

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ระดมการประเมินคุณภาพ

☐ ดีเยี่ยม

☐ ดีมาก

☒ ดี

☐ ปานกลาง





การอบแห้งกล้วยหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ

พฤทธิ เนตรสว่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

ชื่อเรื่อง

การอบแห้งด้วยหั่นแวนด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ

โดย

พฤทธิ์ เนตรสว่าง

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

ปิยพงศ์ วาฤทธิ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดพงศ์ วาฤทธิ์)

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

กรรมการที่ปรึกษา

อนุช สืบคำ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ)

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

กรรมการที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร)

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

อนุช สืบคำ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ)

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

สำนักงานบัณฑิตศึกษารับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เทพ พงษ์พานิช)

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๒

ชื่อเรื่อง	การอบแห้งกล้วยหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ
ชื่อผู้เขียน	นายพฤทธิ เนตรสว่าง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูป ผลผลิตเกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงศ์ วาฤทธิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและปรับปรุงกระบวนการอบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศของกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นหนา 3 mm แบบสดและผ่านการพรีทรีทเมนต์โดยการนึ่งด้วยไอน้ำและอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีแมกนีตรอนขนาด 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โดยการอบแห้งกล้วยที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 203 มาตรฐานแห้ง ให้มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 18 มาตรฐานแห้ง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ 2 ระดับ คือ 0.1 และ 0.02 bar ซึ่งอยู่ในช่วงสุญญากาศระดับต่ำและกลาง โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งขั้นตอนเดียว คือ 20.4 W/g dry matter และ 2 ขั้นตอน คือ 20.4 และ 11.1 W/g dry matter ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง ซึ่งส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีคุณภาพดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การพรีทรีทเมนต์กล้วยโดยการนึ่งด้วยไอน้ำสามารถเพิ่มปริมาณรูพรุนในชั้นกล้วยอบแห้งซึ่งส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีความกรอบเพิ่มขึ้น การลดระดับสุญญากาศในการอบแห้งส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีความแข็งลดลงและมีความกรอบเพิ่มขึ้น การใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนในการอบแห้งสามารถช่วยลดปริมาณความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ได้ถึงร้อยละ 45.6 เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของกล้วยอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม พบว่า คุณภาพของกล้วยอบแห้งด้านสีและเนื้อสัมผัสไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Title	Banana Slice Drying Using Vacuum–Microwave Process
Author	Mr. Prud Netsawang
Degree of	Master of Engineering in Agro-Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

The objective of this research was to study and improve vacuum-microwave (VAC-MW) drying process for banana slices. Fresh and steamed bananas sliced at 3 mm thickness were dried in the laboratory using VAC-MW dryer. A 1,000 W magnetron at frequency of 2.45 GHz was applied to dry the banana slices from initial moisture content of 203% (dry basis) to final moisture content of 18% (dry basis) using 2 treatments of vacuum at 0.1 and 0.02 bar, which were in range of low and medium vacuum. Treatments were designed by using single step drying with 20.4 W/g dry matter and dual step drying with 20.4 W/g dry matter followed by 11.1 W/g dry matter. Results showed that drying of steamed banana slices in medium vacuum with dual step MW power yielded final products with the best quality. Pretreatment by steaming the banana slices increased porosity of VAC-MW dried banana that provided the crispy texture of final products. Reducing the vacuum level for VAC-MW drying resulted in the decrease in hardness but increase in crispness. It was also found that the dual step VAC-MW drying minimized the damage of final products by 45.6%. In comparison of the quality of banana slices dried with laboratory and industrial VAC-MW dryer, the color and texture of banana slices were not statistically different ($P \geq 0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง และช่วยให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับใช้ในการดำเนินการทดลองจนกระทั่งงานทดลองสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจนให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขจนเป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร สืบคำ และรองศาสตราจารย์ บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้คอยให้คำแนะนำในระหว่างการทดลองและกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ ไชยเทพ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ที่กรุณาอบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันมีค่ายิ่ง ให้ใช้สถานที่และเครื่องมือต่างๆ ในการศึกษาทดลองครั้งนี้แก่ข้าพเจ้าตลอดจน พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหารที่คอยช่วยเหลือและมอบมิตรภาพที่ดีให้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อเพทาย และคุณแม่สุดา เนตรสว่าง และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจและให้การศึกษาที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

พฤทธิ เนตรสว่าง

สิงหาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
สารบัญตารางผนวก	(13)
สารบัญภาพผนวก	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กล้วยน้ำว้า	4
คุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้า	4
การสุกของกล้วย	5
การอบแห้ง	7
กราฟการอบแห้ง	7
สมการการอบแห้ง	10
คลื่นไมโครเวฟ	11
คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ	13
กลไกการเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ	13
ความลึกในการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟ	15
ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ	15
สถานะสุญญากาศ	18

การเลือกใช้ระดับสัญญาณ	19
การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ-สัญญาณ	20
การพรีทรีทเมนต์	22
การลวกด้วยไอน้ำ	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
กรอบแนวคิด	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	26
วัสดุทดลอง	26
เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สัญญาณ ระดับห้องปฏิบัติการ	26
เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สัญญาณ ระดับอุตสาหกรรม	27
เครื่องชั่งดิจิทัล	27
เครื่องวัดสี	28
เครื่องวัดเนื้อสัมผัส	28
เครื่องถ่ายภาพโครงสร้างภายใน	28
วิธีการ	28
การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สัญญาณ	
ระดับห้องปฏิบัติการ	28
การอบแห้งขยายผลจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรม	
วิธีการทดลองอบแห้ง	30
การหาลำดับไมโครเวฟเทียบเท่าของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สัญญาณ	31
การวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้ง	32
การวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง	32
การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย	33
การวัดคุณภาพด้านสี	33
การวัดคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	34
การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน	34

การวิเคราะห์ทางสถิติ	35
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับ	
ห้องปฏิบัติการ	36
การหาล้างไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ	
ระดับห้องปฏิบัติการ	36
การวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้ง	36
การวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง	36
การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย	41
การวิเคราะห์คุณภาพด้านสี	45
การวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	47
การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน	48
การอบแห้งขยายผลจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรม	53
การหาล้างไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งอบแห้งไมโครเวฟ-	
สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม	53
การคำนวณหาล้างไมโครเวฟขยายผล	54
ผลการอบแห้งขยายผลระดับอุตสาหกรรม	54
ผลการวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้งจากการอบแห้งทั้ง	
2 ระดับ	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	56
สรุปผลการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ	
ระดับห้องปฏิบัติการ	56
สรุปผลการทดลองอบแห้งขยายผล	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	63
ภาคผนวก ข ตารางความแปรปรวน	66
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง	71
ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณ	76

ภาคผนวก จ รายละเอียดเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ

ระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม

80

ภาคผนวก ฉ ประวัติผู้วิจัย

84



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ปริมาณส่วนประกอบคุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้าในส่วนที่รับประทานได้ 100 g	5
2 ตารางเทอร์โมไดนามิก	18
3 สมการแบบจำลองการอบแห้ง	32
4 กำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ	36
5 ค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งชนิดต่างๆ	40
6 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติด้านสี	45
7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส	47
8 กำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรม	54

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 ระยะเวลาสุกของผลกล้วย	6
2 ระยะเวลาอบแห้งที่เกิดขึ้นกับวัสดุเกษตร	8
3 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง	9
4 ช่วงความถี่และความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ	12
5 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ	13
6 กลไกการเกิดความร้อนคลื่นไมโครเวฟ	14
7 การเกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศ (ค่าสูงสุด) ที่ขึ้นอยู่กับความดันที่ความถี่สองค่า	19
8 กลไกการอบแห้งด้วยอากาศร้อน	20
9 กลไกการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ	21
10 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ	26
11 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม	27
12 แผนผังการดำเนินงาน	29
13 แผนผังการอบแห้ง	30
14 สเกลลีในหน่วย $L \cdot a \cdot b^*$	33
15 กราฟการวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	34
16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ	37
17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ	38
18 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นของกล้วยที่ได้คำนวณจากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งกับผลการทดลองอบแห้งกล้วยสดที่สุญญากาศระดับต่ำโดยใช้กำลังไมโครเวฟขึ้นตอนเดียว	39
19 ลักษณะการรวมศูนย์ของคลื่นไมโครเวฟ	41
20 ลักษณะการไหม้ในชั้นกล้วยอบแห้ง	42
21 ลักษณะตำแหน่งชั้นกล้วยอบแห้ง	43
22 กราฟช่วงเวลาและลักษณะการเกิดการไหม้ในชั้นกล้วยอบแห้ง	43

ภาพ	หน้า
23 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายในแต่ละสถานะการอบแห้ง	44
24 กัล้วยอบแห้ง	46
25 โครงสร้างผิวหน้ากัล้วยอบแห้ง	49
26 โครงสร้างภายในของกัล้วยอบแห้งในแนวตัดขวาง	50
27 โครงสร้างภายในของกัล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ในแนวตัดขวาง โดยใช้ กำลังไมโครเวฟในการอบแห้งเพียงขั้นตอนเดียว	51
28 โครงสร้างภายในแนวตัดขวางของกัล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ โดยอบแห้ง ภายใต้สุญญากาศระดับกลาง	52

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก	หน้า
1 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสว่าง (L^*)	67
2 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีแดง (a^*)	67
3 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีเหลือง (b^*)	68
4 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง	68
5 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความกรอบ	69
6 ตารางเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L^*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ	69
7 ตารางเปรียบเทียบค่าสีแดง (a^*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ	69
8 ตารางเปรียบเทียบค่าสีเหลือง (b^*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ	70
9 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็ง (Hardness) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ	70
10 ตารางเปรียบเทียบค่าความกรอบ (Crispness) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ	70

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก		หน้า
1	เครื่องชั่งดิจิตอล	64
2	เครื่องวัดสีอาหาร	64
3	เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของอาหาร	65
4	เครื่องถ่ายภาพโครงสร้างภายใน	65
5	รายละเอียดภายในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ	81
6	รายละเอียดเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม	82
7	รายละเอียดภายในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม	83

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

กล้วยน้ำว้า (*Musa sapientum* Linn. Musaceae) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย สามารถส่งขายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ทำการเพาะปลูกได้ทั่วไปทุกภูมิภาคอีกทั้งให้ผลผลิตตลอดทั้งปีและเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ เมื่อเทียบกับกล้วยหอมและกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้าจะให้พลังงานมากที่สุด กล้วยน้ำว้าห้ามและสุกมีธาตุเหล็กในปริมาณสูง ช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง ป้องกันโรคโลหิตจาง มีแคลเซียม ฟอสฟอรัสและวิตามินซี ช่วยบำรุงกระดูก ฟันและเหงือกให้แข็งแรง มีเบต้าแคโรทีน ในอาชินและใยอาหาร ช่วยระบบขับถ่าย (ฤทธิไกร, 2547) แต่ด้วยคุณสมบัติของกล้วยน้ำว้าซึ่งมีอายุการเก็บเพียง 5-7 วันก่อนที่จะเน่าเสีย จึงได้มีวิธีการแปรรูปกล้วยน้ำว้าเพื่อลดปริมาณผลผลิตที่เกิดความสูญเสีย อีกทั้งยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้นมาอีกด้วย

กรรมวิธีการแปรรูปกล้วยน้ำว้าทำได้หลายแบบ เช่น การอบแห้ง การแช่แข็ง การกวน และการทอด เป็นต้น การอบแห้งเป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหารโดยการลดปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity, a_w) สามารถยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสีย ในปัจจุบันนิยมใช้การอบแห้งด้วยวิธีลมร้อน (Hot air drying) ซึ่งเป็นกระบวนการลดความชื้นออกจากกล้วยน้ำว้า โดยใช้หลักการพาความร้อนของอากาศร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานสูง แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากการอบแห้งต่ำ เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำที่ผิวเร็วกว่าอัตราการแพร่ของน้ำภายในออกไปยังบริเวณพื้นผิวผลิตภัณฑ์ ทำให้บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์แห้งและแข็งตัว (Case hardening) ส่งผลให้การระเหยน้ำออกจากชั้นอาหารยากขึ้น ภายในชั้นอาหารจึงยังมีความชื้นอยู่ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงลดลง นอกจากนี้การอบแห้งแบบลมร้อนยังใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงในการอบแห้ง จึงทำให้สูญเสียสารอาหารที่มีคุณค่าในกล้วยน้ำว้าได้ง่าย เช่น วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น

ปัจจุบันไมโครเวฟเข้ามามีบทบาทในกระบวนการแปรรูปอาหารอย่างมาก เช่น การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนในการอบแห้งเนื้อลำไย ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 64.3% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Varith et al., 2007) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในชั้นวัสดุเกิดการสั่นตัวจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้เกิด

ความร้อนขึ้นภายในชิ้นวัสดุ (Mousa and Farid, 2007) อีกทั้งคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงผ่านอาหารซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพและสามารถให้ความร้อนได้ทั่วถึงอย่างรวดเร็ว (จาตุพวงศ์และคณะ, 2548; Buffler, 1993) นอกจากนี้ไมโครเวฟยังได้นำไปแปรรูปผักและผลไม้อื่นๆ อีกด้วย เช่น สมุนไพร มันฝรั่ง ถั่วเหลือง องุ่น (Ozkan et al., 2007) และกระเจี๊ยบ (Dadah, et al., 2007) เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งในสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากการอบแห้งในสภาวะสุญญากาศจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัว ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบ (Lee and Kim, 2009) และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศมาวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) พบว่าโครงสร้างภายในของมันฝรั่งที่อบแห้งด้วยวิธีไมโครเวฟ-สุญญากาศมีลักษณะรูพรุนมากกว่ามันฝรั่งที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อน (Bondaruk et al., 2007) เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศกับการอบแห้งแบบลมร้อน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศมีความสว่างมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแบบลมร้อน (Drouzas et al., 1999) อีกด้วย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาการอบแห้งโดยนำวิธีการอบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เนื่องจากในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งน้ำจะมีจุดเดือดต่ำกว่าในสภาวะบรรยากาศปกติ เช่น การอบแห้งที่ความดันสุญญากาศที่ 10 kPa ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดที่ต่ำลงประมาณ 50 °C อีกทั้งในสภาวะความดันต่ำจะส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์แพร่ออกมาได้ง่ายขึ้นจึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น มีการสูญเสียสารอาหารน้อย (ฤทธิไกร, 2547; Singh and Heldman, 1993)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการสร้างตู้อบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ และศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีไมโครเวฟ-สุญญากาศเพื่อหาสภาวะเหมาะสม ได้แก่ การพรีฮีทเมนต์ ระดับความดัน และระดับกำลังไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง และช่วยยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยอบแห้ง

ประโยชน์ที่ได้รับ

- คุณภาพเพื่อนำไปขยายผลในทางอุตสาหกรรม

ขอบเขตของงานวิจัย

- ด้วยกลี้น้ำว้าแห้งหนา 3 mm

2. ทำการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กล้วยน้ำว้า

กล้วยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทยและเป็นที่รู้จักกันดีมี 3 ชนิด คือ กล้วยไข่ (AA กรุ๊ป) กล้วยหอม (AAA กรุ๊ป) และกล้วยน้ำว้า (ABB กรุ๊ป) ซึ่งมีชื่อสามัญ คือ Pisang awak และชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Musa sapientum* Linn. Musaceae (Ferris et al., 1999)

กล้วยน้ำว้าสามารถพบได้ในทุกภาคของประเทศไทย มีลักษณะโดยทั่วไป คือ ลำต้นสูงไม่เกิน 3.5 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวอ่อน มีประคำบ้างเล็กน้อย ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ปลีรูปไข่ค่อนข้างป้อม ปลายป้าน ด้านนอกสีแดงอมม่วงมีนวลหนา ด้านในมีสีแดงเข้ม เครือหนึ่งมีประมาณ 7-10 หวี หวีหนึ่ง มี 10-16 ผล ก้านผลยาว เปลือกหนา สุกมีสีเหลืองเนื้อสีขาว รสหวาน ไส้กลางมีสีเหลือง ชมพูหรือขาว ทำให้แบ่งออกเป็นกล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยน้ำว้าแดง และกล้วยน้ำว้าขาว

คุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้า

กล้วยน้ำว้าจัดได้ว่าเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง สามารถรับประทานได้ทั้งผลสดและแปรรูป ซึ่งในกล้วยน้ำว้าประกอบด้วย กรดแอมิโน วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี แคลเซียม เหล็ก และโพแทสเซียม เป็นต้น ในกล้วยน้ำว้าดิบจะมีเพคติน (Pectin) ส่วนในกล้วยน้ำว้าสุกจะมีนอร์รีพินเฟริน (Norepinephrine) และเซโรโทนิน (Serotonin) ซึ่งมีอยู่ในเปลือกและเนื้อกล้วยทุกชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับกล้วยหอมและกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้าจะให้พลังงานมากที่สุด กล้วยน้ำว้าห่ามและสุกมีธาตุเหล็กในปริมาณสูงช่วยสร้างเม็ดเลือดแดงและป้องกันโรคโลหิตจาง มีแคลเซียม ฟอสฟอรัส และวิตามินซีช่วยบำรุงกระดูก ฟัน และเหงือกให้แข็งแรง ช่วยให้ผิวพรรณดี มีเบต้าแคโรทีน ในอาซีนและใยอาหาร ช่วยในระบบขับถ่ายคล่อง (ดวงจันทร์, 2545) หากเทียบปริมาณที่รับประทาน 100 g พบว่า สามารถจำแนกสารอาหารที่พบในกล้วยน้ำว้าได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 ปริมาณส่วนประกอบคุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้า ในส่วนที่รับประทานได้ 100 g

สารอาหาร	ปริมาณสารอาหาร
พลังงาน (kcal)	122
โปรตีน (g)	1.2
คาร์โบไฮเดรต (g)	26.1
ไขมัน (g)	0.3
วิตามินเอ (ml)	375
วิตามินบีหนึ่ง (ml)	0.03
วิตามินบีสอง (ml)	0.04
วิตามินซี (ml)	14
ไนอาซิน (ml)	0.6
แคลเซียม (mg)	12
ฟอสฟอรัส (mg)	32
เหล็ก (mg)	0.8
น้ำ (g)	71.6

ที่มา: ถิ่นทม (2535)

การสุกของกล้วย

การสุกของผลไม้รวมทั้งกล้วยน้ำว้าหลังการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีระและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลไม้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ได้แก่ การเปลี่ยนสี การอ่อนตัวของเนื้อเยื่อ การสังเคราะห์น้ำตาล ก๊าซเอทิลีน และมีอัตราการหายใจเปลี่ยนไป การสุกของผลไม้จะเกี่ยวข้องเฉพาะผลไม้ประเภท Climacteric เท่านั้น ผลไม้สุกส่วนมากเนื้อจะนิ่มเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพกติน นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งซึ่งสะสมไว้ในผลเปลี่ยนเป็นน้ำตาลและเกิดจากการสูญเสียน้ำออกไปจากผลผลิต

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาทฤษฎีการสุกของกล้วยเพื่อใช้ในการกำหนดเป็นมาตรฐานในการคัดเลือกกล้วยให้มีระยะความสุกใกล้เคียงกันมาใช้ในงานวิจัย และจากการศึกษา พบว่า CSIRO (1972) ได้จำแนกลักษณะขั้นตอนของการสุกของ

กล้วยออกเป็นระยะต่างๆ ของกล้วยหอม ซึ่งสามารถนำมาอ้างอิงลักษณะการสุกของกล้วยน้ำว้า
ดังภาพ 1 ดังนี้

ระยะที่ 1 เปลือกเขียว ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองเล็กน้อย

ระยะที่ 3 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

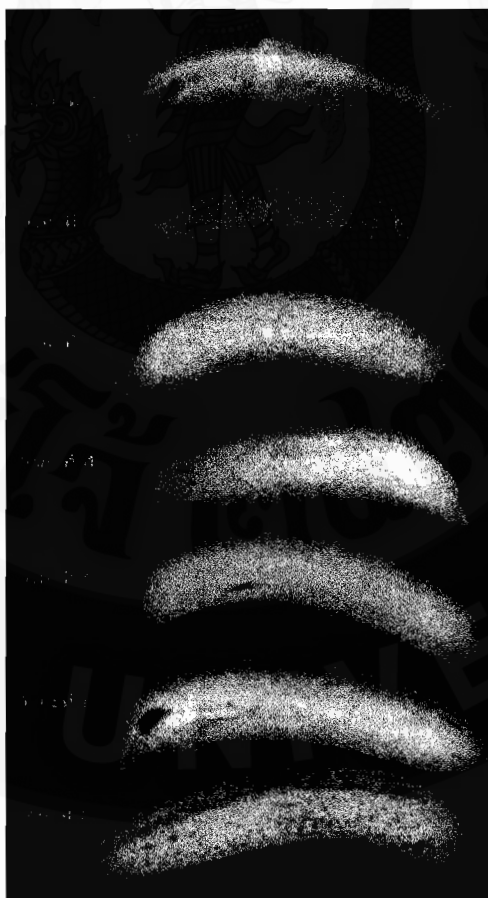
ระยะที่ 4 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองและมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

ระยะที่ 5 เปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว

ระยะที่ 6 ทั้งผลมีสีเหลือง (ผลสุก)

ระยะที่ 7 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล (สุกเต็มที่ มีกลิ่นหอม)

ระยะที่ 8 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไป เนื้อเริ่มอ่อนตัว
และมีกลิ่นแรง)



ภาพ 1 ระยะการสุกของผลกล้วย

ที่มา: เบญจมาศ (2545)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กลัวย่น้ำว่ามีระยะการสุกอยู่ในระยะที่ 4 ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

การอบแห้ง

การอบแห้งโดยทั่วไป หมายถึง การกำจัดน้ำหรือความชื้นออกจากวัสดุ โดยการระเหยนํ้าออกจากชั้นวัสดุเกษตรนั้น เพื่อจุดประสงค์ในการลดน้ำหนักในการขนส่ง (Pushpa et al., 2006) และช่วยยืดอายุการเก็บรักษา (Barbosa-Cánovas and Vega-mercado, 1996) เป็นต้น โดยลดความชื้นของวัสดุเกษตรให้อยู่ในระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรือลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ให้อยู่ในระดับต่ำกว่าระดับที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ ดังจะเห็นได้จากระดับของค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดังนี้ (สินธนา, 2546)

แบคทีเรีย โดยทั่วไปจะเจริญได้ที่ ค่า a_w มากกว่า 0.91

ยีสต์ โดยทั่วไปจะเจริญได้ที่ ค่า a_w มากกว่า 0.86

รา โดยทั่วไปจะเจริญได้ที่ ค่า a_w มากกว่า 0.60

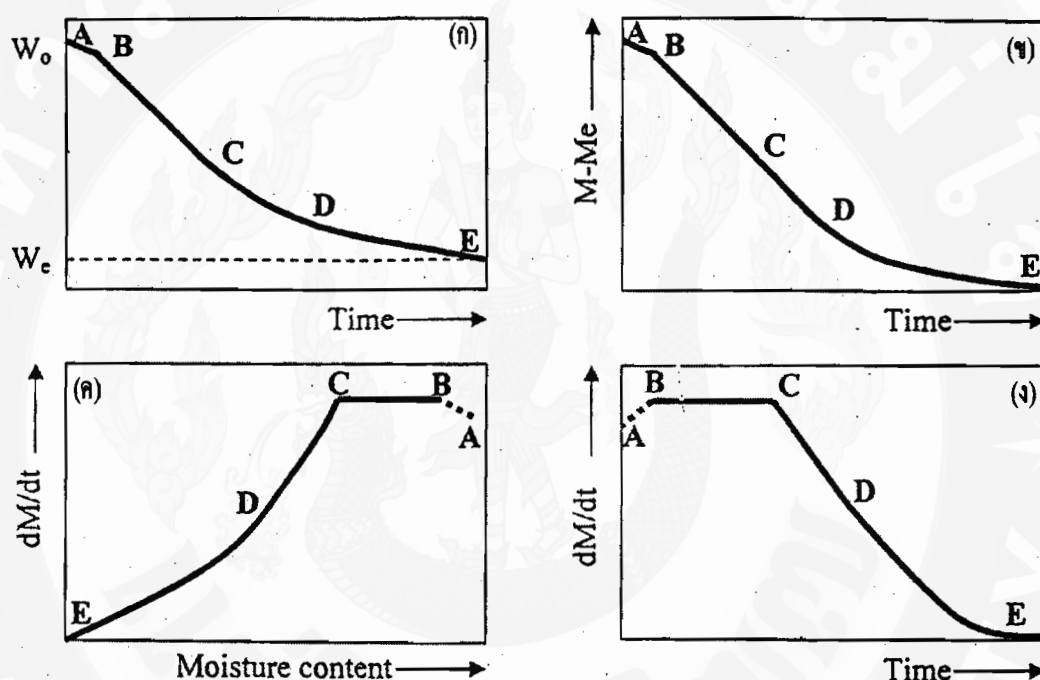
กราฟการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุเกษตรมักจะเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ ซึ่งแบ่งแยกได้ตามอัตราการอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 เส้นกราฟ A-B แสดงถึงช่วงระยะการให้ความร้อน (Warming up period) ซึ่งอาจจะไม่เกิดขึ้นก็ได้ เส้นกราฟ B-C แสดงถึงช่วงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) และส่วนสุดท้ายเส้นกราฟ C-E แสดงถึงช่วงระยะการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงระยะการอบแห้งลดลงครั้งแรก (First falling rate period) ซึ่งอยู่ในช่วงเส้นกราฟ C-D และระยะการอบแห้งลดลงครั้งที่สอง (Second falling rate period) ซึ่งอยู่ในช่วงเส้นกราฟ D-E (สุนทร, 2549)

กระบวนการทั่วๆ ไปในการอบแห้งเกิดขึ้นภายใต้กฎ 3 กรณีดังนี้

1. การระเหยนํ้าที่ผิววัสดุและความต้านทานต่อแรงเกาะยึดภายในของนํ้ามีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความต้านทานต่อการเคลื่อนย้ายไอนํ้าจากผิววัสดุ
2. การระเหยนํ้าที่ผิววัสดุและความต้านทานต่อแรงเกาะยึดภายในของนํ้ามีค่าสูง เมื่อเทียบกับความต้านทานต่อการเคลื่อนย้ายไอนํ้าจากผิววัสดุ
3. การระเหยนํ้าจากภายในผิววัสดุและความต้านทานต่อแรงเกาะยึดภายในของนํ้ามีค่าสูงกว่าความต้านทานต่อการเคลื่อนย้ายไอนํ้าจากผิววัสดุ

การอบแห้งวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งไม่จำเป็นจะต้องเป็นไปตามทั้ง 3 กรณียังกล่าวข้างต้น ความต้านทานต่อการระเหยน้ำจากผิวน้ำซึ่งอัตราการอบแห้งมักจะคงที่ จะตรงกับ การเคลื่อนย้ายความชื้นในกรณีที่ 1 แต่เมื่อขบวนการอบแห้งดำเนินต่อไป น้ำที่บรรจุอยู่ในวัสดุมีค่าลดลง กลไกการอบแห้งมักจะเปลี่ยนไปเป็นกรณีที่ 2 และ 3 ซึ่งอัตราการอบแห้งมักจะลดลงและ ความชื้นที่ซึ่งอัตราการอบแห้งเริ่มลดลงเราเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ดังนั้นเมื่อความชื้นของวัสดุมีค่าน้อยกว่าความชื้นวิกฤต แสดงว่าสิ้นสุดอัตราการอบแห้งคงที่



ภาพ 2 ระยะการอบแห้งที่เกิดขึ้นกับวัสดุเกษตร

หมายเหตุ (ก) น้ำหนักกับเวลา (ข) ความชื้นของวัสดุกับเวลา

(ค) อัตราการอบแห้งกับความชื้นของวัสดุ (ง) อัตราการอบแห้งกับเวลา

ที่มา: Mongpraneet (2003)

1. ช่วงการให้ความร้อนแก่วัสดุ (Warming-up drying period)

จากภาพ 2(ง) อยู่ในช่วงเส้นกราฟ A-B ซึ่งถือเป็นระยะที่อุณหภูมิของผลผลิตเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ใช้ในการลดความชื้น น้ำที่ระเหยใน ระยะนี้จึงเป็นน้ำอิสระ (Free water) ที่ไม่จับรวมกันกับ โมเลกุลของสารอื่น จึงเกิดขึ้นภายใน ระยะเวลาที่สั้นมาก และสังเกตเห็นช่วงระยะนี้ได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะหากผลผลิตมีความชื้น

เริ่มต้นไม่สูงนัก เช่น พริกเมล็ดพืช จึงมักจะไม่นิพิจารณาเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ที่เกิดขึ้นในระยะนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

(1)

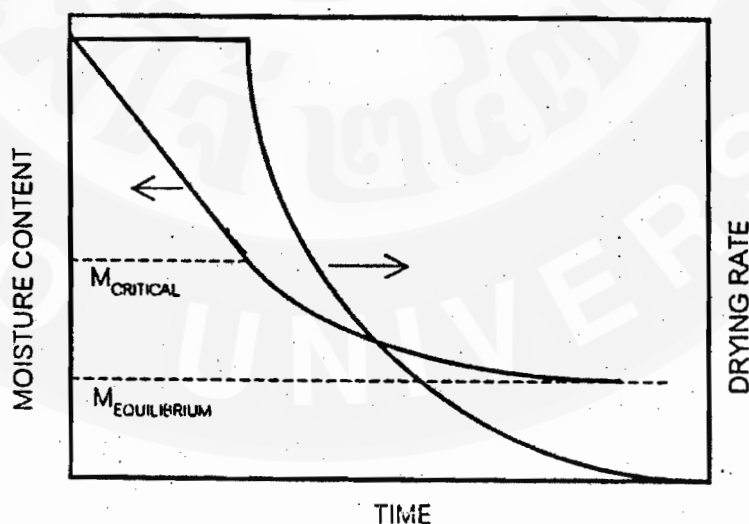
$$\frac{dM}{dt} \cong 0 \quad (1)$$

2. ช่วงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant-rate drying period)

จากภาพ 2(ง) อยู่ในช่วงเส้นกราฟ B-C ระยะการอบแห้งคงที่ที่เกิดขึ้นในวัสดุเมื่อความต้านภายในต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นมีค่าน้อยกว่าความต้านทานภายในต่อการเคลื่อนย้ายไอน้ำจากผิววัสดุ น้ำในวัสดุจะเคลื่อนตัวจากภายในสู่ผิวเพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวสู่บรรยากาศภายนอก ผิวของผลผลิตที่กำลังอบแห้งจึงชุ่มด้วยน้ำเสมอ ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนที่ผิวจึงมีค่าเท่ากับ 1 ในระยะนี้อัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่และสูงสุด

3. ช่วงระยะการอบแห้งลดลง (Falling rate period)

จากภาพ 2(ง) อยู่ในช่วงเส้นกราฟ C-E เมื่อความชื้นของผลผลิตลดลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในออกมาสู่ผิวภายนอกเป็นไปได้ยากขึ้น จึงไม่สามารถทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวออกไป ดังนั้นในระยะนี้อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลงและผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้ง



ภาพ 3 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง

ที่มา: สมชาติ (2540)

สมการการอบแห้ง

สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งอิมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับผลิตภัณฑ์ในช่วงความชื้น ระดับสุญญากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งหนึ่งๆ ซึ่งพบว่า สามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการต้องตรงกับสภาวะการทดลอง สำหรับสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งอิมพิริคัลมีหลายสมการแต่ที่นิยมใช้ในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟดังนี้

สมการแบบจำลองของ Newton

$$MR = \exp(-kt) \quad (2)$$

สมการแบบจำลองของ Page

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

สมการแบบจำลองดัดแปลงของ Page

$$MR = \exp[-(kt)^n] \quad (4)$$

สมการแบบจำลองดัดแปลงของ Henderson and Pabis

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5)$$

โดย

- MR = อัตราส่วนความชื้น
- k = ค่าคงที่การอบแห้ง (minute^{-1})
- t = เวลา (minute)
- a, n = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

โดยการหาอัตราส่วนความชื้นหาได้จากสมการ (6)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (6)$$

โดย

$$\begin{aligned} MR &= \text{อัตราส่วนความชื้น} \\ M &= \text{ความชื้น ณ เวลานั้นๆ (\%db)} \\ M_i &= \text{ความชื้นเริ่มต้น (\%db)} \\ M_{eq} &= \text{ความชื้นสมดุล (\%db)} \end{aligned}$$

และค่าความชื้นสมดุลสามารถคำนวณได้จากสมการ (7)

$$M_{eq} = A(RH/1 - RH)^B \quad (7)$$

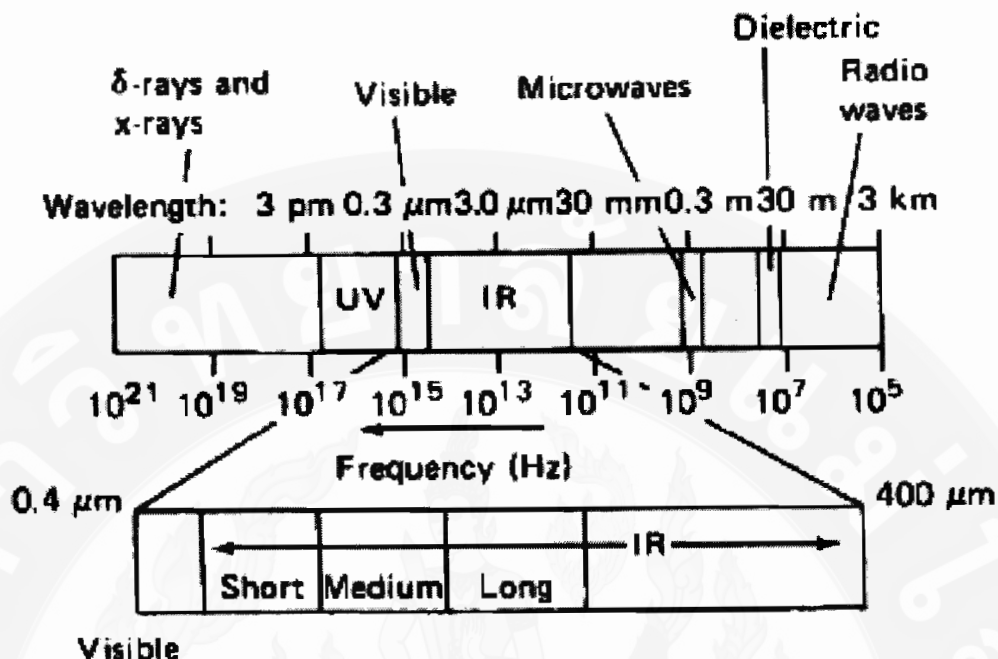
โดย

$$\begin{aligned} A, B &= \text{ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิตทางการเกษตร} \\ RH &= \text{ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (ทศนิยม)} \end{aligned}$$

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ (Drouzas et al., 1996; Maskan, 2000; Soysal, 2004) พบว่า ในการอบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศสามารถกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากการอบแห้งแบบไมโครเวฟ-สุญญากาศได้ทำการดูดอากาศออกจากตู้อบแห้งตลอดเวลา จึงส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในตู้อบมีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ จึงส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลเท่ากับศูนย์ด้วย

คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 100 MHz-10 GHz ดังภาพ 4



ภาพ 4 ช่วงความถี่และความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

ที่มา: วิไล (2543)

จากภาพ 4 จะเห็นว่าคลื่นไมโครเวฟมีความถี่อยู่ระหว่างความถี่ของคลื่นวิทยุ ทีวี และคลื่นอินฟราเรด (Infrared) ความถี่ถัดขึ้นไป คือ แสงที่เรามองเห็น สูงขึ้นไป คือ รังสีเอกซ์ (X-Rays) และรังสีแกมมา (Gamma rays) ตามลำดับ

Regier and Schubert (2005) ได้ทำการศึกษาพบว่า ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ งานคลื่นไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร โดยได้ใช้ระดับความถี่ 915 MHz ในระดับอุตสาหกรรม และระดับความถี่ 2,450 MHz ในระดับครัวเรือน

เราสามารถแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่ได้ 2 แบบ คือ

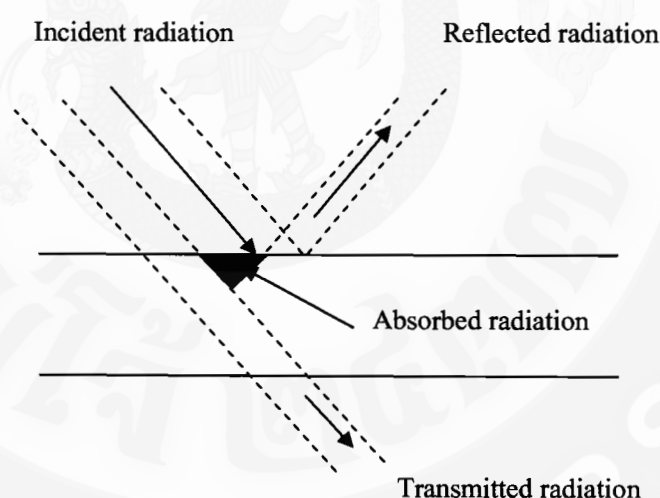
1. การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Nonionizing rays) ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทีวี ไมโครเวฟ เรดาร์ (Radar) อินฟราเรด และแสงที่ตามองเห็น ซึ่งคลื่นเหล่านี้เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิตน้อยมาก

2. การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมของสสารแตกตัว (Ionizing rays) ได้แก่ แสง-อัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) รังสีเอกซ์ (X-Rays) รังสีแกมมา (Gamma rays) ซึ่งคลื่นเหล่านี้ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ ถ้าได้รับรังสีในปริมาณมากๆ เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อกำจัดเซลล์มะเร็ง จะทำให้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงหรือเสียหายได้

คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะ 3 อย่างคือ

1. การสะท้อนของคลื่น (Reflection) คลื่นไมโครเวฟ เมื่อส่งไปสู่วัสดุโลหะจะเกิดการสะท้อนกลับ คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้ไม่เกิดความร้อนในวัสดุที่ถูกห่อหุ้มด้วยโลหะ
2. การทะลุผ่านของคลื่น (Penetration or Transparent) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิด คล้ายช่องกระจกหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมชาติทะลุผ่านได้ วัสดุที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายของการทะลุผ่านของคลื่น ได้แก่ แก้ว เป็นต้น
3. การดูดกลืนของคลื่น (Absorption) คลื่นไมโครเวฟ สามารถถูกดูดกลืนได้โดยอาหาร น้ำ หรือวัตถุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ซึ่งจะส่งผลทำให้กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟลดลงไป และจะเปลี่ยนสภาพจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุนั้น



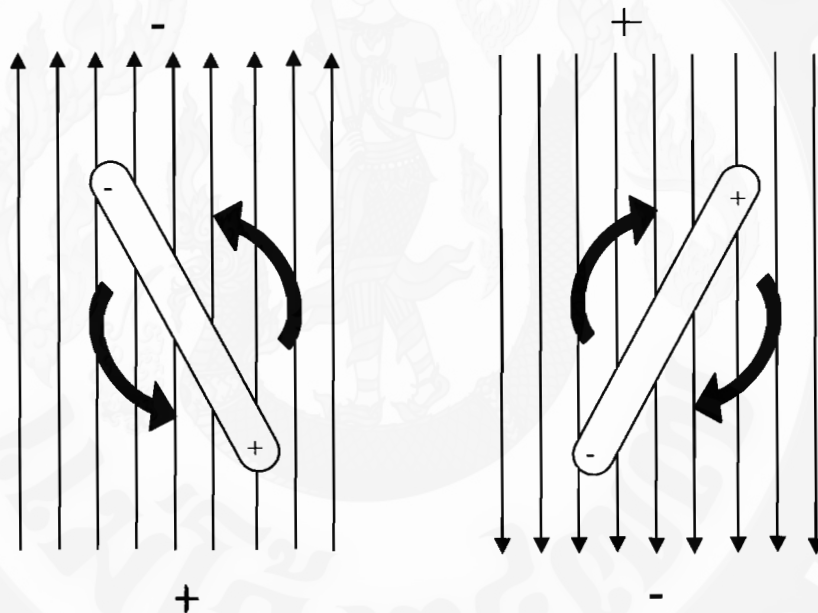
ภาพ 5 คุณลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

กลไกการเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่ชิ้นวัสดุจะเกิดความร้อนได้ใน 2 ลักษณะร่วมกัน ซึ่งได้แก่

1. Ionic Polarization เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้นและเร่งให้มีการเคลื่อนที่จึงทำให้เกิดการเสียดสีกันขึ้นกับไอออนอื่นๆ และมีการเปลี่ยนพลังงานจลน์มาเป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆ ต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้ เกิดได้ในของเหลวภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย

2. Dipole Rotation เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (Polar) ได้แก่ น้ำนั่นเอง ในสภาพปกติสารประกอบนั้นจะเรียงตัวประจุบวกและลบอย่างไม่มีระเบียบ เมื่อเข้าอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบของสารนั้น จะเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ดังภาพ 6



ภาพ 6 กลไกการเกิดความร้อนคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Singh and Heldman (1993)

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915-2,450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นและเป็นลักษณะการเกิดความร้อนที่สำคัญ ความร้อนที่เกิดจากทั้งสองรูปแบบดังกล่าวที่จุดซึ่งวัสดุสัมผัสกับไมโครเวฟแล้วจึงกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่น เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนด้วยและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟจึงสามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยทำให้เกิดความร้อนที่เป็นรูปแบบ

และสูญเสียพลังงานน้อย เมื่อเปรียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน (Baysal et al., 2003; Kardum et al., 2001; Maskan, 2001; Sharma and Prasad, 2006; Tulasidas et al., 1995)

ความลึกในการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟ

ความลึกในการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ของวัสดุ ความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ดังจะเห็นได้จากสมการ (8)

$$d_p = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (8)$$

โดย

- d_p = ความลึกในการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟ (m)
- λ = ความยาวของคลื่นไมโครเวฟ (m)
- ϵ' = ค่า Dielectric constant
- ϵ'' = ค่า Dielectric loss factor

เนื่องจากไมโครเวฟจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนในขณะที่แทรกเข้าไปในวัสดุ ดังนั้นเมื่อค่า Dielectric loss factor ยิ่งสูง จะส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น และจะทำให้การทะลุผ่านของคลื่นได้สั้นลงก่อนที่จะถึงพลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ไป

จากการคำนวณเพื่อหาความเหมาะสมของความหนาของชิ้นกล้วยโดยใช้ค่า ϵ' เท่ากับ 60 และ ϵ'' เท่ากับ 18 (Venkatesh and Raghavan, 2004) พบว่า ความลึกในการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 8.37 mm และได้ทำการกำหนดความหนาของชิ้นกล้วยชิ้นที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 3 mm

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

จากการศึกษาของ Sanga et al. (2000) พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีปัจจัยมากมายหลายชนิดที่มีผลต่อคุณภาพอาหารที่ได้จากการอบแห้งจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาก่อนการอบแห้งเพื่อสามารถผลิตอาหารออกมาได้ดี ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่

1. ปริมาณความชื้นในอาหาร น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงถึง 78 โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงของน้ำจะมีผลอย่างมากต่อวัสดุชิ้นในกระบวนการอบแห้งด้วย

ไมโครเวฟ โดยวัสดุที่มีปริมาณความชื้นสูงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงด้วย เมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในกระบวนการอบแห้งน้ำในอาหารจะอยู่ใน 2 รูปแบบคือ น้ำอิสระ (Free water) และน้ำที่เกาะอยู่กับโมเลกุลอาหาร (Bound water) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำที่เกาะอยู่กับโมเลกุลอาหารมีค่าเท่ากับ 0.003 ในขณะที่น้ำอิสระมีค่าเท่ากับ 12 ส่งผลให้น้ำทั้ง 2 แบบ เกิดการหมุนของอนุภาค (Rotation) เพื่อให้เกิดความร้อนแตกต่างกันเมื่อนำไปไว้ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นอาหารที่มีปริมาณน้ำอิสระอยู่มากจึงตอบสนองต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟได้มากกว่าอาหารที่มีน้ำอิสระอยู่น้อย

2. ความหนาแน่น โดยปกติอากาศจะเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ดังนั้นอาหารที่โปร่งหรือพอง มีอากาศแทรกอยู่มากจะทำให้ร้อนได้ช้า เนื่องจากค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของอากาศซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำหรือตัวทำละลายอื่น

3. อุณหภูมิ ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีค่าต่ำมาก แต่ที่สภาวะอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้นสำหรับของเหลวอุณหภูมิมีก ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แต่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

4. ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความร้อนจำเพาะนี้ไม่มีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหาร แต่ช่วยอธิบายได้ว่าทำไมวัตถุแต่ละชนิดจึงสามารถให้ความร้อนได้เร็วแตกต่างกันไป ถ้าวัตถุมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำวัตถุนั้นจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เร็วกว่าวัตถุที่มีค่าความร้อนจำเพาะสูง ในกรณีที่อาหารมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนพลังงานต่ำ ค่าความร้อนจำเพาะจะมีส่วนช่วยให้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นไปด้วยดี การควบคุมค่าความร้อนจำเพาะเป็นเทคนิคหนึ่งในการให้ความร้อนกับอาหารที่มีองค์ประกอบหลายประเภท โดยจัดสัดส่วนขององค์ประกอบให้มีค่าความร้อนจำเพาะใกล้เคียงกัน

5. ค่าการนำความร้อน โดยค่าการนำความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับอาหารนั้น ๆ ซึ่งค่าการนำความร้อนจะไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหาร แต่เป็นค่าสำคัญที่บ่งบอกถึงการถ่ายเทการกระจายพลังงานภายในชิ้นอาหาร เมื่ออบแห้งด้วยไมโครเวฟ วัตถุจะได้รับพลังงานไมโครเวฟ แล้วจึงเกิดถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้รับไปยังบริเวณข้างเคียง ดังนั้นถ้าอาหารนั้นมีค่าการนำความร้อนที่ดี จะแสดงให้เห็นว่า อาหารนั้นจะเกิดการกระจายความร้อนอย่าง

ทั่วถึงและสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดจุดที่มีอุณหภูมิสูงมากเกินไป (Overheating) ซึ่งอาจทำให้เกิดการไหม้ของอาหารได้

6. ความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหาร (Penetration depth) ความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหารนี้ คือ ความสามารถที่คลื่นไมโครเวฟที่ตกกระทบบริเวณพื้นผิวแทรกผ่านเข้าไปในขึ้นอาหารและพลังงานลดลงร้อยละ 37 ค่าความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหารนี้ไม่ใช่เป็นค่าคุณสมบัติเฉพาะของขึ้นอาหาร แต่เป็นผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติโดยรวมของขึ้นอาหารนั้น ค่าความยาวคลื่นไมโครเวฟค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกจะส่งผลต่อค่าความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหาร เมื่อค่าไดอิเล็กตริก และ Loss tangent เพิ่มขึ้น ค่าความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหารจะยิ่งลดลง

7. ค่าความถี่ โดยความถี่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีอยู่ 2 ช่วงคือ 915 และ 2,450 MHz ความถี่ที่ใช้จะมีผลต่อระดับความลึกที่คลื่นผ่านขึ้นอาหาร โดยทั่วไปค่าความถี่ต่ำ (915 MHz) จะสามารถให้ความร้อนได้ลึกกว่า

8. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-100 kW โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงจะช่วยเร่งให้เกิดความร้อนกับอาหารได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการปรับกำลังไฟฟ้าของระบบเพื่อควบคุมความเร็วในการอบแห้งอาหารร้อนได้ อย่างไรก็ตามก็เกิดการเร่งความเร็วมากเกินไปอาจเกิดผลเสีย เช่น น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกด้วยการระเหยได้ ทำให้เกิดการเดือดขึ้นในเนื้ออาหารและเมื่อมีปริมาณมากจะระเบิดออกมาทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายได้

9. รูปร่างของอาหาร ลักษณะรูปร่างของอาหารที่นำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีความสำคัญ ดังนี้

ขนาด หากขนาดของขึ้นอาหารนั้นใหญ่มาก คลื่นไมโครเวฟเข้าไม่ถึงจุดกึ่งกลางยังผลให้เกิดความร้อนไม่ทั่วทั้งชิ้น แต่ถ้าความหนาของชิ้นใกล้เคียงกับความสามารถของคลื่นไมโครเวฟที่จะแทรกผ่านถึงได้ จะทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางชิ้นมีอุณหภูมิสูงที่สุด การเลือกขนาดความถี่ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ถ้าเป็นอาหารที่มีลักษณะชิ้นหนาควรใช้ความถี่ 915 MHz

รูปร่าง อาหารที่มีรูปร่างขนาดกว้างยาวเท่ากันทั้งชิ้น สามารถทำให้ร้อนได้สม่ำเสมอกว่าควรหลีกเลี่ยงรูปร่างที่มีขอบแหลมหรือมีมุมซึ่งอาหารจะไหม้ได้ง่าย อาหารทรงกลมจะดีกว่าอาหารทรงเหลี่ยม

สภาวะสุญญากาศ

สภาวะสุญญากาศ คือ สภาวะที่มีระดับความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่

1. Low vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 101.32 ถึง 3.33 kPa
2. Medium vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 3.33 ถึง 1.3×10^{-4} kPa
3. High vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 1.3×10^{-4} ถึง 1.3×10^{-7} kPa
4. Very high vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 1.3×10^{-7} ถึง 1.3×10^{-10} kPa
5. Ultra high vacuum อยู่ในช่วงความดันตั้งแต่ 1.3×10^{-10} kPa ขึ้นไป

เนื่องจากความดันมีผลกระทบต่อจุดเดือดของน้ำ โดยเมื่อลดระดับความดันจะส่งผลให้อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำลดลง (Zhangjing and Lamb, 2007) และเมื่อสังเกตจากความสัมพันธ์ของความดันและอุณหภูมิจากตารางเทอร์โมไดนามิก ซึ่งจะทำให้พบแนวโน้มดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ตารางเทอร์โมไดนามิก

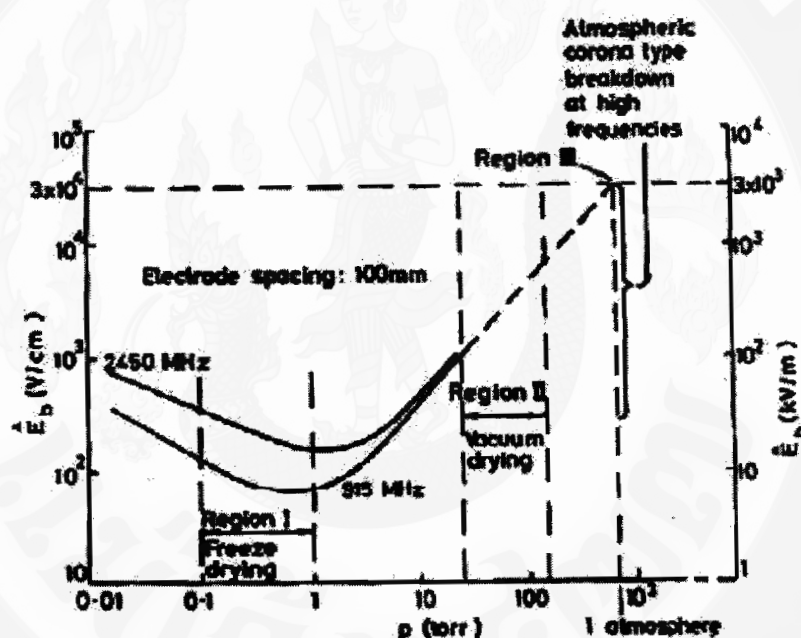
ความดัน (kPa)	อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C)
103.42	100.57
101.325	99.9
68.95	89.55
55.16	83.8
34.47	72.34

ที่มา: Cengel and Michael (2002)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการอบแห้งในสภาวะสุญญากาศที่แตกต่างกัน โดยได้ใช้ระดับสุญญากาศที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ ความดันสุญญากาศ 0.1 และ 0.02 bar ซึ่งทั้งสองระดับนั้นอยู่ในระดับสุญญากาศต่ำและกลางตามลำดับ จากการตรวจสอบเอกสาร พบว่าส่วนใหญ่ในงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศมักจะทำการอบแห้งที่ระดับสุญญากาศระดับต่ำ เช่น Drouzas and Schubert (1996) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองอบกล้วยด้วยวิธีการ

อบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ โดยอบแห้งภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศที่ 15 25 50 100 200 และ 300 mbar หรือ 1.5 2.5 5 10 20 และ 30 kPa (ซึ่งอยู่ในช่วง Low vacuum) ใช้กำลังไฟ 150 280 และ 850 W พบว่า สภาวะความดันสุญญากาศน้อยกว่า 25 mbar กำลังไฟ 150 W อุณหภูมิไม่เกิน 70°C ใช้เวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีที่สุด และมีสภาพลักษณะของผลิตภัณฑ์คล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งแบบระเหิด โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ คือ สี รสชาติ กลิ่น และรูปร่าง

การเลือกใช้ระดับสุญญากาศ



ภาพ 7 การเกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศ (ค่าสูงสุด) ที่ขึ้นอยู่กับความดันที่ความถี่สองค่า

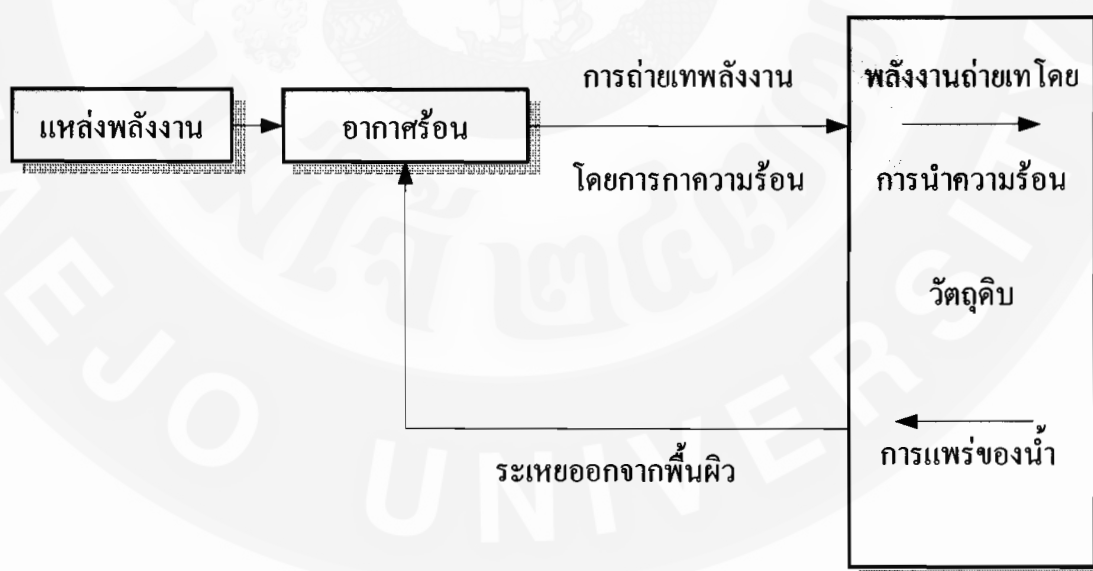
ที่มา: Metaxas and Meredith (1983)

จากภาพ 7 พบว่า การเกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าจะลดลงตามสภาวะสุญญากาศ แต่สำหรับในช่วง I ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่ลดลง หากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์มีค่าสูงเกินไปส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์การอาร์คหรือเกิดพลาสมาขึ้นมาได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูงเกินไป เฉพาะจุด ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ได้ จึงควรหลีกเลี่ยงในการอบแห้งในระดับ

สูญญากาศสูง ในช่วง II ของภาพ 7 แสดงให้เห็นว่า ช่วงความดันระหว่าง 1.33-26.66 kPa (ประมาณ 20-200 torr) ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าหลายเท่าเมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองเบรคดาวน์ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นในการออกแบบระบบอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ-สูญญากาศควรคำนึงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติภายในตู้อบแห้ง เนื่องจาก ส่งผลต่อการกำกับการดูดซับ อุนหภูมิ และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัววัสดุที่นำมาอบแห้ง การเกิดเบรคดาวน์ของสนามไฟฟ้าจะปรากฏที่เฉพาะจุดและเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้ควรจะหลีกเลี่ยงเพราะเป็นกำลังที่สูญเปล่า (Waste power) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดความร้อนสูงเฉพาะจุด (Local overheating) ภายในโหลดหรือวัสดุ อีกทั้งมีกลิ่นบางส่วนรั่วไหลผ่านตรงประตูปิดเปิดของตู้อบแห้งไมโครเวฟได้

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ-สูญญากาศ

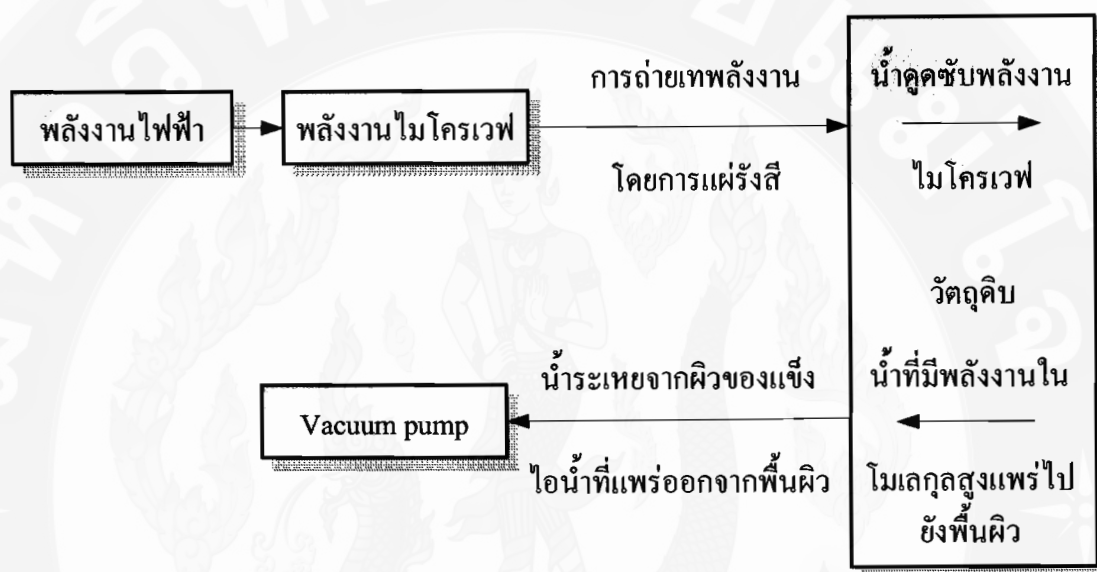
การอบแห้งด้วยระบบสูญญากาศร่วมกับไมโครเวฟเป็นเทคนิคหนึ่งในการนำพลังงานไฟฟ้ามาอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ กลไกการอบแห้งด้วยระบบสูญญากาศร่วมกับไมโครเวฟจะแตกต่างจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในภาพ 8



ภาพ 8 กลไกการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

ที่มา: Wadsworth et al. (1990)

สำหรับกลไกการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเพื่อทำให้อากาศร้อนจากนั้นพลังงานจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของ วัสดุที่นำมาอบแห้งด้วยการพาความร้อน น้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นไอและแพร่สู่อากาศแห้งที่บริเวณ พื้นผิว ซึ่งความแตกต่างของความชื้นภายในวัตถุดิบนี้เองเป็นตัวก่อให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลน้ำ มาที่ผิว



ภาพ 9 กลไกการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

ที่มา: Wadsworth et al. (1990)

หากพิจารณาจากภาพ 9 คลื่นไมโครเวฟที่ถูกปล่อยออกไปจะทะลุทะลวงเข้าไปในชิ้นวัสดุและจะถูกดูดซับด้วยน้ำที่อยู่ในชิ้นวัสดุนั้น ต่อมาจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และเกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ วัสดุต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้น เมื่อเกิดความร้อนขึ้นภายในชิ้นวัสดุ น้ำที่อยู่ในชิ้นวัสดุจะเคลื่อนไปสู่ชั้นผิวและระเหยไปในอากาศภายนอก โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยของน้ำจะต่ำกว่าปกติ เนื่องจากการลดระดับความดันอยู่ในระดับสุญญากาศนั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของการระเหยลดลงด้วยเช่นกัน (Opoku et al., 2007) ดังนั้นการอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศสามารถลดการใช้เวลาในการอบแห้งและช่วยยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Rodriguez et al., 2005; Sunjka et al., 2004; Venkatesh and Gaghavan, 2004; Yongsawatdigul and Gunasekaran, 1996;).

การพรีทรีทเมนต์

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของอาหารในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพของผักและผลไม้ซึ่งสามารถปรับปรุงให้คุณภาพดีขึ้นได้โดยการทำพรีทรีทเมนต์ (Pretreatment) เช่น การลวก และอาจเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงไปในส่วนที่ใช้น้ำ จะทำให้อาหารมีความกรอบมากขึ้น การพรีทรีทเมนต์ด้วยความร้อน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การลวกด้วยไอน้ำและการลวกด้วยความร้อน โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่ตั้งไว้ ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการลวกได้แก่ ชนิดและขนาดของผลผลิต อุณหภูมิในการลวก และวิธีการในการให้ความร้อน จากนั้นทำให้เย็นโดยเร็วที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การพรีทรีทเมนต์โดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกด้วยไอน้ำโดยพิจารณาจากความเหมาะสมของวัตถุดิบ

การลวกด้วยไอน้ำ

การลวกด้วยไอน้ำเหมาะสำหรับผักและผลไม้ที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่เพราะจะเกิดการสูญเสียจากการชะล้างน้อยกว่าการลวกด้วยน้ำร้อน วิธีการลวกอาจใช้เครื่องลวกหรือใช้หม้อต้มน้ำให้เกิดไอน้ำไหลผ่านขึ้นผักซึ่งคล้ายกับการนึ่ง ผักที่นิยมลวกด้วยไอน้ำได้แก่ หัวบีท บล็อกโคลี กะหล่ำปลี ถั่วลันเตา มันฝรั่ง ข้าวโพด เป็นต้น

ข้อดีของการลวกด้วยไอน้ำ คือ ช่วยให้น้ำแข็งเซลล์ขยายตัว ลดระยะเวลาการอบแห้งและไล่อากาศที่อยู่ภายในเซลล์ออกจากเนื้อเยื่อ ทำให้มีเนื้อสัมผัสนุ่ม นอกจากนั้นยังส่งผลให้สารสีในชั้นเนื้อวัตถุดิบบางชนิดเกิดเจลาตินในเซลล์ เช่น กล้วย เป็นต้น (นภภรณ์และคณะ, 2549) ซึ่งเมื่อนำไปอบแห้งจะช่วยเพิ่มรูพรุนในเนื้อกล้วยส่งผลให้เกิดความกรอบมากขึ้น นอกจากนั้นการลวกยังช่วยให้อาหารบางชนิดมีสีสดใสขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังกล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

นภภรณ์และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาการพรีทรีทเมนต์ก่อนการอบแห้งแบบไอน้ำยิ่งยวด 3 วิธี คือ การลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิก พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วย

สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด กล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงเกิดการหดตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกหลังการอบแห้งมีความบางมากที่สุด

Wadsworth et al. (1990) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวหนึ่งโดยใช้การอบแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ พบว่า อัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับพลังงานไมโครเวฟ โดยการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศต่ำ จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งลงได้ ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า เมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งไม่มีการหดตัว ซึ่งเป็นข้อดีของการอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบธรรมดา

Clary and Ostrom (1995) ได้ศึกษาการอบแห้งองุ่นไร้เมล็ดพันธุ์ทอมสันด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ เพื่อรักษาลักษณะองุ่นสดในด้านสี กลิ่นรส และลักษณะฟองฟูให้ได้มากที่สุด โดยปราศจากการเดิมวัตถุดิบเสีย พบว่า การใช้อุณหภูมิ 70-80°C อบแห้งองุ่นให้มีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 5 หรือน้อยกว่า จะทำให้ได้อองุ่นแห้งที่มีคุณลักษณะที่ดีที่สุด นอกจากนี้องุ่นยังมีลักษณะเนื้อสัมผัสกรอบ (Crunchy) และยังมีอายุการเก็บรักษานานอย่างน้อย 1 ปี

Lin et al. (1998) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งชิ้นแครอท 3 วิธี คือ 1) Air dry 2) Vacuum microwave 3) Freeze dry โดยทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะดังนี้ 1) การดูดซับน้ำ 2) สี 3) ความหนาแน่น 4) ปริมาณแร่ธาตุ 5) เนื้อสัมผัส จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพในระดับเดียวกับการอบแห้งแบบ Freeze dry ส่วนการอบแห้งแบบ Air dry จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำกว่าทั้งสองวิธี

Drouzas et al. (1999) ได้ทำการศึกษาหาความแตกต่างของบริเวณการกระจายความร้อนของคลื่นไมโครเวฟและผลของการอบแห้งไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้เจลผลไม้ที่จำลองมาจากน้ำส้มคั้นเข้มข้นเป็นชิ้นทดสอบ ใช้ความดันสุญญากาศที่ 30-50 mbar หรือ 3-5 kPa กำลังไมโครเวฟ 640-710 W จากการศึกษาพบว่า มีความแตกต่างกันของการกระจายความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟจำนวน 5 ตำแหน่งภายในตู้อบไมโครเวฟ และคุณลักษณะทางด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศจะมีความสว่างมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบธรรมดาพร้อมกับไมโครเวฟ

Gunasekaran (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งด้วยวิธีไมโครเวฟ-สุญญากาศ โดยการปล่อยพลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆ ในช่วงการอบแห้ง พบว่า การปล่อยพลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆ นี้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งมากกว่าการปล่อยพลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งโดยการปล่อยพลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆ จะมีคุณภาพ

ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยการปล่อยพลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง และยังสามารถประยุกต์ใช้กับการอบแห้งกับผลผลิตที่ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูงอีกด้วย

Maskan (2000) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งกล้วยหั่นแว่นซึ่งมีความหนาแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 4.3 7.4 และ 14 mm โดยได้ทำการอบแห้ง 3 วิธี แบบลมร้อน (60°C ความเร็วลม 1.45 m/s) แบบไมโครเวฟ (กำลังงานไมโครเวฟ 350 490 และ 700 W) และแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (ที่กำลังงานไมโครเวฟ 350 W และความหนา 4.3 mm) พบว่า กราฟการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ของการอบแห้งแบบลมร้อนใช้เวลานานที่สุด อัตราการอบแห้งสูงสุดเกิดที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่สูงที่สุดด้วยเช่นกัน และในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบไมโครเวฟจะมีสีสว่างและมีอัตราการดูดซับความชื้นสูงที่สุด

Pinedo and Murr (2005) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งฟักทองด้วยการอบแห้งสุญญากาศ โดยใช้ความดันสุญญากาศที่ 5-25 kPa (ซึ่งอยู่ภายใต้สุญญากาศระดับกลาง) ใช้อุณหภูมิที่ $50-70^{\circ}\text{C}$ และทำการพรีทรีตเมนต์ด้วยการลวกและการแช่แข็ง และพบว่า การแช่แข็งมีอิทธิพลและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งมากกว่าการลวก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านออกจากชิ้นฟักทองในระหว่างการอบแห้งสุญญากาศเพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบได้

Hu et al. (2005) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการอบแห้งถั่วเหลือง 3 วิธี คือ การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศ พบว่า การอบแห้งแบบลมร้อนมีอัตราการอบแห้งสูงในช่วงเริ่มต้น แต่ในช่วงท้ายอัตราการอบแห้งลดลงและทำให้เกิดการเสียหายต่อคุณภาพอาหาร การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ส่วนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศโดยการอบแห้งแบบลมร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศที่ความดัน -95 kPa กำลังไมโครเวฟ 9.33 W/g dry matter เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบผสมนี้ สาเหตุที่นำถั่วเหลืองไปอบแห้งแบบลมร้อนก่อนเพื่อลดน้ำหนักเริ่มต้นในการอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ

Setiady et al. (2007) ได้ทำการอบแห้งมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ โดยอบแห้งมันฝรั่งลวกที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C เป็นเวลา 150 นาที พบว่า การอบแห้งที่ 70°C ส่งผลให้มันฝรั่งมีความชื้นต่ำที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C อย่างไรก็ตาม การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ส่งผลให้มันฝรั่งอบแห้งมีคุณภาพด้านสีที่ดีที่สุด

กรอบแนวความคิด

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้ง 2 ชนิด คือ การอบแห้งสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการอบแห้ง ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์กล้วยอบแห้งที่ปราศจากสารเคมีเจือปน เนื่องจากการอบแห้งที่ไม่ได้ปรุงแต่งสารเคมีต่างๆ ลงไปในวัตถุดิบ เพื่อปรับปรุงรสชาติ สำหรับการทดลองอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศได้เริ่มด้วยการอบแห้งกับตู้อบแห้งขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง โดยได้กำหนดสภาวะของกล้วยและการอบแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์กล้วย การเลือกใช้ระดับกำลังไมโครเวฟในช่วงการอบแห้ง และ การเลือกใช้ระดับสุญญากาศ เมื่อทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและได้รับผลการทดลองเบื้องต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งทำให้ทราบถึงสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านการอบแห้งมีคุณภาพดีที่สุด หลังจากนั้นจึงทำการขยายผล โดยการอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาความแตกต่างของเครื่องอบแห้งทั้งสองระดับ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

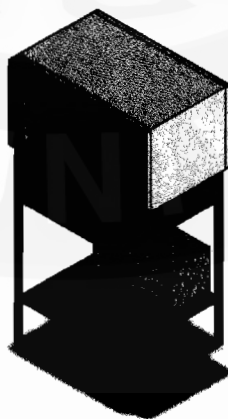
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุทดลอง

กล้วยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะความสุกในระยะที่ 4 ดังภาพ 1 โดยสังเกตสีของเปลือกที่มีลักษณะเริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลือง แต่ยังมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว โดยค่า $L^*a^*b^*$ ของเปลือกเฉลี่ย 61.09 -3.27 และ 33.73 ตามลำดับ บริเวณปลายยังคงเป็นสีเขียวอยู่ โดยเนื้อกล้วยกำลังเริ่มสุกแต่ยังคงความแข็งอยู่ ซึ่งง่ายต่อการหั่นแว่นเพื่อเตรียมชิ้นกล้วยทดสอบ โดยเป็นกล้วยที่มีแหล่งเพาะปลูกใน อ. หางดง จ. เชียงใหม่

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

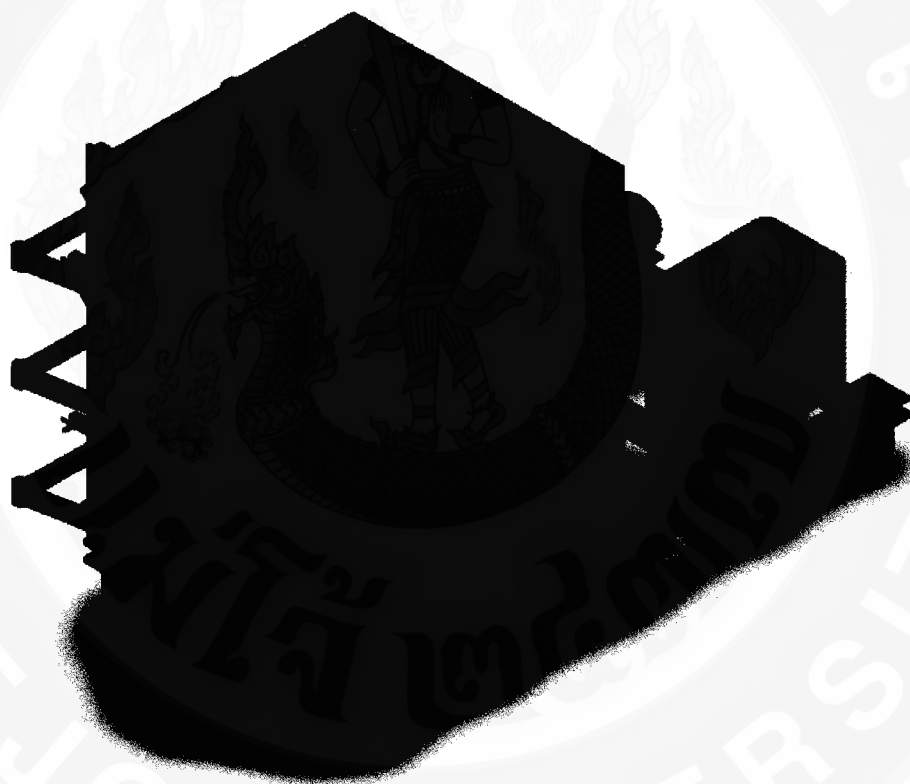
ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้และดัดแปลงตู้อบไมโครเวฟระดับครัวเรือนยี่ห้อ Samsung รุ่น MS103HCE ซึ่งมีความจุ 28 ลิตร กำลังวัตต์ 1,000 W โดยได้เสริมความแข็งแรงโดยการเสริมครีบลูกเหล็กสแตนเลสหนา 3 mm บริเวณด้านใต้ของตู้ไมโครเวฟเพื่อรองรับการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศและได้ทำการติดตั้งบนโครงสร้างเหล็กซึ่งภายในติดตั้งชุดมอเตอร์เพื่อใช้ขับเคลื่อนสำหรับวางชิ้นกล้วย เพื่อให้ชิ้นกล้วยสามารถหมุนรับคลื่นไมโครเวฟได้อย่างทั่วถึงตลอดเวลาในการอบแห้ง ตู้อบแห้งต่อเข้ากับชุดควบคุมระดับสุญญากาศ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบ Starling Fluid System ดังภาพ 10



ภาพ 10 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการและได้นำผลของการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการอบแห้งในเชิงอุตสาหกรรม โดยทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศแนวตั้ง ระดับอุตสาหกรรม ลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 73.5 cm สูง 120 cm โดยมีขนาดความจุ 573 ลิตร ดังภาพ 11 ภายในตู้อบแห้งถูกแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ในแต่ละชั้นได้ทำการติดตั้งแมกนีตรอนขนาด 800 W จำนวน 2 ตัว แกนกลางติดตั้งเชื่อมต่อกับมอเตอร์เพื่อหมุนถาดวางวัสดุ เช่นเดียวกับการหมุนของจานแก้ววางวัสดุในเครื่องไมโครเวฟทั่วไป



ภาพ 11 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม

เครื่องชั่งดิจิตอล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดน้ำหนักชิ้นกล้วยอบแห้งที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงการอบแห้ง ทุกๆ 2 นาที ใช้เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น CP3202S (Sartorius AG, Germany) รับน้ำหนักมากที่สุด 3,200 g ความละเอียด 0.01 g ดังภาพผนวก 1

เครื่องวัดสี

หลังจากทำการอบแห้ง ได้นำชิ้นกล้วยอบแห้งมาทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพด้านสีด้วยใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer รุ่น MiniScan XE Plus (Hunter Associate Laboratory, USA) ดังภาพผนวก 2

เครื่องวัดเนื้อสัมผัส

หลังจากทำการอบแห้ง ได้นำชิ้นกล้วยอบแห้งมาทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK) ค่าความแม่นยำ ± 0.001 N ดังภาพผนวก 3

เครื่องถ่ายภาพโครงสร้างภายใน

หลังจากการอบแห้ง ได้นำชิ้นกล้วยอบแห้งมาถ่ายภาพโครงสร้างภายในด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) รุ่น 5600LV (JEOL Ltd., Japan) ดังภาพผนวก 4

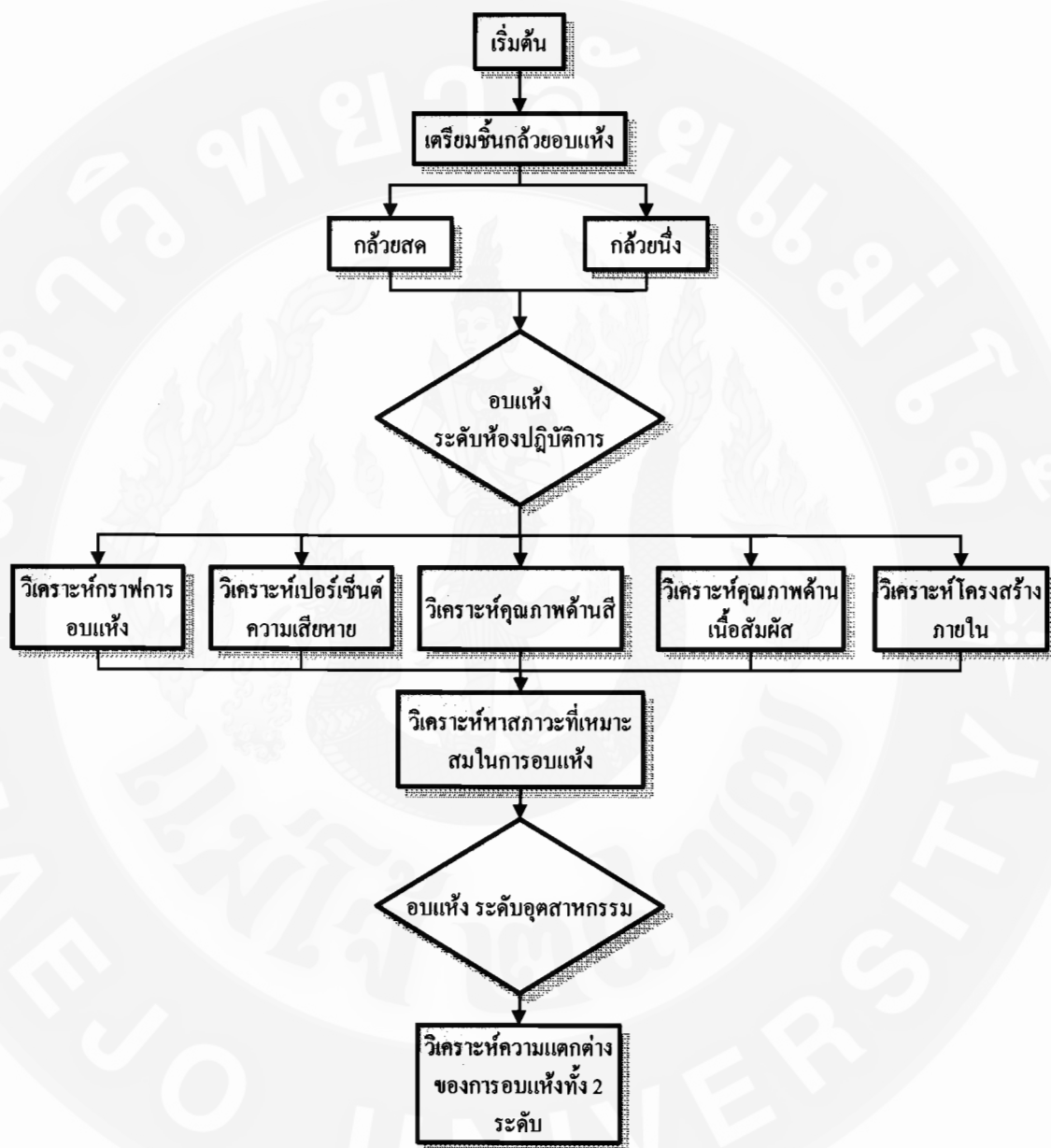
วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบอบแห้งกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาแนวโน้มในการอบแห้งที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด หลังจากนั้นนำสภาวะในการอบแห้งที่ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพนั้นมาขยายผลโดยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรมต่อไป โดยมีแผนผังการดำเนินการดังภาพ 12

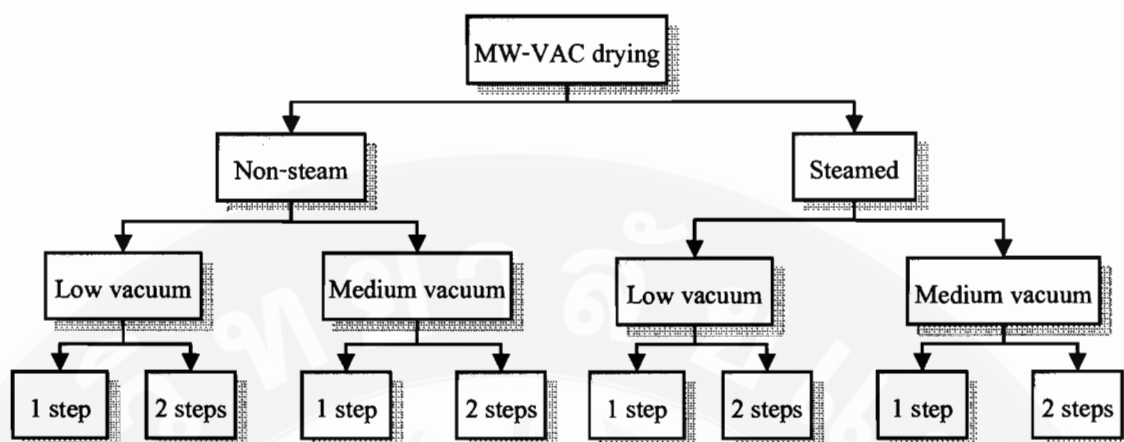
การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ได้แก่ 1) การพรีทรีทเมนต์ โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาหาความแตกต่างระหว่างกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งด้วยไอน้ำก่อนนำไปอบแห้งและกล้วยอบแห้งที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ก่อนการอบแห้งหรือกล้วยสด 2) ระดับสุญญากาศ เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ (0.1 bar) และสภาวะสุญญากาศระดับกลาง (0.02 bar) 3) การใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ โดยได้ทำการศึกษาผลของการใช้กำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน 2 ขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟเพียงขั้นตอนเดียวตลอด

ช่วงการอบแห้ง (1 step) และการใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน (2 step) ที่แตกต่างกันในการอบแห้ง โดยมีแผนผังการดำเนินการอบแห้งดังภาพ 13



ภาพ 12 แผนผังการดำเนินงาน



ภาพ 13 แผนผังการอบแห้ง

การอบแห้งขยายผลจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรม

หลังจากทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการแล้ว จะทำให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วย ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์ ระดับกำลังไมโครเวฟ และระดับสุญญากาศ เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง ที่ทำให้ได้กล้วยอบแห้งที่มีคุณภาพดีที่สุดและความชื้นประมาณร้อยละ 18 มาตรฐานแห้ง หลังจากทำการอบแห้งจึงนำเอากล้วยอบแห้งมาวิเคราะห์คุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัส เพื่อเปรียบเทียบกับกล้วยอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องระดับห้องปฏิบัติการ

วิธีการทดลองอบแห้ง

1. คัดเลือกกล้วยที่มีความสุกซึ่งสังเกตจากสีเปลือกตามที่กำหนดไว้ และขนาดของกล้วยให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน
2. ล้างกล้วยด้วยน้ำเปล่า
3. แบ่งกล้วยออกเป็นสองชนิด ซึ่งประกอบด้วยกล้วยสดและกล้วยหนึ่ง โดยกล้วยหนึ่งจะถูกนำไปนึ่งทิ้งเปลือกด้วยไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที
4. นำกล้วยทั้งสองชนิดมาปอกเปลือกและหั่นตามขวางเป็นแว่น โดยให้ทุกชิ้นมีความหนาเท่าๆ กันประมาณ 3 mm
5. เรียงกล้วยสดในงานพลาสติกที่รองด้วยกระดาษไขเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นกล้วยแห้งติดจาน

6. นำงานที่จัดวางกล้วยเรียบร้อยแล้ว ไปชั่งน้ำหนัก โดยกำหนดให้น้ำหนักรวมของกล้วยประมาณ 80 กรัมต่องาน

7. นำกล้วยไปอบแห้งในเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการอบที่ระดับสุญญากาศ 2 ระดับ คือ 0.1 และ 0.02 bar (10 และ 2 kPa) ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การใช้กำลังไมโครเวฟระดับเดียวตลอดการอบแห้งเป็นแบบ 1 ขั้นตอน และการใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ระดับตลอดการอบแห้งเป็นแบบ 2 ขั้นตอน โดยระดับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง 1 ขั้นตอน คือ 20.4 W/g dry matter และกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง 2 ขั้นตอน คือ 20.4 และ 11.1 W/g dry matter

8. นำกล้วยออกมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกพร้อมทั้งคำนวณหาค่าความชื้นทุกๆ 2 นาที จนกระทั่งความชื้นของชิ้นกล้วยลดลงมาที่ 18 % (dry basis)

9. นำกล้วยงานใหม่ที่เตรียมไว้เข้าเครื่องอบแห้ง โดยตั้งเวลาในอบแห้งเพิ่มขึ้นอีก 2 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว ทำการจดบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

10. นำข้อมูลที่ได้จากการจดบันทึกค่ามาเขียนกราฟการอบแห้งในชิ้นกล้วยทั้ง 2 ชนิดและในสถานะแต่ละสถานะการอบแห้ง

11. นำกล้วยอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งทุกสถานะ ไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ

การหาลำดับไมโครเวฟเทียบเท่าของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ

ในการหาลำดับไมโครเวฟเทียบเท่าของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศนั้น ได้นำน้ำซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยกำหนดค่าการให้กำลังคลื่นไมโครเวฟสำหรับตู้อบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการที่ 30 และ 50% สำหรับตู้อบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรมที่ระดับ 50 70 และ 100% โดยทำการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟจากสมการ (9) (จาดุพงศ์และคณะ, 2551)

$$P_w = \frac{4.187 \times V \times (T_2 - T_1)}{t} \quad (9)$$

เมื่อ

P_w	=	กำลังวัตต์ความร้อนเทียบเท่า (W)
V	=	ปริมาตรของน้ำที่ทดสอบ (ลิตร)
T_1	=	อุณหภูมิก่อนให้คลื่นไมโครเวฟ ($^{\circ}\text{C}$)
T_2	=	อุณหภูมิหลังให้คลื่นไมโครเวฟ ($^{\circ}\text{C}$)
t	=	เวลาในการทดสอบ (วินาที)

การวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้ง

เมื่อเสร็จสิ้นการอบแห้งในแต่ละสถานะที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งประสิทธิภาพของการอบแห้งในแต่ละสถานะมีความแตกต่างกัน โดยได้จำแนกการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. การวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง

เมื่อทำการทดลองอบแห้งเสร็จสิ้น ทำให้ทราบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำมาเขียนกราฟการอบแห้งและนำไปสร้างแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการอบแห้งกล้วยหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ สามารถอธิบายกลไกการอบแห้งในแต่ละสถานะการอบแห้ง โดยการนำผลของความชื้นที่ได้จากสมการแบบจำลองอบแห้งชนิดต่างๆ มาเทียบกับกราฟการอบแห้งที่ได้จากการทดลองจริง แล้วจึงวิเคราะห์ทางสถิติหาค่า Coefficient of determination (R^2) และ Standard error (SE) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการอบแห้งในงานวิจัยนี้ โดยสมการแบบจำลองแสดงรายละเอียดดังตาราง 3

ตาราง 3 สมการแบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลอง	สมการ
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

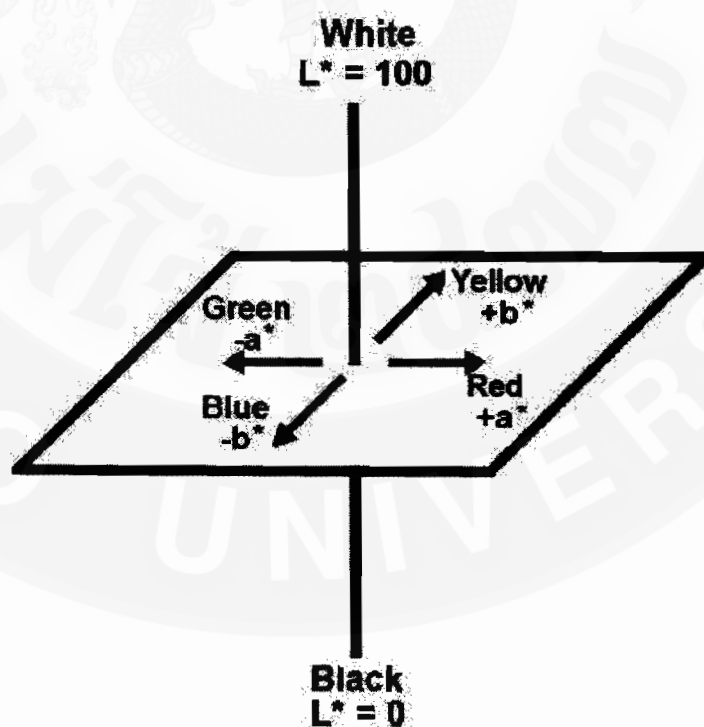
2. การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย

ทำโดยวิธีคัดแยกกล้วยอบแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วเกิดการไหม้และช้ำ น้ำหนักของกล้วยอบแห้งที่ไหม้และช้ำน้ำหนักรวมของกล้วยอบแห้งทั้งหมด นำมาเปรียบเทียบ อัตราส่วนซึ่งแสดงออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์เสียหายโดยน้ำหนัก โดยคำนวณได้จากสมการ (10) การหาเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย} = \frac{\text{นน. ผลผลิตที่เสียหาย} \times 100}{\text{นน. ผลผลิตทั้งหมด}} \quad (10)$$

3. การวัดคุณภาพด้านสี

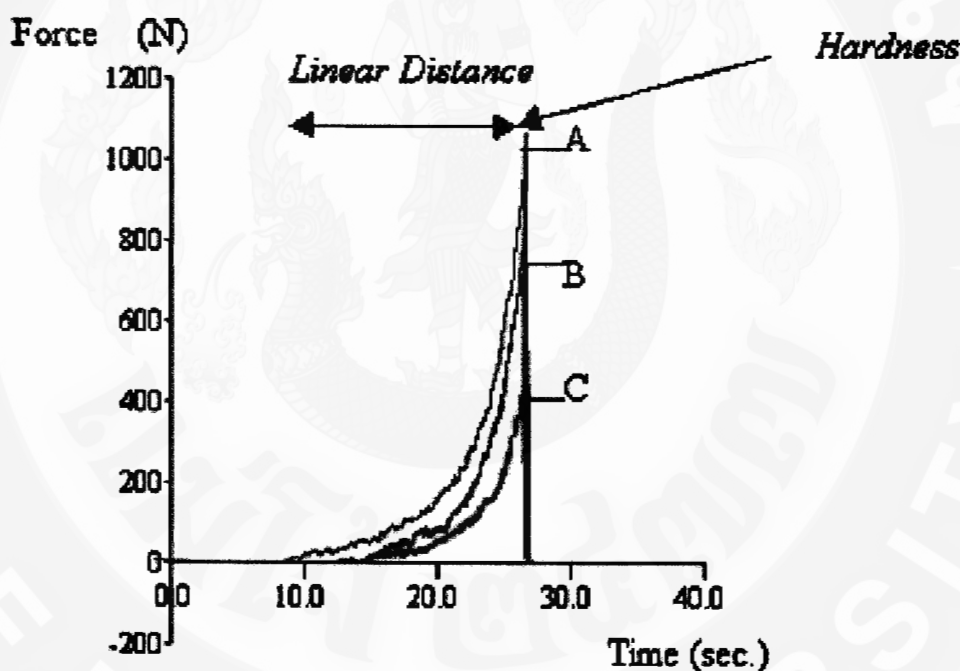
นำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการอบแห้งมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสีอาหาร รุ่น MiniScan XE Plus โดยทำการวัดสีในเทอมของตัวแปร L^* a^* และ b^* ซึ่ง L^* แสดงค่าความสว่าง a^* แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และ b^* แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน ดังแสดงจากภาพ 14 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นกล้วยอบแห้ง โดยทำการวัดค่าสี 3 ซ้ำ



ภาพ 14 สเกลสีในหน่วย $L^*a^*b^*$

4. การวัดคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

นำกล้วยอบแห้งมาทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyser รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK) ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N ทำการทดสอบด้วยแรงกด โดยใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความเร็วในการกด 1 mm/s กดจนทะลุผ่านชิ้นกล้วยซึ่งมีความหนาประมาณ 3 mm พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยอบแห้งจากค่าความแข็ง (Hardness) ซึ่งสามารถหาได้จากค่าแรงสูงสุด และความกรอบ (Crispness) ซึ่งสามารถหาได้จากค่า Linear distance โดยสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กดลงไปให้ชิ้นกล้วยอบแห้งและระยะทางที่หัวกดกดทะลุผ่านชิ้นกล้วยอบแห้งหรือเวลา ดังแสดงในภาพ 15



ภาพ 15 กราฟการวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

5. การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน

นำชิ้นตัวอย่างกล้วยอบแห้งมาถ่ายภาพโครงสร้างภายในด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้ความต่างศักย์ขนาด 10 kV กำลังขยาย 500 μm โดยถ่ายภาพผิวและภาพภาคตัดขวางของชิ้นกล้วยอบแห้งที่ได้ในการอบแห้งในแต่ละสภาวะ

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ของการอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการของแต่ละปัจจัยซึ่งได้แก่ การพรีทรีเมนต์ ระดับอุณหภูมิ และระดับขั้นตอนการใช้อ่างไมโครเวฟ เพื่อศึกษาหาผลที่มีต่อคุณภาพของกล้วยอบแห้ง ได้แก่ ค่าสี ($L^*a^*b^*$) ค่าความแข็ง และค่าความกรอบ แล้วหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีของ Tukey (HSD) Comparison of means โดยใช้ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จำนวนซ้ำการทดลอง 3 ซ้ำ

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

การหาค่าลัมไโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

จากการสอบเทียบระดับค่าลัมไโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่าค่าลัมไโครเวฟที่ถูกปล่อยออกมาจริงในการอบแห้งในแต่ละระดับเปอร์เซ็นต์ไโครเวฟมีค่าดังแสดงในตาราง 4 โดยสามารถนำค่าลัมไโครเวฟที่ได้จากการสอบเทียบของตู้อบแห้งระดับห้องปฏิบัติการมาประยุกต์ใช้ในการเลือกระดับค่าลัมไโครเวฟที่เหมาะสมในการอบแห้งขยายผลในระดับอุตสาหกรรมต่อไป โดยนำค่าลัมไโครเวฟที่วัดได้จริงเทียบกับปริมาณน้ำหนักของมวลแห้งของกล้วย ซึ่งจะทำให้ทราบถึงค่าลัมไโครเวฟต่อน้ำหนักมวลแห้งของกล้วย แล้วทำการเปรียบเทียบน้ำหนักและค่าลัมไโครเวฟในการขยายผลในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรมต่อไป โดยมีรายละเอียดวิธีการคำนวณได้แสดงในภาคผนวก ง

ตาราง 4 ค่าลัมไโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

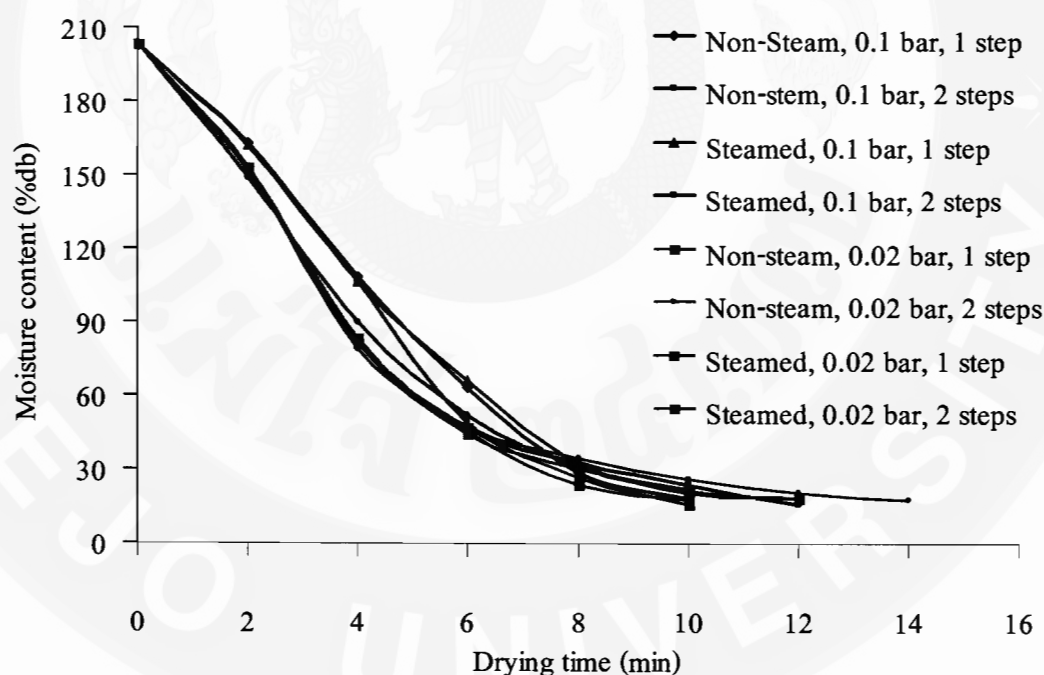
ระดับไมโครเวฟ (%)	ค่าลัมไโครเวฟ (W)	ค่าลัมไโครเวฟเทียบต่อมวลแห้งของกล้วย (W/g dry matter)
50	359.3	20.4
30	196	11.14

การวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้ง

การวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง

กราฟของการอบแห้งกล้วยอบแห้งทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ กล้วยสดและกล้วยนึ่งโดยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า เส้นกราฟการอบแห้ง

ของกล้วยทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟซึ่งสามารถทำให้เกิด ความร้อนขึ้นภายในชั้นกล้วยอย่างรวดเร็ว (Ozkan et al., 2007) ดังนั้นในช่วงแรกของการอบแห้งน้ำหนักของกล้วยจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ดังสังเกตได้จากภาพ 16 นอกจากนี้ ลักษณะของกราฟการอบแห้งกล้วยทั้ง 2 ชนิด มีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้น การพรีทรีทเมนต์กล้วยจึงไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างสำหรับการอบแห้ง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการอบแห้ง คือ ระดับกำลังไมโครเวฟและระดับสูญญากาศที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า การใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน โดยการแบ่งช่วงการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกและช่วงท้ายของการอบแห้ง โดยทำการลดระดับกำลังไมโครเวฟลงในช่วงท้ายของการอบแห้ง (หลังจากนาที่ที่ 6) ส่งผลให้ความชื้นที่ระเหยออกจากชั้นกล้วยลดลง ซึ่งสังเกตได้จาก ความชันของเส้นกราฟการอบแห้ง เส้นกราฟของการอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนมีความชันลดลงในช่วงท้าย เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของเส้นกราฟที่ใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียว ดังภาพ 16



ภาพ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟ-สูญญากาศ

หมายเหตุ Steamed คือ กล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่ง

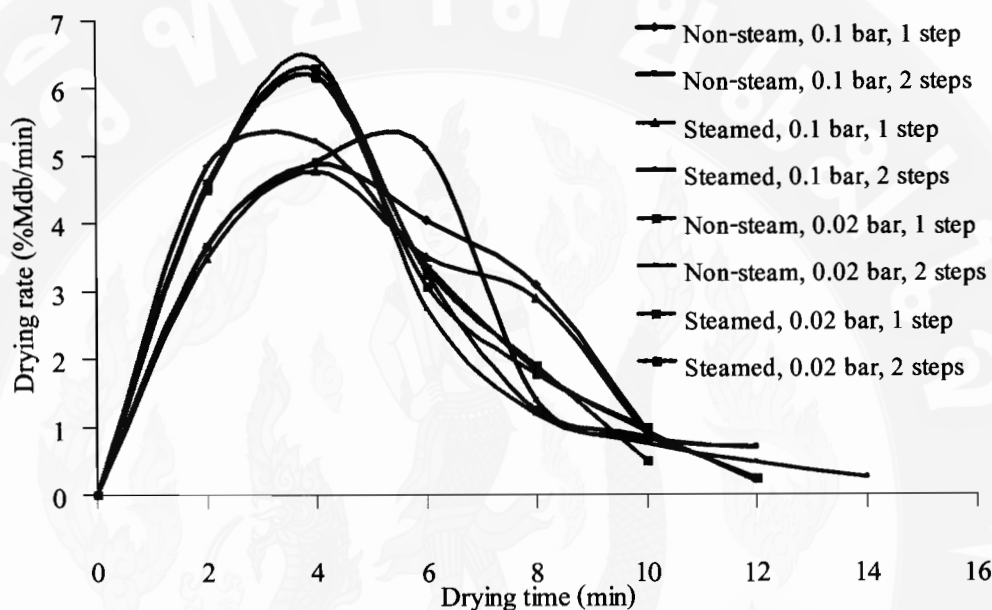
Non-steam คือ กล้วยสด

0.1 bar คือ สุญญากาศระดับต่ำ

0.2 bar คือ สุญญากาศระดับกลาง

1 step คือ การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียว

2 steps คือ การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน



ภาพ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งกล้วยด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ

หมายเหตุ Steamed คือ กล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่ง

Non-steam คือ กล้วยสด

0.1 bar คือ สุญญากาศระดับต่ำ

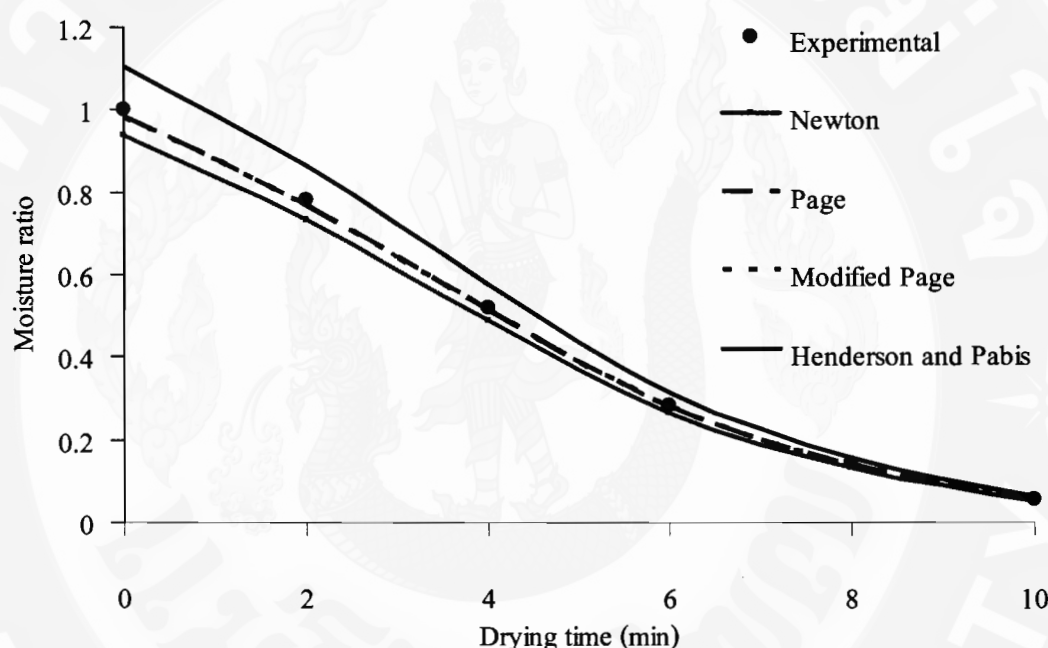
0.2 bar คือ สุญญากาศระดับกลาง

1 step คือ การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียว

2 steps คือ การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน

ระดับสุญญากาศเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อลักษณะของกราฟการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟการอบแห้งทั้ง 2 ระดับสุญญากาศ ได้แก่ สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ (0.1 bar) และสภาวะสุญญากาศระดับกลาง (0.02 bar) พบว่า การอบแห้งกล้วยภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลางมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับ

ต่ำ สังเกตได้จากภาพ 17 กราฟการอบแห้งภายใต้สุญญากาศระดับกลางมีความชันของเส้นกราฟมากกว่าเส้นกราฟการอบแห้งภายใต้สุญญากาศระดับต่ำในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากน้ำที่ระเหยออกจาก ชี้นกล้วยในช่วงแรกของการอบแห้ง คือ น้ำอิสระ (Free water) ซึ่งไม่จับรวมกันกับโมเลกุลของ สารอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถระเหยออกมาได้ง่าย จากข้อดีจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งสามารถช่วยดึงความชื้นที่อยู่ในชี้นวัสดุให้ระเหยออกมาได้ง่ายกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะบรรยากาศ (Opoku et al., 2007) ดังนั้น เมื่ออบแห้งโดยเพิ่มระดับสุญญากาศให้สูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากชี้นวัสดุได้ดีขึ้นด้วย ดังภาพ 17



ภาพ 18 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นของกล้วยที่ได้คำนวณจากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งกับผลการทดลองอบแห้งกล้วยสดที่สุญญากาศระดับต่ำ โดยใช้กำลังไมโครเวฟขึ้นตอนเดียว

เมื่อนำผลการทดลองการอบแห้งมาสร้างแบบจำลองการอบแห้งทั้ง 4 สมการ เพื่อใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แบบจำลองการอบแห้งของ Newton Page Modified Page และ Henderson and Pabis โดยได้ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ จากค่า Coefficient of determination (R^2) และ Standard error (SE) พบว่า แบบจำลองของ Page และ Modified Page มีค่า R^2 และ SE ที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า SE ต่ำที่สุด โดยสามารถเรียงลำดับสมการแบบจำลองจากที่มีความเชื่อมั่น

สูงที่สุดไปต่ำที่สุด คือ Page Modified Page Newton และ Henderson and Pabis ดังนั้นแบบจำลองของ Page และ Modified Page จึงเหมาะสมกับการอบแห้งในงานวิจัยนี้ เมื่อสังเกตจากภาพ 18 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรอบแห้งอัตราส่วนความชื้น พบว่า กราฟที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Page และ Modified Page มีความใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการอบแห้งจริงมากกว่ากราฟที่ได้จากแบบจำลองของ Newton และ Henderson and Pabis โดยรายละเอียดของค่าคงที่ของสมการแบบจำลองแสดงใน ตาราง 5

ตาราง 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งชนิดต่างๆ

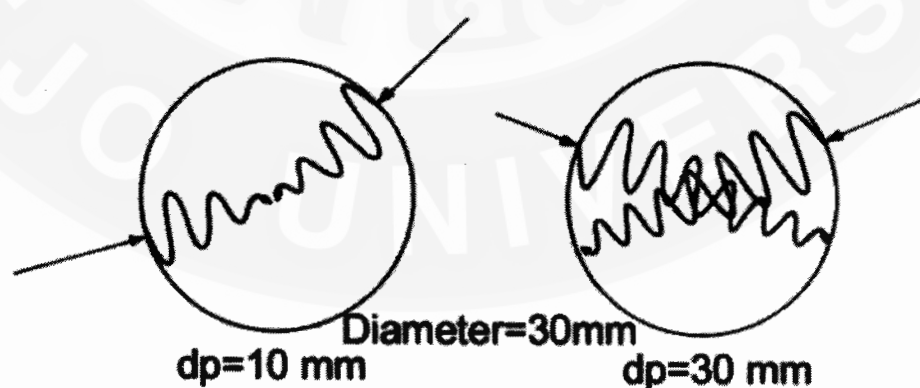
สภาวะการอบแห้ง	แบบจำลอง	k	n	a	R ²	SE
Non-steam, 0.1 bar, 1 step	Newton	0.2057			0.9881	0.0649
	Page	0.1107	1.3524		0.9988	0.0216
	Modified Page	0.1963	1.3524		0.9988	0.0217
	Henderson and Pabis	0.2877		1.3138	0.9636	0.1354
Non-steam, 0.1 bar, 2 steps	Newton	0.1940			0.9883	0.0599
	Page	0.1745	1.0559		0.9906	0.0542
	Modified Page	0.1892	1.0559		0.9903	0.0553
	Henderson and Pabis	0.2246		1.0985	0.9868	0.0669
Non-steam, 0.02 bar, 1 step	Newton	0.2257			0.9930	0.0483
	Page	0.1987	1.0733		0.9954	0.0396
	Modified Page	0.2217	1.0733		0.9954	0.0397
	Henderson and Pabis	0.2643		1.1198	0.9895	0.0634
Non-steam, 0.02 bar, 2 steps	Newton	0.2021			0.9914	0.0460
	Page	0.2695	0.8524		0.9918	0.0444
	Modified Page	0.2155	0.8524		0.9917	0.0445
	Henderson and Pabis	0.2000		0.9458	0.9884	0.0535
Steamed, 0.1 bar, 1 step	Newton	0.1826			0.9779	0.0526
	Page	0.1385	1.1571		0.9916	0.0339
	Modified Page	0.1808	1.1571		0.9916	0.0337
	Henderson and Pabis	0.2345		1.1778	0.9581	0.0923
Steamed, 0.1 bar, 2 steps	Newton	0.2080			0.9906	0.0360
	Page	0.2628	0.8746		0.9913	0.0339
	Modified Page	0.2159	0.8746		0.9912	0.0340
	Henderson and Pabis	0.2171		1.0126	0.9812	0.0482

ตาราง 5 (ต่อ)

สภาวะการอบแห้ง	แบบจำลอง	k	n	a	R ²	SE
Steamed, 0.02 bar, 1 step	Newton	0.2252			0.9805	0.0529
	Page	0.2167	1.0219		0.9826	0.0502
	Modified Page	0.2238	1.0219	1.1059	0.9826	0.0502
	Henderson and Pabis	0.2619			0.9720	0.0728
Steamed, 0.02 bar, 2 steps	Newton	0.2148			0.9820	0.0505
	Page	0.2803	0.8573		0.9835	0.0470
	Modified Page	0.2279	0.8573	0.9736	0.9835	0.0472
	Henderson and Pabis	0.2163			0.9711	0.0602

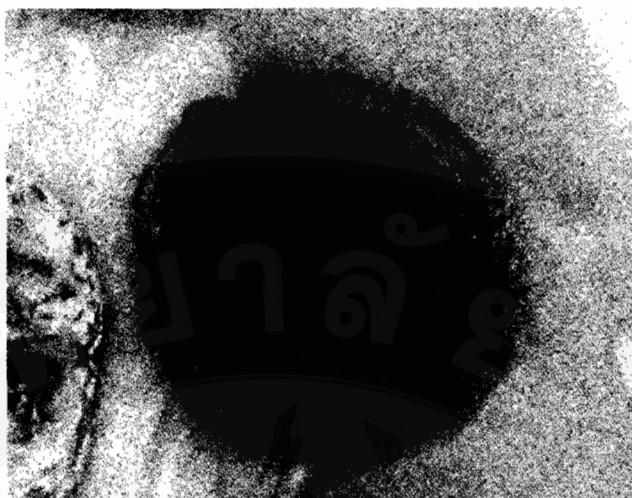
การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย

ความเสียหายของกล้วยอบแห้งที่เกิดจากการไหม้ เนื่องจากไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วในชั้นวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิในชั้นกล้วยอบแห้งจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการไหม้ในชั้นกล้วย นอกจากนี้ยังพบว่า บริเวณที่เกิดจากการไหม้ในชั้นกล้วยอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณแกนกลางของกล้วยอบแห้งเป็นตำแหน่งแรกและขยายไปสู่บริเวณขอบของชั้นกล้วย เนื่องจากคุณสมบัติด้านการรวมศูนย์ของคลื่นไมโครเวฟ (Focusing effect) ซึ่งจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีรูปทรงกลมและทรงกระบอก โดยส่งผลให้เกิดการรวมศูนย์ขึ้นบริเวณแกนกลางของวัสดุนั้น (Varith and Kiatsiriroat, 2004) ดังภาพ 19 จึงส่งผลทำให้บริเวณแกนของกล้วยอบแห้งเกิดความร้อนได้สูงกว่าบริเวณขอบของชั้นกล้วย ซึ่งสังเกตได้จากภาพ 20



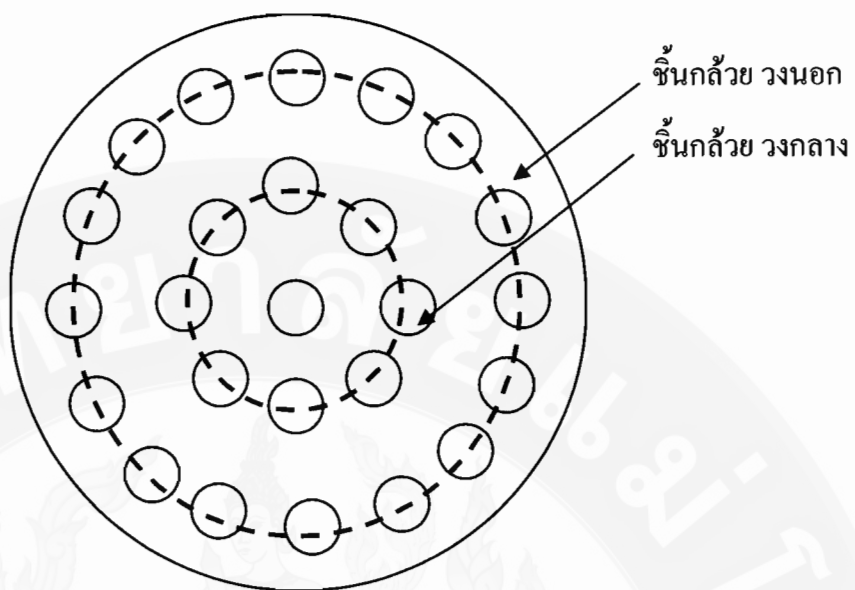
ภาพ 19 ลักษณะการรวมศูนย์ของคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Varith and Kiatsiriroat (2004)

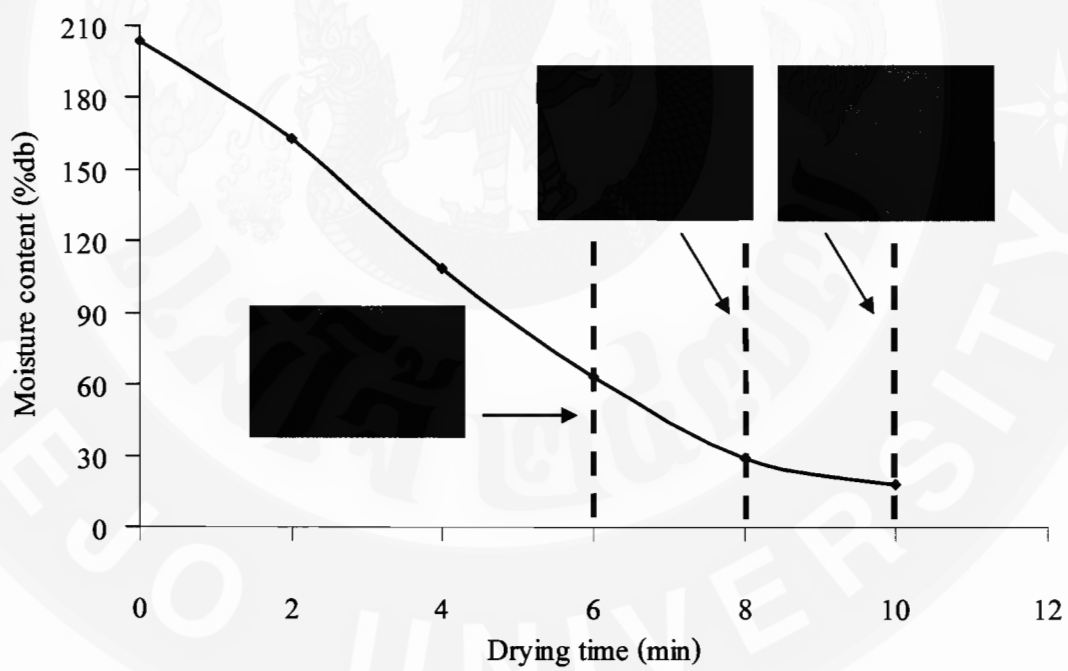


ภาพ 20 ลักษณะการไหม้ในซีกกล้วยอบแห้ง

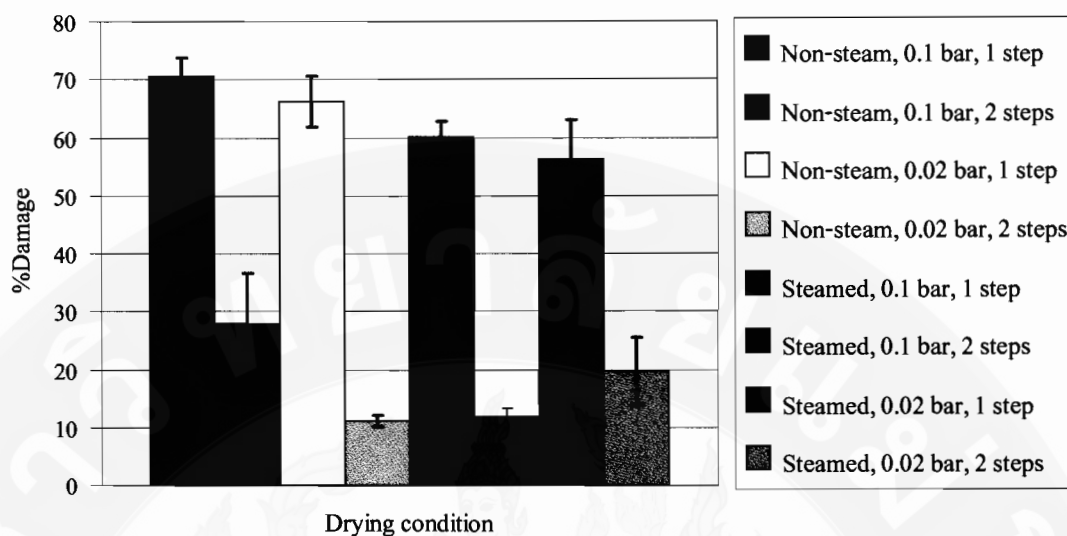
การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำและกลาง ด้วยระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนเดียว (20.4 W/g dry matter) ตลอดทั้งช่วงการอบแห้ง พบว่า แนวโน้มของการเกิดการไหม้ในซีกกล้วยมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังภาพ 21 ตำแหน่งซีกกล้วยมีผลต่อความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ โดยจากผลการทดลองอบแห้ง พบว่า ซีกกล้วยวงนอกสุดเป็นตำแหน่งที่สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลให้ซีกกล้วยในตำแหน่งวงนอกสุดเกิดความร้อนและเกิดการไหม้เป็นตำแหน่งแรก เมื่อความชื้นในซีกกล้วยลดลง ความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟจะลดลงเช่นกัน ดังนั้นซีกกล้วยวงกลางจึงเกิดความร้อนและเกิดการไหม้เป็นอันดับถัดมา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Drouzas et al. (1999) ซึ่งพบว่า ตำแหน่งการวางเจลผลไม้ในตู้อบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศมีผลต่อการดูดซับคลื่นไมโครเวฟและการเกิดความร้อน จากภาพ 22 แสดงถึงลักษณะการเกิดการไหม้ในซีกกล้วยอบแห้ง โดยพบว่า ลักษณะการไหม้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งดังนี้ วงนอก วงกลาง และวงใน ตามลำดับโดยซีกกล้วยวงนอกจะเริ่มเกิดการไหม้ในนาที่ที่ 8 ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้การปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟในช่วงท้ายของการอบแห้ง (การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน) หลังจากนาที่ที่ 6 เพื่อลดปริมาณความเสียหายที่เกิดกับกล้วยอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก (เริ่มต้น-นาที่ที่ 6) ใช้กำลังไมโครเวฟ 20.4 W/g dry matter และช่วงหลัง (นาที่ที่ 6-สิ้นสุดการอบแห้ง) ใช้กำลังไมโครเวฟ 11.1 W/g dry matter จากการทดลองอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน



ภาพ 21 ลักษณะตำแหน่งชั้นกล้วยอบแห้ง



ภาพ 22 กราฟช่วงเวลาและลักษณะการเกิดการไหม้ในชั้นกล้วยอบแห้ง



ภาพ 23 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายในแต่ละสภาวะการอบแห้ง

จากภาพ 23 พบว่า การประยุกต์ใช้การอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน ช่วยลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อกล้วยอบแห้งได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียวและ 2 ขั้นตอน พบว่า การอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนสามารถลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายได้ถึงร้อยละ 45.6 เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียว เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดความร้อนได้รวดเร็วในชั้นกล้วย ดังนั้นความชื้นในชั้นกล้วยจึงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นความร้อนบริเวณแกนกลางของชั้นกล้วยจะถูกถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนสู่บริเวณผิวของชั้นกล้วย การรักษาอุณหภูมิให้สัมพันธ์ต่อการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียวตลอดการอบแห้งส่งผลให้เกิดความร้อนสูงเกินไปในช่วงท้าย ดังนั้นการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟในช่วงท้ายของการอบแห้งหรือการอบแห้งด้วยระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนจึงช่วยรักษาอุณหภูมิในชั้นกล้วยไม่ให้สูงจนเกินไป ดังนั้นจึงสามารถลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในชั้นกล้วยอบแห้ง นอกจากนี้จากภาพ 23 ซึ่งเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของกล้วยอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่มีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายน้อยที่สุด ได้แก่ การอบแห้งกล้วยสดภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน และการอบแห้งกล้วยหนึ่งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน เป็น 2 สภาวะที่มีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายต่ำที่สุด แต่การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง จำเป็นต้องวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้งประกอบด้วย

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสี

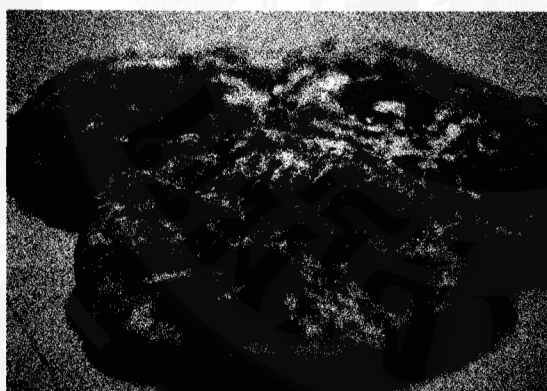
ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L^*) บนชิ้นกล้วยอบแห้ง ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์และระดับสุญญากาศที่ใช้การอบแห้ง อีกทั้งยังมีอิทธิพลของ 2 ปัจจัยร่วมซึ่งได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างการพรีทรีทเมนต์และการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไมโครเวฟ และปัจจัยร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย สังเกตได้จากตารางผนวก 1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง คือ การเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไมโครเวฟเพียงปัจจัยเดียว สำหรับปัจจัยร่วมไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดงได้ ดังจะสังเกตได้จากตารางผนวก 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์และการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไมโครเวฟ สำหรับปัจจัยร่วมที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเหลืองได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างการพรีทรีทเมนต์และระดับสุญญากาศที่ใช้ในการอบแห้งดังสังเกตในตารางผนวก 3

ตาราง 6 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติด้านสี

การพรี ทรีทเมนต์	ระดับ สุญญากาศ	ขั้นตอนการ ใช้กำลังไมโครเวฟ	ค่าสี		
			L^*	a^*	b^*
Non-steam	Low	1	64.1 ± 3.3^{bc}	5.1 ± 1.5^a	27.6 ± 1.6^a
		2	67.8 ± 0.5^{ab}	3.6 ± 0.7^a	23.8 ± 1.2^{ab}
	Med	1	64.1 ± 3.3^{bc}	5.1 ± 1.5^a	27.6 ± 1.6^a
		2	75.3 ± 0.9^a	2.8 ± 0.7^a	26.0 ± 1.8^a
Steamed	Low	1	51.3 ± 2.4^d	5.7 ± 0.5^a	25.3 ± 1.9^a
		2	55.9 ± 5.6^{cd}	3.7 ± 2.9^a	23.1 ± 1.8^{ab}
	Med	1	63.5 ± 7.6^{bc}	5.8 ± 1.4^a	24.2 ± 3.9^{ab}
		2	53.1 ± 1.4^{cd}	4.4 ± 0.2^a	18.9 ± 0.8^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ($P \geq 0.05$)

จากตาราง 6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง (L^*) ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์ โดยกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที มีค่าความสว่างน้อยกว่ากล้วยสดอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ พบว่าการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศระดับกลาง (Medium vacuum) มีอิทธิพลช่วยทำให้กล้วยอบแห้งมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลางสามารถดึงความชื้นออกจากกล้วยได้ดีกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง โดยการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลางมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ สำหรับค่าสีแดง (a^*) พบว่า ปัจจัยทั้งสามไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง จากการวิเคราะห์ค่าสีเหลือง (b^*) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสีเหลือง ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์และกำลังไมโครเวฟ โดยกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มีค่าสีเหลืองน้อยกว่ากล้วยอบแห้งที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ การเปลี่ยนแปลงกำลังไมโครเวฟยังมีอิทธิพลต่อค่าสีเหลือง โดยกล้วยอบแห้งที่ใช้กำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน 2 ขั้นตอนในช่วงการอบแห้งมีค่าสีเหลืองน้อยกว่ากล้วยอบแห้งที่ใช้กำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียวตลอดช่วงการอบแห้ง ดังภาพ 24



(ก)



(ข)

ภาพ 24 กล้วยอบแห้ง

หมายเหตุ (ก) กล้วยสดอบแห้ง

(ข) กล้วยนึ่งอบแห้ง

การวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โดยได้พิจารณาจากค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความกรอบ (Crispness) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ค่าความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อค่าความแข็ง โดย ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์ ระดับสุญญากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟ สำหรับปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างการพรีทรีทเมนต์และระดับกำลังไมโครเวฟ ดังตารางผนวก 4 และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อค่าความกรอบ พบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความกรอบของกล้วยอบแห้ง ได้แก่ การพรีทรีทเมนต์ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลที่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อค่าความกรอบจากปัจจัยร่วมซึ่ง ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างการพรีทรีทเมนต์ ระดับสุญญากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟ ดังตารางผนวก 5

จากตาราง 7 พบว่า การพรีทรีทเมนต์มีอิทธิพลต่อความแข็งของกล้วยอบแห้ง โดยกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งก่อนการอบแห้งมีค่าความแข็งน้อยกว่ากล้วยสดอบแห้ง ในทำนองเดียวกันระดับสุญญากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งเช่นกัน โดยกล้วยอบแห้งภายใต้สถานะสุญญากาศระดับกลางมีค่าความแข็งน้อยกว่ากล้วยอบแห้งภายใต้สถานะสุญญากาศระดับต่ำ นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยของกล้วยอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียวตลอดทั้งช่วงการอบแห้ง สำหรับค่าความกรอบ พบว่า การพรีทรีทเมนต์มีอิทธิพลให้มีความเปลี่ยนแปลงต่อค่าความกรอบ โดยการพรีทรีทเมนต์กล้วยก่อนนำไปอบแห้งมีแนวโน้มส่งผลให้ค่าความกรอบเพิ่มขึ้น และส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีลักษณะคล้ายกล้วยทอดกรอบ ซึ่งทำให้คุณภาพของกล้วยอบแห้งด้านเนื้อสัมผัสดีขึ้น

ตาราง 7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส

การพรีทรีท เมนต์	ระดับ สุญญากาศ	ขั้นตอนการ		
		ใช้กำลังไมโครเวฟ	ความแข็ง (N)	ความกรอบ
Non-steam	Low	1	40.3 ± 1.9^{abc}	117.9 ± 8.4^{bc}
		2	43.1 ± 5.8^{ab}	117.3 ± 0.8^c
	Med	1	38.8 ± 3.4^{abc}	126.8 ± 11.3^{abc}
		2	41.6 ± 1.6^{abc}	138.8 ± 2.8^{abc}

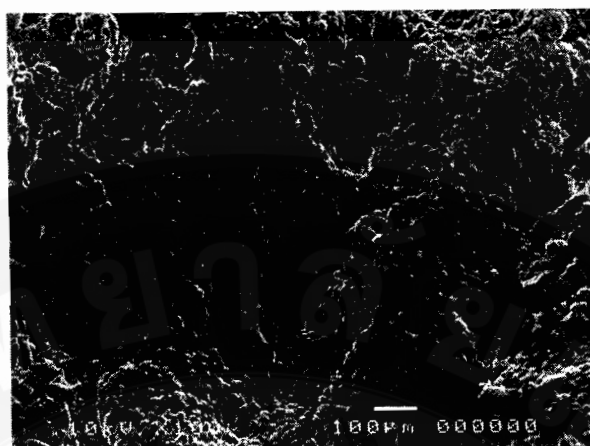
ตาราง 7 (ต่อ)

การพรีทรีท	ระดับ	ขั้นตอนการ		
เมนต์	สุญญากาศ	ใช้กำลังไมโครเวฟ	ความแข็ง (N)	ความกรอบ
Steamed	Low	1	32.6 ± 5.5^{bcd}	138.7 ± 22.7^{abc}
		2	43.9 ± 4.0^a	156.2 ± 17.1^a
	Med	1	26.3 ± 3.2^d	146.1 ± 8.5^{abc}
		2	30.8 ± 4.1^{cd}	155.4 ± 18.5^{ab}

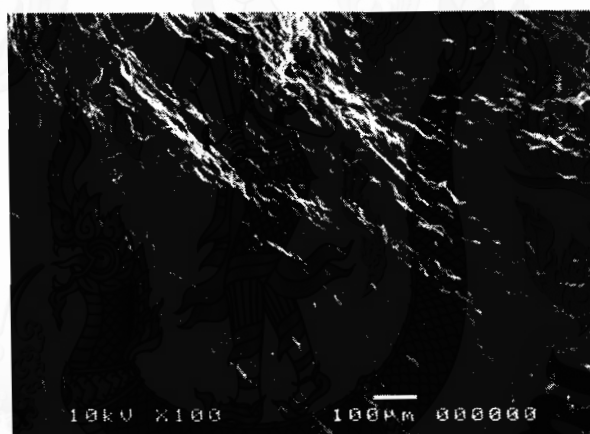
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ($P \geq 0.05$)

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน

ภาพ 25 แสดงภาพโครงสร้างผิวหน้าของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งภายใต้ระดับสุญญากาศระดับต่ำ (0.1 bar) โดยใช้กำลังไมโครเวฟระดับเดียวตลอดช่วงการอบแห้ง ($20.4 \text{ W/g dry matter}$) ซึ่งพบว่า ลักษณะโครงสร้างผิวหน้าของกล้วยอบแห้งมีความแตกต่างกันโดยกล้วยอบแห้งที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มีลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่ากล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ ลักษณะ โครงสร้างผิวหน้าที่ขรุขระของกล้วยสดอบแห้งแสดงให้เห็นถึงการเกาะตัวของเม็ดแป้งปกติในกล้วยที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังภาพ 25(ก) ซึ่งแตกต่างกับกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งที่มีลักษณะ โครงสร้างผิวหน้าเรียบและไม่สามารถสังเกตเห็นการเกาะตัวของเม็ดแป้งที่มีขนาดแตกต่างกัน เนื่องจากเม็ดแป้งรับความร้อนจากการนึ่งส่งผลให้เกิดการสลายพันธะและเกิดเจลาติไนเซชันในเนื้อกล้วย ดังภาพ 25(ข) ดังนั้น จึงพบว่า โครงสร้างผิวหน้ามีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน



(ก)



(ข)

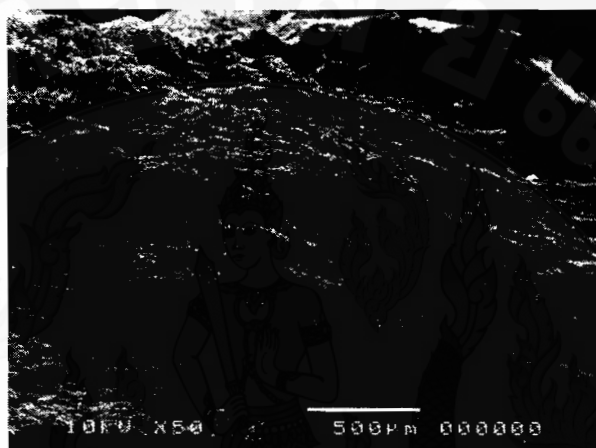
ภาพ 25 โครงสร้างผิวหน้ากล้วยอบแห้ง

หมายเหตุ (ก) กล้วยอบแห้งที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์

(ข) กล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่ง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้งแบบภาคตัดขวาง พบว่า ลักษณะโครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้ง 2 ชนิด ได้แก่ กล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งและกล้วยสด โดยลักษณะโครงสร้างภายในแนวตัดขวางของกล้วยสดอบแห้งมีลักษณะเป็นเส้นใยภายในเนื้อกล้วยที่ยึดตัวแน่นและมีปริมาณช่องว่างหรือโพรงอากาศเล็กน้อยบริเวณแกนกลางของเนื้อกล้วย ดังภาพ 26(ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งก่อนการอบแห้งมีลักษณะเนื้อกล้วยที่ยึดตัวกันแน่นละเอียด โดยไม่สามารถสังเกตเห็นเส้นใยภายในเนื้อกล้วยเช่นเดียวกับกล้วยสดอบแห้งและมีขนาดของโพรงอากาศบริเวณแกนกลาง

กล้วยขนาดใหญ่ ดังภาพ 26(ข) เนื่องจากการปริทริทเมนต์ด้วยการนึ่งทำให้เนื้อเยื่อของกล้วยยึดติดกันและเกิดการเจลาติไนเซชัน ซึ่งส่งผลให้น้ำที่มีอยู่ในกล้วยระเหยได้ยากขึ้น ดังนั้นน้ำในกล้วยจึงเกิดการสั่นตัวของโมเลกุลน้ำและเกิดการเดือดของน้ำภายในกล้วย ซึ่งทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ในชั้นกล้วยอบแห้ง



(ก)

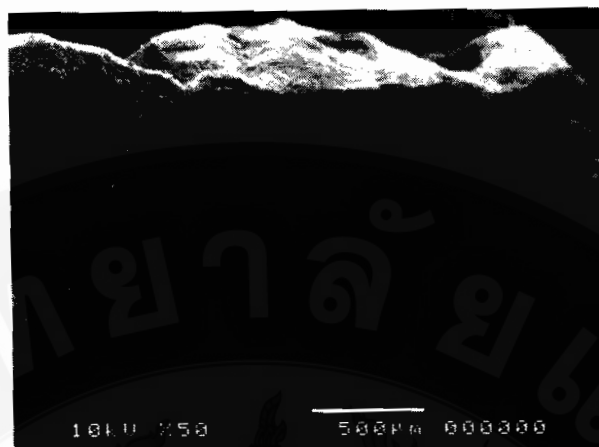


(ข)

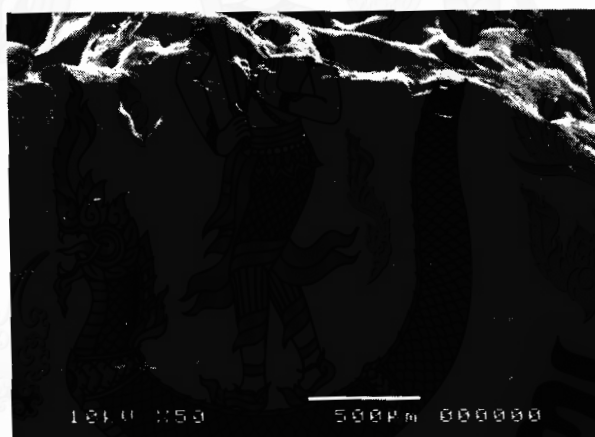
ภาพ 26 โครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้งในแนวตัดขวาง

หมายเหตุ (ก) กล้วยอบแห้งที่ไม่ผ่านการปริทริทเมนต์

(ข) กล้วยอบแห้งที่ผ่านการปริทริทเมนต์ด้วยการนึ่ง



(ก)

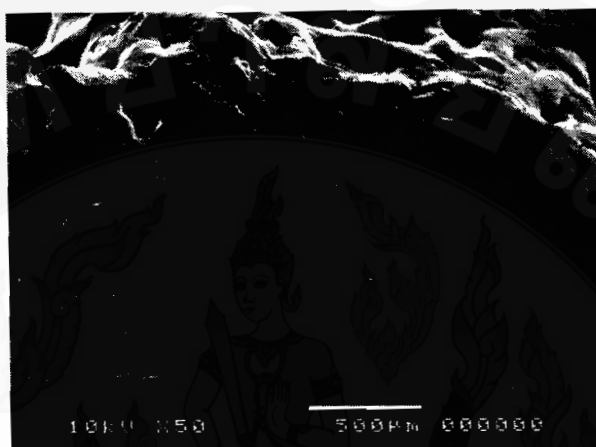


(ข)

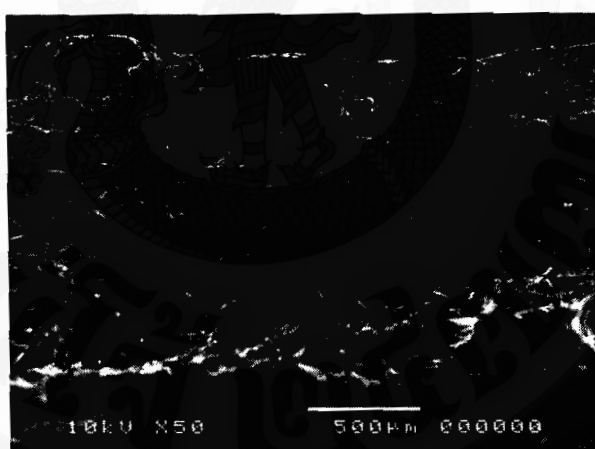
ภาพ 27 โครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ในแนวตัดขวาง โดยใช้กำลังไมโครเวฟในการอบแห้งเพียงขั้นตอนเดียว
 หมายเหตุ (ก) กล้วยอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ
 (ข) กล้วยอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง

ภาพ 27 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในแนวตัดขวางของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งและใช้ระดับกำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียวตลอดช่วงการอบแห้ง โดยอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่แตกต่างกัน พบว่า ขนาดและจำนวนของโพรงอากาศของกล้วยอบแห้งที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศทั้ง 2 ระดับมีความแตกต่างกัน โดยกล้วยอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำมีขนาดโพรงอากาศใหญ่กว่าขนาดโพรงอากาศของกล้วยที่อบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง เนื่องจากระดับสุญญากาศระดับกลางสามารถดึงน้ำ

นอกจากชั้นกล้วยไฉ่ยังง่ายกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ การเดือดของโมเลกุลน้ำในชั้นกล้วยไฉ่จึงเกิดขึ้นได้ยาก สภาพโพรงอากาศขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการเดือดของน้ำในชั้นกล้วยไฉ่จึงไม่เกิดขึ้นในการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง



(ก)



(ข)

ภาพ 28 โครงสร้างภายในแนวตัดขวางของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ โดยอบแห้งภายใต้สุญญากาศระดับกลาง

หมายเหตุ (ก) กล้วยอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟขั้นตอนเดียว

(ข) กล้วยอบแห้งโดยใช้ 2 ขั้นตอน

ภาพ 28 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในแนวตัดขวางของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่ง โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ได้แก่ การใช้กำลัง

ไมโครเวฟชั้นตอนเดียวและ 2 ชั้นตอน ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง พบว่า กล้วยอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟชั้นตอนเดียวมีขนาดโพรงอากาศขนาดใหญ่ แต่มีจำนวนของโพรงอากาศน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับภาพโครงสร้างภายในของกล้วยอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ชั้นตอน ซึ่งมีขนาดโพรงอากาศขนาดเล็ก และมีจำนวนโพรงอากาศมากกว่า เนื่องจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลางสามารถดึงน้ำออกจากกล้วยได้ดี น้ำในชั้นกล้วยสามารถเคลื่อนที่สู่ผิวได้ดีกว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับต่ำ การเดือดของน้ำซึ่งส่งผลทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่จึงเกิดขึ้นได้ยาก อีกทั้งการอบแห้งโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ชั้นตอนช่วยเพิ่มระยะเวลาในการระเหยน้ำออกจากกล้วยและทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นกล้วยอบแห้งไม่สูงมากนักในช่วงท้ายของการอบแห้ง ดังนั้นโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในชั้นกล้วยที่อบแห้งภายใต้สุญญากาศระดับกลาง โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ชั้นตอนจึงมีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก เนื้อกล้วยจึงมีความพรุนดังภาพ 28(ข)

เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเนื้อกล้วยอบแห้งในสภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้านเนื้อสัมผัส พบว่า การพรีทรีทเมนต์กล้วยด้วยการนึ่งก่อนการอบแห้งส่งผลให้เนื้อแข็งในเนื้อกล้วยเกิดการสลายพันธะ ทำให้เนื้อแข็งยึดติดกันแน่นขึ้น ดังนั้นในขณะอบแห้งกล้วย น้ำภายในเนื้อกล้วยจะระเหยออกจากเนื้อกล้วยได้ยาก เมื่อน้ำในชั้นกล้วยจะดูดซับคลื่นไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่น น้ำจะถูกดึงออกจากชั้นกล้วยเนื่องจากการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังนั้นจึงทำให้เนื้อกล้วยอบแห้งมีลักษณะพรุน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของกล้วยอบแห้งที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งให้มีความแข็งลดลงและมีความกรอบเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกล้วยสดอบแห้ง ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยด้านสีและเนื้อสัมผัส รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขยายผลในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การอบแห้งกล้วยที่ผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำภายใต้สุญญากาศระดับกลาง โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ชั้นตอน ซึ่งส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีแนวโน้มคุณภาพดีขึ้น

การอบแห้งขยายผลจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรม

การหาลำดับกำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรม

จากการสอบเทียบกำลังไมโครเวฟ พบว่า ค่าที่ได้จากการสอบเทียบกำลังไมโครเวฟของเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรมรายละเอียดดังตาราง 8

ตาราง 8 กำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรม

ระดับไมโครเวฟ	กำลังไมโครเวฟ	กำลังไมโครเวฟเทียบต่อมวลแห้งของกล้วย
(%)	(W)	(W/g dry matter)
100	539	20.4
70	441	16.7
50	332	12.6
30	198.3	7.5

การคำนวณกำลังไมโครเวฟขยายผล

จากการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า การอบแห้งกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที โดยอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศระดับกลาง (0.02 bar หรือ 2 kPa) และใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน (กำลังไมโครเวฟ 20.4 W/g dry matter ในช่วงแรกของการอบแห้งและ 12.6 W/g dry matter ในช่วงท้ายของการอบแห้ง) เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยซึ่งทำให้ได้กล้วยอบแห้งที่มีคุณภาพดีที่สุดและมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายน้อย เมื่อนำไปคำนวณหากำลังไมโครเวฟเทียบต่อมวลแห้งของกล้วยซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ง โดยได้เพิ่มปริมาณน้ำหนักของกล้วยก่อนการอบแห้งเป็น 80 g พบว่า ระดับกำลังไมโครเวฟเทียบเท่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้เลือกจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ คือ ระดับไมโครเวฟ 100% ในช่วงแรกของการอบแห้งและระดับไมโครเวฟ 50% ในช่วงท้ายของการอบแห้ง

ผลการอบแห้งขยายผลระดับอุตสาหกรรม

จากการทดลองอบแห้ง พบว่า เมื่อนำกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์น้ำหนัก 80 g ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 203 (มาตรฐานแห้ง) อบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรม โดยอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศระดับกลาง โดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอนเช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 20.4 W/g dry matter ในช่วงแรกของการอบแห้งเป็นเวลา 22 นาที และกำลังไมโครเวฟ 12.6 W/g dry matter ในช่วงท้ายเป็นเวลา 22 นาที สามารถทำให้ความชื้นของกล้วยอบแห้งมีความชื้นประมาณร้อยละ 18 (มาตรฐานแห้ง)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของกล้วยอบแห้งจากการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

1. คุณภาพด้านสี

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสีกล้วยอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมในหน่วยสี $L^*a^*b^*$ หรือ ค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลืองตามลำดับ ในระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า กล้วยอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งทั้ง 2 ระดับมีค่าความสว่างอยู่ในระดับเดียวกันหรือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยความสว่างของกล้วยอบแห้งระดับอุตสาหกรรมและระดับห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 50.68 ± 1.55 และ 53.11 ± 1.39 ดังตารางผนวก 6 สำหรับค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) พบว่า กล้วยที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรมมีลักษณะสีแดงและเหลืองมากกว่ากล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับปฏิบัติการ ดังตารางผนวก 7 และ 8

2. คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

จากการวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โดยศึกษาค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความกรอบ (Crispness) พบว่า กล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศทั้งสองระดับไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) กล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการมีความแข็งเฉลี่ย 42.06 และ 32.39 N ตามลำดับ และมีค่าความกรอบเฉลี่ย 159.13 และ 155.4 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงในตารางผนวก 9 และ 10

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างด้านคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัส พบว่าการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ ทำให้ได้กล้วยอบแห้งที่มีคุณภาพอยู่ในระดับเดียวกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ในด้านพลังงานและอัตราการอบแห้ง พบว่า มีความแตกต่างกัน โดยการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากขนาดของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม มีขนาดใหญ่กว่าและมีลักษณะรูปร่างแตกต่างจากเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้งแตกต่างกัน ดังนั้นการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ แล้วจึงนำสภาวะที่ได้นั้นไปศึกษาหาระยะเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งขยายผลในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

จากผลการวิจัย พบว่า สมการแบบจำลองของ Page และ Modified Page มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งกล้วยน้ำว้าหั่นแว่นหนา 3 mm ด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับปฏิบัติการ โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ ระดับสุญญากาศและระดับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับการพรีทรีทเมนต์ไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ทั้ง 3 ปัจจัยซึ่งได้แก่ การพรีทรีทเมนต์ ระดับสุญญากาศ และระดับกำลังไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของกล้วยอบแห้ง แต่ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าสีแดง นอกจากนี้ทั้ง 3 ปัจจัยยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสในชั้นกล้วยอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การอบแห้งกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการนึ่งภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับกลาง โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 2 ขั้นตอน (20.4 และ 11.1 W/g dry matter) ซึ่งส่งผลให้กล้วยอบแห้งมีคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสดีที่สุด

สรุปผลการทดลองอบแห้งขยายผล

จากการอบแห้งขยายผลในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมซึ่งได้จากการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า คุณภาพของกล้วยอบแห้งด้านสีและเนื้อสัมผัสอยู่ในระดับเดียวกัน แต่การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับอุตสาหกรรมใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับห้องปฏิบัติการ

บรรณานุกรม

- จาดุพงศ์ วาฤทธิ์, บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร, โมไนย ไกรฤกษ์, ชนันท์ นิยมราษฎร์, สุวรรณ จันทรอินทร์, พงษ์เทพ เนตรสว่าง และชนิสรา หนูช่วย. 2551. **เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศแนวตั้งเพื่อการอบแห้งผลผลิตเกษตร**. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 61 น.
- จาดุพงศ์ วาฤทธิ์, รชฏ เชื้อวิโรจน์, ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, จักรพงษ์ พิมพ์พิมล, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และไพรัช คิชฌคุณารักษ์กุล. 2548. **การพัฒนาระบบอบแห้งลำไยด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน**. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 50 น.
- ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ. 2545. **พืชผักผลไม้ไทยมีคุณค่าเป็นทั้งอาหารและยา**. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://natres.psu.ac.th/radio/radio_article/radio45-46/45-460009.htm (22 พฤษภาคม 2552).
- นภาพร พลโย, สมเกียรติ ปรัชญาวารการ, วรุณี เตีย และสมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2549. ผลของการพรีทรีตเมนต์ที่มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยหอม. น. 447-455. ใน **การประชุมวิชาการ สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 7 ประจำปี 2549**. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- เบญจมาศ ศิลาชัย. 2545. **กล้วย**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 156 น.
- ฤทธิไกร งามชุม. 2547. **การอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล**. ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 98 น.
- ต้นทม จ่อนจวบทรง. 2535. กล้วยอบเพื่อชีวิต. **เทคโนโลยีที่เหมาะสม** 10(3): 44-51.
- วิไล รังสาดทอง. 2543. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 401 น.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางชนิด**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 378 น.

- สินธนา ถีนานุกรณ์. 2546. **การแปรรูปอาหาร 2**. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 158 น.
- สุนทร โม่งปราณีต. 2549. **หลักการบวนการทางวิศวกรรมเกษตร**. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 198 น.
- Baysal, T., F. Icier, S. Ersus and H. Yildiz. 2003. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. **European Food and Research Technology** 218: 68-73.
- Buffler, C. R. 1993. **Microwave cooking and processing**. New York: Avi book. 169 p.
- Barbosa-Cánovas, G. V. and H. Vega-Mercado. 1996. **Dehydration of Food**. New York: Chapman & Hall. 330p.
- Bondaruk, J., M. Markowski and W. Blaszcak, 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. **Journal of Food Engineering** 81 : 164-175.
- Cengel, A. Y. and B. A. Michael. 2002. **Thermodynamics**. 4th. New York: Mcgraw-hill. 930p.
- Clary, C. D. and G. A. S. Ostrom. Use of Microwave Vacuum for Dehydration of Thompson Seedless Grapes. **US. Patent. No. 950405**. 15 april 1995.
- Commonweath Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). 1972. **Banana ripening guide**. Melbourne: Division of Food Reseach Circular 8. 280 p.
- Dadah, G., D.K. Apar and B. öbek. 2007. Microwave drying kinetics of Okra. **Drying Technology** 25: 917–924.
- Drouzas, A. E. and H. Schubert. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering** 28: 203-209.
- Drouzas, A. E., E. Tsami and G. D. Saravacos. 1999. Microwave vacuum drying of model fruit gels. **Journal of Food Engineering** 39: 117-122.
- Ferris, B. S. R., R. Ortiz and D. Vuylsteke. 1999. Fruit quality evaluation of plantains, plantain hybrids, and cookingbananas. **Posthavest Biology and Technology** 15: 73-81.
- Gunasekaran, S. 1999. Pulsed microwave – vacuum drying of food materials. **Drying Technology**. 17(3): 395–412.
- Hu, Q., M. Zhang, S. Mujumdar, G.Xiao and J.Sun. 2005. Drying of edamames by air and vacuum microwave combination. **Journal of Food Engineering**. 77: 977-982.

- Kardum, J.P., A. Sander and D. Skansi. 2001. Comparison of convective, vacuum, and microwave drying chlorpropamide. **Drying Technology** 19(1): 167-183.
- Lee, H. J. and H. J. Kim. 2009. Vacuum drying kinetics of Asias white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. **Food science and technology** 42 : 180-186.
- Lin, T.M., T.D. Durance and C.H. Scaman. 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. **Food Research International** 31: 111-117.
- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering** 44: 71-78
- _____. 2001. Drying shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering** 48(2): 177-182.
- Metaxas, A.C. and R.J. Meredith, 1983, **Industrial Microwave Heating**, London: Peter Peregrinus Ltd. 573 p.
- Mongpraneet, S. 2003. **Drying characteristic of a far infrared heater combined vacuum operation**. Doctoral. dissertation. Ehime University, Matsuyama, Japan. 106 p.
- Mousa, N. and M. Farid. 2007. Microwave vacuum drying of banana slices. **Drying technology** 20:10, 2055-2066.
- Opoku, A. L., G. Tabil, V. Meda and S. Panigrahi. 2007. Microwave and microwave-vacuum drying kinetics of field peas. p. 1-16. In **2007 ASABE Annual International Meeting**. Sponsored by ASABE Minneapolis Convention Center Minneapolis, Minnesota. 17-20 June 2007. Minnesota: ASABE.
- Ozkan, I. A., B. Akbudak and N. Akbudak. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. **Journal of Food Engineering** 78: 577-583.
- Pinedo, A., A. and F.E.X. Murr. 2005. Kinetics of Vacuum Drying of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Modeling with Shrinkage. **Journal of Food Engineering** 76: 562-567.
- Regier, M. and H. Schubert. 2005. **The microwave processing of foods**. New York: CRC Press. 345p.
- Rodriguez, R., J. I. Lombrana, M. Kamel and C. de Elvira. 2005. Kinetic and quality study of mushroom drying under microwave and vacuum. **Drying Technology** 23: 2197-2213.

- Sanga, E., A.S. Mujumdar and G.S.V. Raghavan. (eds.). 2000. Microwave Drying: Principles and Applications. p. 230-278. **In Drying Technology in Agriculture and Food Sciences**. India: Science Publishers.
- Setiady, D., C. Clary, F. Younce and B.A. Rasco. 2007. Optimizing drying condition for microwave-vacuum (MIVAC) drying of Russet potatoes (*Solanum tuberosum*). **Drying Technology** 25: 1483-1489
- Sharma, G.P. and S. Prasad. 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. **Energy** 31(12): 1921-1926.
- Singh, R.P. and D.R. Heldman. 1993. **Introduction to Food Engineering**. 2nd ed. , New York: Academic press, Inc. 560 p.
- Soysal, Y. 2004. Microwave drying characteristics of parsley. **Biosystems Engineering** 89(2):167-173.
- Sunjka, P. S., T. J. Rennie, C. Beaudry and G. S. V. Raghavan. 2004. Microwave-convective and microwave-vacuum drying of cranberries: A comparative study. **Drying Technology** 22(5): 1217-1231.
- Tulasidas, T.N., G.S.V. Raghavan and A.S. Mujumdar. 1995. Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz – II: Quality and energy aspects. **Drying Technology** 13(8&9): 1973-1992.
- Varith, J. and T. Kiatsiriroat. 2004. Effects of microwave power, treatment time and sample orientation on heat distribution in mango. p. 1-10. **In 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting**. Sponsored by ASAE/CSAE Fairmont Chateau Laurier, The Westin, Government Centre Ottawa, Ontario, Canada. 1-4 August 2004. Ottawa: ASABE.
- Varith, J., P. Dijkanarukkul, A. Achariyaviriya and S. Achariyaviriya., 2007. Combined microwave-hot air drying of peeled longan, **Journal of Food Engineering** 81 : 459–468.
- Venkatesh, M.S. and G.S.V. Raghavan. 2004. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. **Biosystems Engineering** 88: 1–18.
- Wadsworth, J. I., L. Velupillai and L.R. Verma. 1990. Microwave-vacuum drying of parboiled rice. **Transactions in Agriculture** 33(1): 199–210.

- Yongsawatdigul, J. and S. Gunasekaran. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. **Journal of Food Processing and Preservation** 20: 145-156.
- Zhangjing, C. and F. M. Lamb. 2007. Analysis of the vacuum drying rate for red Oak in a hot water vacuum drying system. **Drying Technology** 25: 497-500.



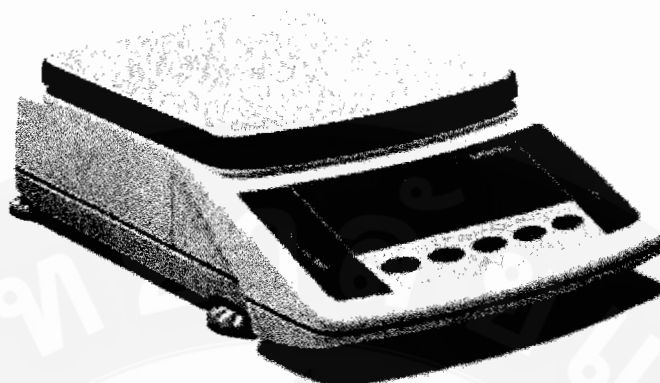


ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



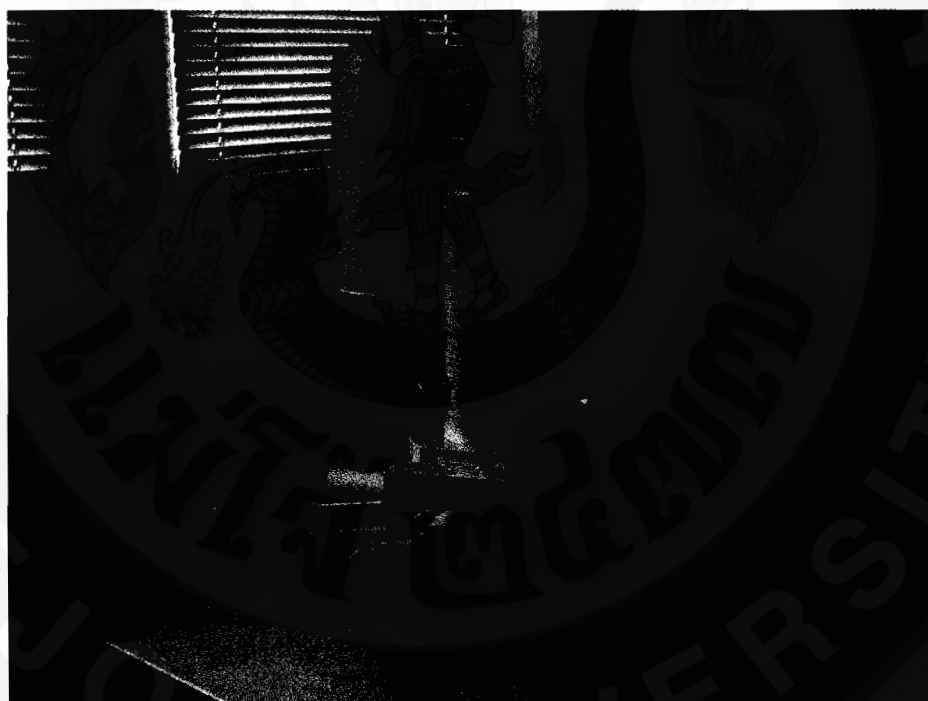
ภาพผนวก 1 เครื่องชั่งดิจิตอล



ภาพผนวก 2 เครื่องวัดสีอาหาร



ภาพผนวก 3 เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของอาหาร



ภาพผนวก 4 เครื่องถ่ายภาพโครงสร้างภายใน



ภาคผนวก ข

ตารางความแปรปรวน

ตารางผนวก 1 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสว่าง (L*)

Source	df	Sum of squares	Means square	F	P
Pre-treatment (A)	1	849.065	849.065	55.52**	0.0000
Vacuum level (B)	1	107.062	107.06	7*	0.0176
MW Power step (C)	1	30.0832	30.0832	1.97	0.1799
A*C	1	161.565	161.565	10.56**	0.0050
A*B	1	1.495	1.495	0.1	0.7586
B*C	1	21.4893	21.4893	1.41	0.2532
A*B*C	1	189.338	189.338	12.38**	0.0028
Residual	16	244.693	15.2933		
Total	23	1604.79			

หมายเหตุ *,** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ

ตารางผนวก 2 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีแดง (a*)

Source	df	Sum of squares	Means square	F	P
Pre-treatment (A)	1	3.2856	3.2856	1.55	0.2307
Vacuum level (B)	1	0.00107	0.00107	0	0.9824
MW Power step (C)	1	19.9108	19.9108	9.41**	0.0074
A*C	1	0.05227	0.05227	0.02	0.8771
A*B	1	0.96802	0.96802	0.46	0.5085
B*C	1	0.00107	0.00107	0	0.9824
A*B*C	1	0.84375	0.84375	0.4	0.5367
Residual	16	33.856	2.116		
Total	23	58.9186			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางผนวก 3 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีเหลือง (b*)

Source	df	Sum of squares	Means square	F	P
Treatment (A)	1	72.2801	72.2801	17.1**	0.0008
Vacuum level (B)	1	3.6426	3.6426	0.86	0.3670
MW Power step (C)	1	63.4725	63.4725	15.02**	0.0013
A*C	1	1.5965	1.5965	0.38	0.5475
A*B	1	21.4137	21.4137	5.07**	0.0388
B*C	1	0.2926	0.2926	0.07	0.7958
A*B*C	1	10.6267	10.6267	2.51	0.1324
Residual	16	67.6221	4.22638		
Total	23	240.947			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางผนวก 4 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง

Source	df	Sum of squares	Means square	F	P
Treatment (A)	1	341.789	341.789	21.79**	0.0003
Vacuum level (B)	1	186.986	186.986	11.92**	0.0033
MW power step (C)	1	170.4	170.4	10.86**	0.0046
A*C	1	100.655	100.655	6.42*	0.0222
A*B	1	39.501	39.501	2.52	0.1321
B*C	1	17.7332	17.7332	1.13	0.3035
A*B*C	1	18.2178	18.2178	1.16	0.2972
Residual	16	251.016	15.6885		
Total	23	1126.3			

หมายเหตุ *,** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ

ตารางผนวก 5 ความแปรปรวนทางสถิติของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความกรอบ

Source	df	Sum of squares	Means square	F	P
Treatment (A)	1	3433.24	3433.24	19.19**	0.0005
Vacuum level (B)	1	514.763	514.763	2.88	0.1092
MW power step (C)	1	544.64	544.64	3.04	0.1002
A*C	1	213.189	213.189	1.19	0.2911
A*B	1	88.8195	88.8195	0.5	0.4911
B*C	1	7.42594	7.42594	0.04	0.8411
A*B*C	1	161.461	161.461	0.9	0.3562
Residual	16	2861.88	178.867		
Total	23	7825.41			

หมายเหตุ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางผนวก 6 ตารางเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

Source	Mean	StDev	P-value
Industrial	50.68	1.55	0.116
Lab	53.11	1.39	

ตารางผนวก 7 ตารางเปรียบเทียบค่าสีแดง (a*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

Source	Mean	StDev	P-value
Industrial	7.79	1.06	0.007
Lab	4.48	0.29	

ตารางผนวก 8 ตารางเปรียบเทียบค่าสีเหลือง (b*) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

Source	Mean	StDev	P-value
Industrial	23.19	0.96	0.004
Lab	18.86	0.78	

ตารางผนวก 9 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็ง (Hardness) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

Source	Mean	StDev	P-value
Industrial	42.06	0.36	0.74
Lab	32.39	0.87	

ตารางผนวก 10 ตารางเปรียบเทียบค่าความกรอบ (Crispness) เฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 ระดับ

Source	Mean	StDev	P-value
Industrial	159.13	12.83	0.789
Lab	155.4	18.52	



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมการจลนศาสตร์การอบแห้ง

การแก้สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งและวิธีการฟิตสมการ

สมการแบบจำลองการอบแห้งของ Newton

$$\text{รูปแบบสมการ คือ } MR = \exp(-kt) \quad (\text{ค1})$$

จากสมการ (ค1) ทำการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\ln MR = -kt \quad (\text{ค2})$$

กำหนดให้

$$y_i = -\ln(MR)$$

$$x_i = t$$

ดังนั้นจะได้

$$y_i = -kx_i \quad (\text{ค3})$$

จากทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ว่า $\sum_{i=1}^n (-y_i - kx_i)^2$ มีค่า

$$\text{น้อยที่สุด นั่นคือ } \sum_{i=1}^n (-y_i - kx_i)^2 = 0 \quad (\text{ค4})$$

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n (-y_i - kx_i)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (-y_i - kx_i)(-x_i) = 0$$

$$-\sum_{i=1}^n y_i x_i + k \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$$

$$k \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i$$

$$k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i x_i}{x_i^2} \right)$$

สมการแบบจำลองการอบแห้งของ Page

$$\text{รูปแบบสมการ คือ } MR = \exp(-kt^n) \quad (\text{ค5})$$

จากสมการ (ค5) ทำการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$-\ln(MR) = kt^n$$

$$\ln\{-\ln(MR)\} = \ln k + n \ln t \quad (ค6)$$

กำหนดให้

$$y_i = \ln\{-\ln(MR)\}$$

$$B = \ln k$$

$$A = n$$

$$x_i = \ln t$$

ดังนั้นจะได้

$$y_i = Ax_i + B \quad (ค7)$$

จากทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ว่า $\sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2$ มี

ค่าน้อยที่สุด นั่นคือ
$$\sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2 = 0 \quad (ค8)$$

ดิฟสมการ ค8 ด้วย $\frac{\partial}{\partial A}$

$$\frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)(x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_i - y_i x_i) = 0 \quad (ค9)$$

ดิฟสมการ ค8 ด้วย $\frac{\partial}{\partial B}$

$$\frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)(1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i) = 0 \quad (ค10)$$

จากสมการ ค9 และ ค10 แทนค่าเพื่อหาค่าคงที่ A และ B เพื่อนำไปแทนค่าหาค่าคงที่ของการอบแห้ง

สมการแบบจำลองการอบแห้ง Modified Page

$$\text{รูปแบบสมการ คือ } MR = \exp[-(kt)^n] \quad (ค11)$$

จากสมการ (ค11) ทำการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$-\ln(MR) = (kt)^n$$

$$\ln\{-\ln(MR)\} = n(\ln k + \ln t) \quad (ค12)$$

กำหนดให้

$$y_i = \ln\{-\ln(MR)\}$$

$$A = n$$

$$B = n \ln k$$

$$x_i = \ln t$$

ดังนั้นจะได้

$$y_i = Ax_i + B \quad (\text{ค13})$$

จากทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ว่า $\sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2$ มี

ค่าน้อยที่สุด นั่นคือ
$$\sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2 = 0 \quad (\text{ค14})$$

ดิฟสมการ ค14 ด้วย $\frac{\partial}{\partial A}$

$$\frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)(-x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (-y_i x_i) + A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (\text{ค15})$$

ดิฟสมการ ค14 ด้วย $\frac{\partial}{\partial B}$

$$\frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)(1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i - A \sum_{i=1}^n x_i - B = 0 \quad (\text{ค16})$$

จากสมการ ค15 และ ค16 สามารถแทนค่าและแก้สมการหาค่าคงที่ A และ B เพื่อนำไปหาค่าคงที่ของการอบแห้งต่อไปได้

สมการแบบจำลองการอบแห้ง Henderson และ Pabis

$$\text{รูปแบบสมการ คือ } MR = a \exp(-kt) \quad (\text{ค17})$$

จากสมการ (ค17) ทำการเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\ln(MR) = -kt + \ln a \quad (\text{ค18})$$

กำหนดให้

$$y_i = \ln(MR)$$

$$x_i = t$$

$$A = \ln a$$

ดังนั้นจะได้

$$y_i = -kx_i + A \quad (\text{ค19})$$

จากทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ว่า $\sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)^2$ มี

ค่าน้อยที่สุด นั่นคือ
$$\sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)^2 = 0 \quad (\text{ค20})$$

ดิฟสมการ ค20 ด้วย $\frac{\partial}{\partial k}$
$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)(x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i x_i + kx_i^2 - A x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i + k \sum_{i=1}^n x_i^2 - A \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (\text{ค21})$$

ดิฟสมการ ค20 ด้วย $\frac{\partial}{\partial A}$
$$\frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)^2 = 0$$

$$2 \sum_{i=1}^n (y_i + kx_i - A)(-1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (-y_i - kx_i + A) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (-y_i) - k \sum_{i=1}^n x_i + A \sum_{i=1}^n 1 = 0 \quad (\text{ค22})$$

จากสมการ ค21 และ ค22 สามารถแทนค่า y_i และ x_i เพื่อหาค่าคงที่ k และ A แล้วนำไปแก้สมการ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าคงที่ของการอบแห้ง



วิธีการคำนวณ

การคำนวณกำลังไมโครเวฟเทียบเท่าของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ

$$\text{จากสมการ } P_w = \frac{4.187 \times V \times (T_2 - T_1)}{t}$$

$$\text{แทนค่า } V = 1000 \text{ cm}^3$$

$$T_1 = 19.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 25.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t = 62 \text{ s}$$

$$\text{จะได้ } P_w = \frac{4.187 \times 1000 \times (25.1 - 19.9)}{62}$$

$$P_w = 351.16 \text{ W}$$

การคำนวณปริมาณมวลแห้งของกล้วยอบแห้ง

ความชื้นเริ่มต้นของกล้วย 203.3 %db

มวลกล้วยเริ่มต้น 50 g

เมื่อ W = น้ำหนักเริ่มต้นของกล้วย

d = มวลแห้งของกล้วย

$$\text{ดังนั้นจะได้ } d = \frac{W}{[(Mdb/100) + 1]}$$

$$d = \frac{53.3}{[(203.3/100) + 1]}$$

$$d = 17.58 \text{ g}$$

การคำนวณกำลังไมโครเวฟเทียบเท่าของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ
เทียบกับปริมาณมวลแห้ง

กำลังไมโครเวฟเฉลี่ยที่ 50% = 359.3 W/g dry matter

น้ำหนักมวลแห้งเฉลี่ยของกล้วย = 17.58 g

$$\text{ดังนั้น กำลังไมโครเวฟเทียบต่อมวลแห้ง} = \frac{359.3 \text{ W}}{17.58 \text{ g}} = 20.4 \text{ W/g dry matter}$$

กำลังไมโครเวฟที่ 30% = 196 W

น้ำหนักมวลแห้งเฉลี่ยของกล้วย = 17.58 g

ดังนั้น กำลังไมโครเวฟเทียบต่อมวลแห้ง = $\frac{196 \text{ W}}{17.58 \text{ g}} = 11.1 \text{ W/g dry matter}$

การคำนวณหามวลแห้งเพื่อใช้อบแห้งขยายผล

ขั้นตอนที่ 1 การหามวลแห้งในการอบแห้งขยายผล

เลือกใช้กำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมที่ 100% = 539 W

กำลังไมโครเวฟต่อมวลแห้งของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับ

ห้องปฏิบัติการ = 20.4 W/g dry matter

แทนค่าเพื่อหามวลแห้งในการอบแห้งขยายผล

$$20.4 = \frac{539}{g}$$

ดังนั้น $g = 26.4 \text{ g}$

จะได้ว่า มวลแห้งที่ใช้อบแห้งขยายผล = 26.4 g หรือ 1.5 เท่าของมวลแห้งที่ใช้
อบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนที่ 2 การหาคำนวณหา กำลังไมโครเวฟในช่วงอบแห้งที่ 2

กำลังไมโครเวฟต่อมวลแห้งของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศระดับ

ห้องปฏิบัติการ = 11.1 W/g dry matter

มวลแห้งที่ใช้ในการอบแห้งขยายผล = 26.4 g

แทนค่าเพื่อหามวลแห้งในการอบแห้งขยายผล

$$11.1 = \frac{W}{26.4}$$

จะได้ว่า กำลังไมโครเวฟที่ใช้ = 293.4 W

ดังนั้นจึงเลือกใช้ระดับกำลังไมโครเวฟที่ 50% ซึ่งมีกำลังไมโครเวฟ 332 W

ขั้นตอนที่ 3 การหาคำนวณหาปริมาณกล้วยในการอบแห้งขยายผล

จากข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า

ที่ความชื้น 203.3 %db

น้ำหนักเริ่มต้นของกล้วยที่ใช้ในการอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ 53 g มวลแห้งของกล้วย 17.58 g

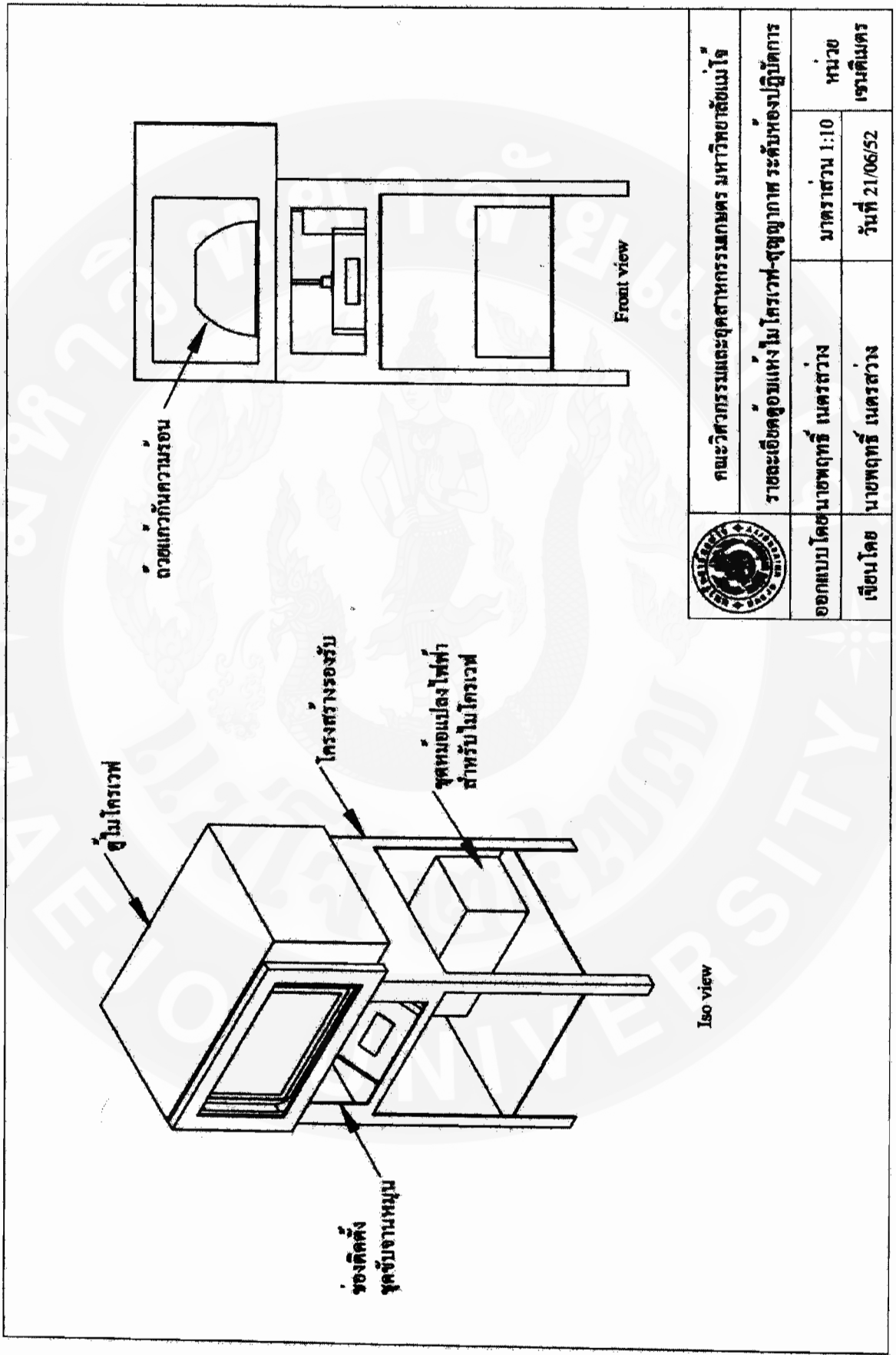
มวลแห้งที่ใช้อบแห้งขยายผล = 26.4 g (จากขั้นตอนที่ 1) มวลแห้งของกล้วยในการอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

ดังนั้น น้ำหนักกล้วยในการอบแห้งระดับอุตสาหกรรม = $\frac{53 \times 26.4}{17.58} = 79.59 \text{ g}$ หรือประมาณ 80 g

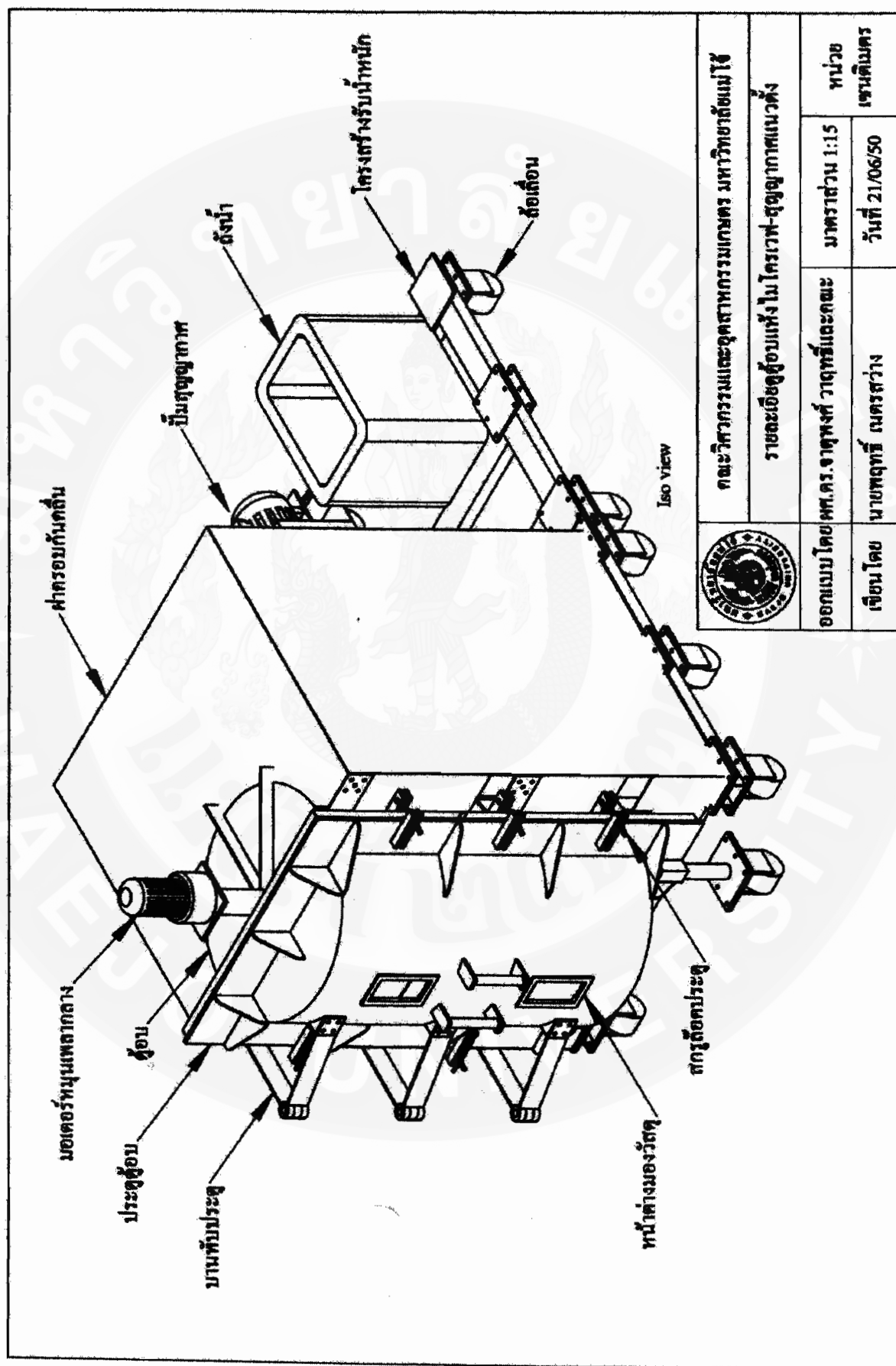
The logo of Maejo University is a large, light gray circular emblem in the background. It features a central figure of a deity or guardian figure holding a sword, surrounded by flames. The text "มหาวิทยาลัยแม่โจ้" (Mahavithalai Maejo) is written in Thai script along the top inner edge, and "MAEJO UNIVERSITY" is written in English along the bottom inner edge. There are also decorative star-like symbols on the sides.

ภาคผนวก จ

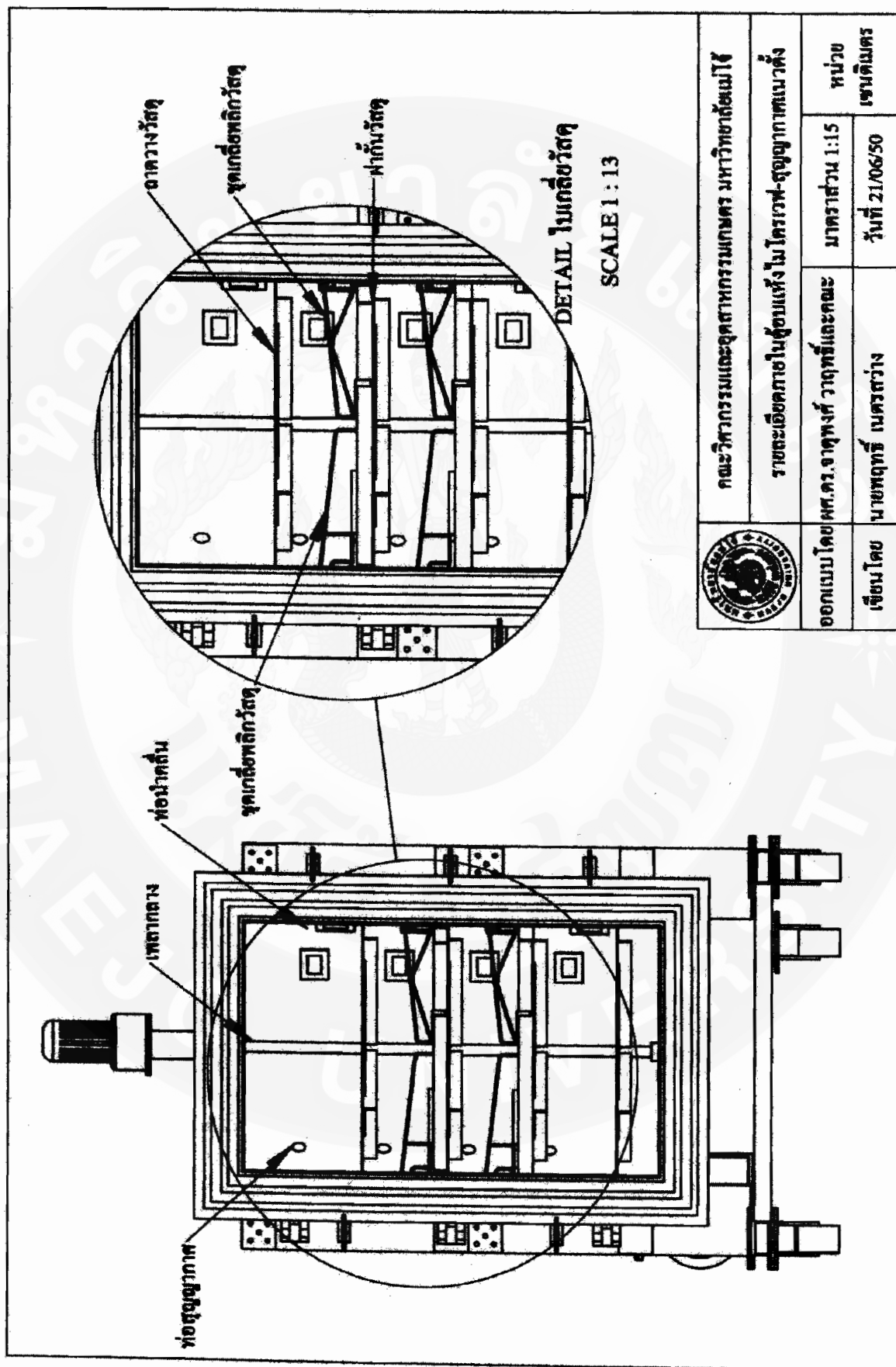
รายละเอียดเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ
ระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม



ภาพผนวก 5 รายละเอียดเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพผนวก 6 รายละเอียดเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม



ภาพผนวก 7 รายละเอียดภายในเครื่องอบแห้งไม่โครเวฟ-สุญญากาศ ระดับอุตสาหกรรม



ภาคผนวก ฉ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพฤทธิ์ เนตรสว่าง
เกิดเมื่อ	12 มิถุนายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดลำพูน
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2539 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนปิ่นสร้อยเขตวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2542 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจักรคำคณาทร จังหวัดลำพูน พ.ศ. 2547 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการฝึกงาน	พ.ศ. 2546 นักศึกษาฝึกงาน บริษัท Cotco-SV Eastern Steel Pipe จำกัด จังหวัดระยอง พ.ศ. 2551 นักศึกษาฝึกงาน Institut für Landtechnik, Universität Bonn, Germany
ผลงานทางวิชาการ	พ.ศ. 2547 การออกแบบและศึกษาเครื่องดักไอน้ำแบบกลุ่มท่อสำหรับการอบแห้งแบบสุญญากาศ วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2550 J. Varith, P. Netsawang, C. Noochuay, B. Hirunstitporn, S. Janin and M. Krairiksh. 2007. Design of Multimode-Circular Microwave Cavity for Agri-Food Processing. p. 58-61. In <u>The 19th Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2007)</u>.

พ.ศ. 2552 พฤทธิ์ เนตรสว่าง และจาดุพงศ์ว่าฤทธิ์. 2552. การปรับปรุง กระบวนการอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศสำหรับกล้วย อบแห้ง. น. 305-309. ใน รายงานการประชุมวิชาการการ ถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8). ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พ.ศ. 2552 การอบแห้งกล้วยหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยแม่โจ้