สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

การศึกษาการอบแห้งชั้นบางพริกไทยโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

อรอุมา หนูทอง

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

20 มิ.ย. 2557
338614

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ อรอุมา หนูทอง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ดร.ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน

(ดร.วทัญญู รอดประพัฒน์)

.....กรรมการ

(ดร.ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์)

.....กรรมการ

(ดร.อภิชาติ เนียมวงษ์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ ..... เดือน .....พฤษภาคม..... พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.ณรงค์ อึ้งกิมป้วน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขออาราบขอบพระคุณ ดร.วทัญญู รอดประพัฒน์ รองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์ และดร.อภิชาติ เนียมวงษ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็น อันเป็นประโยชน์ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ พี่ น้องนิสิตปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อพิพัฒน์ คุณแม่ผิ้น หนูทอง พี่ชาย น้องสาว และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุนทั้งกำลังใจ และทุนทรัพย์ในการศึกษามาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

อรอุมา หนูทอง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

54910147 สาขาวิชา ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: แบบจำลองการอบแห้ง/ พริกไทย/ อากาศร้อน/ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง/ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

อรอุมา หนูทอง การศึกษาการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน (A STUDY ON THIN LAYER DRYING OF PEPPER USING SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR DRYER) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ณรงค์ อึ้งกิมป้วน, ปร.ด. 104 หน้า ปี พ.ศ. 2557

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทย หาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเท่ากับ 120 140 และ 160°C ความเร็วของตัวกลางเท่ากับ 1.0 m/s และการอบแห้งพริกไทยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 410 %(d.b.) จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 3 %(d.b.) และใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน จากแบบจำลองการอบแห้งจำนวน 12 แบบจำลอง ได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Modified Page, Two Term, Two Term Exponential, Wang and Singh, Approximation of diffusion, Midilli et al., Verma et al., และ Modified Henderson and Pabis โดยความถูกต้องของแบบจำลองพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าไคสแควร์ (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%P) สุดท้ายหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยตามกฎการแพร่ความชื้นข้อที่สองของฟิกส์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของพริกไทย หลังจากนั้นหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลในเทอมของอุณหภูมิและความชื้นของพริกไทย

จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของพริกไทยได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และจากการวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่า แบบจำลอง Midilli et al ให้ผลการทำนายดีที่สุดทั้งการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่

อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 และ 140°C ในขณะที่แบบจำลอง Page ให้ผลการทำนายดีที่สุดสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C และพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าระหว่าง 2 8975 x 10^{-9} ถึง 2.2290 x 10^{-8} m^2/min และเมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าระหว่าง 1 6650 x 10^{-9} ถึง 3.1273 x 10^{-8} m^2/min โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นและความชื้นของพริกไทยลดลง และพบว่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับความชื้นของพริกไทยอยู่ในรูปสมการกำลังสาม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

54910147 MAJOR: PHYSICS, M.Sc. (PHYSICS)
KEYWORDS DRYING MODEL/ PEPPER/HOT AIR/ SUPERHEATED STEAM/ EFFECTIVE DIFFUSIVITY

ONUMA NUTHONG: A STUDY ON THIN LAYER DRYING OF PEPPER USING SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR DRYER. ADVISORY COMMITTEE: NARONG UENGKIMBUAN, Ph.D. 104 P. 2014.

The objectives of this research were to study the drying kinetics of pepper and to find out the suitable thin layer model and effective moisture diffusivity of pepper drying using superheated steam and hot air at the temperatures of 120, 140 and 160°C and the media velocity of 1.0 m/s. Pepper was reduced from initial moisture content about 410 %(d.b.) to final moisture content about 3 %(d.b.). The several drying models such as Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Modified Page, Two Term, Two Term Exponential, Wang and Singh, Approximation of diffusion, Midilli et al., Verma et al., and Modified Henderson and Pabis were fitted to the experimental data. The drying models were compared using the coefficient of determination (R^2), reduced chi-square (χ^2), root mean square error (RMSE) and mean relative percent error (%P) for determination of the best suitable model. Finally, the effective moisture diffusivity of pepper was calculated by the Fick's second law of diffusion in terms of drying temperatures and moisture content of pepper. After that, the effective moisture diffusivity of pepper was fitted as a function of temperatures and moisture content of pepper.

The results showed that the drying rate of pepper increased with increasing temperature of drying media. At the same temperature, hot air drying provided faster moisture reduction rate compared with superheated steam drying. By modeling the experimental data, it was found that Midilli et al. model provided the best description of thin layer drying of pepper using superheated steam at temperatures of 120, 140, and 160°C and hot air at the temperatures of 120 and 140°C. On the other hand, Page model gave the best description of the thin layer drying of pepper using hot air at the

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

temperature of 160°C Finally, the result found that effective moisture diffusivities were in the range of 2.8975 x 10^{-9} – 2.2290 x 10^{-8} m^2/min and 1.6650 x 10^{-8} – 3.1273 x 10^{-8} m^2/min for superheated steam and hot air drying, respectively. The effective moisture diffusivity increased with the increasing in drying temperature and decreasing in moisture content of pepper From regression analysis, the relation between effective moisture diffusivity and moisture content of pepper was in term of a cubic function

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	4
สถานที่ทำการวิจัย	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
พริกไทย	5
การอบแห้ง	5
วิธีการอบแห้ง	8
การจำแนกวิธีการอบแห้ง	9
เครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากแหล่งอื่น	10
กลไกของการอบแห้งวัสดุ	11
ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง	12
ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัสดุ	13
ความชื้นในวัสดุ	14
การอบแห้งวัสดุทางการเกษตร	15
สมการการอบแห้งทางทฤษฎี	19
สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล	21

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง	23
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3	วิธีดำเนินการวิจัย	32
	วัตถุดิบ	32
	เครื่องมือและอุปกรณ์	33
	วิธีดำเนินการวิจัย	35
4	ผลการวิจัย	41
	อิทธิพลของอุณหภูมิตัวกลางที่มีผลต่อการอบแห้ง	41
	ผลการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน	45
	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางพริกไทย	49
	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย	70
5	สรุปผลการทดลอง	79
	สรุปผลการทดลอง	79
	ข้อเสนอแนะ	80
บรรณานุกรม		81
ภาคผนวก		85
	ภาคผนวก ก	86
	ภาคผนวก ข	94
ประวัติย่อของผู้วิจัย		104

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2 – 1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง.....	24
4 – 1	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C	51
4 – 2	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C..	52
4 – 3	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C	53
4 – 4	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C	54
4 – 5	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C.....	55
4 – 6	ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบางพริกไทย ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C..	56
4 – 7	ค่าทางสถิติของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ทำนายการ เปลี่ยนแปลงความชื้นพริกไทยที่อุณหภูมิต่าง ๆ..	57
4 – 8	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้งด้วย ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.	72
4 – 9	ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทยที่อบแห้ง ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	72
4 – 10	ค่าคงที่ของสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของพริกไทย.....	78
ก – 1	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C.....	87
ก – 2	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C.....	88
ก – 3	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C.....	89
ก – 4	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C.....	90
ก – 5	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C.....	91

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก – 6	ข้อมูลการทดลองอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C....	91
ก – 7	อัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ..	92
ก – 8	อัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	93
ข – 1	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C	95
ข – 2	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140°C	96
ข – 3	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 160°C	97
ข – 4	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C	98
ข – 5	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C	99
ข – 6	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C	100
ข – 7	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C.....	101
ข – 8	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C.....	102
ข – 9	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C.....	103

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2 – 1	แผนภูมิของน้ำประเภทต่าง ๆ ในวัตถุชื้น.	14
2 – 2	ลักษณะทางกายภาพของชั้นแห้งและโซนเปียกในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	19
3 – 1	พริกไทยสด	32
3 – 2	ระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	33
3 – 3	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	34
3 – 4	ตู้อบไฟฟ้า	34
3 – 5	ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น	35
4 – 1	เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ	42
4 – 2	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ	43
4 – 3	เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
4 – 4	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
4 – 5	เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C	46
4 – 6	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C	46
4 – 7	เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C.	47
4 – 8	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C	47

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4 – 9	เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C	48
4 – 11	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C.	58
4 – 12	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C	59
4 – 13	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C	59
4 – 14	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Logarithmic สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C.	60
4 – 15	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Page สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C	60
4 – 16	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two Term สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C	61
4 – 17	เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Two Term Exponential สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C	61

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4 – 18 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 62

4 – 19 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Approximation of diffusion สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 62

4 – 20 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 63

4 – 21 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Verma et al. สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 63

4 – 22 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 64

4 – 23 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Newton สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 64

4 – 24 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Page สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 65

4 – 25 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 65

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4 – 26 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Logarithm สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C 66

4 – 27 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Modified Pageสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 66

4 – 28 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Two Term สำหรับการอบแห้งด้วย อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 67

4 – 29 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Two Term Exponential สำหรับการอบแห้งด้วย อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C. . 67

4 – 30 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Wang and Singh สำหรับการอบแห้งด้วย อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 68

4 – 31 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Approximation of diffusion สำหรับการอบแห้งด้วย อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 68

4 – 32 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Midilli et al. สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C..... 69

4 – 33 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง การอบแห้งของ Verma et al. สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C.. 69

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4 – 34 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองการอบแห้งของ Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C 70

4 – 35 ผลการเปรียบเทียบค่า ln(D) กับ 1/(T+273.15) ของการอบแห้งพริกไทย 71

4 – 36 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 120°C..... ... 73

4 – 37 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 140°C..... 74

4 – 38 เปรียบเทียบความชื้นพริกไทยที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน 160°C..... 74

4 – 39 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120°C 76

4 – 40 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C 76

4 – 41 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 160°C 77

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University