

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(7)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
สัญลักษณ์กำกับล่าง	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
องค์ประกอบของขมื่นชั้น	3
การแปรรูปขมื่นชั้น (การเคียวรีงและการทำแห้ง)	4
พื้นฐานการอบแห้ง	7
การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน	11
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	23
การออกแบบห้องอบแห้ง	23
การออกแบบระบบปั๊มความร้อน	28
เครื่องอบแห้งขมื่นชั้นที่สร้างขึ้น	38
การเก็บข้อมูล	39
การวางแผนการทดลอง	42
สถานที่ทำการทดลอง	44
ระยะเวลาในการทดลอง	44
ผลและวิจารณ์	45
การอบแห้งขมื่นชั้น	45
สมรรถนะของเครื่องอบแห้งขมื่นชั้น	47
คุณภาพผลิตภัณฑ์	59
การประเมินค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก แบบเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน	72
ภาคผนวก ข การคำนวณความดันลดในระบบ	74
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คิวมิน	82
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดลอง	84
ภาคผนวก จ ตารางการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	91
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลจากการทดลอง	96
ภาคผนวก ช ข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมด	169

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางโภชนาการของขมิ้นแห้ง 100 กรัม	4
2	ตารางเปรียบเทียบเมื่อมาตราส่วนปริมาณการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น	39
3	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของขมิ้นชันแห้ง	42
4	สถานะต่างๆ ที่ใช้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชัน	43
5	ปริมาณผลผลิตขมิ้นชันแห้งและเวลาในการทำแห้งของขมิ้นที่ผ่านการต้มที่เวลาต่างๆ	46
6	อัตราการอบแห้งของขมิ้นชันที่ผ่านการต้มที่เวลาต่าง ๆ	49
7	ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้ม	51
8	ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30 นาที	52
9	ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที	53
10	ผลการทดลองอบแห้งขมิ้นชันที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที	54
11	คุณภาพทางกายภาพและเคมีของขมิ้นชันสดและขมิ้นชันผงที่ไม่ผ่านและผ่านการต้มที่ระยะเวลาต่าง ๆ	59
12	ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทน	64
 ตารางผนวกที่		
จ1	วิเคราะห์กลุ่มข้อมูลเหมือนกันทางสถิติของ อัตราการอบแห้งที่เวลาการต้มต่างกัน	92
จ2	วิเคราะห์กลุ่มข้อมูลเหมือนกันทางสถิติค่าสีปรากฏ L(ความสว่าง) ของการต้มที่เวลาต่างกัน	93
จ3	วิเคราะห์กลุ่มข้อมูลเหมือนกันทางสถิติค่าสีปรากฏ a (สีแดง) ของการต้มที่เวลาต่างกัน	94
จ4	วิเคราะห์กลุ่มข้อมูลเหมือนกันทางสถิติค่าสีปรากฏ b (สีเหลือง) ของการต้มที่เวลาต่างกัน	95
ฉ5	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 1 (ไม่ต้ม)	97
ฉ6	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 2 (ไม่ต้ม)	98
ฉ7	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 3 (ไม่ต้ม)	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
น8	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ไม่ดัม)	100
น9	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ไม่ดัม)	101
น10	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ไม่ดัม)	102
น11	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ไม่ดัม)	103
น12	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ไม่ดัม)	104
น13	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ไม่ดัม)	105
น14	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 1 (ไม่ดัม)	106
น15	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 2 (ไม่ดัม)	107
น16	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 3 (ไม่ดัม)	108
น17	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 1 (ไม่ดัม)	109
น18	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 2 (ไม่ดัม)	110
น19	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 3 (ไม่ดัม)	111
น20	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 1 (ไม่ดัม)	112
น21	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 2 (ไม่ดัม)	113
น22	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 3 (ไม่ดัม)	114
น23	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	115
น24	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	116
น25	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	117
น26	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	118
น27	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	119
น28	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	120
น29	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	121
น30	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	122
น31	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	123
น32	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	124
น33	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	125
น34	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
น35	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	127
น36	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	128
น37	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	129
น38	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 1 (ดัม 30 นาที)	130
น39	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 2 (ดัม 30 นาที)	131
น40	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 3 (ดัม 30 นาที)	132
น41	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	133
น42	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 2 (ดัม 60 นาที)	134
น43	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 3 (ดัม 60 นาที)	135
น44	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	136
น45	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ดัม 60 นาที)	137
น46	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ดัม 60 นาที)	138
น47	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	139
น48	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ดัม 60 นาที)	140
น49	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ดัม 60 นาที)	141
น50	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	142
น51	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 2 (ดัม 60 นาที)	143
น52	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 3 (ดัม 60 นาที)	144
น53	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	145
น54	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 2 (ดัม 60 นาที)	146
น55	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 3 (ดัม 60 นาที)	147
น56	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 1 (ดัม 60 นาที)	148

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
น57	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 2 (ต้ม 60 นาที)	149
น58	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 3 (ต้ม 60 นาที)	150
น59	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	151
น60	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	152
น61	รายละเอียดข้อมูลการใช้ไฟฟ้าการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	153
น62	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	154
น63	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	155
น64	ความดันของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	156
น65	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	157
น66	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	158
น67	อุณหภูมิของวงจรสารทำความเย็นการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	159
น68	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	160
น69	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	161
น70	ปริมาณน้ำควบแน่นจากเครื่องทำระเหยการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	162
น71	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	163
น72	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	164
น73	อุณหภูมิของวงจรอากาศการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	165
น74	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 1 (ต้ม 90 นาที)	166
น75	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 2 (ต้ม 90 นาที)	167
น76	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของการอบแห้งขมิ้นชันการทดลองที่ 3 (ต้ม 90 นาที)	168
ช77	ข้อมูลค่าวัสดุและค่าแรงในการสร้างเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน	170

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Schematic of the food drying phenomenon	7
2	Characteristic behavior for convective drying	9
3	แสดงวงจรอากาศของการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	12
4	แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	13
5	เครื่องอบแห้งขมิ้นชันต้นแบบ	20
6	เครื่องวัดความเร็วลม (Hot wire anemometer)	21
7	เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)	21
8	เครื่องวัดสี (Color meter)	22
9	ขมิ้นชันสดและขมิ้นที่หั่นเป็นแว่น	23
10	แผนภูมิอากาศชื้นของกระบวนการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	29
11	แผนภูมิความดันและเอนทัลปี	33
12	ตำแหน่งการวัดอากาศหลังอบแห้งและอากาศ Bypass	40
13	ตำแหน่งวัดอัตราการไหลของอากาศ	40
14	แสดงวงจรอากาศของระบบและตำแหน่งการบันทึกข้อมูล	41
15	ปริมาณผลผลิตขมิ้นชันแห้งและเวลาการทำแห้งของขมิ้นชันที่ช่วงเวลาการต้มต่าง ๆ	47
16	กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ไม่ผ่านการต้ม	55
17	กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30 นาที	55
18	กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที	56
19	กราฟแสดงอัตราการอบแห้งขมิ้นชันในเครื่องอบแห้งที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที	56
20	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งขมิ้นชันที่ไม่ผ่านการต้ม	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งไขมันชั้นที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 30 นาที	57
22	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งไขมันชั้นที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 60 นาที	58
23	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยอัตราการควบแน่นและพลังงานที่ใช้กับเวลาการอบแห้งไขมันชั้นที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 90 นาที	58
24	ไขมันชั้นผงที่เตรียมจากไขมันชั้นที่ผ่านการเคียวรังโดยการต้มในน้ำเดือดที่เวลาต่าง ๆ	60
25	ไขมันชั้นก่อนและหลังการอบแห้ง	61
ภาพผนวกที่		
ข1	แสดงตำแหน่งท่อลมในระบบที่นำมาคิดความดันลด	75
ข2	ความดันสูญเสียของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น	80

สัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่ (m^2)
C	ความร้อนจำเพาะ ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$) หรือค่าสัมประสิทธิ์ใด ๆ
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ
D	เส้นผ่าศูนย์กลาง (m)
DR	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
db	มาตรฐานแห้ง
Eff	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (เศษส่วน)
f	แฟกเตอร์ความเสียหาย (m)
g	แรงโน้มถ่วง (9.81 m/s^2)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$) หรือ เอนทัลปี (kJ/kg)
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ
h_L	การสูญเสียความดัน (m-air)
i	อัตราดอกเบี้ย (%)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
k	สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดัน
l	ความยาว (m)
m	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)
M	ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง หรือน้ำหนักโมเลกุล)
MER	อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย (kg/h)
n	จำนวนปี
P	พลังงาน (W) หรือ ความดัน (Pa หรือ MPa)
Pr	ตัวเลขเพรตต์เทิล (ปริมาณไร้มิติ)
q	ความสามารถในการทำความร้อนหรือความเย็นต่อหน่วยมวล (kJ/kg)
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W) หรือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์ (ปริมาณไร้มิติ)
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (เศษส่วน)
SEC	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
SMER	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kJ/kWh)

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

t	เวลา (h, min หรือ s)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
V	ความเร็ว (m/s) แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) หรือ ปริมาตร (m^3)
wb	มาตรฐานเปียก
W	กำลังที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอ (kW) หรือ อัตราส่วนความชื้นอากาศ (kg water/kg dry air)
η	ประสิทธิภาพอุปกรณ์ (เศษส่วน)
μ	ความหนืดของสารทำงาน (N s/m^2)
θ	มุมเอียง (Degree)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	อากาศแห้ง หรือ อากาศแวดล้อม
abs	สภาวะแวดล้อม
bp	สภาวะอากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย
c	เครื่องควบแน่น หรือ เครื่องอัดไอ
ci	สภาวะขาเข้าเครื่องควบแน่น
co	สภาวะขาออกเครื่องควบแน่น
compi	สภาวะขาเข้าเครื่องอัดไอ
compo	สภาวะขาออกเครื่องอัดไอ
d	การอบแห้ง
e	เครื่องทำระเหย
ei	สภาวะขาเข้าเครื่องทำระเหย
eo	สภาวะขาออกเครื่องทำระเหย
expi	สภาวะขาเข้าวาล์วขยาย
f	สภาวะหลังอบแห้ง
i	สภาวะเริ่มต้น
m	มอเตอร์ หรือ ทางกล
o	สภาวะขาออก หรือ ขนาดภายนอก
p	วัสดุ หรือ ผลิตภัณฑ์
r	สารทำความเย็น
sys	ของระบบ
used	ที่นำมาใช้ประโยชน์เพื่อการอบแห้ง
v	ไอน้ำ
w	น้ำ
1	Compressor inlet
2	Condenser inlet
3	Expansion valve inlet
4	Evaporator inlet