2 = -0.0557$	0.990	0.989	0.0195
10	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	$a = 1.0112, k_1 = -0.0388, k_2 = -0.0556, b = 0.0243, k_3 = 0.0165, k_4 = -0.0002$	0.995	0.994	0.0177

ตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ของสมการในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศร้อน 6 m/s

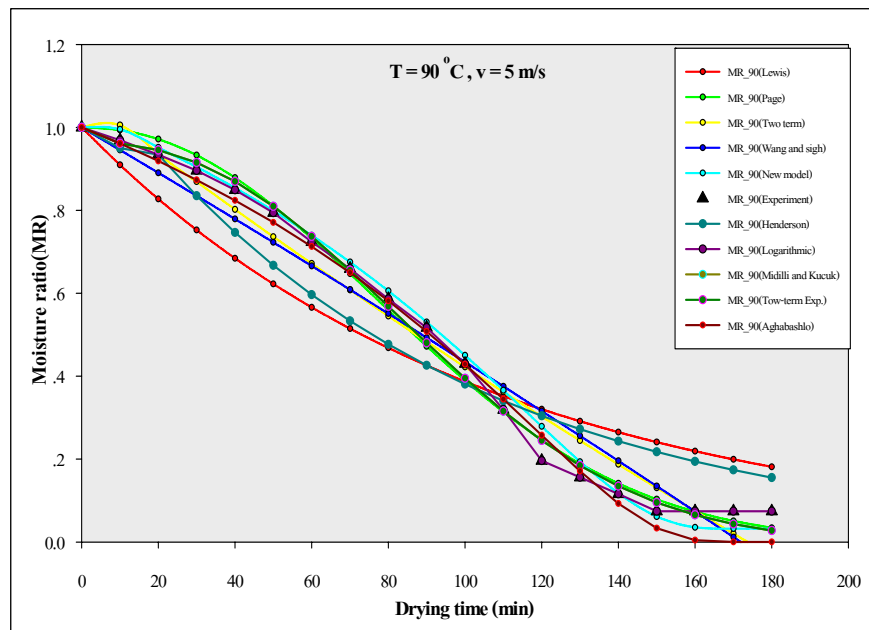
ที่	ชื่อสมการ	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่	R^2	Adjust R^2	SSE
1	Henderson	$a = 1.0751, k = 0.0812$	0.945	0.941	0.0611
2	Logarithmic	$a = 113.0969, c = -112.0797, k = 0.0005$	0.992	0.990	0.0092
3	Page	$k = 0.0197, n = 1.5669$	0.986	0.985	0.0153
4	Lewis	$k = 0.0730$	0.929	0.929	0.0782
5	Two-term	$a = 0.5793, b = 0.0812, k_1 = 0.4959, k = 0.0812$	0.944	0.931	0.0610
6	Wang and Singh	$a = -0.0443, b = -0.0005$	0.994	0.994	0.0069
7	Midilli and Kucuk	$a = 1.01936, b = -0.0521, k = 0.0021, n = -1.46783E-06$	0.991	0.989	0.0087
8	Two-term Exp.	$a = -9.7342, b = -18.2899, k = 0.0062, n = 0.0095$	0.994	0.993	0.0069
9	Aghabashlo	$k_1 = 0.0420, k_2 = -0.0382$	0.994	0.993	0.0061
10	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	$a = 0.4826, k_1 = -0.0265, k_2 = -0.0625, b = 0.5138, k_3 = 0.0713, k_4 = 0.0176$	0.997	0.996	0.0031

ตารางที่ 5. ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์เอมไพริกัลที่ได้จากการประมาณค่าโดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษา
นี้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นในแต่ละอุณหภูมิและความเร็วอากาศร้อนในการอบแห้ง

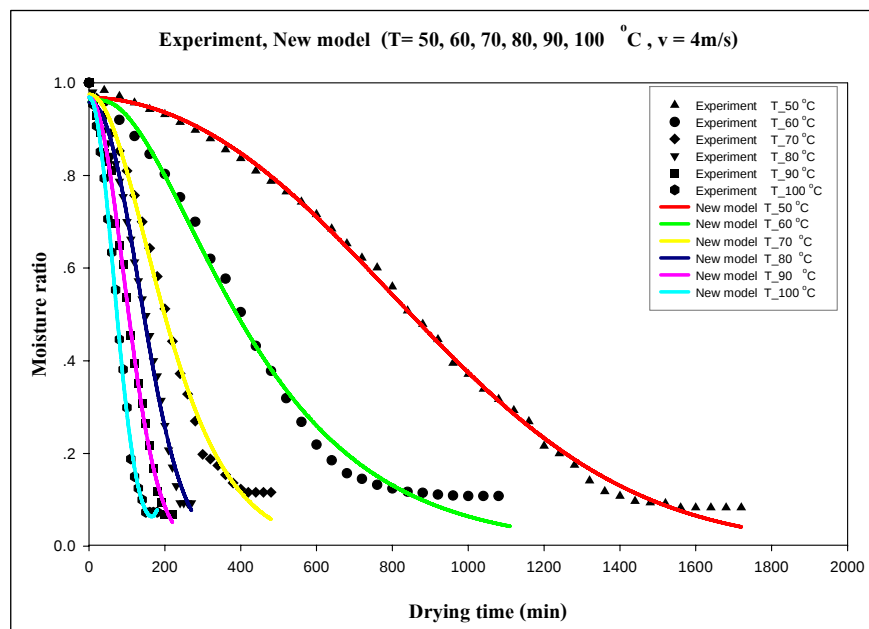
ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิ (°C)	a	k_1	k_2	b	k_3	k_4	R^2	adj. R^2	SSE
4	50	9.2645	0.0135	0.0015	-8.2797	0.0153	0.0020	0.999	0.998	0.0108
	60	9.4866	-0.0525	0.0156	-8.5272	0.0582	0.0170	0.998	0.997	0.0243
	70	3.4284	-0.1102	0.0082	-2.4109	-0.1385	-0.0208	0.998	0.997	0.0105
	80	1.0183	-0.0281	-0.0292	0.0056	-0.0313	-0.1429	0.997	0.996	0.0080
	90	1.0038	-0.0442	-0.0409	0.0016	-0.1885	-0.0057	0.996	0.995	0.0086
	100	0.9899	-0.0638	-0.0557	0.05036	0.0202	-0.0052	0.997	0.996	0.0059
5	50	8.3497	0.0119	0.0008	-7.3618	0.0138	0.00132	0.999	0.998	0.0061
	60	3.3877	-0.0437	-0.0005	-2.3636	-0.0539	-0.0111	0.998	0.997	0.0147
	70	1.0547	-0.0223	-0.0238	-0.0309	-0.0707	-0.0279	0.999	0.998	0.0036
	80	0.9209	-0.0244	-0.0470	0.0799	-0.0002	-0.2099	0.999	0.997	0.0003
	90	1.0112	-0.0388	-0.0556	0.0243	0.0165	-0.0002	0.992	0.990	0.0177
	100	0.9999	-0.0827	-0.0558	0.0470	-0.0014	-0.0612	0.998	0.997	0.0028
6	50	3.7950	-0.0117	-0.0037	-2.8256	-0.0131	-0.0055	0.998	0.997	0.0161
	60	2.5792	-0.0537	0.0130	-1.5898	-0.0773	-0.0055	0.999	0.998	0.0028
	70	0.9884	-0.0276	-0.0307	-0.0001	-0.0802	-0.0452	0.999	0.998	0.0032
	80	0.5483	-0.0417	-0.0513	0.4477	-0.0083	-0.0414	0.998	0.997	0.030
	90	0.4826	-0.0265	-0.0625	0.5138	-0.0713	0.0176	0.997	0.996	0.0031
	100	0.9789	-0.0812	-0.0329	0.0243	-0.0199	-0.0770	0.997	0.996	0.0035

สำหรับในบทความนี้ผู้ศึกษาขอเสนอผลเฉพาะ
การทดลองและผลการวิเคราะห์ทางสถิติเฉพาะที่
อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเร็วอากาศร้อน 4 5 และ 6
m/s เท่านั้นเนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก จากการ
พิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้แบบจำลอง
ทั้ง 10 แบบจำลอง ที่ทุก ๆ ระดับอุณหภูมิ และ
ความเร็วอากาศร้อน แสดงดังในตารางที่ 2 3 และ 4
แบบจำลองที่ดีที่สุดที่สามารถอธิบายคุณลักษณะการ
อบแห้งพริกแบบชั้นบางนั้น ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การ
ตัดสินใจ (R^2) และค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การ
ตัดสินใจ (Adj. R^2) ที่สูงที่สุด และค่าผลรวมของความ
ผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) ที่น้อยที่สุด ซึ่งพบว่าที่
90°C แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้มีค่า

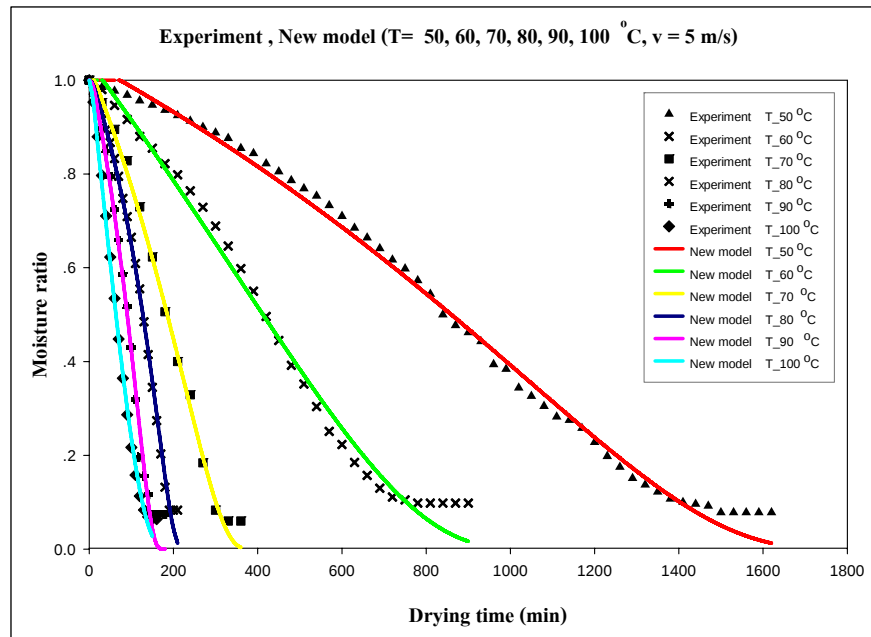
สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.996,
0.995 และ 0.997 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Adj. R^2)
เท่ากับ 0.995, 0.994 และ 0.996 ที่ความเร็วอากาศ
ร้อน 4, 5 และ 6 m/s ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อ
เปรียบเทียบกับแบบทุก ๆ แบบจำลอง ซึ่งค่าผลรวม
ของความผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) เท่ากับ 0.0086,
0.0177 และ 0.0031 ที่ความเร็วอากาศร้อน 4, 5 และ
6 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ
แบบทุก ๆ แบบจำลอง แสดงว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
นี้สามารถที่จะอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้
ศึกษาจึงนำเอาค่าทางสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์การ
ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้
เอามานำเสนออีกครั้งซึ่งแสดงดังตารางที่ 5



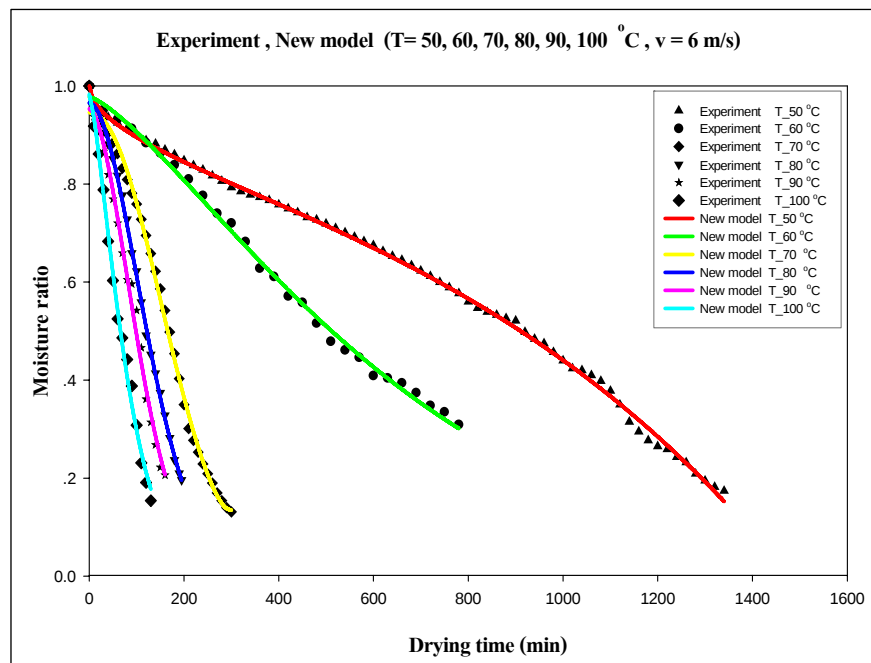
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายเทียบกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C ความเร็วอากาศร้อน 5 m/s



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายเทียบกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ $50\ 60\ 70\ 80\ 90$ และ 100°C ความเร็วอากาศร้อน 4 m/s



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายเทียบกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 90 และ 100 °C ความเร็วอากาศร้อน 5 m/s



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายเทียบกับเวลาในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 90 และ 100 °C ความเร็วอากาศร้อน 6 m/s

จากรูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาทั้งผลการทดลอง แบบจำลองที่มีอยู่แล้วและจากการใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาแสดงผล ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราส่วนความชื้นของพริกนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ แสดงว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของพริกได้ และจากผลการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกนั้นอยู่ในช่วง 2 ชั่วโมง 15 นาที จนถึง 27 ชั่วโมง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งในการทดลองนี้อยู่ที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วอากาศร้อน 5 m/s ซึ่งให้คุณลักษณะทางกายภาพของพริกออกมาดี สีแดงสด ผิวมันวาว ไม่มีกลิ่นไหม้ สีไม่ดำ โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 3 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าเป็นเวลาที่สั้นและได้พริกที่มีความชื้นต่ำกว่า 13% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งนั้นมีนัยสำคัญมากกว่าความเร็วของอากาศร้อน แต่ความเร็วของอากาศร้อนนั้นจะมีผลทำให้การเกิดฟลูอิดไดเซชัน และการเคลื่อนตัวของพริกออกจากห้องอบได้อย่างอัตโนมัติ

จากรูปที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของทั้งผลการทดลองและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้จะเห็นว่าแบบจำลองสามารถที่จะแสดงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองแสดงว่าแบบจำลองนี้ใช้ทำนายการอบแห้งนี้ได้และเมื่อนำผลของการทดลองในทุกๆ อุณหภูมิและความเร็วอากาศร้อนมาเขียนกราฟ เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะเห็นว่าแบบจำลองใช้อธิบายเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นได้เป็นอย่างดี

จากตารางที่ 5 ค่าคงที่ k_1, k_2, k_3 และ k_4 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นที่แต่ละอุณหภูมิและความเร็วของอากาศในการอบแห้ง และค่าคงที่และสัมประสิทธิ์นี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนได้ดังนี้

$$MR = ae^{\left(-\frac{kt}{1+k_1t}\right)} + be^{\left(-\frac{kt}{1+k_4t}\right)}$$

โดยที่

$$a = (-1874.40243 + 410.46623v + 64.87901v^2 - 13.48348v^3) + (61.21272 - 5.95864v - 4.95507v^2 + 0.70753v^3)T + (-1.16045 + 0.28578v + 0.02412v^2 - 0.00659v^3)T^2 + (0.00581 - 0.00172v - 3.60518E-06v^2 + 2.159E-05v^3)T^3$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.962, (\text{Adj. } R^2) = 0.667,$$

$$(SSE) = 0.0214$$

$$k_1 = (-8.17596 + 1.69835v + 0.26461v^2 - 0.05996v^3) + (0.51246 - 0.17860v + 0.01115v^2 + 0.00102v^3)T + (-0.00230 - 0.00036v + 0.00040v^2 - 5.03911E-05v^3)T^2 + (1.58778E-05 - (2.32197E-06v) - (9.1687E-07v^2) - 1.64E-07v^3)T^3$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.975, (\text{Adj. } R^2) = 0.788, (SSE) = 0.003$$

$$k_2 = (1879.87430 - 411.40397v - 65.04085v^2 + 13.51382v^3) + (-94.09434 + 26.15899v + 0.87489v^2 - 0.43632v^3)T + (0.96686 - 0.16547v - 0.04869v^2 + 0.00824v^3)T^2 + (-0.00325E-06 + 0.00013v + 0.00033v^2 - 4.31E-05v^3)T^3$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.961, (\text{Adj. } R^2) = 0.669, (SSE) = 0.0223$$

$$b = ((-2.40196 + v) / (0.10311 - 0.02576v) + T)$$

$$/((-6.96431 + v) / (-0.00086 + 0.00022v))$$

$$+ ((1.9E-09 + v) / (6.2E-08 + 7.1E-09v))T$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.999, (\text{Adj. } R^2) = 0.999, (SSE) = 0.0047$$

$$k_3 = ((-6.00000 + v) / (-4.5E-08 + 2.6E-09v) + T)$$

$$/((-6.00000 + v) / (1.33E-10 + 2.39E-11v))$$

$$+ ((-6.00000 + v) / (-1.8E-09 + 4.7E-09v))T$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.999, (\text{Adj. } R^2) = 0.999, (SSE) = 0.0127$$

$$k_4 = ((-3.39868 + v) / (0.01564 - 7.0E-03v) + T)$$

$$/((-5.30886 + v) / ((1.9E-03) - (3.6E-04v)))$$

$$+ ((-4.12093 + v) / (-0.13595 + 0.03325v))T$$

$$\text{ซึ่ง } (R^2) = 0.911, (\text{Adj. } R^2) = 0.851, (SSE) = 0.0015$$

5. สรุปผล

ในการศึกษานี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของพริกที่อุณหภูมิ

การอบแห้ง 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 °C และความเร็วอากาศร้อน 4, 5 และ 6 m/s ซึ่งจากผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของพริกโดยใช้แบบจำลองทั้ง 10 แบบจำลอง และนำมาเปรียบเทียบค่าทางสถิติทั้ง 3 ค่าคือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($Adj.R^2$) ที่สูงที่สุด และค่าผลรวมของความผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) ที่น้อยที่สุด จะเห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่คือ

$$MR = ae^{(-\frac{k_1 t}{1+k_2 t})} + be^{(-\frac{k_3 t}{1+k_4 t})}$$

ซึ่งสามารถอธิบายผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกแบบชั้นบางภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและความเร็วอากาศร้อนในการทดลองนี้ได้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

6.1 บทความจากวารสาร

- [1] Aghabashlo, M., M.H. Kianmehr and S. Khani. 2008. Mathematical modeling of carrot thin layer drying using new model. *Energy Conversion and Management*, 49, 201-212.
- [2] Akpinar, E.K., Bicer, Y., Yildiz, C., 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering* 59, 99-104.
- [3] Yaldiz, O. and C. Ertekin, 2001. Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technol.*, 19:583-596
- [4] Lewis W K (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial Engineering*, 13(5), 427-432

- [5] Lopez A; Iguaz A; Enzo A; Virseda P (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable waster from wholesale market. *Drying Technology*, 18(4-5), 995-1006
- [6] Henderson, S.M. 1952, A basic concept of equilibrium moisture, *Agr. Eng.* 33, 29-32
- [7] Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.B., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26, 457-465
- [8] Midilli, A Kucuck, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single layer drying. *Drying Tehnology* 20(7), 1503-1513.
- [9] S. Kaleemullah, R. Kailappan, 2005, Drying Kinetics of Red Chillies in a Rotary Dryer, *Byosystems Engineering*, 92(1), 15-23.
- [10] C..L.Hii, C.L.Law, M. Cloke, 2009 Modelling using a new Thin Layer Drying model and product quality of Cocoa, *Journal of Food Engineering*, 90, 191-198.

6.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม

- [1] Yaldiz, O., 2001. Effect of drying properties on drying characteristics of carrot and leek. In *Proceedings of the 20th national congress on agricultural mechanization*, Sanliurfa, Turkey.

6.3 รายงาน

- [1] AOAC, 2000 AOAC, Official method 930.04. Moisture in plants, *Official methods of analysis*, AOAC A. International (2000).

6.4 หนังสือ

- [1] Page G E (1949). Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin layer. MS Thesis, Mechanical Engineering Department, Purdue University, Lafayette.