สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ช

สารบาญตาราง ฎ

สารบาญภาพ ฏ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 2

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

1.5 ขอบเขตของการศึกษา 7

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 8

2.2 ความชื้นในวัสดุ 12

2.3 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง 12

2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ 14

2.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ 15

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง 17

3.2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ 17

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ 21

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อการอัตราการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 22

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 26

4.3 คุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง 47

บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปวิเคราะห์ผลและข้อเสนอแนะ 53

5.2 ข้อเสนอแนะ 54

เอกสารอ้างอิง 55

ภาคผนวก 57

ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 58

ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองการอบแห้ง 64

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง 76

ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 78

ภาคผนวก จ การคำนวณความชื้นวัสดุ การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์ความแปรปรวน 80

ภาคผนวก ฉ บทความตีพิมพ์ 85

ประวัติผู้เขียน 88

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 สมการแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (k) สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7,10 และ 15 kPa 28

ตารางที่ 4.2 สมการแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิล (k,n) สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7,10 และ 15 kPa 38

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ค่าสีลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำและลำไยอบแห้งตามท้องตลาด 48

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าการหดตัวของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 50

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ 65

ตารางที่ ค.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 77

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีของลำไยคว้านเมล็ด 79

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของลำไยคว้านเมล็ด 79

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	ลักษณะทางกายภาพของชั้นแห้งและโซนเปียกในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	9
ภาพที่ 2.2	ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	9
ภาพที่ 2.3	ระบบการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ	11
ภาพที่ 2.4	แผนภาพสีของระบบ Hunter color	16
ภาพที่ 3.1	เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ	18
ภาพที่ 4.1	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 7 kPa	23
ภาพที่ 4.2	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 10 kPa	23
ภาพที่ 4.3	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 15 kPa	24
ภาพที่ 4.4	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	24
ภาพที่ 4.5	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	25
ภาพที่ 4.6	ค่าความชื้นของลำไยคว้านเมล็ดกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	25
ภาพที่ 4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับอุณหภูมิจากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa	26
ภาพที่ 4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับความดันจากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส	27
ภาพที่ 4.9	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการแบบกึ่งทฤษฎี แบบจำลองที่ 1-3 จากการอบแห้งที่ความดัน 7 kPa	28

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการแบบกึ่งทฤษฎี แบบจำลองที่ 1-3 จากการอบแห้งที่ความดัน 10 kPa 29

ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการแบบกึ่งทฤษฎี แบบจำลองที่ 1 - 3 จากการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa 29

ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 30

ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 31

ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 31

ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 32

ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 32

ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณ 33
โดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด
ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa

ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณ 34
โดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด
ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa

ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณ 34
โดยใช้แบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด
ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa

ภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิล (k) กับอุณหภูมิ 35
จากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa

ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิล (n) กับอุณหภูมิ 36
จากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่ความดัน 7, 10 และ 15 kPa

ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิล (k) กับความดัน 36
จากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C

ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิล (n) กับความดัน 37
จากการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C

ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (k) ของการอบแห้งที่หาได้จากการ 38
ทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้ง
ที่ความดัน 7 kPa

ภาพที่ 4.26 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (k) ของการอบแห้งที่หาได้จากการ 39
ทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้ง
ที่ความดัน 10 kPa

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.27 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (k) ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa 39

ภาพที่ 4.28 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (n) ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งที่ความดัน 7 kPa 40

ภาพที่ 4.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (n) ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งที่ความดัน 10 kPa 41

ภาพที่ 4.30 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (n) ของการอบแห้งที่หาได้จากการทดลองกับค่าที่หาได้จากสมการเอมไพริเคิล แบบจำลองที่ 4 และ 5 จากการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa 41

ภาพที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 42

ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 43

ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 7 kPa 43

ภาพที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 44

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 44

ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 10 kPa 45

ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa 45

ภาพที่ 4.38 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa 46

ภาพที่ 4.39 การเปรียบเทียบค่าอัตราการส่วนความชื้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณแบบจำลองค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริเคิลของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 15 kPa 46

ภาพที่ 4.40 แสดงค่าแรงเฉือนสูงสุดของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 49

ภาพที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าการคืนตัวของลำไยคว้านเมล็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 7 kPa 51

ภาพที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าการคืนตัวของลำไยคว้านเมล็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 10 kPa 51

ภาพที่ 4.43 เปรียบเทียบค่าการคืนตัวของลำไยคว้านเมล็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสที่ความดัน 15 kPa 52

ภาพที่ ก.1 เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งความดันต่ำ 59

ภาพที่ ก.2 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ WBT Binder รุ่น BD/ED/FD with R3-Controller 59

ภาพที่ ก.3 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CR323S 60

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ก.4	เวอร์เนียร์	60
ภาพที่ ก.5	เครื่องวัดสี Miniscan XE plus	61
ภาพที่ ก.6	เครื่องดูดอากาศและเครื่องผนึกถุง	61
ภาพที่ ก.7	โถดูดอากาศ	62
ภาพที่ ก.8	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Kane-May รุ่น KM330(type K)	62
ภาพที่ ก.9	เครื่องวัด Texture Analyzer (TA.XT2i/50 Texture Technologies, US)	63
ภาพที่ ก.10	อุปกรณ์คว้านลำไย (ตุ๊ดตู่)	63

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved