

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ส้ม	4
2.1.1 สายพันธุ์ของส้ม	4
2.1.2 แหล่งผลิตส้ม	8
2.1.3 ปริมาณผลผลิตส้ม	9
2.1.4 คุณค่าทางอาหาร	10
2.2 การทำแห้งอาหาร	10
2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการทำแห้ง	10
2.2.2 การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร	14
2.2.3 อัตราการทำแห้ง	18
2.2.4 คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของอาหาร	21
2.2.5 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการทำแห้ง	24

2.2.6	ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้กระบวนการทำแห้งอาหาร	25
2.2.7	การเลือกชนิดของเครื่องทำแห้ง	27
2.3	น้ำผลไม้ผง	30
2.3.1	คุณลักษณะของน้ำผลไม้ผง	30
2.3.2	การทำแห้งน้ำผลไม้ผง	31
2.3.3	การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ผง	32
2.4	วัตถุเจือปนอาหาร	32
2.4.1	ความหมายของวัตถุเจือปนอาหาร	33
2.4.2	หลักเกณฑ์ในการใช้วัตถุเจือปนอาหาร	33
2.4.3	ชนิดของวัตถุเจือปนอาหาร	34
2.5	การทำแห้งด้วยวิธีโฟมเมต	36
2.5.1	การทำแห้งอาหารด้วยวิธีโฟมเมต	36
2.5.2	กระบวนการทำให้เกิดโฟม	37
2.5.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟม	38
2.5.4	ข้อดีของกระบวนการทำแห้งแบบโฟมเมต	39
2.5.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำโฟมเมต	40
2.6	กรรมวิธีการทำแห้งทางเลือกใหม่	41
2.6.1	สถานการณ์ด้านพลังงานในประเทศ	41
2.6.2	การทำแห้งกับการใช้พลังงาน	42
2.6.3	การทำแห้งทางเลือกใหม่	44
2.7	รังสีอินฟราเรด	45
2.7.1	รังสีอินฟราเรดและคุณสมบัติ	45
2.7.2	การลดความชื้นโดยใช้รังสีอินฟราเรด	48
2.7.3	อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรด	51
2.7.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	52

ลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	58
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	58
3.1.1 วัสดุดิบและสารเคมี	58
3.1.2 อุปกรณ์	58
3.2 วิธีการทดลอง	59
3.2.1 การเตรียมน้ำส้ม	59
3.2.2 วิธีวิจัย	60
ตอนที่ 1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง สุญญากาศแบบอินฟราเรด และผลของการเตรียมน้ำส้ม ที่มีต่อสมบัติของโพน้ำส้ม	60
1.1 ศึกษาผลของค่าอุณหภูมิที่ตั้ง และระยะห่างจากหลอด อินฟราเรดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง สุญญากาศแบบอินฟราเรด	60
1.2 ศึกษาผลของการเตรียมน้ำส้มที่มีต่อสมบัติของ โพน้ำส้ม	63
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของสภาวะปฏิบัติการทำแห้งน้ำส้มด้วย เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดที่มีต่อสมบัติ บางประการของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผง	64
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	65
4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ แบบอินฟราเรด และผลของการเตรียมน้ำส้มที่มีต่อสมบัติ ของโพน้ำส้ม	65
4.1.1 ผลของค่าอุณหภูมิที่ตั้ง และระยะห่างจากหลอดอินฟราเรดที่มีต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศ แบบอินฟราเรด	65
4.1.2 ผลของการเตรียมน้ำส้มที่มีต่อสมบัติของโพน้ำส้ม	83
4.2 ผลของสภาวะปฏิบัติการทำแห้งน้ำส้มด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศ แบบอินฟราเรดที่มีต่อสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผง	94

บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	105
5.1	สรุปผลการทดลอง	105
5.2	ข้อเสนอแนะ	106
เอกสารอ้างอิง		109
ภาคผนวก		120
ภาคผนวก ก	การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพ และด้านเคมี	121
ภาคผนวก ข	เอกสารประกอบเกี่ยวกับสารที่ก่อให้เกิดโฟม	124
ภาคผนวก ค	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรด ในระหว่างปฏิบัติการเป็นเวลา 60 นาที	128
ภาคผนวก ง	ภาพประกอบการทดลอง	135
ภาคผนวก จ	การทำงานของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด	141
ภาคผนวก ฉ	ตารางคุณสมบัติไอน้ำ	143
ภาคผนวก ช	กราฟสมบัติของโฟมน้ำส้มหลังผ่านกรรมวิธีโฟมเมต	146
ประวัติผู้เขียน		150

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	กลไกการครอบครองและการถ่ายเทน้ำภายในวัสดุ	17
2.2	คำศัพท์ที่นิยมใช้ในด้านพลังงาน	43
2.3	ระดับของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	47
2.4	ค่า Emissivity ของวัสดุประเภทต่างๆ	50
4.1	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรดของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IRVD)	83
4.2	ปริมาณการใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟม 2 ชนิด	84
4.3	ความคงตัวของโฟมน้ำส้มวัดจากอัตราการแยกตัวของของเหลวจากโฟม (syneresis of foam) โดยใช้สารก่อโฟมร่วม 2 ชนิด	85
4.4	ค่าความหนาแน่นของโฟมน้ำส้ม (foam density) โดยใช้สารก่อโฟมร่วม 2 ชนิด	86
4.5	ค่าโอเวอร์รันของโฟมน้ำส้ม โดยใช้สารก่อโฟมร่วม 2 ชนิด	87
4.6	การเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ (ค่า a_w) ในน้ำส้มผงที่ได้จากการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดต้นแบบที่สภาวะต่างๆ	95
4.7	การเปรียบเทียบค่า L^* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ	100
4.8	การเปรียบเทียบค่า a^* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ	100
4.9	การเปรียบเทียบค่า b^* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ	101
ค-1	กำลังไฟฟ้า (วัตต์) ที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรดในขณะปฏิบัติการเป็นเวลา 60 นาที	129
จ-1	แสดงคุณสมบัติน้ำภายใต้สุญญากาศ	144

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า	
2.1	ลักษณะผลของสัณสายพันธุ์ต่างๆ	8
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระ (a_w) กับอัตราส่วนความชื้นในวัสดุ (adsorption isotherm)	12
2.3	ช่วงเวลา 3 ระยะของการทำแห้ง	19
2.4	เส้นลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง	19
2.5	ระดับคลื่นของรังสีอินฟราเรด	46
2.6	การดูดซับ การส่งผ่าน และการสะท้อนกลับพลังงานของวัตถุ	48
3.1	ขั้นตอนการเตรียมน้ำส้มก้นสด	59
3.2	ตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลบนถาดอบแห้ง	61
3.3	เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IRVD) ต้นแบบ (ภาพด้านข้าง)	62
3.4	เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IRVD) ต้นแบบ (ภาพด้านหน้า)	62
4.1	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส)	67
4.2	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส)	68
4.3	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส)	70
4.4	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส)	71
4.5	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส)	73
4.6	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจาก หลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส)	74
4.7	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณถาดบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง	

	เป็น 40 องศาเซลเซียส	77
4.8	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณตาล่าง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 40 องศาเซลเซียส	77
4.9	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณตาลบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส	78
4.10	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณตาล่าง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส	78
4.11	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณตาลบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 80 องศาเซลเซียส	79
4.12	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณตาล่าง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 80 องศาเซลเซียส	79
4.13	กำลังไฟฟ้า (วัตต์) เฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรดในขณะแผ่รังสีโดยตรงสู่ถาดอบแห้งชั้นบน เป็นเวลา 60 นาที	82
4.14	กำลังไฟฟ้า (วัตต์) เฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรดในขณะแผ่รังสีโดยตรงสู่ถาดอบแห้งชั้นล่าง เป็นเวลา 60 นาที	82
4.15	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	96
4.16	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	96
4.17	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.5 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	97
4.18	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.5 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	97
4.19	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.1 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	98

4.20	โพนน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (P = 0.1 bar) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	98
4.21	ผงน้ำส้มที่เก็บได้หลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศปกติ (P = 1.0 bar) และภายใต้สภาวะสุญญากาศ (P = 0.5 และ 0.1 bar)	99
ง-1	การเตรียมน้ำส้มสดเพื่อการทดลอง	136
ง-2	สารที่ก่อให้เกิดโพน 2 ชนิด	136
ง-3	น้ำส้ม 25°Brix ที่เติมลงในสารที่ก่อให้เกิดโพนที่ผสมเข้ากันแล้ว ในอัตราส่วน 1:1 ก่อนตีปั่น และโพนน้ำส้ม 25°Brix หลังตีปั่น 5 นาที	136
ง-4	ถาดอบแห้ง, ถูบบีบ-หัวบีบโพน และการบีบโพนเป็นเส้นบนถาดอบแห้ง	137
ง-5	ลักษณะของโพนที่มีความคงตัวน้อย และโพนที่มีความคงตัวมาก	137
ง-6	ลักษณะของเส้นโพนในถาดก่อนการทำแห้ง และวางถาดอบแห้งห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร ในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด	138
ง-7	สาย thermocouples, data logger, อุปกรณ์ต่อพ่วง และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	139
ง-8	ตำแหน่งการวางถาดบน และถาดล่าง และการติดตั้งอุปกรณ์ต่อพ่วง และ data logger สำหรับการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IRVD)	139
ง-9	ผังการติดตั้งสาย thermocouples บนถาดอบแห้ง 8 ตำแหน่ง และแท่งวัดอุณหภูมิ 1 ตำแหน่ง	140
ง-10	หลอดอินฟราเรดที่ผลิตจากเซรามิก (ceramic infrared heaters) และ โคมไฟ	140
ง-11	เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด เครื่องวัดค่า water activity และ เครื่องวัดค่าสี (ตามลำดับ)	140
ช-1	ค่าความคงตัวของโพนน้ำส้ม 25, 30 และ 35°Brix โดยใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้ม 4 ระดับ	147
ช-2	ค่าความหนาแน่นของโพนน้ำส้ม 25, 30 และ 35°Brix โดยใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้ม 4 ระดับ	148
ช-3	ค่าโอเวอร์รันของโพนน้ำส้ม 25, 30 และ 35°Brix โดยใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้ม 4 ระดับ	149