สารบาญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค
บทคัดย่อภาษาไทย ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ
สารบาญตาราง ฌ
สารบาญภาพ ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์ ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 10
1.5 ขอบเขตการศึกษา 11

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 12
2.1 การอบแห้ง 12
2.1.1 การอบแห้งในช่วงอัตราส่วนคงที่ 13
2.1.2 การอบแห้งในช่วงอัตราส่วนการอบแห้งลดลง 13
2.1.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของการอบแห้ง 19
2.1.4 กระบวนการต่างๆ บนแผนภูมิอากาศชื้น 22
2.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อน 24
2.2.1 แบบจำลองการอบแห้ง 25

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 แบบจำลองการผสมกันของอากาศชื้น 27
2.2.3 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน 28
2.3 มาตรฐานเนื้อลำไยอบแห้ง 30

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 32
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง 32
3.2 ข้อกำหนดในการทดลอง 34
3.3 การทดลองและการวิเคราะห์ 34
3.3.1 การอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดแบบชั้นบาง 34
3.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์การอบแห้ง 36
3.3.3 การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง 36
3.3.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง 38
3.3.5 การวิเคราะห์หาสภาวการณ์อบแห้งที่เหมาะสมของลำไยคว้านเมล็ด 41

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 42
4.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์การอบแห้งที่มีต่อการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 42
4.1.1 ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 42
4.1.2 ผลของความเร็วลมร้อนที่มีการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 44
4.1.3 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อนที่มีการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 46
4.2 ผลการวัดค่าสีของลำไยคว้านเมล็ด 49
4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 55
4.4 ผลการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด 67
4.5 ผลการวิเคราะห์หาสภาวการณ์อบแห้งที่เหมาะสมของลำไยคว้านเมล็ด 68
4.5.1 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลม 68
4.5.2 ผลของสัดส่วนการนำอากาศที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ 72

บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ 76
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ 76
5.2 ข้อเสนอแนะ 77

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง 78

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 81

ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองอบแห้งแบบชั้นบาง 86

ภาคผนวก ค ผลการคำนวณอัตราส่วนความชื้น 106

ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้ง 119

ภาคผนวก จ ผลการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่แต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง เพื่อหาเวลาการอบแห้งและค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 121

ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนผลการทดลองการลดลงของอัตราส่วนความชื้น ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองโดย ANOVA Analysis 126

ภาคผนวก ช การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดและการวิเคราะห์ความแปรปรวน 131

ประวัติผู้เขียน 135

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมการจลนพลศาสตร์ของลำไย	2
1.2	ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งและการจำลองสภาวะการอบแห้ง	7
2.1	สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุรูปทรงต่างๆ	16
2.2	คุณลักษณะทางกายภาพของเนื้อลำไยอบแห้งแต่ละชั้นคุณภาพ	31
3.1	เงื่อนไขการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดแบบชั้นบาง	35
4.1	ค่าความชื้นสมดุลของลำไยที่อุณหภูมิ 50-90 ˚C ความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อนต่างๆ	47
4.2	ผลการวิเคราะห์ค่าสีของลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งและเนื้อลำไยตามท้องตลาดโดยระบบ CIE Lab	50
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (D) และค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎี (k)	56
4.4	สมการแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม	59
4.5	สมการแบบจำลองของค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎี	59
ข.1	ข้อมูลการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ˚C	87
ข.2	ข้อมูลการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิลมร้อน 70 ˚C	95
ข.3	ข้อมูลการทดลองอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิลมร้อน 90 ˚C	101
ค.1	ผลการคำนวณอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ˚C	107
ค.2	ผลการคำนวณอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิลมร้อน 70 ˚C	111
ค.3	ผลการคำนวณอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิลมร้อน 90 ˚C	116
ง	ข้อมูลจากการทดลองและจากการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิ 70.3 ˚C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 10.6% ความเร็วลม 1.0 m/s น้ำหนักเริ่มต้นวัสดุ 1.02 kg ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น 372.2% db. น้ำหนักสุดท้ายวัสดุ 0.25 kg	120
จ	ผลการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่แต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง	122
ฉ.1	ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนผลการทดลองการลดลงของความชื้นพิจารณาค่าความเร็วลมร้อน	127
ฉ.2	ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนผลการทดลองการลดลงของความชื้นพิจารณาค่าความความชื้นสัมพัทธ์	129

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง	12
2.2	กระบวนการผสมของกระแสอากาศชื้นสองกระแสบนแผนภูมิอากาศชื้น	23
2.3	เครื่องอบแห้งลมร้อนที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่	25
3.1	เครื่องอบแห้งที่สามารถปรับสภาวะภายในห้องอบ ที่ห้องปฏิบัติการอบแห้ง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	33
3.2	วงจรการทำงานเครื่องอบแห้งที่สามารถปรับสภาวะห้องอบ	34
3.3	แผนผังการจำลองสภาพของการอบแห้ง	40
4.1	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิ 70 °C และ90 °C ที่แต่ละความเร็วลมร้อน	43
4.2	ผลของความเร็วลมร้อนที่มีผลต่อลดลงของความชื้นในการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ด	45
4.3	การลดลงของความชื้นและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลำไยคว้านเมล็ดจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อน 24.6 ± 3.6% ที่ความเร็วลมต่างๆ	46
4.4	การลดลงของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดที่อุณหภูมิลมร้อน 50 70 และ 90 °C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อนต่างๆ	48
4.5	กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดจนมีความชื้นประมาณ 18 %db. ที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s อุณหภูมิลมร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ	49
4.6	แสดงค่าสีบนแกน Chroma และ Hue angle ของลำไยคว้านเมล็ดที่อบด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50-90 °C ความเร็วลมร้อน 0.5-1.5 m/s ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ	51
4.7	คุณภาพสีลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งที่ความเร็วลมร้อน 0.5 m/s	52
4.8	คุณภาพสีลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 24.6 ± 3.6% ที่แต่ละความเร็วลมร้อน	53
4.9	คุณภาพสีลำไยคว้านเมล็ดหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 90 °C ความเร็วลมร้อน 1.5 m/s	54
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับอุณหภูมิลมร้อนที่ความเร็วลมร้อน 0.5 1.0 และ 1.5 m/s	57

