กิตติกรรมประกาศ

การศึกษา และการจัดทำรายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ส่งเสริมและสนับสนุนการทำวิจัย และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 และ 2553

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2556

เครื่องอบแห้งภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศใช้งานร่วมกับรังสีอินฟราเรด

Infrared Vacuum Dryer

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา ชาคริต โพธิ์งาม ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ ศักชัย จงจำ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Umphisak Teeboonma Chakrit Po-ngarm Songsupa Pumchumpol and Sakchai Jongjam

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง พร้อมทั้งวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้ง โดยทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์สมุนไพร 3 ชนิด ได้แก่ ขิง หญ้าปักกิ่ง และบอระเพ็ด ภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 ^{o}C ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา และทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้ง ได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนั้น ผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด พบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายผลการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากที่สุด และ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุด สำหรับการศึกษาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้ง พบว่า ค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมดมีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับรอบการผลิตในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ซึ่งส่งผลต่อมูลค่าการใช้พลังงาน และเมื่อพิจารณาต้นทุนการระเหยน้ำต่อหน่วย พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและลดความดันสัมบูรณ์ จะทำให้ต้นทุนการระเหยน้ำต่อหน่วยลดลง โดยที่ภาวะความดันสัมบูรณ์ 5 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 60 ^{o}C มีต้นทุนการระเหยน้ำต่อหน่วยน้อยที่สุด

ศัพท์สำคัญ : การอบแห้ง สมการอบแห้งชั้นบาง สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด อัตราการอบแห้ง

ABSTRACT

The objectives of this research were to study drying using infrared-vacuum technique and to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying behavior of Ginger, Murdannia lorifomis and Heart-leaved moonseed as well as to analyze unit cost of herb drying. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: absolute pressures in drying chamber of 5, 10, 15 kPa and drying temperatures of 40, 50, 60^{o}C. The criteria used for evaluating the dryer performance were drying rate and specific energy consumption.

From experimental results, it was revealed that increment of drying temperature or decrement of absolute pressure in drying chamber result in high drying rate and low specific energy consumption. Furthermore, it was found that Modified Henderson and Pabis equation is the best equation for predicting the drying behavior of Ginger, Murdannia lorifomis and Heart-leaved moonseed. It provides the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest root mean square error (RMSE). In case of cost analysis, it was indicated that increment of drying temperature or decrement of absolute pressure in drying chamber result in low unit cost of production. Additionally, it should be noted that at the drying condition of absolute pressures in drying chamber of 5 kPa and drying temperatures of 60^{o}C yield lowest unit cost of production.

Keywords : Drying / Drying rate / Infrared-Vacuum / Thin layer equation

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ข**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ค**
สารบัญ	**ง**
สารบัญตาราง	**ฉ**
สารบัญภาพ	**ช**
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การอบแห้ง	4
2.2 การอบแห้งด้วยสุญญากาศ	5
2.3 การแผ่รังสีอินฟราเรด	5
2.4 อัตราส่วนความชื้น	11
2.5 การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง	11
2.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ	13
2.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	14
2.8 ข้อมูลผลิตภัณฑ์อบแห้ง	16
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด 22

3.2 รายละเอียดอุปกรณ์และเครื่องมือวัด 23

3.3 การคำนวณขนาดหลอดรังสีอินฟราเรด 24

3.4 การทดลองและการเก็บข้อมูล 29

4 ผลและวิจารณ์

4.1 ผลการอบแห้งขิง 31

4.2 ผลการอบแห้งหญ้าปักกิ่ง 39

4.3 ผลการอบแห้งบอระเพ็ด 47

4.4 อิทธิพลของรังสีอินฟราเรด 55

4.5 สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง 63

4.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68

4.7 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 74

5 สรุปผลการศึกษา

5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง 87

5.2 อิทธิพลของความดันสุญญากาศ 87

5.3 อิทธิพลของรังสีอินฟราเรด 88

5.4 การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง 88

5.5 การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 89

5.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 89

5.7 ข้อเสนอแนะ 89

เอกสารอ้างอิง 91

ภาคผนวก

ก ภาพเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยสมการอบแห้งชั้นบาง 96

ข ตัวอย่างการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 118

ค รายการบทความวิจัย 122

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ	8
4.1	ค่าคงที่สมการอบแห้งชั้นบางของขิง	64
4.2	ค่าคงที่สมการอบแห้งชั้นบางของหญ้าปักกิ่ง	65
4.3	ค่าคงที่สมการอบแห้งชั้นบางของบอระเพ็ด	67
4.4	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขิง	69
4.5	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหญ้าปักกิ่ง	70
4.6	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งบอระเพ็ด	72
4.7	เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	73
4.8	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งขิงที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	76
4.9	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งขิงที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	77
4.10	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งขิงที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	78
4.11	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งหญ้าปักกิ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	79
4.12	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งหญ้าปักกิ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	80
4.13	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งหญ้าปักกิ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	81
4.14	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งบอระเพ็ดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	83
4.15	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งบอระเพ็ดที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	84
4.16	ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งบอระเพ็ดที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	85

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การสูญหายของรังสี	5
2.2	การอบแห้งแผ่นของแข็งชื้นด้วยการแผ่รังสี	6
2.3	(a) โปรไฟล์อุณหภูมิ (b) โปรไฟล์ความชื้นของการอบแห้งแผ่นของแข็งด้วยการแผ่รังสีตามภาพที่ 2.2 เมื่อ 1 คือ สภาวะเริ่มต้น และ 2-5 คือ สภาวะไม่สม่ำเสมอ	7
2.4	ย่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหาร เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะของเหลว	8
2.5	วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่นๆ ใน enclosure	10
3.1	แบบจำลองเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด	22
3.2	เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด	23
3.3	วงจรต้านทานการไหลของความร้อน	24
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	32
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	32
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	33
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	33
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	34
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	34
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40^{o}C	36
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40^{o}C	36
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C	37
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C	37
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C	38
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60^{o}C	38
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	40
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	41
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	41
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	42
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	42
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 °C	44
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 °C	44
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 °C	45
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 °C	45
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 °C	46
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 °C	46
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	48
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	48
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	49
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	49
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	50
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	50
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 °C	52
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 °C	52
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 °C	53
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50 °C	53
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 °C	54
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 °C	54
4.37	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.38	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa	56
4.39	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	57
4.40	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa	57
4.41	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	58
4.42	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa	58
4.43	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40°C	60
4.44	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 40°C	60
4.45	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50°C	61
4.46	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 50°C	61
4.47	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60°C	62
4.48	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60°C	62
4.49	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขิง	69
4.50	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหญ้าปักกิ่ง	71
4.51	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งบอระเพ็ด	72
ก.1	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Newton ที่ความดัน 5 kPa	97
ก.2	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa	98
ก.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa	98
ก.4	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa	99
ก.5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa	99
ก.6	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.7	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดันของการอบแห้งขิง 5 kPa	100
ก.8	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa	101
ก.9	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa	101
ก.10	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilld ที่ความดัน 5 kPa	102
ก.11	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa	102
ก.12	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa	103
ก.13	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Newton ที่ความดัน 5 kPa	104
ก.14	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa	105
ก.15	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa	105
ก.16	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa	106
ก.17	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa	106
ก.18	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa	107
ก.19	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดัน 5 kPa	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ก.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa 108

ก.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa 108

ก.22 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilld ที่ความดัน 5 kPa 109

ก.23 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa 109

ก.24 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa 110

ก.25 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Page ที่ความดัน 5 kPa 111

ก.26 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Page I ที่ความดัน 5 kPa 112

ก.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa 112

ก.28 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Wang and Singh ที่ความดัน 5 kPa 113

ก.29 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa 113

ก.30 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Logarithmic ที่ความดัน 5 kPa 114

ก.31 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความดัน 5 kPa 114

ก.32 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term exponential ที่ความดัน 5 kPa 115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ก.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Modified Henderson and Pabis ที่ความดัน 5 kPa 115
ก.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Midilld ที่ความดัน 5 kPa 116
ก.35 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Approximation of diffusion ที่ความดัน 5 kPa 116
ก.36 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Verma ที่ความดัน 5 kPa 117