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมที่อุณหภูมิลมร้อน 50°C 70°C และ 90 °C ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s ที่แต่ละความชื้นสัมพัทธ์ 58
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับอุณหภูมิลมร้อนที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s 60
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับความเร็วลมร้อน ที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อน 10.1% 61
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎีกับความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C ความเร็วลม 1.0 m/s 62
4.15 การเปรียบเทียบการลดลงของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งจากการทดลองและจากแบบจำลองที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s 64
4.16 การเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในการอบแห้งจากการทดลองและจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 70.5±0.2°C ความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อน 10.1±0.6% 65
4.17 การเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในการอบแห้งจากการทดลองและจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 90.4±0.3°C ความเร็วลม 1.0 m/s 66
4.18 การเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในการอบแห้งลำไยคว้านเมล็ดด้วยลมร้อนระหว่างการทดลองกับการจำลองสภาพการอบแห้งที่ T= 70.3°C, v = 1.0 m/s, RH = 10.6 %, M_{in} = 372.2 %db., M_f =18 %db., RC = 0 67
4.19 การเปรียบเทียบเวลาอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิลมร้อนจากการจำลองสภาพที่อุณหภูมิลมร้อน 50-90°C 69
4.20 การเปรียบเทียบเวลาอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับความเร็วลมร้อนจากการจำลองสภาพที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C 70°C และ 90°C 71
4.21 การเปรียบเทียบเวลาอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับสัดส่วนการนำอากาศใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จากการจำลองสภาพที่ความเร็วลมร้อน 0.5, 1.0 และ1.5 m/s ที่แต่ละอุณหภูมิลมร้อน 73
4.22 การเปรียบเทียบเวลาอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับสัดส่วนการนำอากาศใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จากการจำลองสภาพที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90°C ที่แต่ละความเร็วลมร้อน 74

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก.1 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Testo รุ่น 445 82
ก.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Testo รุ่น 650 82
ก.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Kane-May รุ่น KM330 Air Probe Type K 82
ก.4 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.001 g ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 323 S 83
ก.5 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.001 kg ยี่ห้อ Union รุ่น NWT-15k 83
ก.6 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิตอล ยี่ห้อ TSI Made in USA. 83
ก.7 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ WBT Binder รุ่น BD/ED/FD with R3-Controller 84
ก.8 เครื่องวัดสี Miniscan XE plus 84
ก.9 เวอร์เนียร์ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Absolute Digimatic 84
ก.10 อุปกรณ์คว้านลำไย (ตุ๊ดตู่) 85

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่, m^2
C_a, C_v	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งและไอน้ำตามลำดับ, kJ / $kg_{\text{dry air}}$ ·°C
D	สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2 / h
D_0	อาร์ริเนียสเฟกเตอร์, m^2 / h
E_a	พลังงานกระตุ้น, kJ / mol
L^*	ค่าความสว่าง
M	ความชื้นวัสดุ, % มาตรฐานแห้ง
M_a, M_v	มวลโมเลกุลของอากาศแห้งและไอน้ำตามลำดับ, dimensionless
P	ความดัน, kPa
ΔP	ความดันลดลงของระบบอบแห้ง, Pa
R	ค่าคงที่สากลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ / kmol·K
T	อุณหภูมิอบแห้ง, °C
V	ปริมาตร, m^3
W	อัตราส่วนความชื้น, $kg_{\text{water}}/kg_{\text{dry air}}$
W_s	งานทางไฟฟ้าที่ให้ที่เพลาของพัดลม, kJ / h
a^*	ค่าความเป็นสีแดง
b^*	ค่าความเป็นสีเหลือง
c	ความเข้มข้นของความชื้น, kg / m^3
d	มวลแห้งของวัสดุ (Dry bone), kg
h	เอนทัลปี, kJ / $kg_{\text{dry air}}$
h_D	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, m / h
m	มวล, kg
m_p	มวลแห้งของลำไยคว้านเมล็ด, $kg_{\text{dry Longan}}$
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล, $kg_{\text{dry air}}$ / h

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$\dot{m}_w$	อัตราการถ่ายเทมวล, kg / h
k	ค่าคงที่การอบแห้ง, h^{-1}
a,b	รัศมีภายในและภายนอกของวัสดุทรงกลมกลวงตามลำดับ, m
t	เวลา, h
Δt	ช่วงเวลาสั้นๆ, h
v	ความเร็วลมร้อน m/s
w	มวลของวัสดุ, kg

สัญลักษณ์กรีก

ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, $kg_{dry\ air} / m^3$
η_f	ประสิทธิภาพของพัดลม, เศษส่วน
η_m	ประสิทธิภาพมอเตอร์, เศษส่วน

สัญลักษณ์กับล่าง

a	อากาศแห้ง
abs	สัมบูรณ์
amb	อากาศแวดล้อม
b	พัดลม
eq	สมดุล
f	สุดท้าย
i	เข้าห้องอบแห้ง
in	เริ่มต้น
mix	อากาศผสม
rc	อากาศกลับมาใช้ใหม่
v	ไอน้ำ
vs	ไอน้ำอิ่มตัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อ

MR	อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย, decimal
RH	ความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน
SEC	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ / kg $_{water}$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved