



การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
แบบสายพานลำเลียง

Product Development of Dried Shiitake Mushroom
Using Belt-Conveyor Combined Microwave-Hot Air Drying

ลิสสา มิตรประยูร
LISA MITPRAYOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (บัณฑิตศึกษา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564



การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
แบบสายพานลำเลียง

Product Development of Dried Shiitake Mushroom
Using Belt-Conveyor Combined Microwave-Hot Air Drying

ลิส้า มิตรประยูร
LISA MITPRAYOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน (บัณฑิตศึกษา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง
ชื่อ นามสกุล	ลิสสา มิตรประยูร
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนใช้เวลาอบแห้งนาน ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมาก ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงและการคืนตัวต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยนำเห็ดหอมที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการใช้ไมโครเวฟที่กำลัง 300 W, 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม 0.3 m/s และอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน 65 °C เพียงอย่างเดียว จนกระทั่งเห็ดหอมมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง โดยประเมินจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งทางด้านสี การหดตัว การคืนตัว เนื้อสัมผัส วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค จากผลการทดลอง พบว่าวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำให้ใช้เวลาอบแห้งสั้น ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ เห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวก เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวและความแข็งต่ำกว่า แต่มีการคืนตัวสูงกว่า และโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อน แต่ค่าสีของเห็ดหอมอบแห้งทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกัน ในขณะเดียวกันเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลองมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวและความแข็งต่ำกว่า แต่มีค่าความสว่างของสี (L^*) ค่าสีแดง ($+a^*$) ค่าสีเหลือง ($+b^*$) และค่าการคืนตัวมากกว่า และมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวก

คำสำคัญ : การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ, จลนพลศาสตร์การอบแห้ง, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, โครงสร้างระดับจุลภาค, เห็ดหอมอบแห้ง

Thesis title	Product Development of Dried Shiitake Mushroom Using Belt-Conveyor Combined Microwave-Hot Air Drying
Authors	Lisa Mitprayoon
Degree	Master of Engineering (Sustainable Industrial Management Engineering)
Major program	Sustainable Industrial Management Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

Drying an agricultural product with hot air (HA) method causes a long drying time, and results in high specific drying energy consumption (SEC). The dried product has high shrinkage percentage and low rehydration. Therefore, this research aims to develop dried shiitake mushroom using belt-conveyor combined microwave-hot air drying method (MHB). The shiitake mushroom was dried by MHB at microwave power of 300 W, 400 W, 500 W and 600 W, and air temperature of 65 °C with air velocity of 0.3 m/s and recycled air of 80% and by the HA drying method at air temperature of 65 °C. The samples were dried until their final moisture content less than 11.1% dry basis. The drying kinetics, SEC of drying process and quality of dried shiitake mushroom were evaluated. The quality of dried product was considered in terms of color, shrinkage, rehydration, texture, water activity and microstructure. The results showed that the shiitake mushroom drying using MHB gave higher drying rate than that of HA drying method, leading to short drying time, and resulting in low SEC. The drying rate of un-blanched shiitake mushroom was higher than that of blanched shiitake mushroom. Dried shiitake mushroom from MHB drying gave lower values in shrinkage percentages and hardness, but higher rehydration and larger pore size than that dried by HA drying. However, the color values (L^* , $+a^*$ and $+b^*$) of dried shiitake mushroom in all cases were not significantly different. Meanwhile, dried shiitake mushroom from un-blanched case gave lower values in shrinkage percentage and hardness, but higher values in all colors and rehydration, and larger pore size than those of blanched case.

Keywords : Microwave drying, Drying kinetics, Specific energy consumption, Microstructure, Dried shiitake mushrooms

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ รวมถึงการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ อดุสาหกรรมการเพื่อความยั่งยืน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ อดุสาหกรรมการเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบคุณภาพหัตถ์คหกรรมภัณฑ์ด้านสี เนื้อสัมผัส และวอเตอร์แอกทีวิตี

ขอขอบคุณ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

ลิสมา มิตรประยูร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ช)
สารบัญภาพ	(ซ)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ของเขตการวิจัย	3
1.4 สมมติฐานการวิจัย	3
1.5 กรอบแนวความคิด	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เติ็ดหอม	5
2.2 วอเตอร์แอคทีวิตี	8
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	9
2.4 พื้นฐานของไมโครเวฟ	19
2.5 สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations)	29
2.6 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction)	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
2.8 โอกาสในการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
3.1 วัตถุประสงค์	37
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	39
3.3 วิธีการทดลอง	40
3.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี	41

สารบัญ (ต่อ)

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	42
3.6 การทดสอบคุณภาพด้านการคั้นตัว	43
3.7 การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี	44
3.8 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	44
3.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง	45
3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ	46
บทที่ 4 ผลการวิจัย	47
4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอม	47
4.2 คุณภาพสีของเห็ดหอมอบแห้ง	49
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้ง	52
4.4 การหดตัวของเห็ดหอมอบแห้ง	54
4.5 การคั้นตัวของเห็ดหอมอบแห้ง	55
4.6 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้ง	56
4.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเห็ดหอมอบแห้ง	57
บทที่ 5 อภิปรายผล	59
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	64
6.1 สรุปผลการวิจัย	64
6.2 ข้อเสนอแนะ	65
บทที่ 7 แผนนำไปใช้ประโยชน์และการผลิตในเชิงพาณิชย์	66
7.1 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ	66
7.2 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์	66
7.3 รูปแบบดำเนินการทางธุรกิจ (Business Mode)	66
7.4 แผนผังกระบวนการ (Process flow chart)	67
7.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิต	67
7.6 แผนงานทางธุรกิจ	68
7.7 สรุปผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน	70
เอกสารอ้างอิง	71

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง ผลกระทบของระดับกำลัง ไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	80
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง การอบแห้งเห็ดหอม ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	86
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	91



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	7
2.2	25
2.3	27
3.1	41
4.1	50
4.2	55
4.3	57
4.4	58
7.1	68
7.2	68
7.3	69
7.4	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เห็นหอมหนา	6
2.2 เห็นหอมลาย	6
2.3 การจำแนกตามค่าแอมิติวิตี้ของน้ำ	9
2.4 การเคลื่อนที่ของความชื้นอาหารในระหว่างการอบแห้ง	12
2.5 ลักษณะการลดลงของความชื้นของวัสดุในขณะอบแห้ง	16
2.6 คลื่นไมโครเวฟ	19
2.7 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	21
3.1 เห็นหอมสด	37
3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	38
3.3 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	39
3.4 แผนผังของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	40
3.5 เครื่องวัดสี Spectrophotometer	42
3.6 เครื่อง Texture Analyzer	43
3.7 เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี	44
3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope	45
4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเห็นหอมในขณะอบแห้งแบบ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 300 คือ กำลังไมโครเวฟ 300 W]	48
4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเห็นหอม และอุณหภูมิลมร้อน ในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ	48
4.3 ลักษณะสีของเห็นหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W]	50
4.4 ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็นหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W]	53
4.5 การคืนตัวของเห็นหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ	56
7.1 แผนผังการผลิตเห็นหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เห็ดหอมเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของโลกและถือเป็นเห็ดเศรษฐกิจของโลกอันดับที่สองรองจากเห็ดแชมปิยอง (ยุคติ สาริยะภูติ, 2559) เห็ดหอมมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีรสชาติดี และมีกลิ่นหอม และได้รับความนิยมในการบริโภคจนได้ชื่อว่าเป็น “ราชินีของเห็ด” มีสรรพคุณเป็นยาอายุวัฒนะ ป้องกันโรคบางอย่างได้ เช่น การสะสมไขมันในหลอดเลือด ความดันโลหิตสูง และมีสารต้านเนื้องอกได้ (สุทธพรพรณ ตริรัตน์, 2523) ชาวเอเชียนิยมนำเห็ดหอมมาประกอบอาหาร ส่วนยุโรปนิยมนำมาใส่ในซूप (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2551) ประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในประเทศที่นิยมบริโภคเห็ดมาก โดยเฉพาะกลุ่มผู้บริโภคที่ลดการบริโภคเนื้อสัตว์ กลุ่มคนรักสุขภาพ และกลุ่มผู้บริโภคมังสวิวัติ ส่งผลให้ตลาดและธุรกิจเห็ดขยายตัวอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีศักยภาพในการผลิตเห็ดเพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ส่งผลให้ตลาดและธุรกิจเห็ดขยายตัวเติบโตอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเห็ดหอมเป็นพืชที่มีความขึ้นค่อนข้างสูง อายุการเก็บเกี่ยวสั้น ทำให้เน่าเสียง่าย ดังนั้นเกษตรกรจึงนำเห็ดหอมมาแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าให้กับเห็ดหอมโดยวิธีการตากแดดเพื่อลดความชื้น แต่วิธีการตากแดดควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ยาก เนื่องจากปนเปื้อนฝุ่นละอองและแมลงต่างๆ ที่มารบกวน (วรนุช แจงสว่าง, 2551) การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่ได้รับความนิยมทั่วไป อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยทั่วไปมักใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนักประมาณ 60-70 °C เพื่อป้องกันผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำและเหี่ยวยุบมาก ไม่น่ารับประทาน (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540) ดังนั้นจึงทำให้การอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งนาน สิ้นเปลืองพลังงานมาก และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมักมีการหดตัวสูง มีค่าความแข็งมาก และอัตราการคืนตัวต่ำ (Paengkanya et al, 2015)

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งร่วมกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถช่วยทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้เนื่องจากไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพลังงานไมโครเวฟถูกดูดซับด้วยน้ำในวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อนผ่านกลไกไอออนถูกกระตุ้นแล้วทำให้เกิดการชนกันกับไอออนอื่นๆ และการเสียดสีกันของสารประกอบของโมเลกุลมีขั้วจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้กำเนิดความร้อนภายในวัสดุและไอน้ำระเหยออกอย่างรวดเร็ว (Paengkanya et

al, 2015) ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Varith et al, 2007; Kasseem et al, 2011) อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนยังมีข้อเสียคือการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้งไม่สม่ำเสมอ ทำให้วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเป็นวิธีการอบแห้งทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยให้วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟสม่ำเสมอมากขึ้นจากการเคลื่อนที่ของสายพาน ส่งผลให้วัสดุแต่ละตำแหน่งในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันมากขึ้น จากงานวิจัยของ กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์ และคณะ (2560) พบว่า การทำให้ไหลเคลื่อนที่โดยใช้สายพานจะช่วยทำให้อุณหภูมิของวัสดุในตำแหน่งต่างๆ มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น ศรีณย์ ศักดิ์สุวรรณ (2560) พบว่าการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และมะม่วงอบแห้งมีการหดตัว ความแข็ง และความเหนียวน้อยกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยปัจจุบันมีการนำวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมาใช้ในการอบแห้งวัสดุหลายชนิด เช่น มะม่วง (สิทธิชัย ศรีไทย, 2559) ขนุน (ณัฐพล ดวงธรรม, 2561) ใบมะกรูด (คณิศ์ สิทธิชัยทวีกุล และคณะ, 2562) และจิ้งหรีด (ธัญญลักษณ์ นิลบารันต์, 2561) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุบางชนิดมักเกิดสีคล้ำในขณะการปอก ตัด หรือฉีกเนื้อของวัสดุก่อนการอบแห้ง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งจะช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องในวัสดุได้

การลวกตัวอย่างก่อนการอบแห้งเป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องได้ (Srivastava et al., 2009) ช่วยปรับปรุงคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และยังสามารถเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้วัสดุเกิดการขยายตัวได้ดีในระหว่างอบแห้ง (Raikham et al., 2015) นอกจากนี้การลวกยังเป็นวิธีที่ปราศจากการใช้สารเคมี ง่าย สะดวก และไม่ซับซ้อน

จากข้อดีของวิธีการอบแห้งดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งทางเลือกให้กับผู้ประกอบการที่ผลิตเห็ดหอมอบแห้ง โดยศึกษาจลพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งทางด้านสี การคืนตัว ความแข็ง วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งด้านสี การหดตัว การคิ่นตัว เนื้อสัมผัส วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้เห็ดหอมสดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกเห็ดในช่วงประมาณ 4-5 cm โดยใช้เฉพาะส่วนดอกเห็ดหอม

1.3.2 พิธีกรรมเริ่มต้นตัวอย่างก่อนอบแห้งโดยการลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลานาน 4 นาที

1.3.3 ใช้ไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 MHz ที่ระดับกำลังไมโครเวฟในช่วง 300 W - 600 W และใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การนำเห็ดหอมมาอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงคาดว่าจะสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้ง ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งทางด้านสี การหดตัว ความแข็ง การคิ่นตัว และโครงสร้างระดับจุลภาคเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุได้โดยตรง กำเนิดความร้อนจากภายในวัสดุ ให้น้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว

1.5 กรอบแนวความคิด

1.5.1 ศึกษากระบวนการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่ระดับกำลังไมโครเวฟต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

1.5.2 ศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างเห็ดหอมก่อนการอบแห้งด้วยการลวกน้ำร้อน

1.5.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้วิธีการผลิตเห็ดหอมอบแห้งเพื่อสุขภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตเห็ดหอมอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.6.2 ได้ผลิตภัณฑ์แห้งเพื่อสุขภาพปราศจากการใช้สารเคมีในกระบวนการอบแห้ง ที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบดั้งเดิม สำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ

1.6.3 วิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงสามารถลดเวลาในการผลิตแห้งลงได้ และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

การอบแห้ง (Hot air drying) คือ การลดความชื้น (Moisture) ของวัสดุให้เหลือความชื้นตามที่ต้องการ

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Drying) คือการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการหมุนวนเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการเสียดสีไปมา จนเกิดความร้อนภายในวัสดุอย่างรวดเร็ว

การพรีทรีตเมนต์ (Pretreatment) คือ การเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้ง เช่น การล้างน้ำ การแช่สารเคมี การลวก การนึ่ง เป็นต้น

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บพลังงานของผลิตภัณฑ์ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss Factor) คือ ค่าพลังงานที่สูญเสียไปในสารไดอิเล็กทริก

ค่าลอสแทนเจน (Loss tangent) คือ ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสาร

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ของกระบวนการอบแห้ง คือค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง

ไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่ 300 MHz-300 GHz ให้ความร้อนขึ้นภายใน ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำ เชนไอออน (Ionic Conduction) และการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation) ภายในสนามไฟฟ้า

วอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity) คืออัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เห็ดหอม

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของเห็ดหอม

เห็ดหอมเป็นสิ่งมีชีวิตในกลุ่มฟังไจ (Fungi) ประเภทเห็ด (Mushroom) (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2563) ซึ่งเห็ดเป็นสิ่งมีชีวิตประเภทรา เป็นราที่มีวิวัฒนาการสูงกว่าราชนิดอื่นๆ (ราชบัณฑิตยสถาน, 2539) มีชื่อสามัญว่า Shiitake mushroom หรือ Oak mushroom มีชื่อภาษาจีนคือ Xiang Gu (Smell mushroom) เรียกเป็นภาษาจีนว่า Hoangko หรือ Xiang (smell) Gu (mushroom) หมายถึง เห็ดที่มีกลิ่นหอม และเรียกเป็นภาษาญี่ปุ่นว่า ชิอิทาเกะ (Shiitake) (สำนักส่งเสริมการเกษตร, 2537)

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

เห็ดหอมมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Lentinus edodes* (Berk.) Sing. อยู่ในวงศ์ Tricholomataceae เป็นประเภทหนึ่งของเห็ด (Mushroom) (*L. edodes*) ซึ่งอยู่ใน อาณาจักร Fungi ไฟลัม Basidiomycetes อันดับ Agaricales วงศ์ Tricholomataceae Marasmiaceae Omphalotaceae สกุล Lentinula สปีชีส์ *L. edodes* (รัฐพล ศรประเสริฐ, 2538)

2.1.3 ชนิดและสายพันธุ์ของเห็ดหอม

เห็ดหอมมีทั้งเพาะไว้บริโภคเอง และเพื่อการค้า โดยเห็ดหอมที่เพาะเป็นการค้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้ (กมลรัตน์ นนทรี, 2546)

1) เห็ดหอมหนา

ภาษาจีนเรียก เชียงชิน (Chiang-Chin) และ ภาษาญี่ปุ่นเรียก โกชิน (Ko-Shin) ผิวหมวกที่ดอกเห็ดหอมไม่แตกเป็นลายเห็นเด่นชัด ขอบหมวกดอกเห็ดหอมจะบาน ก้านดอกยาว เกิดในฤดูหนาว และมีความชื้นสูง เป็นชนิดที่ในประเทศไทยสามารถเพาะได้ มีราคาสูงกว่า เห็ดหอมลาย



ภาพที่ 2.1 เห็ดหอมหนา

2) เห็ดหอมลาย

ภาษาจีนเรียก ดอนโก (Don-ko) ฝัวมวกที่ดอกเห็ดหอมแตกเป็นลายเห็นเด่นชัด เนื้อหมวกหนา ขอบหมวกดอกเห็ดหอมไม่บาน ก้านดอกสั้น เกิดในฤดูหนาว อากาศเย็นจัด และมีความชื้นต่ำ ในประเทศไทยไม่สามารถเพาะได้ มีราคาแพงมาก พันธุ์ของเห็ดหอมที่นิยมมาอบแห้ง จะต้องเป็นพันธุ์ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำในการออกดอก



ภาพที่ 2.2 เห็ดหอมลาย

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการของเห็ดหอม

เห็ดหอมเป็นเห็ดที่มีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าเห็ดชนิดอื่น มีรสชาติดี และมีกลิ่นหอม ชาวจีนและชาวญี่ปุ่นนิยมบริโภคมาก ในรูปยาอายุวัฒนะ ใช้ในการตุนเครื่องยาจีน เพื่อบำรุงร่างกาย ให้แข็งแรง เลือดไหลเวียนได้ดี ป้องกันโรคบางอย่างได้ (บรรณ บุรณชนบท, 2546) ช่วยควบคุม

ภูมิคุ้มกัน ระวังการเจริญเติบโตของเนื้องอก ปกป้องตับ ต่อด้านไวรัสและแบคทีเรีย นิยมบริโภค เห็ดหอมในรูปแบบของการชงชาหรือใส่ในซุป สารสกัด และเม็ด (Bo and Yunsun, 1980; Hobbs, 1998) สารที่เป็นประโยชน์ในเห็ดหอมต่อร่างกายมนุษย์ คือ เอริทาดีนิน (Eritadenin) ช่วยต่อต้าน เซลล์เนื้องอก (มะเร็ง) และสารเบต้ากลูแคน(น้ำตาลโมเลกุลขนาดใหญ่) ซึ่งช่วยกระตุ้นการทำงานของ ระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายมนุษย์ ปกป้องการติดเชื้อโรค และช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพร่างกายมนุษย์ได้ แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารเลนติแนน (Lentinan) ช่วยลดคอเลสเตอรอลในเลือด และ LEM (Lenti nula edodes mycelium) ช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อสู้กับเชื้อโรค เห็ดมีคุณค่าทางโภชนาการสูงมาก มีสารอาหาร โปรตีน วิตามิน เกลือแร่ ธาตุต่างๆ ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของเห็ดหอมในสัดส่วนที่กินได้ 100 g

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ได้รับ	หน่วย
พลังงาน	26.61	kcal
โปรตีน	2.19	g
ไขมัน	0.12	g
คาร์โบไฮเดรต	4.19	g
แคลเซียม	6.44	mg
ฟอสฟอรัส	45.78	mg
เหล็ก	1.06	mg
วิตามินบี 1	0	mg
วิตามินบี 2	1.03	mg
ไนอาซิน	3.23	mg
วิตามินซี	0	mg
เบต้าแคโรทีน	-	RE
ใยอาหาร	-	g

ที่มา: กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2530)

2.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเห็ดหอมแห้ง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.683/2547) ได้กำหนดมาตรฐานได้กำหนด ผลิตภัณฑ์ชุมชนเห็ดหอมแห้งดังนี้

- 1) ลักษณะทั่วไป

ต้องแห้งไม่มีราหรือมอด ในภาชนะบรรจุเดียวกัน ต้องมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน กรณีเป็นผงต้องไม่จับตัวเป็นก้อน

2) สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของเห็ดหอมแห้ง

3) กลิ่น

ต้องมีกลิ่นที่ดีตามธรรมชาติของเห็ดหอมแห้ง ปราศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ

4) สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

5) ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

6) จุลินทรีย์

จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

2.2 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity; a_w)

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการอบแห้งเพื่อรอการบริโภคหรือการจำหน่าย มักประสบปัญหาด้านการเสื่อมสภาพจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งรวดเร็วกว่าการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาจากเอนไซม์หรือปฏิกิริยาทางเคมี โดยปริมาณของน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หลังจากกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดของการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ปริมาณน้ำนี้สามารถวัดได้ด้วยค่าวอเตอร์แอกทิวิตีหรือปริมาณน้ำอิสระคือปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ได้ (ปริยา วิบูลย์เศรษฐ์ และคณะ, 2549) ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีคำนวณได้จากอัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร (p) ต่อค่าความดันไอน้ำบริสุทธิ์ (P_w) ในสภาวะอุณหภูมิและความดันเดียวกัน (สีกมณฑล เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

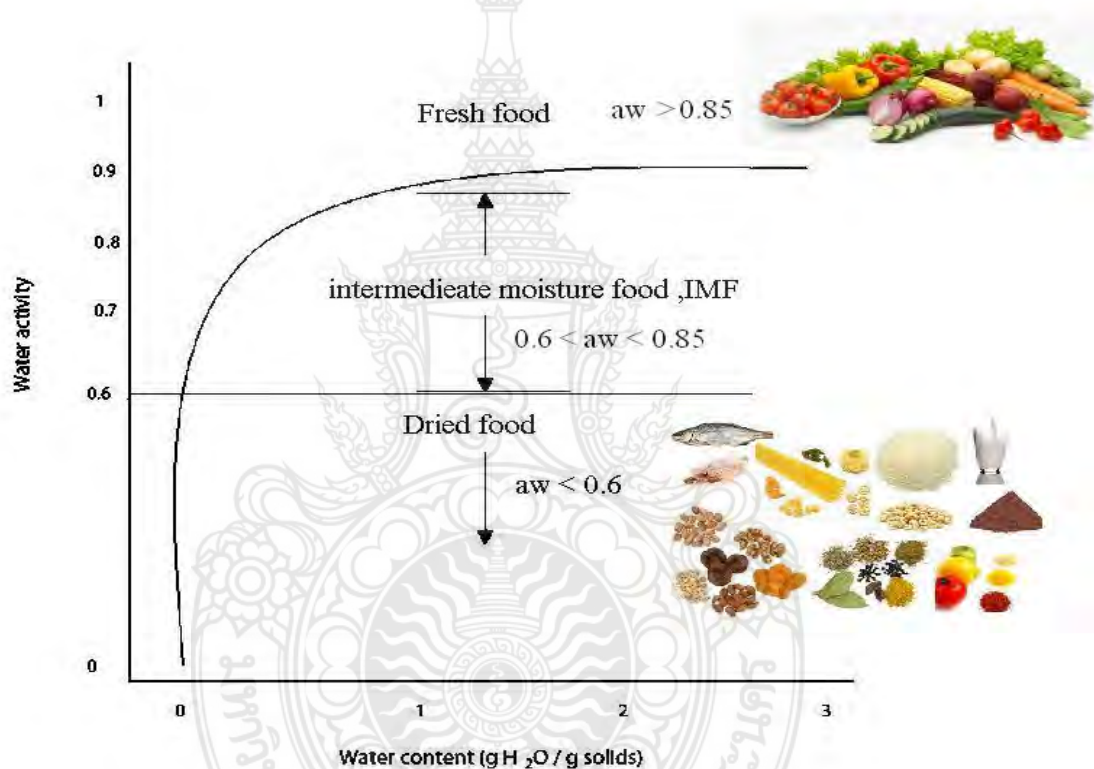
$$a_w = \frac{p}{P_w} \quad (2.1)$$

เมื่อ

a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี, ไม่มีหน่วย

p คือ ความดันไอของน้ำในอาหาร, kPa

สำหรับค่าแอกทีวิตีของอาหารแห้งควรมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งทำให้เกิดการเน่าเสียได้ยากและเก็บรักษาได้นาน (ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์ และคณะ, 2546) โดยผลไม้อบแห้งควรมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.60-0.65 ที่ความชื้น 15-20% w.b. (รัชณี ตัณฑะพานิชกุล, 2549) ในขณะที่ค่าแอกทีวิตีของผลไม้แห้งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 136/2558) มีค่าไม่เกิน 0.6 ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การจำแนกตามค่าแอกทีวิตีของน้ำ

(รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และไพศาล วุฒิจันทร์, 2545)

2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.3.1 การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่มาช้านาน โดยปัจจุบันยังนิยมอย่างแพร่หลาย โดยมีการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีด้วยการให้ความร้อนภายใต้สภาวะการควบคุม เพื่อกำจัดน้ำที่มีอยู่ในอาหารด้วยการนำอาหารมาระเหยเอาน้ำออก โดยการอบแห้งในตู้อบแห้งหรือการ

ตากแดด จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลืออยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่าสภาวะที่เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้อีกต่อไป ส่งผลให้สามารถยืดอายุอาหารในการเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยการลดค่าออเตอร์แอกติวิตีจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ได้ด้วย เมื่อจะนำอาหารแห้งมารับประทานต้องทำการคืนรูปก่อนด้วยการนำไปแช่น้ำหรือการนำไปต้มก่อนที่จะทำการบริโภค (รัตนา อุตตปัญญา และพีไลรัก บุญใหญ่, 2541)

2.3.2 หลักการถนอมอาหารโดยการทำแห้ง

การถนอมอาหารโดยการทำแห้งแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

- 1) หลักการทำแห้ง คือการไล่น้ำหรือความชื้นที่มีในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรออกไป ให้คงเหลือน้ำไว้ตามจุดประสงค์ของการนำไปใช้
- 2) การถนอมอาหารโดยการทำแห้ง หมายถึง การกำจัดน้ำที่อยู่ในอาหารออกไป ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเมตาโบลิซึม และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ช้าลง (Potter and Hotchkiss, 1995)

2.3.3 วิธีการทำแห้ง

วิธีการทำแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

- 1) การตากแห้ง คือ การทำให้วัสดุแห้งด้วยการอาศัยธรรมชาติจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ การผึ่งลม นิยมใช้ในประเทศที่มีอากาศร้อน ตามแนวเส้นศูนย์สูตร วิธีนี้ ใช้ต้นทุนต่ำ การทำงานง่าย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมามีคุณภาพต่ำ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอัตราเร็วในการทำแห้งได้ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550)
- 2) การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเท ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นด้วยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (วิวัฒน์ ตันตพานิชกุล, 2529) เพื่อระเหยน้ำในวัสดุหรือลดปริมาณความชื้นออกไปจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากน้ำระเหยไปด้วยความร้อน จึงเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในเวลาเดียวกันอย่างชัดเจน (Tamon et al., 2005) ผลิตภัณฑ์อาหารเป็นวัสดุที่ไม่สามารถทำให้แห้งจนความชื้นมีค่าเป็นศูนย์ได้ เพราะมีความชื้นจำนวนหนึ่งแฝงอยู่เสมอ เช่น ผัก, ผลไม้ และ เนื้อสัตว์ต่างๆ การอบแห้งมีความสำคัญมาก เพื่อรักษาผลิตภัณฑ์ผลิตผลการเกษตรที่มีความชื้นค่อนข้างสูง ให้เก็บได้นาน โดยรักษาคุณภาพให้ดีขึ้น ต้องมีการวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนด สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำอาหารแต่ละชนิดให้แห้ง โดยที่ไม่ให้เกิดการสูญเสียคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางอาหาร เป็นสิ่งสำคัญมาก

2.3.4 ลักษณะเด่นของกระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งมีลักษณะเด่นดังนี้ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

- 1) ใช้งานกับวัสดุหลายประเภทได้ดี อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) ลักษณะสมบัติการอบแห้งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ
- 3) การดำเนินการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับ อุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่ใช้ในการป้อน การขนส่ง การถ่ายเทวัสดุ ที่ดีและเหมาะสมกับงานนั้น
- 4) การเลือกประเภทเครื่องอบแห้งมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง
- 5) สถานที่ตั้งของอุปกรณ์อบแห้ง มีความสำคัญต่อความสามารถในการอบแห้ง
- 6) ช่วยในด้านการประหยัดพลังงาน ได้จากเงื่อนไขการอบแห้ง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งที่ดี ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการได้ดียิ่งขึ้น

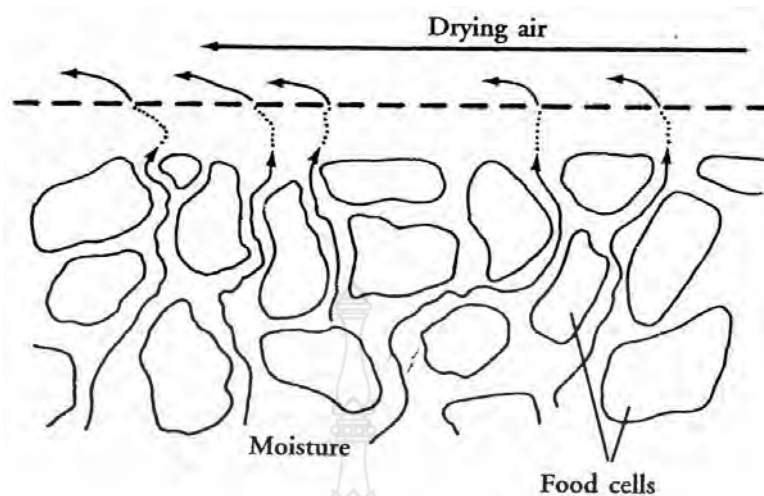
2.3.5 วิธีการทำแห้ง

วิธีการทำแห้งสามารถดำเนินการได้ดังนี้ (อำไพศักดิ์ ทีบุญญา และคณะ, 2547)

- 1) ลดความชื้นในอาหารด้วยไมโครเวฟ โดยใช้การไล่น้ำ หรือ ความชื้นที่มีในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรออกไป ให้คงเหลืออยู่ตามวัตถุประสงค์การใช้งานต่อไป
- 2) กำจัดความชื้นในอาหาร โดยการทำให้อาหารแห้งแบบเยือกแข็ง เช่น เครื่องอบแห้งแบบเยือกแข็ง
- 3) ใช้กระแสลมร้อนสัมผัสอาหารโดยตรง เช่น ตู้อบลมร้อน ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์
- 4) การพ่นอาหารที่เป็นของเหลวเข้าไปในลมร้อน เช่น เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย
- 5) การทำให้อาหารชั้นสัมผัสที่ผิวหน้าของลูกกลิ้งร้อน

2.3.6 กลไกการอบแห้ง

กลไกการอบแห้ง เกิดจากความร้อนถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร ด้วยอากาศหรือลมร้อน แล้วพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก จนกระทั่งน้ำในอาหารจะระเหยออกมา ซึ่งความร้อนแฝงของการเกิดไอน้ำ จะแพร่ผ่านฟิล์มของอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของความชื้นอาหารในระหว่างการอบแห้ง
(วิไล รังสาดทอง, 2552)

วิไล รังสาดทอง (2543) ได้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในอาหารไปยังผิวหน้าของอาหารไว้ดังนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของของเหลว โดยเฉพาะอาหารที่มีเซลล์โปร่ง ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (Capillary force)
- 2) การแพร่ของของเหลว เนื่องจากความเข้มข้น ภายในอาหารกับตัวถูกละลายที่ผิวหน้ามีความแตกต่างกัน
- 3) การแพร่ของของเหลวถูกดูดซับ ด้วยผิวหน้าของแข็งในอาหาร
- 4) การแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศภายในอาหาร เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ

การทำแห้งแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

- 1) น้ำที่อยู่ภายในอาหารเคลื่อนตัวมาที่ผิวหน้าอาหาร
- 2) น้ำที่ผิวหน้าอาหารเกิดการระเหย

โดยในช่วงแรกน้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการระเหยของน้ำ ส่งผลให้ผิวหน้ามีความชุ่มชื้น ความร้อนช่วงนี้หมดไปกับการทำให้น้ำระเหย ช่วงนี้อัตราเร็วในการทำแห้งคงที่ ช่วงที่สองน้ำเกิดการระเหยเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำไปที่ผิวหน้าอาหาร ส่งผลให้ผิวหน้าอาหารแห้ง ช่วงนี้อัตราเร็วในการทำแห้งลดลง จากการที่น้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอ แล้วเคลื่อนที่ออกมาภายนอกอาหาร

จนกระทั่งไม่เกิดการระเหยน้ำอีก เมื่อปริมาณความชื้นในอาหารเท่ากับปริมาณไอน้ำในอากาศ (สุพิชญา รุ่งเรือง และมณีกาญจน์ บุญสง, 2553)

2.3.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง

ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล และคณะ (2556) ได้อธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งไว้ดังนี้

1) ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม โดยการระเหยออกของน้ำขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

2) ความดันการทำแห้งภายใต้ความดัน อัตราการทำแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องมาจากน้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงในการระเหยของน้ำ

3) ลักษณะธรรมชาติของอาหาร

ก) อาหารที่ผ่านการลวก หรือ ผ่านการนวดคลึง น้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นเมื่อผ่านการระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการที่เซลล์ของอาหารแตก

ข) อาหารที่มีน้ำในรูปอิสระ จะแห้งเร็วกว่า อาหารที่จับตัวกับองค์ประกอบของอาหาร เช่น อาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง อาหารนั้นจะมีความหนืด เหนียว ซึ่งจะทำให้การกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำ ส่งผลให้อาหารนั้นแห้งช้า

ค) อาหารที่มีไขมันสูง จะเกิดอัตราการแห้งที่ช้าลง

4) รูปร่างและความหนาของอาหาร

อาหารที่มีความหนามาก อัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่หนาน้อยกว่า เพราะอัตราการแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

5) อาหารที่มีลักษณะเป็น เนื้อโปรง รูพรุนมาก เช่น ผัก ผลไม้ จะมีอัตราการอบแห้งจะเร็วเพราะน้ำภายในอาหารจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอาหารที่มีเนื้อแน่น เช่น เนื้อสัตว์

6) อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากอัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็ว เพราะผิวของอาหารสัมผัสความร้อนได้มากกว่า

7) ถ้าปริมาณของอาหารมาก อัตราการอบแห้งจะช้า เพราะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้ดี อัตราอบแห้งจึงช้า

8) ตำแหน่งของอาหารในเตา น้ำในอาหาร ที่วางตำแหน่งในเตาแล้วสัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือ สัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำ จะระเหยได้ดีกว่า ส่งผลให้อัตราการอบแห้งได้เร็วกว่า

9) ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าหากมากเกินไป อาหารส่วนล่างจะไม่สัมผัสความร้อนเท่าที่ควร ส่งผลให้อาหารทั้งหมดแห้งช้า และ มีอัตราการแห้งต่ำ

10) อุณหภูมิของอากาศร้อน หากอากาศ มีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ ส่งผลให้อัตราการทำให้แห้งสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันต้องทำการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้ภายนอกของอาหารแข็ง แต่ในขณะที่ยังคงมีความชื้นภายในอยู่

11) การเคลื่อนที่ของความเร็วลมร้อน เกิดการเคลื่อนย้ายน้ำจากภายในอาหารออกมาที่ผิว และระเหยออกมาเป็นไอได้ดี แต่ความเร็วลมต้องมีระดับที่เหมาะสม เพื่อเป็นการปกป้องผิวอาหารไม่ให้แห้งเร็วเกินไป และความเร็วลมช่วยทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนเวียนในเตาอบแห้งได้ดีขึ้น

2.3.8 ความชื้นของวัสดุ

การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรจำเป็นต้องผ่านกระบวนการลดความชื้น กล่าวคือ การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ คือ มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity: A_w) ต่ำกว่า 0.60 ตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ว่าด้วยเรื่องข้อกำหนดและความปลอดภัยสินค้าเกษตรและอาหาร (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549) โดยความชื้นในวัสดุมีทั้งความชื้นที่เกาะติดที่ผิวของวัสดุ (Unbound moisture) ซึ่งสามารถไล่ความชื้น นี้ออกไปได้หมดโดยการให้ความร้อน ความชื้นอาจเกาะติดอยู่ภายในผนังด้านในท่อเล็กๆ (Capillaries) ที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ (Bound moisture) โดยไม่สามารถไล่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุนี้ได้หมด ปริมาณความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ดังนี้

1) ความชื้นฐานเปียก (Wet basis)

ความชื้นฐานเปียก คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุขึ้น ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในสมการ (2.2) โดยความชื้นฐานเปียกเป็นความชื้นที่นิยมใช้ในทางการค้าเพราะหาความชื้นได้เร็ว ทราบผลได้ทันที เช่น การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพืชหรือข้าวเปลือก

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก, %

w คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg

d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), kg

2) ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

ความชื้นฐานแห้ง คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง สามารถหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ

M_d คือ ความชื้นฐานแห้ง, %

w คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg

d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

2.3.9 อัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้นคืออัตราส่วนของผลต่างของปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ และความชื้นสมดุลต่อผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลของวัสดุ โดยสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$M_R = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (2.4)$$

เมื่อ

M_R คือ อัตราส่วนความชื้น, ไม่มีหน่วย

M คือ ค่าความชื้นของวัสดุ, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง

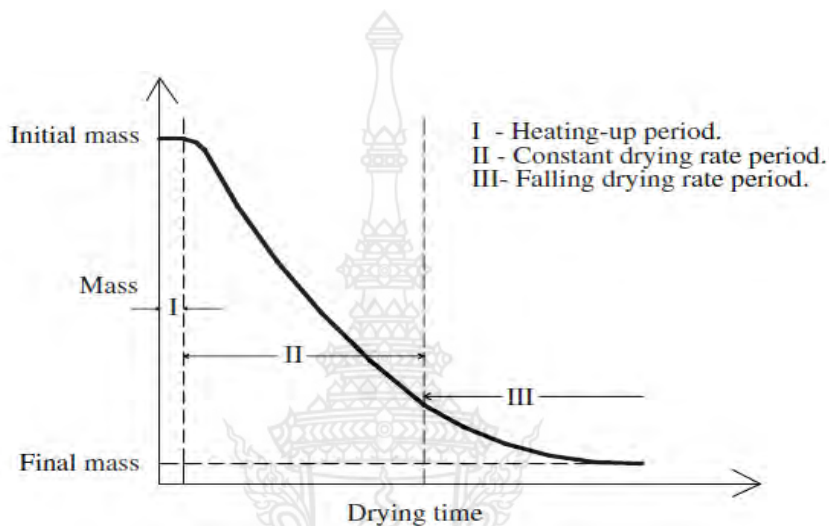
M_e คือ ความชื้นสมดุล, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง

M_0 คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง

2.3.10 ช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง

ช่วงเริ่มต้นการอบแห้งเป็นช่วงที่เกิดขึ้นในช่วง I ดังภาพที่ 2.5 ผลลัพธ์ในช่วงนี้จะมีค่าความชื้นสูงโดยความชื้นจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวของผลิตภัณฑ์ เมื่อความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากอากาศร้อนดังแสดงในสมการที่ 2.5 และทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้น้ำเกิดการระเหยที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์มายังตัวกลางกระแสอากาศ

ร้อน (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ในช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ของและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์มีค่าแตกต่างกันมากจนทำให้ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็วจนกว่าอุณหภูมิที่อยู่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ออบแห้งจะเกิดความสมดุลทางความร้อน กล่าวคืออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิอากาศร้อน



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการลดลงของความชื้นของวัสดุในขณะอบแห้ง

(Idris et al, 2004)

$$q = h' A (T_{\infty} - T_s) \quad (2.5)$$

เมื่อ

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, kJ/h

h' คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kJ/m² h °C

$$q = h' A (T_{\infty} - T_s) \quad (2.6)$$

เมื่อ

T_s คือ อุณหภูมิผิวของเม็ดของแข็ง, °C

T_{∞} คือ อุณหภูมิของกระแสของไหล, °C

A คือ พื้นที่ของวัสดุ, m²

$$N_A = h'_A(C_{AS} - C_A) \quad (2.7)$$

เมื่อ

- N_A คือ ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท, kg/h
 h'_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, kg/m h² (kg/m³)
 C_{AS} คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว, kg/m³
 C_A คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A, kg/m³

2.3.11 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เป็นช่วง II ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เป็นช่วงที่เกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศ โดยมีลักษณะคล้ายกับการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์มอมิเตอร์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) ปริมาณน้ำที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะมีค่าคงที่เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมาแทนที่น้ำที่อยู่ในบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยไปอย่างเพียงพอ ทำให้ปริมาณน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ยังคงที่ตลอดเวลา (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลสารและสมการถ่ายโอนความร้อนของวัสดุอบแห้งได้ดังนี้

$$\dot{m}_w = h'_D \rho_a A (W_{wb} - W_\infty) \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_w = \frac{h'_A (T_\infty - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.9)$$

สำหรับในกรณีระบบไอน้ำและอากาศจะได้

$$\frac{h'}{h'_D} = \rho_a C_a \quad (2.10)$$

เมื่อ

- \dot{m}_w คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h
 h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ, kJ

- ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
 C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
 T คือ อุณหภูมิ, $^\circ\text{C}$
 W คือ อัตราส่วนความชื้น, $\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$

สัญลักษณ์กำกับล่าง

- w คือ น้ำ
 w_b คือ กระจาปะเปียก
 ∞ คือ กระจาสการไหลอิสระ

2.3.12 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งหรือช่วงที่ III ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ความชื้นของวัสดุเกิดจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่มายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวของวัสดุไปยังอากาศ ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารขึ้นภายในเนื้อและผิวของวัสดุ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุจะเป็นตัวควบคุมอัตราการระเหยของน้ำ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระจาปะเปียก (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) และเมื่ออบแห้งต่อไปเรื่อยๆ จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในวัสดุหมด การระเหยของน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุและภายในวัสดุแตกต่างกัน และอัตราการระเหยของน้ำลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำลดลงมาก (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) อัตราการอบแห้งลดลงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.11

$$\dot{m}_w = -\frac{AD\partial c}{\partial x} \quad (2.11)$$

เมื่อ

- D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
 A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวลสาร, m^2
 C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3
 x คือ ระยะ, m

2.4 พื้นฐานของไมโครเวฟ

2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่มีความถี่สูงอยู่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz ความยาวคลื่นในช่วง 1 mm ถึง 1 m ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ใช้เครื่องมือเฉพาะวัดได้เท่านั้น ถ้านำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมใช้ความถี่ 915 MHz (Siamchemi, 2021) โดยคลื่นไมโครเวฟมีสมบัติดังนี้

1) การสะท้อนกลับ (Reflection)

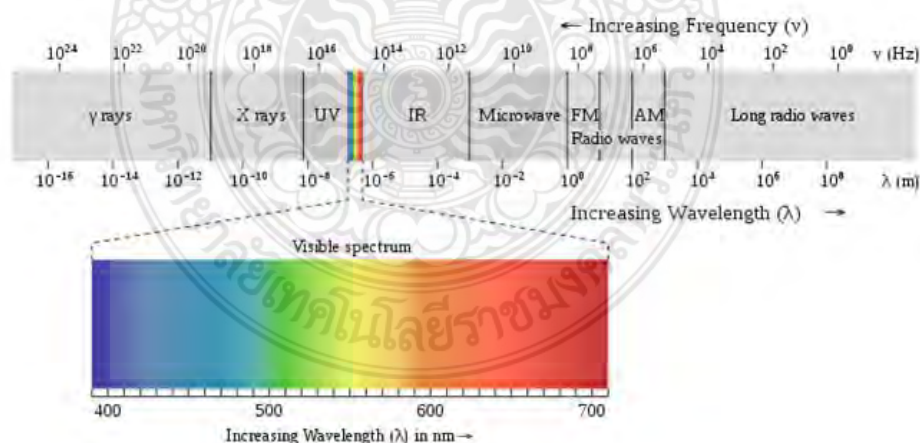
คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะ แต่ไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านได้ และสะท้อนกลับทั้งหมด ดังนั้น อาหารที่ถูกหุ้มด้วยภาชนะดังกล่าวจะไม่เกิดการสุก

2) การส่งผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟ เมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้

3) การดูดซับ (Absorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นจะเกิดบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเอาไว้จนเกิดความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนเช่นกัน ทั้งนี้ คลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซับจะสลายตัวทันที ไม่มีการตกค้างในอาหาร



ภาพที่ 2.6 คลื่นไมโครเวฟ

(Wikipedia, 2021)

2.4.2 ประโยชน์คลื่นไมโครเวฟ

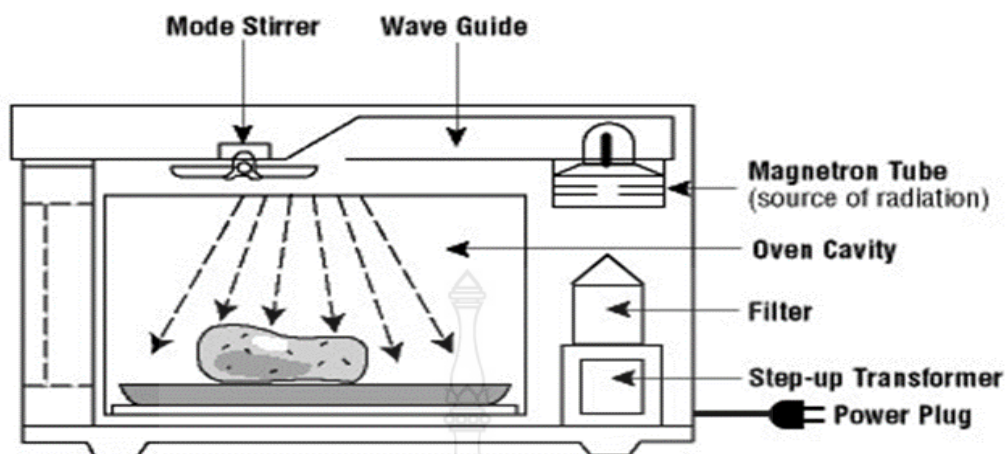
- 1) ใช้ในอุปกรณ์หรือระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม
- 2) ใช้ในระบบตรวจจับวัตถุทางอากาศ การนำร่องทางการบิน การเดินเรือ และยุทธโศปกรณ์เคลื่อนที่เรดาร์
- 3) ใช้ในทางการแพทย์ สำหรับการฆ่าเชื้อ หรือการรักษาโดยการให้ความร้อน โดยความถี่ช่วงความยาวคลื่นที่ยาวกว่าคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ปรุงอาหารหรือมีความถี่คลื่นน้อยกว่านั่นเอง เพราะการรักษาอาการป่วยของมนุษย์จะต้องใช้ความร้อนในขนาดที่ร่างกายทนได้ ห้ามการใช้ความร้อนสูง เช่น การรักษาอาการปวดเมื่อยของกล้ามเนื้อหรือข้อ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ต่ำที่ให้ความร้อนเพียงอุ่นๆ ส่วนการรักษา และทำลายเซลล์มะเร็งในร่างกาย แพทย์จะใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงขึ้นมาเล็กน้อย
- 4) ใช้เป็นแหล่งกระตุ้นให้เกิดความร้อนภายในอาหารหรือใช้ประกอบอาหารให้สุก หรือที่นิยมเรียกว่า เตาไมโครเวฟ รวมถึง ใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม โดยใช้คลื่นความถี่ในช่วง 915 – 2,450 MHz

2.4.3 ข้อดีของการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ

- 1) ใช้ได้ตลอดเวลา (ไม่ขึ้นกับฤดูกาล)
- 2) การเกิดความร้อนอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว
- 3) ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (ไฟฟ้า) สูง
- 4) สามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ดี

2.4.4 เตาไมโครเวฟ

เตาไมโครเวฟที่ใช้งานอย่างกว้างขวางในการให้ความร้อนหรือการอบแห้งอุตสาหกรรมประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่ แมกนีตรอน (Magnetron), แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply), ท่อนำคลื่น (Wave Guide), อุปกรณ์ป้องกัน (Circulator), Directional Coupler, Tuner และ Cavity ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และคณะ, 2550)



ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

1) แมกนีตรอน (Magnetron) เป็นอุปกรณ์สร้างคลื่นไมโครเวฟ มีขั้วแคโทด (Cathode) ขั้วแอโนด (Anode) แม่เหล็กถาวร และ Antenna อยู่ภายใน เริ่มต้นจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3-4 V กระแสไฟฟ้า 10 A อิเล็กตรอนจะวิ่งออกมา และจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร เกิดความต่างศักย์ จนสูงถึงค่าหนึ่งจะปล่อยคลื่นไมโครเวฟ ผ่านทาง Antenna มี 2 ประเภท คือ ทำงานเป็นจิ้งหะ (Pulse Magnetron) ในงานสื่อสาร เช่น งานเรดาร์ และ ทำงานต่อเนื่อง (Continuous Wave Magnetron) เช่น เตาไมโครเวฟบ้าน (Domestic Microwave) หรืองานให้ความร้อนในอุตสาหกรรม มี 2 ประเภท คือ ระบบใช้แมกนีตรอนกำลังสูงเพียงตัวเดียว กำลังวัตต์สูงจะมีราคาสูงมาก แต่มีข้อดี คือ ดูแลรักษาและซ่อมบำรุงง่าย เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดเพียงชุดเดียวและระบบใช้แมกนีตรอนกำลังต่ำหลายตัวประกอบด้วยส่วนประกอบในหน่วยย่อยต่างๆหลายตัว ต้องใช้เงินลงทุนตัวอุปกรณ์ไมโครเวฟค่อนข้างสูง

2) ท่อนำคลื่น (Wave Guide) เป็นสายส่งสัญญาณ ในการส่งคลื่นไมโครเวฟ เป็นท่อกลมหรือท่อสี่เหลี่ยม ทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง ด้านในฉาบด้วยเงิน เพื่อให้ท่อนำคลื่นเป็นตัวนำที่ดี คลื่น ไมโครเวฟจะสูญเสียพลังงานน้อยกว่าทำเป็นรูปแบบอื่น

3) อุปกรณ์ป้องกัน (Circulator) เป็นอุปกรณ์ป้องกันการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ กลับไปยังแมกนีตรอน เพื่อยืดอายุการใช้งานของแมกนีตรอน

4) อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Turner) เป็นอุปกรณ์ที่ปรับค่าของคลื่นไมโครเวฟ ให้ เหมาะสมกับการใช้งานหรือวัสดุให้ความร้อน ใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น (Power Monitor)

- 5) Directional Coupler เป็นอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้สูงขึ้น
- 6) คาวิตี้ (Cavity) เป็นส่วนบรรจุวัสดุ เพื่อทำให้วัสดุร้อนขึ้นหรือต้องการไล่น้ำออกจากวัสดุอบเพื่อให้แห้ง
- 7) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply) และระบบควบคุม (Power control) เป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและควบคุมการทำงานของระบบไมโครเวฟ ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมบูรณ์

2.4.6 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม

ในการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนหรือการอบแห้งวัสดุในทางอุตสาหกรรมจะใช้ความถี่คลื่นในช่วง 915 MHz เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน ส่วนประกอบอย่างอื่นในระบบจะไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้น คาวิตี้ซึ่งออกแบบตามกำลังการผลิต วัสดุที่นำมาอบ และในบางครั้งยังเพิ่มอุปกรณ์หรือระบบบางอย่าง เพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุ คุณภาพของวัสดุที่ต้องการ หรือแม้แต่กำลังการผลิตที่ต้องการ เช่น เพิ่มระบบสุญญากาศในคาวิตี้ หรือการเพิ่มระบบลมร้อนเพื่อให้การพาความร้อนขึ้นบริเวณผิวหน้าได้ดีขึ้น

2.4.7 การถ่ายเทความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟไม่ได้ให้ความร้อน แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นเกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โมเลกุลมีขั้วในผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งก็คือ น้ำ ส่วนที่เกิดปฏิสัมพันธ์กับคลื่นไมโครเวฟ (Interaction) เมื่อน้ำอยู่ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ น้ำจะจัดเรียงตัวให้เป็นไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ แต่เนื่องจากทิศทางของขั้วสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนสลับ ไปมาหลายล้านๆ ครั้งต่อวินาที โมเลกุลของน้ำซึ่งถูกจำกัดด้วยพื้นที่เล็กๆ ในอาหารก็จะเริ่มหมุนใน ทิศทางหนึ่ง เมื่อสนามไฟฟ้าสลับขั้วโมเลกุลน้ำก็จะหมุนในอีกทิศทางหนึ่งด้วยความถี่สูงเช่นกัน การ หมุนสลับกันนี้ทำให้เกิดพลังงานจลน์สูงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด

กำลังการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$P_{\text{abs}} = 5.56 \times 10^{-4} \epsilon'' f E^2 \quad (2.12)$$

เมื่อ

P คือ กำลังการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟ, W/cm³

E คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า, V/cm

f คือ ค่าความถี่, Hz

ϵ'' คือ ค่าไดโพลทริกสูญเสีย

2.4.8 การเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟทำให้อาหารสุกได้เนื่องจากอาหารมีการดูดซับพลังงานคลื่นไว้ และคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารสั่นสะเทือน และชนกับโมเลกุลอื่นๆ จนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นนี้ จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแทน

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำด้วยการหมุนตัววนไปมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 915-2,450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที จากอัตราการหมุนตัวนี้ จึงเกิดการเคลื่อนที่ และการเสียดสีระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้น อัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจึงสำคัญต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น

2.4.9 รูปแบบการดูดซับคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่อาหาร

1) การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic polarization)

เป็นการเกิดความร้อนที่เป็นผลมาจากผลของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละโมเลกุลซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้น และเร่งให้มีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการเสียดสีกับโมเลกุลอื่นๆ และเกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้กลายเป็นพลังงานความร้อน จากนั้น เกิดการกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในเซลล์ แล้วค่อยแพร่มายังด้านนอก

2) การหมุนตัวของสารประกอบที่มีขั้ว (Dipole Rotation)

เป็นการเกิดความร้อนกับวัสดุที่มีสารประกอบมีขั้วเป็นองค์ประกอบ ซึ่งหมายถึงน้ำเป็นส่วนประกอบนั้นเอง โดยธรรมชาติน้ำที่อยู่ในวัสดุจะเรียงตัวประจุบวก และลบบนโมเลกุลอย่างไม่ระเบียบ แต่เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นถูกกระทบกับคลื่นไมโครเวฟแล้ว ประจุเกิดการเคลื่อนที่ และจัดเรียงมีระเบียบขึ้น และหากมีการสลับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประจุเหล่านั้นก็จะเคลื่อนที่กลับทิศตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นกัน และเกิดการวิ่งสลับเป็นหลายล้านครั้ง/วินาที จนส่งผลทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นมาภายในอาหารตามมา

2.4.10 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ในขณะที่อยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยน้ำและเกลือแร่ที่อยู่ในวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาหารเกือบทุกชนิดมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกโดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความชื้นของอาหารและระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (สายสนมประดิษฐ์ดวง, 2549) ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, ϵ') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor, ϵ'') และ ลอสแทนเจน (Loss Tangent, $\delta \tan$) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บพลังงานของผลิตภัณฑ์ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งค่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ความชื้น และความหนืดในอาหารนั้นๆ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงจำนวนข้อและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอาหาร และเป็นอัตราส่วนกันระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอาหารและค่าความจุไฟฟ้าในอากาศ (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550)

2) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก

ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss Factor) คือ ค่าพลังงานที่สูญเสียไปในสารไดอิเล็กทริก ขณะที่อาหารอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้าที่อาหารได้รับ จะสูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในอาหาร อาหารที่มีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงจะนำให้คลื่นไมโครเวฟเข้าไปในอาหารได้สั้นกว่าอาหารที่มีค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากว่าคลื่นไมโครเวฟจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนหมดก่อน (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550)

3) ค่าลอสแทนเจน

ค่าลอสแทนเจน หรือ แฟกเตอร์การกระจาย (Dissipation) คือ ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสาร คัดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไปจาก 90 องศา ในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) ดังสมการที่ 2.13 โดยสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.2

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.13)$$

เมื่อ

 δ คือ Loss tangent

ตารางที่ 2.2 สมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

อาหาร	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	แฟกเตอร์การสูญเสีย ไดอิเล็กทริก	ค่าลอสแทนเจน
น้ำ (25 °C)	76.7	12.0	0.2
น้ำ (1.5 °C)	80.5	25.0	0.3
น้ำแข็ง (-12 °C)	3.2	0.0	0.0
0.1 M โซเดียมคลอไรด์ (25 °C)	75.5	18.0	0.2
เนื้อมันสด (25 °C)	40.0	12.0	0.3
เนื้อมัน (25 °C)	49.0	15.0	0.3
เนื้อมัน (25 °C)	45.0	12.0	0.6
เนื้อมัน (25 °C)	-	-	0.0
เนื้อมัน (25 °C, 915 MHz)	55.0	22.0	0.4
เนื้อมัน (25 °C, 915 MHz)	54.0	23.0	0.4
มันฝรั่งสด (25 °C)	65.0	22.0	0.3
มะม่วงสด (30 °C, 915 MHz)	71.9	14.2	-
ลูกเกด (30 °C, 915 MHz)	9.4	4.3	-
พริก (30 °C, 915 MHz)	26.8	11.9	-

ที่มา: Alfaifi et al. (2013)

2.4.11 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating)

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating) เป็นการให้ความร้อนโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุ (300 GHz-300 MHz) หรือไมโครเวฟ (300 GHz-3 Hz) ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยความถี่ของคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลจนเกิดเป็นความร้อนภายในเนื้อวัสดุโดยตรง แบบนี้แตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection Heating) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการใช้อากาศพาความร้อนจากคอยล์ร้อนหรือหัวเผาเพื่อถ่ายเทไปที่ผิววัสดุ จากนั้นจึงจะเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปภายในเนื้อวัสดุ เป็นการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็วและกระจายความร้อนในเนื้อวัสดุได้อย่างทั่วถึงกว่าการให้ความร้อนโดยการพา

2.4.12 การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กทริก วัสดุไดอิเล็กทริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กทริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรสามารถแสดงได้ดังนี้เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ คือ relative dielectric constant บอกถึงคุณสมบัติของวัตถุใดๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย Dielectric Constant ของอากาศ และ Dielectric Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$) บอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า $\tan\delta$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ ของชิ้นมะม่วงมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อยคลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชิ้นมะม่วงโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (Moisture content) ลักษณะของแผ่นชิ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นชิ้นไม้อัด ค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ ค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2543)

2.4.13 ความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration depth)

ความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration depth) (D_p) คือระยะทางจากบริเวณผิวของวัสดุที่ซึ่งกำลังไมโครเวฟลดลงไป $1/e$ ($e = 2.718$) หรือ มีค่าประมาณ 37% ของค่าส่งผ่านที่พื้นผิวของวัสดุ (Metaxas and Meredith, 1983; Sosa-Morales et al., 2010) ค่า D_p แสดงได้ดังนี้

$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (2.14)$$

เมื่อ

λ_0 คือ ค่า Free space microwave wavelength (λ_0 ที่ 2.45 GHz = 12.2 cm) (Sosa-Morales et al., 2010)

นอกจากนี้ ค่า Dp สามารถแสดงได้ในรูปอื่นได้ดังนี้

$$D_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (2.15)$$

เมื่อ

c คือ ความเร็วแสงในที่ว่าง, m/s

f คือ ความถี่, Hz

จากสมการ (2.15) เป็นค่าสัดส่วนผกผันกับค่าความถี่ ดังนั้น Dp ของวัสดุที่ความถี่ต่ำจะมีค่ามากกว่าที่ความถี่สูง (Sosa-Morales et al., 2009) โดยสมบัติไดอิเล็กทริกของผักและผลไม้ที่ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 915 MHz ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติไดอิเล็กทริกของผักและผลไม้ที่ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 915 MHz

Fruit and vegetable	Temperature (°C)	Moisture (% w.b.)	Relative dielectric constant (ϵ'_r)	Relative Dielectric Loss (ϵ''_r)
Apple (Red delicious)	20	-	77	10
Apple (Red delicious)	50	-	68.9	9.8
Avocado	20	-	59.9	27.4
Avocado	50	-	57.9	39.8
Banana	23	78	64	19

ที่มา: Sosa-Morales et al. (2010)

ตารางที่ 2.3 สมบัติไดอิเล็กทริกของผักและผลไม้ที่ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 915 MHz (ต่อ)

Fruit and vegetable	Temperature (°C)	Moisture (% w.b.)	Relative dielectric constant (ϵ'_r)	Relative Dielectric Loss (ϵ''_r)
Cantaloupe	23	92	68	14
Carrot	23	87	59	18
Cherry	20	-	73.7	16.4
Cherry	50	-	66.7	19.3
Cucumber	23	97	71	11
Grape	23	82	69	15
Grapefruit	20	-	72.7	12.1
Grapefruit	50	-	66.1	14.2
Kiwifruit	-	87	70	18
Lemon	-	91	73	15
Lime	-	90	72	18
Longan	20	-	68.2	13.3
Longan	50	-	60.8	15
Mango	-	86	64	13
Onion	-	92	61	12
Orange	20	-	72.9	16.5
Orange	50	-	66.1	17.5
Papaya	-	88	69	10
Peach	-	90	70	12
Pear	-	84	67	11
Potato	-	79	62	22
Radish	-	96	68	20
Strawberry	-	92	73	14

ที่มา: Sosa-Morales et al. (2010)

2.5 สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations)

สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations) หรือ สมการอิเล็กโตรแมก (Electromagnetic equations) ใช้ในการอธิบายสนามอิเล็กโตรแมก (Electromagnetic field) ในการให้ความร้อนของไมโครเวฟ (Microwave) เช่น ในการกระจายสนามอิเล็กโตรแมก (Electromagnetic field) ในช่องว่างของเตาอบ และ การแพร่กระจายของรังสีไมโครเวฟ (Propagation of microwave) ในวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material)

สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations) ประกอบด้วย 4 สมการ คือ สมการฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของแม่เหล็กฟลักซ์ (Magnetic flux) ในการผลิตสนามไฟฟ้า (Colin, 1966) สามารถเขียนในรูปแบบสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential equation) ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.16)$$

เมื่อ

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity), V/m หรือ N/C

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density), Wb/m² หรือ Tesla

สมการที่สองคือ กฎการเหนี่ยวนำของแอมแปร์ (Ampere's law of induction) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ the spatial variations of magnetic field ไปยังความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งรวมด้วยกับ the contribution of conductive และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Metaxas, 1996) ดังนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.17)$$

เมื่อ

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity), At/m

J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (The current density), A/m²

D คือ ความหนาแน่นฟลักซ์กระแสไฟฟ้า (The electric flux density) Wb/m²

สมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20 คือ กฎของเกาส์ (Guass's law) สำหรับอำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) และกระแสไฟฟ้า (Electricity) โดยกฎของเกาส์ สำหรับสภาวะความเป็นแม่เหล็กนั้น ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิผ่านทุกๆพื้นผิวปิดแล้วค่าจะเป็นศูนย์ กฎของเกาส์สำหรับกระแส ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าฟลักซ์กระแสไฟฟ้าสุทธิ (D) จากปริมาตรมีค่าเท่ากับประจุทั้งหมดที่บรรจุอยู่ภายในปริมาตร (Collin, 1966) ดังนี้

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.19)$$

เมื่อ

q คือ ประจุไฟฟ้า (Charge Density), C

D, B, J, H คือ ปริมาณเวกเตอร์

ความสัมพันธ์ข้างต้นแสดงได้ดังนี้

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.20)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.21)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.22)$$

เมื่อ

σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า หรือ ค่าเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า เป็นการวัดความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า (Electrical conductivity), Semen/m

ϵ คือ แรงต้านสนามไฟฟ้า เป็นตัวชี้วัดความต้านทาน (Permittivity), F/m

μ คือ ความสามารถนำสนามแม่เหล็ก (Permeability), Henry/m

สมการข้างต้นแสดงให้เห็นในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.23)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.24)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.26)$$

สมการ (2.23) และ (2.24) เปลี่ยนรูปมาจากกฎของฟาราเด (Faraday's law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ตามลำดับ และสมการ (2.25) และ (2.26) เปลี่ยนรูปมาจากกฎของเกาส์ (Guass's law) สำหรับอำนาจแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ สมการแมกซ์เวลสามารถสรุปให้อยู่ในรูปอย่างง่ายตามรูปแบบสมการ (2.27) โดยจับคู่ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Rattanadecho, 2008) สิ่งนี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าได้

$$\left(\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times E \right) - \omega^2 \epsilon E = 0 \quad (2.27)$$

2.6 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction)

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลคือปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อเนื้อเยื่อผักและผลไม้ได้ถูกทำลายลง โดยจะเกิดสีน้ำตาลหรือสีคล้ำอย่างรวดเร็วตรงบริเวณที่ปอก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการรสชาติไม่อร่อย และมูลค่าทางการตลาดจะลดลง เพราะไม่น่ารับประทาน ดังนั้นการเกิดปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลจึงจัดว่าเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องมีการแก้ไข ปรับปรุง เพื่อไม่ให้เกิดขึ้น

นิธิยา รัตนาปนนท์ (2536) ได้อธิบายปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหารมี 2 แบบ คือ ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (Enzymatic browning reaction) และปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (Non enzymatic browning reaction) ดังนี้

- 1) ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ของพืชถูกทำลายลงจากการเตรียมพืชในกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบโมโนฟีนอล (ในพืช) สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน แล้วได้เป็น ออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ออกมา ซึ่งสารนี้จะถูกออกซิไดซ์ต่อให้กลายเป็นออร์โท-ควิโนน (o-quinone) ควิโนนที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้ ก็จะมีการรวมตัวกัน แล้วเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ หรือจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับกรดอะมิโนได้ออกมาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล

2) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเกิดขึ้นเมื่ออาหารเกิดการสูญเสียน้ำ (Dehydration) การสลายตัว (Degradation) และการควบแน่น (Condensation) จากความร้อนของหมู่เอมิโน (Amino Group) กับน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) จนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีเหลือง สีน้ำตาล และน้ำตาลแดง ส่งผลให้อาหารมีรสชาติและกลิ่นมีความเฉพาะตัว ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การเกิดคาราไมเซชัน (Caramelization) และ ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ดังนี้

1) การเกิดคาราไมเซชัน (Caramelization) เกิดจากการเผาไหม้น้ำตาลที่ปราศจากสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compound) โมเลกุลของน้ำตาลจึงแยกสลายตัวออกมา (Thermolysis) จากนั้นสารประกอบคาร์บอน (Carbon compound) เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้สีน้ำตาลออกมา

2) ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) เกิดขึ้นเมื่ออาหารที่มีสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compound) และ น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ได้รับความร้อน ส่งผลให้คุณค่าทางอาหารลดลง

2.6.1 การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำได้หลายวิธี ทั้งการใช้สารเคมีและการไม่ใช้สารเคมี การลวกหรือการต้มเป็นการไม่ใช้สารเคมี โดยการลวกถูกนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุก่อนที่จะทำการอบแห้งจากผลผลิตทางการเกษตร พริกฝักและผลไม้บางชนิด มี 2 วิธีคือ (นิธิยา รัตนานนท์, 2536)

- 1) การลวกด้วยไอน้ำร้อน ใช้ในอุตสาหกรรม
- 2) การลวกด้วยน้ำร้อน

วัตถุประสงค์ในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของอาหารมีดังนี้

- 1) เพื่อทำลายเอนไซม์วัตถุบิ ที่เป็นสาเหตุให้คุณภาพของวัสดุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปและเกิดการเสื่อมสภาพด้านคุณภาพ เช่น ปฏิกริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์
- 2) เพื่อกำจัดอากาศออกจากผิวของวัตถุบิ
- 3) ช่วยให้วัตถุบิหดตัวและนิ่ม เพื่อความสะดวกในการบรรจุ
- 4) ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับการอบแห้งอาหารและวัสดุทางการเกษตรสามารถสรุปได้ดังนี้

2.7.1 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

ปัจจุบันมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมใช้ความถี่คลื่นที่ 915 MHz เนื่องจากวัสดุมีขนาดชิ้นค่อนข้างใหญ่และมีความหนาจึงต้องการความถี่คลื่นที่มีระดับความทะลุทะลวงมาก ในขณะที่เตาไมโครเวฟที่ใช้ตามครัวเรือนใช้ความถี่คลื่น 2,450 MHz ซึ่งวัสดุมีขนาดความหนาไม่มาก โดยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีข้อดีคือคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุได้โดยตรง ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการเสียดสีกันไปอย่างรวดเร็ว ทำให้นำภายในวัสดุร้อนและระเหยอย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ลดเวลาในการอบแห้งลง ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งลง และการกระจายพลังงานในเนื้อวัสดุเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอทั้งด้านความชื้น สี (ศิริประภา คลังทอง และ ศิริวิไล อนุกุลประชา, 2546) อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีข้อเสียคือใช้พลังงานสูง ทำให้เสียค่าไฟฟ้าสูง และราคาของเครื่องอบแห้งสูง (Ressing et al., 2007; Zhang et al., 2007) โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเหมาะกับวัสดุที่ต้องการให้มีความพรุนตัวสูงจากการพองตัว (Puffing) ซึ่งเกิดจากการเดือดอย่างรวดเร็วของน้ำภายในวัสดุ ทำให้เกิดการพองตัว และมีความพรุนตัวสูง เช่น ขนม วัสดุที่มีราคาสูง เช่น สมุนไพร และอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่ต้องการการคืนรูปกลับอย่างรวดเร็ว (Ressing et al., 2007; Zhang et al., 2007) อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟนิยมนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการอบแห้งด้วยวิธีอื่น เช่น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับความดันสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับฟลูอิดซ์เบด เป็นต้น เพื่อลดข้อจำกัดการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของไมโครเวฟ

2.7.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นกระบวนการอบแห้งที่มีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อแก้ปัญหาที่วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟไม่สม่ำเสมอในห้องอบแห้ง เป็นการนำข้อดีของวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟและวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนมาใช้ร่วมกัน กล่าวคือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวมีข้อดีคือทำให้วัสดุร้อนจากภายใน ซึ่งเป็นการสร้างความดันไอบนผิววัสดุ ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูง ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนจะช่วยให้ความชื้นที่บริเวณผิวของวัสดุระเหยได้ดี และช่วยให้วัสดุภายในห้องอบแห้งได้รับความร้อนสม่ำเสมอมากขึ้น ดังผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจึงมีคุณภาพดีขึ้น โดยปัจจุบันมีนำวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้กับผลไม้ เช่น พุเรียน (Paengkanya et al., 2015) ลำไย (Apinyavisit et al., 2017) เป็นต้น จากงานวิจัยของ Paengkanya et al. (2015) ศึกษาการอบแห้งแผ่นพุเรียนด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า วิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ผลิตภัณฑ์แผ่นพุเรียนหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าความกรอบสูงกว่า แต่การหดตัวและค่าความแข็งต่ำกว่า ผลิตภัณฑ์แผ่นพุเรียนหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะมีข้อดีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ยังมีข้อเสียคือหากวัสดุภายในห้องอบแห้งไม่เคลื่อนที่ จะทำให้วัสดุในแต่ละตำแหน่งได้รับคลื่นไมโครเวฟไม่เท่ากันซึ่งทำให้วัสดุแต่ละตำแหน่งแห้งไม่เท่ากัน ดังนั้นหากมีการปรับปรุงให้ไหลสามารถเคลื่อนที่จะทำให้วัสดุสามารถรับพลังงานไมโครเวฟได้สม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.7.3 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเป็นเทคนิคการอบแห้งที่ประยุกต์จากวิธีการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งเพื่อลดข้อจำกัดของการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่ไม่สม่ำเสมอในห้องอบแห้ง จากงานวิจัยของ กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์ และคณะ (2560) ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง พบว่า การดูดซับพลังงานไมโครเวฟของน้ำในแต่ละตำแหน่งในห้องอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 44.6-63.6 W ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับพลังงานของวัสดุสามารถลดได้เมื่อมีการเคลื่อนที่ของสายพาน โดยปัจจุบันมีการนำวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมาใช้กับวัสดุหลายชนิด เช่น มะม่วง ขนุน ใบมะกรูด และจิ้งหรีด เป็นต้น ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีขึ้น จากงานวิจัยของ สิทธิชัย ศรีไทย (2559) ศึกษาการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง พบว่าการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงมีอัตราการอบแห้งที่สูง

กว่า และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีค่าความสว่างของสีสูง แต่มีค่าสีแดง ค่าสีเหลือง ค่าการหดตัว และค่าความแข็งต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

2.8 โอกาสในการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน

2.8.1 การเลือกโอกาสการพัฒนา (Selected Opportunity)

เหตุผลที่เลือกพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง และทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงนั้น เพื่อลดการนำเข้าเห็ดหอมอบแห้งจากต่างประเทศ และสร้างรายได้ให้เกษตรกรไทย เพราะใช้วัตถุดิบเห็ดหอมสดที่คนไทยปลูกได้เองในประเทศ อีกทั้งได้เห็ดหอมอบแห้งที่มีคุณภาพดี สามารถลดพลังงานจำเพาะลงได้ และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งจากต่างประเทศ ซึ่งสิ่งต่างๆ ที่กล่าวมานี้ นับเป็นจำนวนเงินที่มาก การวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างความมั่นคงทั้งด้านพลังงาน ด้านเศรษฐกิจ และด้านสังคม ให้กับประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน ในการตัดสินใจทำการพัฒนาอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยมีการแบ่งโอกาสได้ดังนี้

โอกาสที่ 1 การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งเพื่อผู้บริโภคที่รักสุขภาพ เพราะปราศจากสารเคมี

โอกาสที่ 2 การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งเพื่อจำหน่ายภายในประเทศ เพื่อจะได้เก็บไว้รับประทานได้นานๆตลอดทั้งปี

โอกาสที่ 3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งเพื่อส่งจำหน่ายต่างประเทศเพื่อนำรายได้เข้าประเทศ

ดังนั้นจึงเลือกโอกาสที่ 1 เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยทำการพรีทรีตเมนต์เห็ดหอมด้วยการลวก และ การนึ่ง แทนการใช้สารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทุกๆด้านในตัวผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง เนื่องจากไมโครเวฟมีการให้ความร้อนที่ดีมาก

- 1) เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง
- 2) ปริมาณความต้องการที่จะบริโภคผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งของผู้บริโภคทั่วโลกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง

2.8.2 เป้าหมาย

2.8.2.1 ได้ผลิตภัณฑ์เห็ดหอมคุณภาพสูง เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเห็ดหอมอบแห้งในอุตสาหกรรม

- 1) ได้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เห็ดหอมคุณภาพสูง

2) ลักษณะของตลาดกลุ่มเป้าหมาย

จากการพิจารณาเป้าหมายทางการตลาดดังกล่าวข้างต้นนั้น สามารถระบุกลุ่มเป้าหมายได้ 2 กลุ่มดังนี้

2.8.2.2 กลุ่มเป้าหมายหลัก คือ กลุ่มเกษตรกรที่สนใจและผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง ที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่าย

2.8.2.3 กลุ่มเป้าหมายรอง คือ ผู้บริโภคที่รักสุขภาพ เพราะปราศจากสารเคมี

2.8.3 รูปแบบความต้องการตลาดกลุ่มเป้าหมาย

สามารถกำหนดตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของเห็ดหอมอบแห้งตามความต้องการของลูกค้าประกอบด้วย

1) ต้องการรักษาสิ่งแวดล้อม ขั้นตอนการทำเห็ดหอมอบแห้งในการวิจัยนี้ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ เพราะใช้ไมโครเวฟในการอบแห้ง ซึ่งจะไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการประหยัดพลังงาน สะดวกในการใช้งาน และมีจิตสำนึกที่ดีต่อสังคมและส่วนรวม

2) ต้องการความประหยัด เห็ดหอมอบแห้งที่ได้จากการวิจัยนี้ เมื่อนำมาขายภายในประเทศ ผู้บริโภคจะไม่ต้องเสียเงินซื้อด้วยราคาที่มีต้นทุนแฝงจากค่าขนส่งนำเข้าจากต่างประเทศ และพ่อค้าคนกลาง ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายถึงวิธีดำเนินการการวิจัยโดยมีเนื้อประกอบด้วย วัตถุประสงค์ อุปกรณ์การทดลอง วิธีการทดลอง การทดสอบคุณภาพที่ด้านสี การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว การทดสอบค่าวอเตอร์แอกทิวิตี การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ทางสถิติ

3.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเห็ดหอมสดโดยนำมาจากซูเปอร์มาร์เก็ต โดยคัดเลือกเห็ดหอมที่มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีตำหนิและไม่มีร่องรอยการทำลายของแมลง คัดเลือกเฉพาะดอกเห็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 cm และเลือกเห็ดหอมที่มีสีผิวใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยเห็ดหอมสดมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 693.1-969.2% ฐานแห้ง



ภาพที่ 3.1 เห็ดหอมสด

3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยนำเห็ดหอมสดที่เตรียมไว้แล้วตัดขาออกเหลือเฉพาะดอกเห็ด และล้างน้ำทำความสะอาด แล้วนำมาใส่ตะแกรงสแตนเลส ที่งัดไว้ให้สะอาด น้ำประมาณ 5 นาที จากนั้นนำเห็ดหอมประมาณ 500 g ลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 4 นาที แล้ววางบนตะแกรงที่งัดไว้ให้สะอาดเป็นเวลา 3 นาที โดยเห็ดหอมสดและเห็ดหอมลวกส่วนที่เหลือนำไปใส่ถุงพลาสติกแช่ไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-5 °C

3.1.2 การหาความชื้นของเห็ดหอม

การหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของเห็ดหอมดำเนินการได้โดยการนำเห็ดหอมหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมประมาณ 5-8 กรัม แล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Sartorius, model ED2202S-CW, Germany) มีความละเอียดได้ 0.01 g ดังภาพที่ 3.2 โดยใช้เตาอบลมร้อน (Memmert, model ULE500, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งใส่ในโถดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างอบแห้งลดลง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างอบแห้ง จากนั้นสามารถหาค่าความชื้นเริ่มต้นและค่าความชื้นสุดท้ายตามสมการที่ (2.3) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยวิธีการหาความชื้นของตัวอย่างนี้มีความใกล้เคียงกับวิธีการหาความชื้นของตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน AOAC (AOAC, 1995)



ภาพที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

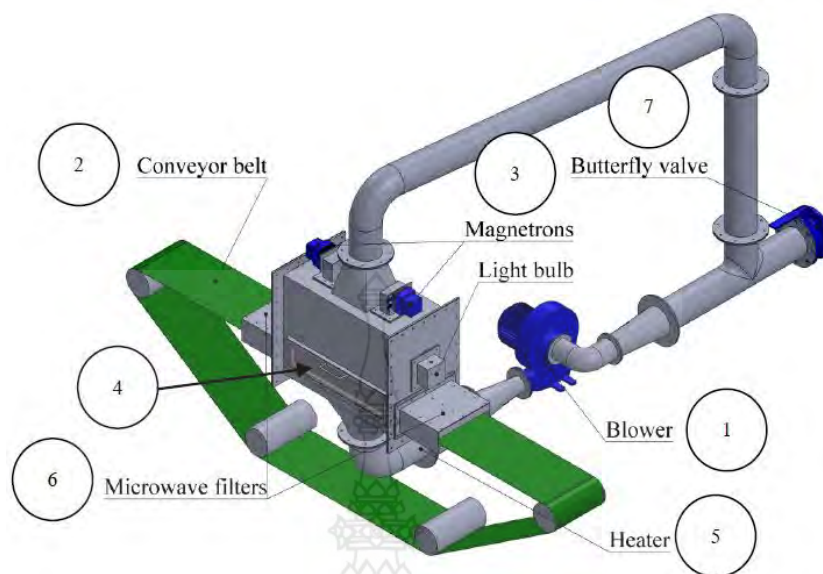
3.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงดังแสดงในภาพที่ 3.3 และแผนผังของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงแสดงในภาพที่ 3.4 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ (1) เครื่องเป่าลมร้อน (2) สายพานลำเลียง (3) แมกนีตรอน (4) ห้องอบแห้ง (5) เครื่องทำความร้อน (6) ตัวกรองคลื่นไมโครเวฟ และ (7) วาล์ว

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงอธิบายได้ตามแผนผังในภาพที่ 3.4 โดยเริ่มจากการเปิดเครื่องเป่าลม (หมายเลข 1) และเครื่องทำความร้อน (หมายเลข 5) โดยเครื่องเป่าลมจะทำหน้าที่ดูดและเป่าอากาศให้เคลื่อนผ่านเครื่องทำความร้อน แล้วปรับอินเวอร์เตอร์ให้มีความเร็วตามที่กำหนดและปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนให้ได้ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นปรับวาล์ว (หมายเลข 4) เพื่อนำอากาศหมุนเวียนจากระบบอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ตามที่กำหนด เมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นได้ตามที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างวางเรียงบนสายพาน (หมายเลข 2) แล้วปรับสายพานให้เคลื่อนที่เข้าไปในห้องอบแห้งและปรับความเร็วสายพานตามที่กำหนด จากนั้นเปิดไมโครเวฟ (หมายเลข 3) และปรับตั้งกำลังไมโครเวฟให้ได้ตามที่กำหนด หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการอบแห้ง



ภาพที่ 3.3 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง



ภาพที่ 3.4 แผนผังของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง
(สิทธิชัย ศรีไทย, 2559)

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1) ก่อนเริ่มต้นการอบแห้งทุกครั้ง ควรเปิดเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยเปิดเฉพาะเครื่องเป่าลมและเครื่องให้ความร้อนก่อนจนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นในระดับที่ต้องการซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที

2) นำตัวอย่างเห็ดหอมที่เตรียมไว้แล้วชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 500 g พร้อมวัดอุณหภูมิของตัวอย่างเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (EXTECH, model IR250) มีความถูกต้อง $\pm 3\%$ บันทึกน้ำหนัก อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างเห็ดหอมวางเรียงบนสายพานลำเลียง จากนั้นเริ่มดำเนินการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 300 W 400 W 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 0.3 m/s และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% ความเร็วสายพาน 0.6 cm/min โดยอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง แล้วเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยเงื่อนไขการอบแห้งแสดงในตารางที่ 3.1

3) เมื่อดำเนินการอบแห้งสิ้นสุดแล้วบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ตัวอย่างคลายความร้อน จากนั้นจึงนำตัวอย่างบรรจุไว้ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ป้องกันความชื้นและแสงในระหว่างรอทดสอบคุณภาพต่อไป

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการอบแห้งด้วยไมโครเวฟด้วยร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

เงื่อนไขการอบแห้ง	ความหมาย
MW300+HA65	การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 300 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C
MW400+HA65	การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 400 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C
MW500+HA65	การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 500 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C
MW600+HA65	การอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C
HA65	การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C

3.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของเห็ดหอมอบแห้งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer (Konica Minolta, CM-3500d, Japan) ดังภาพที่ 3.5 โดยการวิเคราะห์สีของตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งโดยใช้ระบบ CIE L* a* และ b* โดยค่า L* คือค่าความสว่างของวัตถุ (0 ดำ, 100 ขาว) a* คือ ค่าสีแดง/เขียว (+ แดง, - เขียว) และค่า b* คือ ค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (+ เหลือง, - น้ำเงิน) ซึ่งก่อนจะทำการวัดสีเห็ดหอมอบแห้งจะต้องเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานทั้งแผ่นสีดำและแผ่นสีขาวทุกครั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดสีตรงตำแหน่งบริเวณผิวของดอกเห็ดจำนวน 3 จุด โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยดำเนินการวัดสีทั้งหมด 3 ซ้ำ



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดสี Spectrophotometer

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเห็ดหอมอบแห้งใช้เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System, model TA.XT. Plus, Surrey, UK) ที่ความแม่นยำ 0.001 N ดังแสดงในภาพที่ 3.6 โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบเฉพาะค่าความแข็งเท่านั้น เนื่องจากสมบัติอื่นของเนื้อสัมผัสไม่สามารถวัดได้ โดยก่อนดำเนินการทดสอบวัดค่าความแข็งของตัวอย่างต้องปรับเทียบเครื่องกับน้ำหนักมาตรฐาน 2,000 g เสมอ เพื่อให้ค่าความแข็งที่ได้มีความถูกต้องและเป็นที่น่าเชื่อถือ การวัดค่าความแข็งใช้หัวกดแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความเร็วก่อนการกด 1 mm/s ความเร็วขณะกดขณะกด 1 mm/s และความเร็วหลังการกด 10 mm/s โดยกำหนดให้หัวทดสอบกดตัวอย่างจนทะลุ การทดสอบใช้ตัวอย่างจำนวน 15 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Texture Analyzer

3.6 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

การคืนตัวของเห็ดหอมอบแห้งคือความสามารถในการดูดน้ำร้อนกลับคืนของเนื้อเห็ดหอมอบแห้ง โดยหาน้ำหนักของเนื้อเห็ดหอมอบแห้งหลังจากการคืนตัวเทียบกับน้ำหนักของเนื้อเห็ดหอมก่อนการคืนตัว การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวของเห็ดหอมอบแห้งดำเนินการโดยนำเห็ดหอมอบแห้งแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C ค่าความถูกต้อง ± 3 °C โดยบันทึกค่าของน้ำหนักทุกๆ 1 นาที ใช้เวลาทดสอบประมาณ 10 นาที จากนั้นคำนวณหาค่าการคืนตัวของเห็ดหอมอบแห้งจากสมการดังนี้

$$\% \text{Rehydration} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ

W_t คือ มวลของเห็ดหอมอบแห้งที่เวลาใดๆ, kg

W_d คือ มวลของเห็ดหอมอบแห้งหลังจากการคืนตัว, kg

3.7 การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

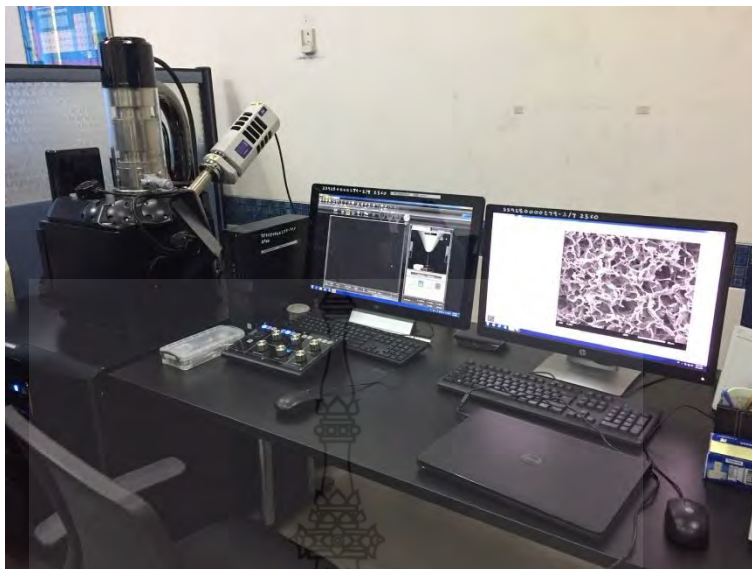
การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งใช้เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี (Novasina Model Lab Master-aw, Switzerland) ดังแสดงในภาพที่ 3.7 โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 °C การทดสอบดำเนินการโดยหั่นเห็ดหอมอบแห้งเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วใส่ในภาชนะทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ในปริมาณ 3/4 ของภาชนะทดสอบ จากนั้นนำภาชนะทดสอบที่บรรจุเห็ดหอมอบแห้งใส่เข้าไปในเครื่องใช้เวลาประมาณ 30 นาที สำหรับแต่ละตัวอย่าง โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองดำเนินการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี 3 ซ้ำ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.7 เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี

3.8 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, Model JSM-5410 LV, Tokyo, Japan) ดังแสดงในภาพที่ 3.8 การทดสอบดำเนินการโดยใช้หักเห็ดหอมอบแห้งให้แตกออกเป็นชิ้นตามแนวขวางของโครงสร้างรูพรุนของเห็ดหอม แล้วนำตัวอย่างที่หักแล้ววางบน Stub แล้วนำไปเคลือบด้วยทองที่บริเวณผิวของภาคตัดขวางของเห็ดหอมอบแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง SEM โดยใช้ความต่างศักย์ในการเร่งอิเล็กตรอน 15 kV และถ่ายภาพภาคตัดขวางโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างอบแห้งที่ตรงตำแหน่งตรงกลางของชิ้นตัวอย่างด้วยขนาดกำลังขยายของภาพ 500 เท่า



ภาพที่ 3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope

3.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานพลังงานของกระบวนการอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องเป่าลม เครื่องทำความร้อน และไมโครเวฟ โดยสามารถวัดได้จากกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ชนิด 1 เฟส โดยความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งงานวิจัยนี้แสดงในรูปของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) มีหน่วยเป็น MJ/kg water evaporated ในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$SEC = \frac{2.6E_{\text{Microwave}} + E_{\text{Heater}} + 2.6E_{\text{Blower}}}{M_w} \quad (3.2)$$

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง, MJ/kg ของน้ำระเหย

$E_{\text{Microwave}}$ คือ พลังงานที่ใช้สำหรับไมโครเวฟ, MJ

E_{Heater} คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องทำความร้อน, MJ

E_{Blower} คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลม, MJ

M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเห็ดหอมอบแห้ง, kg

2.6 คือ ค่าตัวคูณแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน (Achariyaviriya, et al., 2001)

3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติสำหรับงานวิจัยนี้ข้อมูลจากผลของการวัดคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งทางด้านสี การหดตัว ความแข็ง และวอเตอร์แอกทิวิตี โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS, Version 13, Inc., Chicago, IL) ที่ระดับนัยสำคัญ 5%



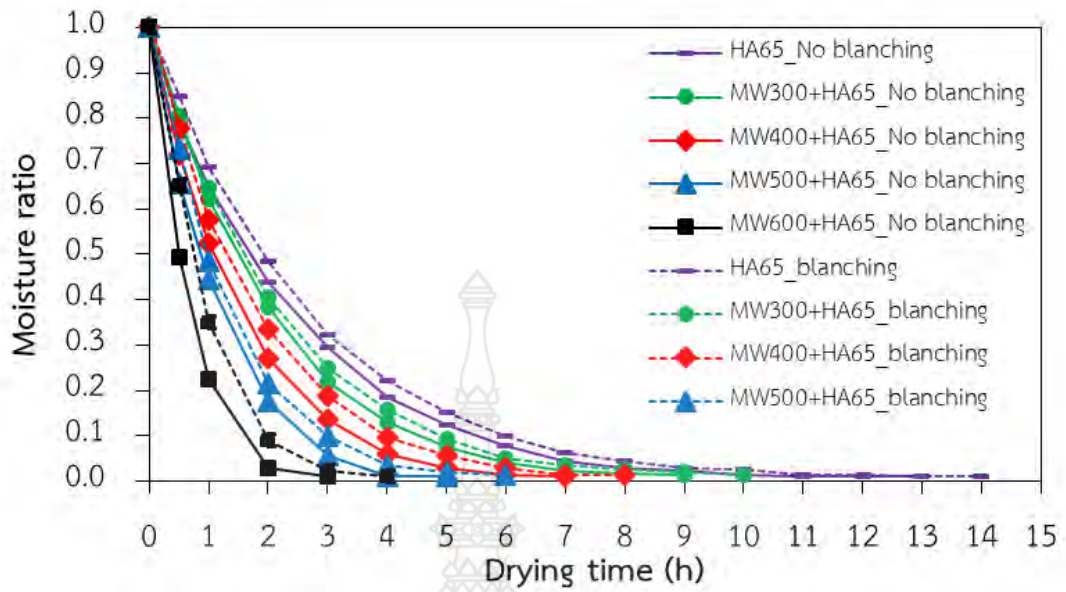
บทที่ 4

ผลการวิจัย

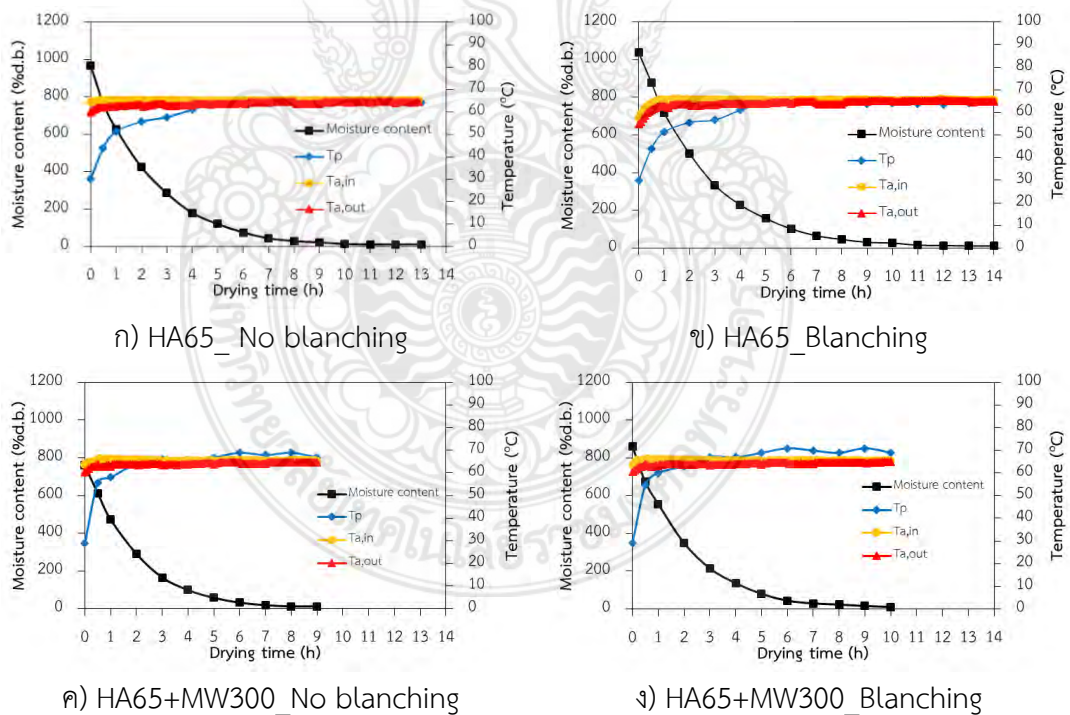
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยการอบแห้งเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกแล้ว นำมาอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอม ความสิ้นเปลืองพลังงาน จำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งในด้านสี การหดตัว การคืนตัว ความแข็ง วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้ออธิบายได้ ดังนี้

4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอม

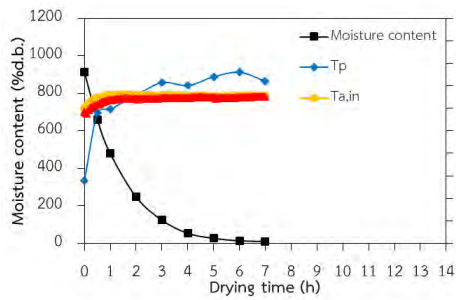
การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 300 W, 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C ที่ความเร็วลม 0.3 m/s และนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน 65 °C เพียงอย่างเดียว โดยเห็ดหอมมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 693.1-969.2% ฐานแห้ง หลังผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนมีความชื้นเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 877.4-1,037.1% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งเห็ดหอมมีความชื้นไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในภาพที่ 4.1 และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม และอุณหภูมิของลมร้อนในขณะอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2



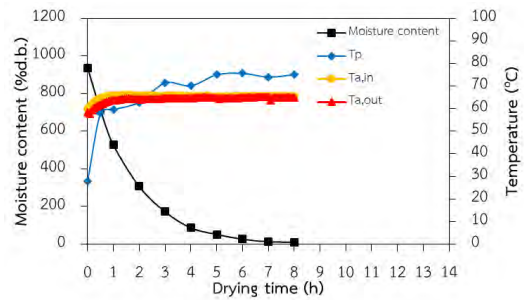
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเห็ดหอมในขณะอบแห้งแบบต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 300 คือ กำลังไมโครเวฟ 300 W]



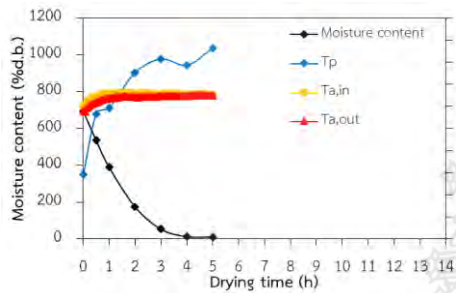
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม และอุณหภูมิลมร้อนในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ



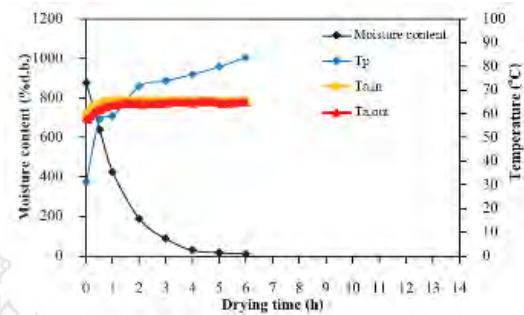
จ) HA65+MW400_No blanching



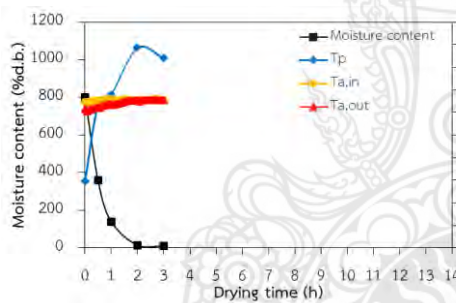
ฉ) HA65+MW400_Blanching



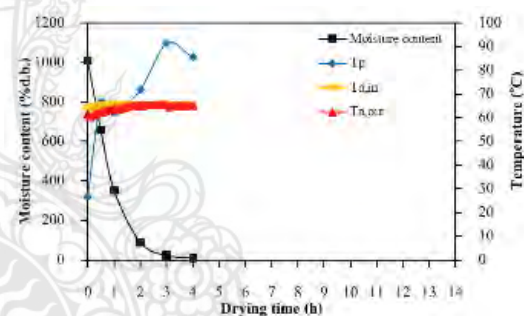
ช) HA65+MW500_No blanching



ฌ) HA65+MW500_Blanching



ฉ) HA65+MW600_No blanching



ญ) HA65+MW600_Blanching

ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม และอุณหภูมิลมร้อนในขณะอบแห้ง ด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ (ต่อ)

4.2 คุณภาพสีของเห็ดหอมอบแห้ง

สีของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกและนำมาอบแห้งมีค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 24.67-39.32 ค่าสีแดง (+a*) อยู่ในช่วง 24.67-39.32 และค่าสีเหลือง (+b*) อยู่ในช่วง 6.95-15.84 เมื่อนำเห็ดหอมลวกด้วยน้ำร้อนแล้วนำมาอบแห้ง สีของเห็ดหอมอบแห้งจะมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 14.00-16.93 ค่าสีแดงอยู่ในช่วง 0.91-1.40 และค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 0.77-1.45 โดยลักษณะสีของเห็ดหอมอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 สีของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Pretreatment conditions	L*	a*	b*
HA65	No blanching	36.53±2.82 ^f	7.08±1.94 ^b	15.84±2.39 ^e
	Blanching	14.00±1.57 ^a	1.21±0.65 ^a	1.04±0.45 ^a
HA65+MW300	No blanching	39.32±2.27 ^g	6.16±1.07 ^b	15.53±1.89 ^e
	Blanching	16.13±1.43 ^{ab}	1.58±1.13 ^a	1.45±0.71 ^a
HA65+MW400	No blanching	34.28±1.76 ^e	7.29±0.93 ^{bc}	13.33±1.96 ^d
	Blanching	14.70±1.68 ^{ab}	0.82±0.48 ^a	0.99±0.51 ^a
HA65+MW500	No blanching	31.45±2.74 ^d	7.25±0.78 ^{bc}	11.83±2.08 ^c
	Blanching	16.22±2.41 ^{ab}	0.91±0.64 ^a	0.96±0.56 ^a
HA65+MW600	No blanching	24.67±2.92 ^c	7.35±1.40 ^c	6.95±2.13 ^b
	Blanching	16.93±1.12 ^{ab}	1.40±0.69 ^a	0.77±0.38 ^a

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$)



ก) HA65_No blanching

ข) HA65_Blanching

ภาพที่ 4.3 ลักษณะสีของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คือ อุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W]



ค) HA65+MW300_ No blanching



ง) HA65+MW300_ Blanching



จ) HA65+MW400_ No blanching



ฉ) HA65+MW400_ Blanching



ช) HA65+MW500_ No blanching



ซ) HA65+MW500_ Blanching

ภาพที่ 4.3 ลักษณะสีของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ สมร้อน, 65 คือ อุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W] (ต่อ)



ณ) HA65+MW600_ No blanching



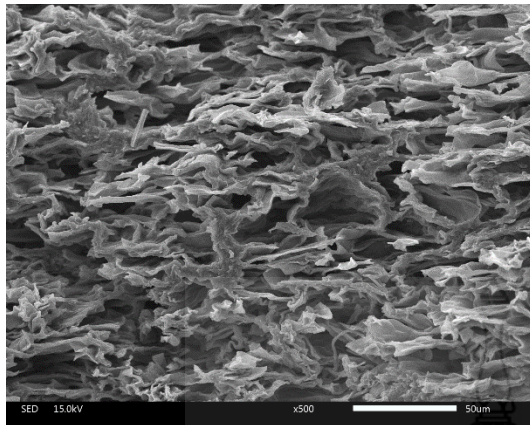
ญ) HA65+MW600_ Blanching

ภาพที่ 4.3 ลักษณะสีของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คือ อุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W] (ต่อ)

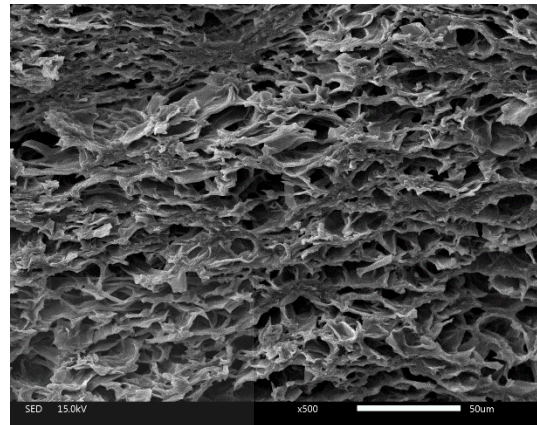
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้ง

ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

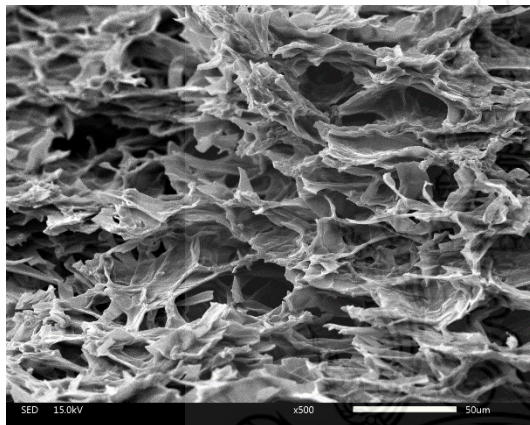




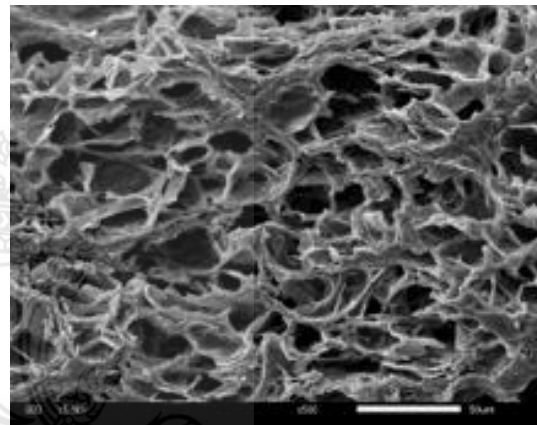
ก) HA65_No blanching



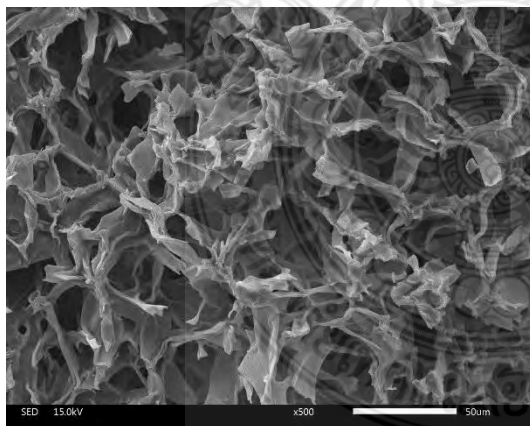
ข) HA65_Blanching



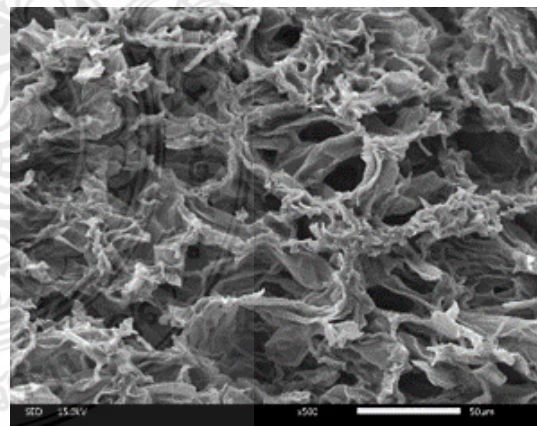
ค) HA65+MW300_No blanching



ง) HA65+MW300_Blanching

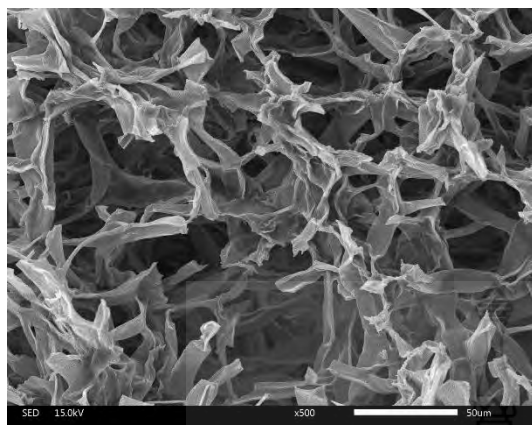


จ) HA65+MW400_No blanching

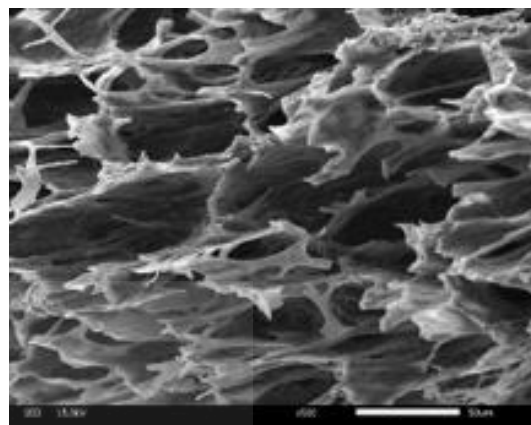


ฉ) HA65+MW400_Blanching

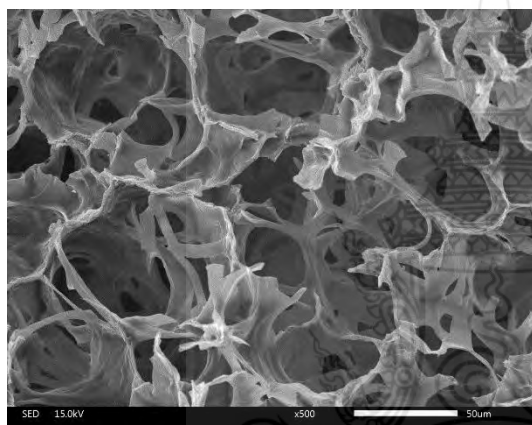
ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W]



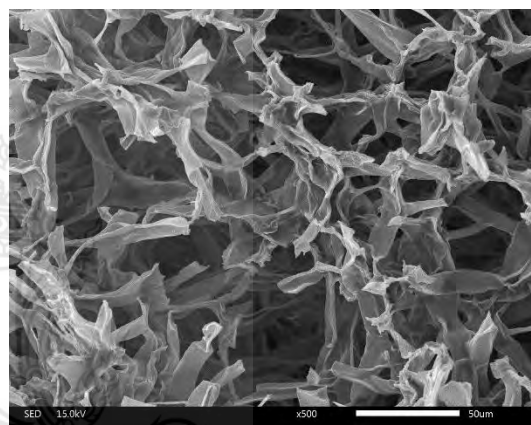
ข) HA65+MW500_ No blanching



ช) HA65+MW500_ Blanching



ณ) HA65+MW600_ No blanching



ญ) HA65+MW600_ Blanching

ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 65 คืออุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 600 คือ กำลังไมโครเวฟ 600 W] (ต่อ)

4.4 การหดตัวของเห็ดหอมอบแห้ง

การหดตัวของเห็ดหอมจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเห็ดหอมหลังผ่านการอบแห้ง การหดตัวของเห็ดหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า เห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าการหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวก เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าการหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

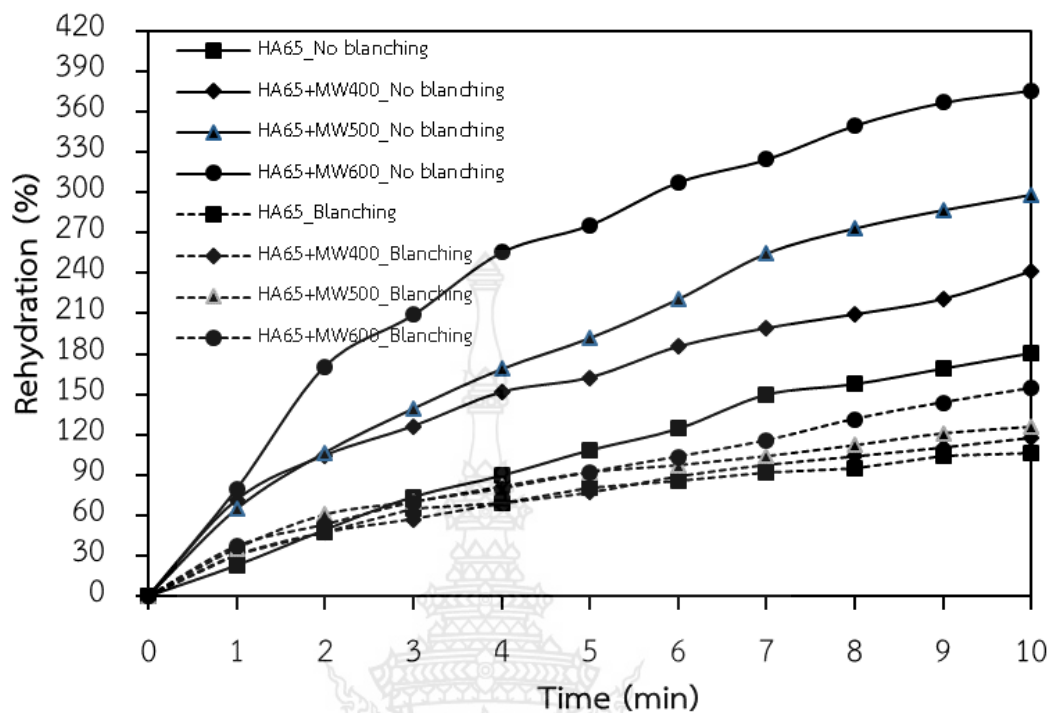
ตารางที่ 4.2 การหดตัวของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Pretreatment conditions	Shrinkage (%)	Drying time (h)
HA65	No blanching	78.33±1.41 ^e	13
	Blanching	86.57±1.95 ^g	14
HA65+MW300	No blanching	74.47±1.26 ^{cd}	9
	Blanching	83.99±1.86 ^f	10
HA65+MW400	No blanching	72.22±0.37 ^c	7
	Blanching	82.91±0.63 ^f	8
HA65+MW500	No blanching	68.91±0.73 ^b	5
	Blanching	75.88±1.63 ^d	6
HA65+MW600	No blanching	66.50±1.18 ^a	3
	Blanching	74.49±1.44 ^{cd}	4

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5 การคั่วตัวของเห็ดหอมอบแห้ง

การคั่วตัวของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกแล้วนำมาอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าการคั่วตัวในน้ำร้อนได้ดีกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกแล้วนำมาอบแห้ง เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร่วมกับลวกร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าการคั่วตัวสูงกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลวกเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.5 การคืนตัวของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.6 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้ง

ค่าความแข็งและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความแข็งของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและนำมาอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ อยู่ในช่วง 95.79 - 142.15 N และค่าความแข็งของเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกแล้วนำมาอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ อยู่ในช่วง 33.14 - 63.027 N เห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Pretreatment conditions	Hardness (N)	Water activity	Drying time (h)
HA65	No Blanching	63.027±12.13 ^d	0.272±0.020 ^a	13
	Blanching	142.15±14.53 ⁱ	0.502±0.012 ^d	14
HA65+MW300	No Blanching	53.71±8.85 ^c	0.419±0.040 ^c	9
	Blanching	117.16±9.83 ^g	0.582±0.010 ^f	10
HA65+MW400	No Blanching	47.96±10.20 ^{bc}	0.323±0.025 ^{ab}	7
	Blanching	127.11±9.74 ^h	0.563±0.010 ^{ef}	8
HA65+MW500	No Blanching	39.99±10.61 ^{ab}	0.309±0.062 ^a	5
	Blanching	104.69±8.56 ^f	0.525±0.010 ^{de}	6
HA65+MW600	No Blanching	33.14±6.70 ^a	0.374±0.058 ^{bc}	3
	Blanching	95.79±8.35 ^e	0.479±0.003 ^d	4

อักษรยกกำลังที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันในตารางแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.005$)

4.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเห็ดหอมอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งเห็ดหอมที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งรวมทั้งหมดอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 63.48 - 288.30 MJ/kg water evaporated

ตารางที่ 4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Pretreatment conditions	Drying time (h)	Evaporated water (kg)	SEC (MJ/kg water evaporated)					Overall Energy
				Heater	Blower	Microwave	Total energy		
							Heat	Electricity*	
HA65	No blanching	13	0.1449	214.66	15.90	0.00	214.66	41.34	256.00
	Blanching	14	0.1362	241.57	17.97	0.00	241.57	46.73	288.30
HA65+	No blanching	9	0.2140	101.78	7.74	6.90	101.78	38.05	139.83
MW300	Blanching	10	0.2172	120.01	8.12	7.13	120.01	39.65	159.65
HA65+	No blanching	7	0.3448	53.87	4.18	13.16	53.87	45.06	98.94
MW400	Blanching	8	0.3118	59.24	4.73	13.74	59.24	48.04	107.27
HA65+	No blanching	5	0.3412	43.89	3.38	8.74	43.89	31.51	75.40
MW500	Blanching	6	0.3108	35.91	3.48	20.27	35.91	61.74	97.65
HA65+	No blanching	3	0.3286	21.03	1.64	14.68	21.03	42.44	63.48
MW600	Blanching	4	0.3119	27.82	2.31	19.97	27.82	57.92	85.74

หมายเหตุ: *ค่าพลังงานไฟฟ้าในตารางเป็นค่าที่แสดงในรูปของพลังงานความร้อนด้วยการคูณค่าแฟคเตอร์การแปลงพลังงาน 2.6



บทที่ 5

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้พัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยนำเห็ดหอมสดลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 4 นาที อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการใช้ไมโครเวฟที่กำลัง 300 W, 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม 0.3 m/s และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% อบแห้งจนกระทั่งเห็ดหอมจากความชื้นเริ่มต้น 693.1-1,037.1% จนมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง แล้วเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน 65 °C เพียงอย่างเดียว และเปรียบเทียบกับกรณีเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวก โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งในด้านสี การหดตัว การคิ่นตัว เนื้อสัมผัส วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอุณหภูมิของเห็ดหอมในขณะที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่าอุณหภูมิของเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งเกิดจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุได้โดยตรงทำให้น้ำภายในวัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วผ่านกลไกการกระตุ้นให้อิออนเกิดการชนกันและการเสียดสีกันของโมเลกุลของน้ำจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว (Paengkanya et al., 2015) ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลของวัสดุสูงกว่า ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ สิทธิชัย ศรีไทย (2559) และศรัณย์ ศักดิ์สุวรรณ (2560) ที่ศึกษาการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง ในขณะที่การเพิ่มระดับของกำลังไมโครเวฟในขณะที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น กล่าวคือการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไข HA65+MW600 มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไข HA65+MW500 HA65+MW400 และ HA65+MW300 ตามลำดับ เนื่องจากเห็ดหอมได้รับพลังงานไมโครเวฟมากกว่า

ทำให้อุณหภูมิของเห็ดหอมในขณะอบแห้งสูงกว่า อัตราการถ่ายเทมวลของวัสดุสูงกว่า ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า เมื่อพิจารณาผลกระทบของเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวก เนื่องจากเห็ดหอมที่ผ่านการลวกมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากเดิมเห็ดหอมสดมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 693.1-969.2% หลังลวกด้วยน้ำร้อนเห็ดหอมมีความชื้นเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 877.4-1,037.1% ฐานแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.2

สีของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับสีของเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า เห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีค่าความสว่างของสี (L^*) ต่ำกว่าเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยลมร้อน ยกเว้นเห็ดหอมที่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยเงื่อนไข HA65+MW300 แต่มีค่าสีแดง ($+a^*$) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) มากกว่าเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของเห็ดหอมในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่าทำให้เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องมากขึ้น ส่งผลให้เห็ดหอมอบแห้งมีสีคล้ำกว่า ยกเว้นกรณีอบแห้งด้วยเงื่อนไข HA65+MW300 เนื่องจากกรณีอบแห้งด้วยวิธีนี้อุณหภูมิของวัสดุไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อสีของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่า กรณีเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งที่เงื่อนไข HA65+MW300 มีค่าความสว่างของสีและค่าสีเหลืองสูงกว่า แต่มีค่าสีแดงต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่เงื่อนไข HA65+MW400 HA65+MW500 และ HA65+MW600 ตามลำดับ เนื่องจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำ (300 W) ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูง (400 W 500 W และ 600 W ตามลำดับ) ทำให้วัสดุอบแห้งมีการปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องน้อยกว่า ในขณะที่เห็ดหอมที่ผ่านการลวกอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสีไม่แตกต่างกัน โดยเห็ดหอมที่ผ่านการลวกมีสีคล้ำทำให้หลังผ่านการอบแห้งยังคงมีสีคล้ำ แสดงให้เห็นว่าการนำเห็ดหอมมาลวกก่อนการอบแห้งไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณภาพสีของเห็ดหอมอบแห้ง

โครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกแล้วนำมาอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า เห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งมีโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มากกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างของเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่า ทำให้โครงสร้างเกิดการขยายตัวได้มากกว่ากรณีลวกเห็ดหอมก่อนอบแห้ง (ชลลดา ไธขาม, 2556) เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีขนาดรูพรุนที่มี

ขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากผลของคลื่นไมโครเวฟทำให้น้ำภายในวัสดุร้อนและระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้โครงสร้างภายในของเห็ดหอมเกิดการขยายตัว ในขณะที่เห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 °C อุณหภูมิของวัสดุในขณะอบแห้งค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ความดันภายในเนื้อวัสดุค่อนข้างต่ำทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ในขณะที่การเพิ่มระดับของกำลังไมโครเวฟมากขึ้นสำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทำให้โครงสร้างภายในของเห็ดหอมเกิดขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้น้ำภายในวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้มากขึ้น อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของไอน้ำภายในวัสดุเพิ่มขึ้น (Kantrong et al., 2014) นอกจากนี้ยังเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งมีโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกอบแห้ง เนื่องจากหลังการลวกเห็ดหอม เห็ดหอมจะหดตัวลงทำให้เมื่อนำมาอบแห้งจะโครงสร้างภายในของเห็ดหอมจะเกิดการขยายตัวลดลง

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงและเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวทั้งเห็ดหอมที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกก่อนอบแห้งแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนอบแห้งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างของเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนอบแห้งมีความยืดหยุ่นตัวสูงกว่า วัสดุที่มีความแน่นเนื้อต่ำกว่า ทำให้โครงสร้างขยายตัวได้ดีกว่าเมื่อนำมาอบแห้ง (ชลลดา ไร่ขาม, 2556) เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไข HA65+MW600 มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไข HA65+MW500, HA65+MW400 และ HA65+MW300 ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีโครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าซึ่งเกิดจากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าทำให้แรงดันไอน้ำภายในวัสดุสูงกว่า ดังนั้นโครงสร้างของวัสดุเกิดการขยายตัวได้ดีกว่า ส่งผลให้วัสดุหดตัวต่ำกว่า (Mayer et al., 2004; ชลลดา ไร่ขาม, 2556) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของสิทธิชัย ศรีไทย (2559) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

การคืนตัวของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ดังในภาพที่ 4.5 พบว่าเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกมีโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มากกว่า เห็ดหอมมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่า ผิวของวัสดุมีความแข็งน้อยกว่ากรณีเห็ดหอมที่ผ่านการลวก (ชลลดา ไร่ขาม, 2556) ทำให้สามารถวัสดุสามารถ

ดูดซับน้ำร้อนได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาผลของวิธีการอบแห้งที่มีต่ออัตราการคืนตัวของเห็ดหอมอบแห้งพบว่า เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการคืนตัวในน้ำร้อนสูงกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้สามารถดูดซับน้ำร้อนได้เร็วกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 600 W มีอัตราการคืนตัวสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ระดับกำลัง 500 W 400 W และ 300 W ตามลำดับ เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้อของเห็ดหอมมีขนาดใหญ่ขึ้น (Kantrong et al., 2014) ดังแสดงในภาพที่ 4.4

เนื้อสัมผัสของเห็ดหอมที่ผ่านการลวกและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวกมีค่าความแข็งสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากเห็ดหอมที่ผ่านการลวกมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูงกว่า ทำให้วัสดุมีความแน่นเนื้อสูงกว่า การขยายตัวของโครงสร้างภายในน้อยกว่า เมื่อนำไปอบแห้งจึงมีค่าความแข็งสูงกว่า (ชลลดา ไร่ขาม, 2556) เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีโครงสร้างภายในเนื้อเห็ดหอมมีเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่มีต่อความแข็งของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของเห็ดหอมอบแห้งมีค่าลดลง โดยการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 600 W มีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 500 W 400 W และ 300 W ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างภายในเนื้อเห็ดหอมเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น (Kantrong et al., 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ (2554) กล่าวคือวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนทำให้วัสดุแห้งจากบริเวณผิวของวัสดุเข้าไปสู่แกนกลางของวัสดุ ทำให้น้ำในเซลล์บริเวณผิวหน้าถูกดึงออกไปจนทำให้เนื้อของวัสดุที่ทำการอบด้วยลมร้อนมีลักษณะแข็ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า วิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ทำให้อุปกรณ์

ต่างๆ ใช้พลังงานน้อยกว่าตามไปด้วย เมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง พบว่าการเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง โดยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 600 W มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลังไมโครเวฟ 500 W 400 W และ 300 W ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paengkanya et al. (2015) ที่ศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟสำหรับอบแห้งแผ่นทุเรียน และงานวิจัยของ Varith et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง พบว่า กระบวนการอบแห้งเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกก่อนอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่ากระบวนการอบแห้งเห็ดหอมที่ผ่านการลวก เนื่องจากเห็ดหอมหลังผ่านการลวกมีความชื้นสูงกว่าเห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวก โดยเห็ดหอมสดก่อนลวกมีความชื้นอยู่ระหว่าง 693.1-969.2% เมื่อนำเห็ดหอมลวกด้วยน้ำร้อนเห็ดหอมจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 877.4-1,037.1% ฐานแห้ง ทำให้ใช้เวลาในการทำให้ความชื้นระเหยออกจากวัสดุมากขึ้น



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 300 W, 400 W, 500 W และ 600 W เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน 65 °C โดยนำเห็ดหอมที่มีผ่านและไม่ผ่านการลวกอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ จนกระทั่งเห็ดหอมมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง โดยประเมินจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอม ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และวิเคราะห์คุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งทางด้านสี การหดตัว การคิ่นตัว เนื้อสัมผัส วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1) จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอม พบว่าอัตราการอบแห้งของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลังสูง 600 W มีค่าสูงกว่าที่ระดับกำลังต่ำ (500 W และ 400 W ตามลำดับ) และมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 65 °C เพียงอย่างเดียว เห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ผ่านการลวกอบแห้ง

2) การประเมินคุณภาพด้านสีของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีความสว่างของสี (L^*) ค่าสีแดง ($+a^*$) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) สูงกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกทุกเงื่อนไข เห็ดหอมที่ผ่านการลวกอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสีไม่แตกต่างกัน

3) การประเมินคุณภาพด้านการหดตัวของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อน เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 600 W มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าที่กำลัง 500 W 400 W และ 300 W ตามลำดับ และเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวก

4) การประเมินคุณภาพด้านการคิ่นตัวของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีการคิ่นตัวสูงกว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้การคิ่นตัวของเห็ดหอมเพิ่มขึ้น และเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีการคิ่นตัวสูงกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวก

5) การประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอม

อบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของเห็ดหอมลดลง และเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวก เห็ดหอมอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 ซึ่งปลอดภัยจากจุลินทรีย์และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

6) การประเมินคุณภาพด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้ง พบว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้โครงสร้างภายในของเห็ดหอมมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเห็ดหอมอบแห้งที่ไม่ผ่านการลวกมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวก

7) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง พบว่า วิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟจาก 400 W เป็น 500 W และ 600 W ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง เห็ดหอมที่ไม่ผ่านการลวกอบแห้งมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการลวกอบแห้ง

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรนำวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงโดยใช้เทคนิคการลดระดับกำลังไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งเห็ดหอมเพื่อลดเวลาในการอบแห้งลง

2) ควรเพิ่มการวัดสารอาหารและตรวจสอบความสามารถในการต่อต้านอนุมูลอิสระของเห็ดหอมหลังผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

บทที่ 7

แผนการนำไปใช้ประโยชน์และการผลิตในเชิงพาณิชย์

บทนี้นำเสนอรูปแบบของผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงไปใช้ประโยชน์โดยเนื้อหาประกอบด้วย การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ รูปแบบดำเนินการทางธุรกิจ แผนผังกระบวนการผลิต แผนงานทางธุรกิจ และสรุปผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน โดยรายละเอียดของการแผนการนำไปใช้ประโยชน์และการผลิตในเชิงพาณิชย์อธิบายได้ดังนี้

7.1 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ

การนำงานวิจัยที่ได้จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัก ผลไม้ หรือวัสดุทางการเกษตรชนิดต่างๆ ได้ หรือใช้ในการบูรณาการสำหรับการเรียนการสอนกับการวิจัยได้อย่างแท้จริง โดยเป็นการใช้ประโยชน์ในการให้บริการทางวิชาการ (สอน/บรรยาย/ฝึกอบรม) การใช้ประโยชน์ในการพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนการสอน การเขียนตำราแบบเรียน หรือเป็นรายงานวิจัยเพื่อต่อยอดโครงการวิจัยทางด้านการพัฒนาการอบแห้งเห็ดหอมได้ต่อไป

7.2 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

นอกจากจะได้ต้นแบบวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่ใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการแล้ว ยังสามารถนำไปต่อยอดให้เกิดรายได้โดยการจำหน่ายผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง หรือสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงสำหรับจำหน่ายให้กับเกษตรกรหรือผู้ประกอบการผู้ที่สนใจอบแห้งเห็ดหอมหรือผักและผลไม้ต่างๆ

7.3 รูปแบบดำเนินการทางธุรกิจ (Business Mode)

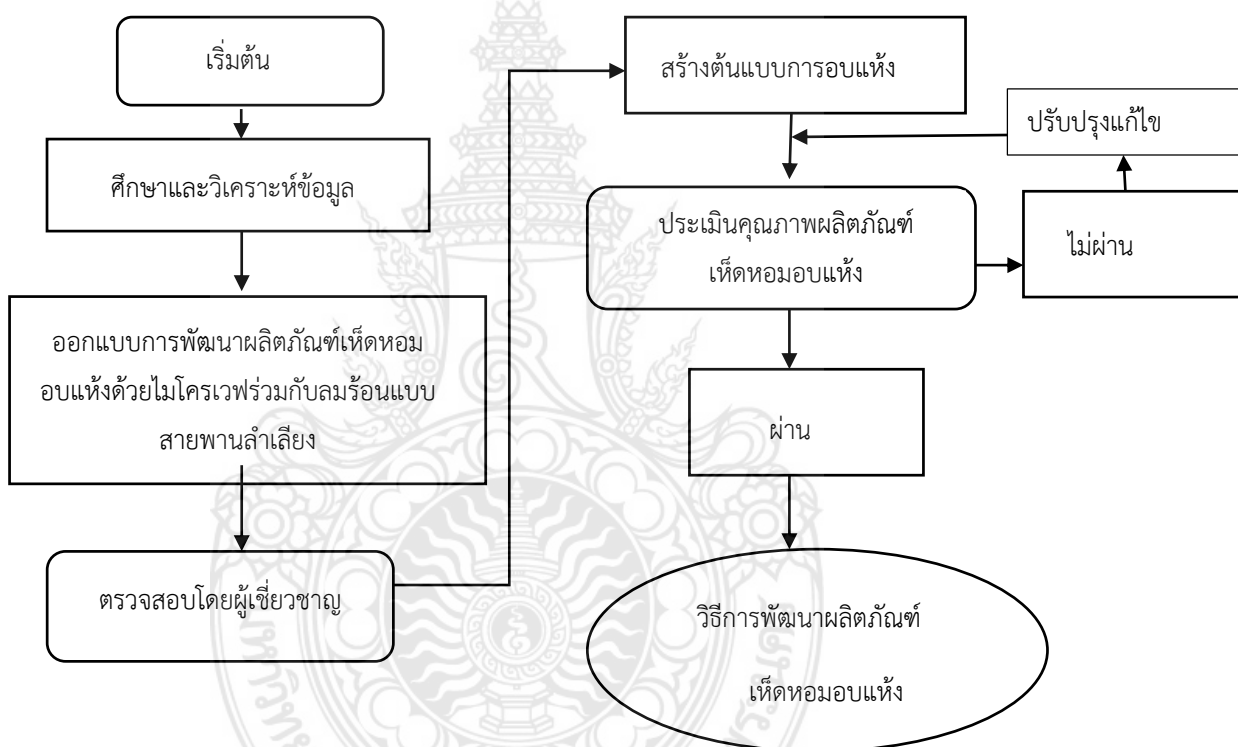
จากปริมาณเห็ดหอมสดที่ประเทศไทยสามารถผลิตได้ สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากเพียงพอที่นำมาสร้างรูปแบบทางธุรกิจได้

จากการศึกษาและทำการวิเคราะห์ข้อมูลธุรกิจเห็ดหอม พบว่า เห็ดหอมสามารถสร้างรายได้ให้แก่กลุ่มต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตเห็ดหอมสด
2. กลุ่มผู้ประกอบการจำหน่ายและส่งออกเห็ดหอมอบแห้ง

7.4 แผนผังกระบวนการ (Process flow chart)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง มีแผนผังกระบวนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 แผนผังการผลิตเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

7.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิต

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง มีรายละเอียดดังแสดงตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้ง
ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
1	เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบ สายพานลำเลียง	1	เครื่อง	20,000
2	เครื่องไล่ความชื้น	1	เครื่อง	2,000
3	เขียง	1	อัน	200
4	มีด	1	ด้าม	100
5	เครื่องชั่งน้ำหนักเห็ดหอม	1	เครื่อง	2,000
6	ตะแกรงสแตนเลส	1	อัน	100
7	ถาดใส่เห็ดหอม	1	อัน	100
8	โถเก็บความชื้น	1	อัน	500
9	หม้อไฟฟ้า	1	อัน	500
10	ปรอทยาววัดอุณหภูมิ	1	อัน	100
11	เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด	1	อัน	1,000
12	Stand & Clamp (ชุดขาตั้งและแคลมป์จับ)	1	อัน	400
รวม				27,000

7.6 แผนงานทางธุรกิจ

แผนงานทางธุรกิจการผลิตเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพาน
ลำเลียง สำหรับโรงงานขนาดเล็กกำหนดให้กำลังการผลิตเฉลี่ย 200 ชิ้นต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 รายละเอียดกำลังในการผลิต

ระยะเวลา	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)
1 ชั่วโมง	8.33
1 วัน	200
1 เดือน	6,000
1 ปี	72,000
5 ปี	360,000

7.6.1 แรงงานที่ใช้ในการผลิต

แรงงานที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง ในระยะ 1 ปี และค่าแรงงาน ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แรงงานที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

รายการ	จำนวน	ค่าแรง (บาท)/เดือน	ค่าแรง (บาท)/ปี
ผู้จัดการฝ่ายผลิต	1	12,000	144,000
ฝ่ายการตลาด	1	9,000	36,000
ฝ่ายบัญชี	1	9,000	36,000
แรงงานฝ่ายผลิต	2	9,000	36,000
รวม	5	48,000	96,000

7.6.2 หาจุดค้ำทุนในการผลิต

จากข้อมูลต้นทุนในการผลิตข้างต้น ทำให้สามารถทำการหาจุดค้ำทุนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง ดังแสดงในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 รายละเอียดต้นทุนในการผลิต

รายการ	ต้นทุนคงที่ (บาท)	ต้นทุนแปรผัน (บาท)
อุปกรณ์ในการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	27,000	-
ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง	10,000	-
แรงงาน	-	96,000
รวม	37,000	96,000

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีกำลังการผลิตทั้งหมด 72,000 ชิ้นต่อปี ในราคา 10 บาทต่อชิ้น คำนวณหาจุดค้ำทุนในการผลิตที่ 90% ของการผลิตที่ระยะเวลา 1 ปี

	N	=	64,800	ชิ้น
	F	=	37,000	บาท
	V	=	96,000/72,000	
		=	1.33	บาทต่อชิ้น
	P	=	1.66	บาทต่อชิ้น
จากสมการ	$\frac{N^*}{P - V}$	=	F	
แทนค่า		=	37,000/(1.66-1.33)	
	จุดคุ้มทุน	=	112,121	ชิ้น

การผลิตเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีกำลังการผลิตทั้งหมด 72,000 ชิ้นต่อปี คำนวณหาจุดคุ้มทุนในการผลิตที่ 90 % ของการผลิตที่ระยะเวลา 3 ปี

	N	=	194,400	ชิ้น
	F	=	37,000	บาท
	V	=	288,000/194,000	
		=	1.485	บาทต่อชิ้น
	P	=	1.66	บาทต่อชิ้น
จากสมการ	$\frac{N}{P - V}$	=	F	
แทนค่า		=	37,000/(1.66-1.485)	
	จุดคุ้มทุน	=	211,428.57	ชิ้น

7.7 สรุปผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน

กรณีการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง 72,000 ชิ้นต่อปี กำลังการผลิตที่ 100 % อยู่ที่ 72,000 ชิ้นต่อปี ในราคา 1.84 บาทต่อชิ้น และจุดคุ้มทุนในการผลิต คือ 112,121 ชิ้น จึงจะคืนทุน และถ้า 3 ปี จุดคุ้มทุนจะอยู่ที่การผลิต 211,428.57 ชิ้น

เอกสารอ้างอิง

- กมลรัตน์ นนทรีย์. 2546. **ต้นทุนและผลตอบแทนของการเพาะเลี้ยงเห็ดหอมใน อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2560. “การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ.” *วิทยาศาสตร์ มข.* 45, 3: 628-638.
- กอบพัชรกุล เป็นบุญ. 2550. “การอบแห้งลำไยแผ่นโดยใช้เทคนิคผสมระหว่างเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบลมร้อนและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร).* มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กิตติ แซ่โจ้ว, ยุทธนา เกติพันธ์, วรวรรณ สุทธิธนาเลิศ, ทิพาพร อยู่วิทยา และ นภาพร รัตนสมบุรณ์. 2544. “ผลของสภาวะการอบแห้งต่อปริมาณสารให้กลิ่นในเห็ดหอม.” *วิจัยและพัฒนา มจร.* 24, 3(กันยายน-ธันวาคม): 285-297.
- คณิศ สิริชัยทวีกุล ธนิต สวัสดิ์เสวี และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2562. “การอบแห้งใบมะกรูดด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน.” *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15.* 21-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา: 899-903.
- ณัฐพล ดวงธรรม. 2561. “การอบแห้งขนุนด้วยเทคนิคลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม).* คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เถลิงราช นิลเชื้อวงศ์, อนุพงศ์ เอกผล สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล. 2558. “การอบแห้งยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับวิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาดย่อม.” *วิทยาศาสตร์บูรพา.* 17, 2: 50-59.
- ธัญญลักษณ์ นิลบารันต์. 2561. “การเปรียบเทียบการอบแห้งจิ้งหรีดต้มแล้วด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในเครื่องอบแห้งแบบสายพาน.” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม).* คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นพวรรณ หาแก้ว. 2560. *ว. กับการวิจัยทางด้านเห็ด*. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ปทุมธานี.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- นักสิทธิ์ ปัญญาใหญ่, สุธิตา คำเหมื่อง และ วิภาวรรณ ไชยเทพ. 2554. “การศึกษารูปแบบการอบแห้งสมุนไพรไทยบางชนิด.” **แก่นเกษตร**. 39 ฉบับพิเศษ: 488-492.
- นันทวัน เทิดไทย และ สุพิชา กระจ่างเมธีกุล. 2555. “ผลของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนต่อคุณภาพของพื้กทองอบแห้ง.” **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. 49: 133-140.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2536. **เคมีอาหาร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- บรรณ บุรณะชนบท. 2546. **สวนทุเรียน**. ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท. กรุงเทพฯ.
- ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์ และ สุธาย ตริวานิช. 2546. **จุลินทรีย์ในอาหาร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. **พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ**. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549. “การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่างๆ.” **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท**. (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2550. **โครงการพัฒนาการศึกษาที่มีเป้าหมายสัมพันธ์กับการแก้ไขปัญหาเศรษฐกิจของประเทศ**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ยุคติ สาริภะภูติ. 2559. **มันสำปะหลัง**. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.
- รัชนี ตันตะพานิชกุล. 2539. **เคมีอาหาร**. มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ.
- รัตนา อุตตปัญญา และ พิไลรัก บุญใหญ่. 2541. **การเลือกใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรในการผลิตผักและผลไม้อบแห้งระดับครัวเรือน**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- ราชบัณฑิตยสถาน. 2539. **พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2525**. พิมพ์ครั้งที่ 6. อักษรเจริญทัศน์. กรุงเทพฯ.
- วรรณช แจงสว่าง และสมโภชน์ เชิดพงษ์. 2551. **การพัฒนาระบบการเผาถ่านและระบบการอบแห้งถ่านอัดแท่งแบบบูรณาการ**. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร. กรุงเทพฯ.
- วิไล รัสสาตทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- วิวัฒน์ ตัณฑพานิชกุล. 2529. การพัฒนาและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบฮีทไปป์ใน
อุตสาหกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- วารุ เฟ็งสวัสดิ์. 2552. “การวิจัยและการพัฒนา (Research and Development).” มหาวิทยาลัยราช
ภัฏสกลนคร. 1, 2(กรกฎาคม-ธันวาคม): 1-12.
- ศรัณย์ ศักดิ์สุวรรณ. 2560. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ระหว่างมะม่วงอบแห้งโดยปราศจากการเติม
สารละลายน้ำตาลโดยใช้เทคนิคการอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.
(สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี.
- ศิระ เลิศวิริยจิตต์. 2558. “การวิเคราะห์การอบแห้งและศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เครื่อง
ไมโครเวฟป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรร่วมกับระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. (ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล). คณะวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
กรุงเทพฯ.
- ศิริประภา คลังทอง และ ศิริวิไล อนุกุลประชา. 2546. การศึกษาวิธีการควบคุมการออกดอกของลำไย.
มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- สิทธิชัย ศรีไทย. 2559. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติม
สารละลายน้ำตาล โดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟ
ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน).
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุวิทย์ แพงกันยา. 2553. “การอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุวิทย์ แพงกันยา, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2561. “การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วย
ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ.” วิจัย มข. 16, 3 (ก.ค.-
ก.ย.): 102-111.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. ท้อป. กรุงเทพฯ ฯ
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2551. พระราชบัญญัติมาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สำนักส่งเสริมการเกษตร. 2537. โครงการปรับโครงสร้างและระบบการผลิตการเกษตร. กรมส่งเสริมการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร.
- สุทธพรรณ ตรีรัตน์, อานนท์ เอื้อตระกูล และ อัจฉรา เครือศรีสวัสดิ์. 2523. การทดสอบคุณภาพของเชื้อเห็ดฟาง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ ฯ
- อารีรัตน์ ซื่อดี. 2560. การใช้คลื่นไมโครเวฟสกัดสารสำคัญจากพืชสมุนไพร. วิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย. 11, 1 (มกราคม-เมษายน): 1-14.
- อิศเรศ วรรณทร. 2554. การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ
- Ahmed, J., and Sinha, N. and Hui, Y. 2011. **Drying of vegetables and vegetable processing.** Wiley-Blackwell. U.S.A.
- Achariyaviriya, A., Soponronnarit, S. and Tiansuwan, T. 2001. "Study of Longan Flesh Drying." **Drying Technology.** 19, 9 (February): 2315-2329.
- Alibas I. 2007. "Microwave, Air and Combined Microwave- air Drying Parameters of Pumpkin Slices." **LWT- Food Science and Technology.** 40, 8 (October): 1445-1451.
- Ajibola, N., and Aviara, N. and Oni, S. 2004. "Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean." **Biosystems Engineering.** 87, 2 (February): 179-190.
- AOAC, 1995, **Official Methods of Analysis**, 16thed. The Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. : 122-133.
- Aydogdu, A., and Sumnu, G. and Sahin, S. 2015. "Effects of Microwave- Infrared Combination Drying on Quality of Eggplants." **Food and Bioprocess Technology.** 8, 6: 1198-1210.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Cunniff P. 1997. **Association of Official Analytical Chemists Official Methods of Analysis of the AOAC International**. Gaithersburg. Maryland.
- Hobbs, R. 1998. “Digital and Media Literacy: A Plan of Action.” **Journal of Communication**. 48, 1: 16-32.
- Idris, A., and Khalid, K. and Omar, W. 2004. “Drying of silica sludge using microwave heating.” **Elsevier**. 24, 5-6 (April): 905-918.
- Izli, N. and Izli, G. and Taskin, O. 2014. “Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple.” **Journal of Food**. 16: 213-221.
- Jhonsi, M., and Kathiravan, A. and Renganathan, R. 2008. “Interaction between certain porphyrins and CDS colloids: A steady state and time resolved fluorescence quenching study.” **ACS**. 71: 1507 – 1511.
- Kantrong, H., Tansakul, A. and Mittal, G.S. 2014. “Drying Characteristics and Quality of Shiitake Mushroom Undergoing Microwave-vacuum Drying and Microwave-Vacuum Combined with Infrared Drying.” **Journal of Food Science Technology**. 51, 12 (December): 3594-3608.
- Kasseem, H., and Alobeed, R., and Ahmed, M. and Omar, A. 2011. “Productivity, Fruit Quality and Profitability of Jujube Trees Improvement by Preharvest Application of Agro-Chemicals.” **Middle-East Journal of Scientific Research**. 9, 5: 628-637.
- Khan, A., and Amilhussin, A., and Arboleda, J., and Manalo, A. and Chancellor, W. 1974. “Accelerated Drying of Rice Using Heat-Conduction Media.” **Plant Pathology**. 17, 5: 949-955.
- Khoshtaghaza, M., and Darvishi, H. and Minaei, S. 2014. “Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels.” **Journal of Food Engineering**. 52, 8: 4749-4760.
- Liu, B. and Bs, Y. 1980. **Fungi Pharmacopoeia (sinica)**. Kinoko. U.S.A.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Makul, N., and Chatveera, B. and Ratanadecho, P. 2009. "Use of Microwave Energy for Accelerated Curing of Concrete." **Songklanakarin J. Sci. Technol.** 31: 1-13.
- Maskan, M. 2001. "Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwi Fruits during Hot Air and Microwave Drying." **Journal of Food Engineering.** 48: 177-182.
- Metaxas, A. 1996. **Integrated Modeling of microwave Food Processing and Comparison with Experimental Measurements.** Wiley. U.S.A.
- Metaxas, A. and Meredith, R. 1983. **Industrial Microwave Heating.** Peter Peregrinus, London, U.K.
- Morales, S., and Junco, V., and Malo, L. and Garcia, H. 2010. "Dielectric properties of foods." **LWT- Food Science and Technology.** 43, 8:1169-1179.
- Motavali, A., and Najafi, G., and Abbasi, S. and Minaee, S. 2013. "Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks." **J Food Sci Tech Mys.** 50, 4: 714-722.
- Nathakaranakule, A., and Jaiboon, P. and Soponronnrit, S. 2010. "Far- Infrared Radiation Assisted Drying of Longan Fruit." **Journal of Food Engineering.** 100, 4: 662-668.
- Nimmol, C., and Devahastin, S., and Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S. 2007. "Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying." **Elsevier Science.** 27, 14-15: 2483-2494.
- Paengkanya, S., and Soponronarit, S. and Natakaranakule, A. 2015. "Application of Microwaves for Drying of Durian Chips." **Food and Bioproducts Processing.** 96: 1-11.
- Raikham, C., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2015. "Influences of Pretreatments and Drying Process Including Fluidized Bed Puffing on Quality Attributes and Microstructural Change of Banana Slices." **Drying Technology.** 33, 8 (May): 915-925.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ressing, H., and Ressing, M. and Durance, T. 2007. "Modeling the mechanisms of puffing during vacuum microwave drying using the finite element method." **Journal of Food Engineering**. 82: 498-508.
- Regier, M., and Knoerzer, K. and Schubert, H. 2005. **The microwave processing of foods**. Woodhead. UK.
- Shaik, K. and Kailappan, R. 2006. "Modelling of Thin-Layer Drying Kinetics of Red Chillies." **Journal of Food Engineering**, 76, 4: 531-537.
- Soponronnarit, S., and Nuimeem, M. and Bunnag, B. 1993. "Maintaining Qualities, Minimizing Time and Energy Consumption in Pineapple Glace Drying". **RERIC International Energy Journal**. 15: 33-48.
- Srivastava, B., Singh, K.P. and Zimik, W. 2009. "Effects of Blanching Methods on Drying Kinetics of Oyster Mushroom." **International Journal of Food Engineering**. 5, 4 (January): 1-13.
- Tan, L., and Chang, J.S., and Costa, A. and Schedl, P. 2001. "An autoregulatory feedback loop directs the localized expression of the Drosophila CPEB protein Orb in the developing oocyte." **Pubmed**. 128, 7 (April): 1159-1169.
- Varith, J., and Dijkanarukkul, P., and Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. 2007. "Combined microwave-hot air drying of peel logan." **Journal of Food Engineering**. 81: 459 – 468.
- Wang, J. and Sheng, K. 2006. "Far-infrared and microwave drying of peach." **LWT-Food Science and Technology**. 39, 3: 247-255.
- Wodjdylo, A., and Figiel, A. and Oszmianski, J. 2014. "Effect of Drying Methods with the Application of Vacuum Microwaves on the Bioactive Compounds, Color, and Antioxidant Activity of Strawberry Fruits." **J Agric Food Chem**. 57, 4: 1337-1343.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Zhang, J., and Zhang, M., Shan, L. and Fang, Z. 2007. "Microwave-vacuum heating conditions for processing savory crisp bighead carp slices." **Journal of Food Engineering**. 79, 3: 885-891.



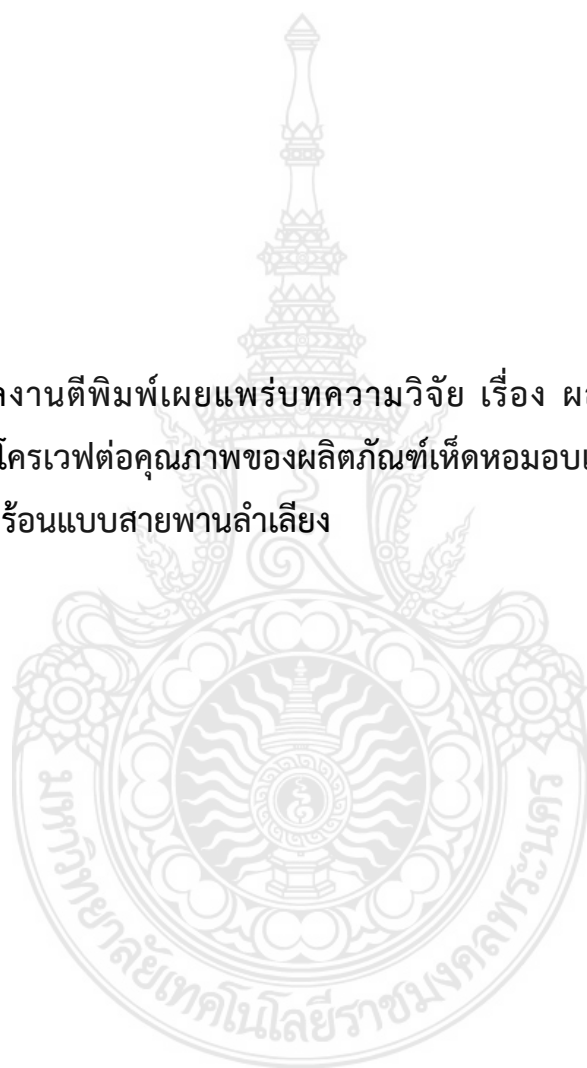


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง ผลกระทบของระดับกำลัง
ไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับ
ลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟ
ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง ผลกระทบของระดับกำลัง
ไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับ
ลมร้อนแบบสายพานลำเลียง



การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
 Proceedings of the 5th RMUTP Conference on Engineering and Technology



การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5

The 5th RMUTP Conference on Engineering and Technology 2021

RMUTP



The 5th ENGCON - RMUTP 2021

MODERN INDUSTRIAL DEVELOPMENT

"การวิจัยเชิงนวัตกรรม เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม"

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
 Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

ผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

Effect of Microwave Power Levels on Dried Shiitake Mushroom Using Combined Microwave-Hot Air with Belt Conveyor

ลิสสา มิตรประยูร¹ และ สุวิทย์ เพ่งกันยา²

สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 [ลิสสา มิตรประยูร¹] | เลขววงศักรัง เลขตบวงศักรัง | กรุงเทพมหานคร 10800 | E-mail: suwit.p@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงระดับกำลัง 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 °C เปรียบเทียบด้วยโดยพิจารณาคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งในด้านเนื้อสัมผัส การคืนตัว ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี และ โครงสร้างระดับจุลภาค จากผลการทดลองพบว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าการคืนตัวสูงกว่า และมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟส่งผลให้เห็ดหอมมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น การคืนตัวเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีต่ำกว่า 0.6 โดยเงื่อนไขที่แนะนำสำหรับผลิตเห็ดหอมอบแห้งคืออบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 600 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C

คำสำคัญ: การคืนตัว, การอบแห้งไมโครเวฟ, ความแข็ง, โครงสร้างระดับจุลภาค

Abstract

The objective of this research is to study the effect of microwave power level on product qualities of dried shiitake mushroom using combined microwave-hot air with belt conveyor (MWA-BC) compared with hot air (HA) drying method. The shiitake mushrooms were dried by MWA-BC at power levels of 400 W, 500 W and 600 W combined with HA at 65 °C. The qualities of dried shiitake mushroom were considered in terms of texture, rehydration, water activity and

microstructure. From experimental results, it was found that dried shiitake mushroom from MWA-BC drying method showed larger pore sizes, a higher rehydration, but a lower hardness than that HA drying. Increasing the microwave power resulted in the shiitake mushroom gave a larger pore size, more rehydration, but the lower hardness. In addition, it was found that the dried shiitake mushrooms in all experimental conditions had lower water activity than 0.6. The recommended condition for producing the dried shiitake is MWA-BC drying method at power of 600 W combined with value HA at 65 °C.

Keywords: Rehydration, Microwave drying, Hardness, Microstructure

1. บทนำ

เห็ดหอมเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงช่วยให้ระบบการย่อยดีซึ้งและลดสามารถระดับโคเลสเตอรอลในเลือดได้ โดยเห็ดหอมนิยมนำมาประกอบอาหารด้วยการต้ม นึ่ง แงง และตุ๋น เป็นต้น ส่วนใหญ่อยู่ในแบบเก็บรักษาในรูปแบบของเห็ดลมอบแห้ง เนื่องจากมีกลิ่นหอมและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน แต่อย่างไรก็ตามเห็ดหอมแห้งมักใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้เวลานาน ผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยลมร้อนมีการหดตัวและความแข็งสูง การคืนตัวต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดหรือไมโครเวฟ [1]

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเป็นวิธีการอบแห้งทางเลือกหนึ่งที่สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ กล่าวคือผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่าการคืนตัวสูง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อของวัสดุได้โดยตรงจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของน้ำในวัสดุ โดยที่เนื้อความชื้นภายในเนื้อของวัสดุผ่านกลไกของอนุภาคและโมเลกุลที่มีขั้วเกิดการเคลื่อนที่และการเสียดสีกันจนเกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่สลับไปมาอย่างรวดเร็วจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อน [2, 3] ดังนั้นการใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งทำให้อัตราการ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

ถ่ายเทมวลเร็วขึ้น เวลาการอบแห้งจึงสั้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของตัว มีโครงสร้างรูพรุนภายใน การหดตัวต่ำ การคืนตัวสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว [1] แต่การอบแห้งที่มีอัตราการถ่ายเทมวลที่เร็วเกินไป อาจเกิดผลเสียต่อเนื่องสัมผัส บางครั้งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจพบรอยไหม้ในบางตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ จากความไม่สม่ำเสมอของกลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้โดยการกำหนดค่าให้สอดคล้องกันที่ภายในห้องอบแห้งเพื่อลดการกระจายคลื่นที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวัสดุอบแห้งยังสามารถดำเนินการได้โดยการลดวัสดุก่อนการอบแห้งช่วยให้อายุที่สัมผัสของวัสดุเกิดการหมุนตัวได้ดี [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อคุณภาพของเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดหอม

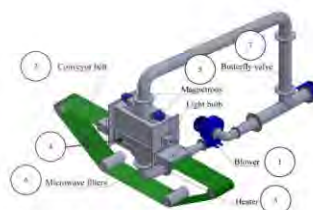
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง

นำเห็ดหอมจากซูเปอร์มาร์เก็ตคัดเลือกเห็ดหอมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 4-5 cm คัดเขาเห็ดหอมใช้เฉพาะหมวกเห็ด นำมาหมวกเห็ดล้างน้ำแล้ววางบนตะแกรงประมาณ 5 นาที จากนั้นนำเห็ดหอมลวกด้วยน้ำร้อน 95 °C เป็นเวลา 4 นาที เพื่อทำให้สุก และทำให้เนื้อสัมผัสของเห็ดหอมมีความหยุ่นตัวเพิ่มขึ้น โดยใช้เห็ดหอม 500 กรัม ต่อปริมาณน้ำ 2 ลิตร เมื่อลวกด้วยน้ำแล้วนำมาย่างบนตะแกรงเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิแห้งๆ ความชื้นของเห็ดหอมก่อนและหลังอบแห้งหาได้ตามวิธีมาตรฐาน AOAC [5]

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ (1) เครื่องเป่าลม (L.DF.TB-0400) ขนาดกำลัง 0.4 kW (2) สายพานลำเลียง (3) แมกนีตรอนขนาด 800 W จำนวน 2 ตัว (4) ห้องอบแห้ง (5) เครื่องทำความร้อนขนาด 3 kW (6) ตัวกรองกลิ่นไมโครเวฟ และ (7) วาล์ว



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพาน [2]

2.3 วิธีการทดลอง

เปิดเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนด้วยสายพานลำเลียงจนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นในระดับที่ต้องการซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที นำตัวอย่างเห็ดหอมที่เตรียมไว้แล้วซึ่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 500 กรัม วัดอุณหภูมิของตัวอย่างเริ่มต้นและบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำตัวอย่างเห็ดหอมวางเรียงบนสายพานลำเลียง แล้วเริ่มการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิการใช้กำลังไมโครเวฟ 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม 0.3 m/s ความเร็วสายพาน 0.6 cm/min และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยใช้เงื่อนไขของอุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลม และอากาศหมุนเวียนเดียวกันกับวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง การทดลองดำเนินการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 11.1% ฐานแห้ง

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเห็ดหอมอบแห้งใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Model JEOL S800LV, Tokyo, Japan) โดยนำเห็ดหอมอบแห้งมาหักออก แล้ววางลงบน Stub ฉาบทองที่ผิวตัวอย่าง จากนั้นนำเห็ดหอมที่ฉาบทองเรียบร้อยแล้วส่องจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้ Accelerating Voltage 10 kV ถ่ายภาพโครงสร้างที่ตำแหน่งต่างๆ ของเห็ดหอมใช้ถึงขนาด 500 เท่า

2.5 การทดสอบคุณภาพด้านการกินตัว

การกินตัวของเห็ดหอมอบแห้งคือความสามารถในการดูดน้ำกลับของเนื้อเห็ดหอม โดยหาได้จากน้ำหนักของเนื้อเห็ดหอมอบแห้งหลังการกินตัวเทียบกับน้ำหนักของเนื้อเห็ดหอมก่อนการกินตัว การทดสอบเริ่มจากนำเห็ดหอมอบแห้งมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า และนำเห็ดหอมอบแห้งตัวในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C จากนั้นนำมาชั่ง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
 Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

น้ำหนักและบันทึกค่าของน้ำหนักทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที การคืนตัวของเนื้อหัดหอบแห้งหาได้จากสมการ (2)

$$R_{\text{hydration}}(\%) = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

W_t คือ มวลของหัดหอบที่ผ่านการคืนตัวแล้วที่เวลาใดๆ, kg

W_d คือ มวลของหัดหอบแห้ง, kg

2.6 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดลองคุณภาพเนื้อสัมผัสของหัดหอบแห้งที่ жарณาเฉพาะค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System, model TA.XT. Plus, Surrey, UK) ที่ความแม่นยำ 0.001 N โดยใช้หัวกดชนิดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความเร็วก่อนกด 1 mm/s ความเร็วหัวกดขณะกด 1 mm/s และความเร็วจนถึงจุด 10 mm/s กดจนขึ้นตัวอย่างทะลุ โดยทดสอบค่าความแข็งของตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.7 การหาข้อต่อแอกทีวิตี

ค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของหัดหอบแห้งทดสอบด้วยเครื่อง Water Activity (Novasina Model Lab Master-aw, Switzerland) ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C โดยหัดหอบเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในภาชนะทดสอบที่ปริมาตร 3/4 ของภาชนะ จากนั้นนำภาชนะทดสอบที่บรรจุหัดหอบแห้งใส่เข้าไปในเครื่อง โดยทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

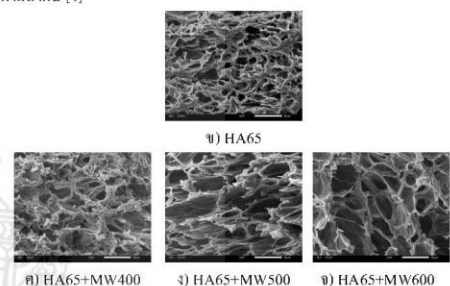
ข้อมูลจากการทดสอบค่าความแข็งและวอเตอร์แอกทีวิตีของหัดหอบแห้งนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's test ด้วยโปรแกรม SPSS โดยพิจารณาความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการวิจัย

3.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของหัดหอบแห้ง

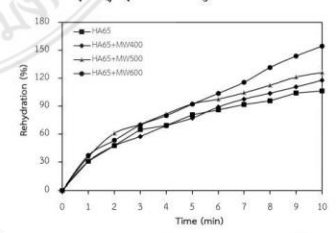
ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของหัดหอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ แสดงในรูปที่ 3 พบว่า หัดหอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายนาลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าหัดหอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิของวัสดุสูงกว่า โดยภายในวัสดุดูด

ซับพลังงานไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนไปเป็นความร้อน โดยความร้อนถูกกำเนิดขึ้นภายในวัสดุแล้วสร้างความดันไอน้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการขยายตัวทำให้เกิดรูพรุน โดยขนาดของรูพรุนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้น โดยพบว่าเงื่อนไขการอบแห้ง HA65+MW600 มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่กว่ากรณีอบแห้งด้วยเงื่อนไข HA65+MW500 และ HA65+MW400 ตามลำดับ [4]



3.3 การคืนตัวของหัดหอบแห้ง

การคืนตัวของหัดหอบที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ แสดงในรูปที่ 3 พบว่าหัดหอบที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายนาลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าการคืนตัวในน้ำร้อนได้สูงกว่าหัดหอบที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากขนาดของรูพรุนภายในเนื้อของวัสดุมีขนาดใหญ่กว่าจึงสามารถดูดซับน้ำร้อนกลับได้ดีกว่า [4] เมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อค่าการคืนตัวของหัดหอบแห้ง พบว่าการเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายนาลำเลียงมีค่าการคืนตัวของหัดหอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเงื่อนไข HA65+MW600 มีค่าการคืนตัว 154.4% สูงกว่าเงื่อนไขการอบแห้งอื่นๆ เนื่องจากเนื้อของวัสดุเกิดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเงื่อนไขการอบแห้งอื่น



รูปที่ 3 การคืนตัวของหัดหอบที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

3.3. เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้ง

ค่าความแข็งและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ เปรียบเทียบกับเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนและเห็ดหอมจากตลาดสดในตารางที่ 2 พบว่า เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีโครงสร้างภายในเนื้อของวัสดุเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า [1] ในขณะที่การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้เห็ดหอมอบแห้งมีค่าความแข็งลดลง โดยเห็ดหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไข HA65+MW600 มีค่าความแข็งต่ำที่สุดคือ 96.70 N รองลงมาคือ HA65+MW500 และ HA65+MWA400 มีค่าความแข็ง 104.69 N และ 137.11 N ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับกำลังไมโครเวฟทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการขยายตัวเกิดเป็นรูพรุนจากสาเหตุของความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกของวัสดุมากขึ้น [4] นอกจากนี้ยังพบว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 แสดงให้เห็นว่าเห็ดหอมอบแห้งมีความปลอดภัยแก่จุลินทรีย์หรือเป็นไปดหมยธรรมชาติ

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งและวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying method	Hardness (N)	Water activity	Drying time (h)
Blanched mushroom	8.67±1.72 ^a		
HA65	142.45±27.19 ^b	0.502±0.012 ^b	14
HA65+MW400	137.11±9.85 ^b	0.563±0.010 ^b	8
HA65+MW500	104.69±21.37 ^c	0.525±0.010 ^b	6
HA65+MW600	96.70±15.66 ^c	0.479±0.003 ^a	4

อักษรย่อค่าที่แตกต่างกันโดยมีเครื่องหมายแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.005$)

4. สรุป

การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบสายพานลำเลียงสามารถปรับปรุงคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งได้ โดยเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า การคืนตัวสูงกว่า และมีค่าความแข็งต่ำกว่าเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้นส่งผลให้เห็ดหอมอบแห้งมี

ขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การคืนตัวสูงขึ้น และมีค่าความแข็งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของเห็ดหอมอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าไม่เกิน 0.6 โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการผลิตเห็ดหอมอบแห้งคือใช้กำลังไมโครเวฟที่ 600 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการศึกษาดูแลสหกรณ์เพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณ ศศ.ดวงกมล หังสดีศพร หัวหน้าสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบคุณภาพเห็ดหอมอบแห้งด้านเนื้อสัมผัส และวอเตอร์แอกทิวิตี และขอขอบคุณ รศ.ดร.อดิศักดิ์ นวกกรมกุล ประธานสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Nathakaranakule, S. Paengkanya and S. Soponronnarit, "Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input", *Food and Bioproducts Processing*, Vol. 116, pp. 105-117, 2019.
- [2] สิทธิชัย ศรีไทย, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง", วิทยุวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-109, 2559.
- [3] H. Kantrong, A. Tansakul and G. S. Mittal, "Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying", *J. Food Sci Technol*, Vol. 51(12), pp. 3594-3608, 2014.
- [4] S. Tabtiang and S. Prachayawarakorn, "Effects of banana ripeness and puffing temperature on puffed banana qualities and drying time", *International Journal of Agricultural Technology*, Vol. 13(2), pp. 281-292, 2017.
- [5] Association of Official Analytical Chemists Official Methods of Analysis of the AOAC International, 16th ed., Gaithersburg, MD., 1995.

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย เรื่อง การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟ
ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหกรรมนคร ครั้งที่ 5
Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

Shiitake Mushroom Drying Using Combined Microwave-Hot Air with Belt Conveyor

อิดา มิตรประยูร¹, อุวิทย์ แหงกันยั และ ณัฐพรพล รัชสิริ วัชรบูล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 ¹LISA-M@rmutp.ac.th, ²suwit.p@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตเห็ดหอมอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลานานส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งเห็ดหอมโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 400 W, 500 W และ 600 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยเห็ดหอมลดกัมมันตภาพรังสีประมาณ 877.4-1,037.1% ฐานแห้ง อบแห้งจนตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง โดยประเมินจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพสีของเห็ดหอมอบแห้ง จากการทดลอง พบว่าวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง และส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ในขณะที่คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสีไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ, จลนพลศาสตร์การอบแห้ง, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เห็ดหอมอบแห้ง

Abstract

The production of dried shiitake mushroom using hot air (HA) drying used a long time, resulting in high specific energy consumption (SEC). Therefore, this research aims to improve shiitake drying process using combined microwave-hot air with belt conveyor at 400 W, 500 W and 600 W combined with HA at 65 °C compared with HA drying method. The shiitake mushroom had moisture content of approximately 877.4-1,037.1% dry base (d.b.). The shiitake-mushroom dried until they remained the final moisture content of not more than 11.1% db. Drying kinetic, SEC and color quality of dried shiitake

mushroom were considered. From the experiment, it was found that drying method using combined microwave-hot air with belt conveyor (MWA-BC) in all experimental conditions had higher changing moisture ratio than HA drying method, resulting in a shorter drying time and lower SEC. Increasing the level of microwave power in MWA-BC increases the change in moisture ratio, resulting in a reduction of drying time, and resulted in lower SEC. While the color quality of all dried products had no different in color values.

Keywords: Microwave drying, Drying kinetic, Specific energy consumption, Dried shiitake mushroom

1. บทนำ

เห็ดหอมเป็นที่ขจรชุกชิดหนี่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งโปรตีน แร่ธาตุ วิตามินดี และมีกลิ่นหอม นิยมบริโภคสำหรับเป็นยาอายุวัฒนะ และใส่ในน้ำซุป [1] อย่างไรก็ตามเห็ดหอมมีอายุการเก็บรักษาสั้น ง่ายเสียง่าย ดังนั้นจึงมีการนำเห็ดหอมมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าให้กับเห็ดโดยการตากแดดหรือการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งทั้งสองวิธียังใช้เวลาในการอบแห้งนาน การตากแดดมีข้อเสียคือวัสดุอาจเปื้อนเป็นเชื้อโรคและการตากแดดขึ้นกับสภาพอากาศ ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนมีข้อเสียใช้เวลาอบแห้งนาน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก [2]

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟให้ความร้อนกับวัสดุเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ส่งผลความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานที่อยู่ในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความชื้นในอาหารจะถูกขับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยความร้อนถูกกักเก็บขึ้นภายในเนื้อของวัสดุจากการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะไฟฟ้าอย่างรวดเร็วกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำถูกกระตุ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการเสียดสีกันไปมาและไออนชนกัน ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว [2, 3] แต่อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟมักไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดบริเวณจุดร้อน

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหกรรมนคร ครั้งที่ 5
 Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

$$SEC = \frac{2.6E_{Microwave} + E_{Heater} + 2.6E_{Blower}}{M_w} \quad (1)$$

เมื่อ
 SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง,
 MJ/kg ของน้ำระเหย
 $E_{Microwave}$ คือ พลังงานที่ใช้สำหรับไมโครเวฟ, MJ
 E_{Heater} คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องทำความร้อน, MJ
 E_{Blower} คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลม, MJ
 M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเห็ดหอมอบแห้ง, kg

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

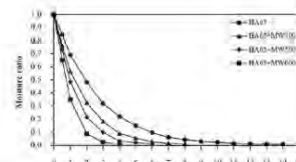
ข้อมูลค่าสีของเห็ดหอมอบแห้งวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's test ด้วยโปรแกรม SPSS โดยพิจารณาความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการวิจัย

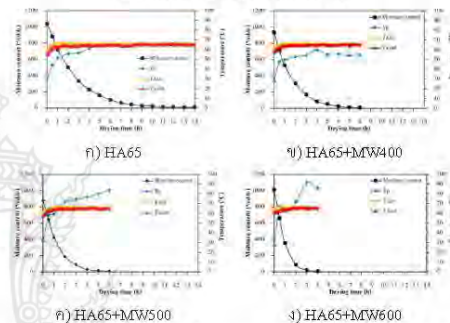
3.1 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งเห็ดหอม

การอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับเครื่องแบบสายพานลำเลียงที่กำลัง 400 W, 500 W และ 600 W เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่อง 65 °C โดยเห็ดหอมมีความชื้นเริ่มต้นหลังการลวกอยู่ระหว่าง 877.4-1,037.1% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งเห็ดหอมมีความชื้นไม่เกิน 11.1% ฐานแห้ง จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงในรูปที่ 2 และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม และอุณหภูมิของลมร้อนในขณะอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงในรูปที่ 3 พบว่า วิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยไมโครเวฟร่วมกับเครื่องแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยเครื่องร้อนแบบสายพานลำเลียงทุกเงื่อนไขการทดลองสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนคงแสดงในรูปที่ 3 ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำภายในวัสดุสูงกว่า ทำให้ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากน้ำภายในวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนแปลงไปเป็นความร้อนผ่านกลไกการเสียดสีกันของโมเลกุลของน้ำและไอออนบวกกระตุ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าสลับกลับไปกลับมามีอย่างรวดเร็ว [2]

การเพิ่มขึ้นของระดับกำลังไมโครเวฟในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับเครื่องแบบสายพานลำเลียงทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเห็ดหอมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่า ทำให้การถ่ายเทมวลน้ำภายในวัสดุมากกว่า ทำให้เวลาอบแห้งลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเห็ดหอมในขณะอบแห้งแบบต่างๆ [HA คือ เครื่องร้อน, 65 คือ อุณหภูมิ 65 °C, MW คือ ไมโครเวฟ และ 400 คือ กำลังไมโครเวฟ 400 W]



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม และอุณหภูมิของลมร้อนในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

3.2 สีของเห็ดหอมอบแห้ง

สีของเห็ดหอมก่อนและหลังอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งมีค่าความสว่าง (L*) อยู่ในช่วง 14.00-16.93 ค่าสีแดง (+a*) อยู่ในช่วง 0.82-1.40 และค่าสีเหลือง (+b*) อยู่ในช่วง 0.77-1.45 โดยทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสีต่ำกว่าเห็ดหอมสด เนื่องจากในระหว่างอบแห้งเห็ดหอมจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เอนไซม์มาเกี่ยวข้องจากผลของอุณหภูมิของวัสดุที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเห็ดหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ มีค่าสีไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 สีของเห็ดหอมอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Drying method	L*	a*	b*
Blanched mushroom	24.31± 1.89 ^a	5.19± 1.50 ^a	6.10± 0.65 ^a
HA65	14.00± 1.57 ^a	1.21± 0.65 ^a	1.04± 0.45 ^a
HA65+MW400	14.70± 1.68 ^{ab}	0.82± 0.48 ^a	0.99± 0.51 ^a
HA65+MW500	16.22± 2.41 ^{bc}	0.91± 0.64 ^a	0.77± 0.38 ^a
HA65+MW600	16.93± 1.12 ^c	1.40± 0.69 ^a	1.45± 0.71 ^a

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในตอนต้นด้วยตัวอักษรแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ (p<0.05)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 5
Proceedings of the 5th RMUTP Conference of Engineering and Technology

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งแห้งหอมแตงเดือนไข้แสดงในตารางที่ 2 พบว่า วิธีการอบแห้งแห้งหอมแตงเดือนไข้ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิ 600 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิ 400 W เป็น 500 W และ 600 W ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมลดลงจาก 107.27 MJ/kg water evaporated เป็น 97.65 MJ/kg water evaporated และ 85.74 MJ/kg water evaporated ตามลำดับ เนื่องจากการใช้เวลาอบแห้งลดลงจาก 8 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paengkanya et al. [2] ที่ศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

W ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมลดลงจาก 107.27 MJ/kg water evaporated เป็น 97.65 MJ/kg water evaporated และ 85.74 MJ/kg water evaporated ตามลำดับ เนื่องจากการใช้เวลาอบแห้งลดลงจาก 8 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paengkanya et al. [2] ที่ศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying method	Drying time (h)	Evaporated water (kg)	SEC (MJ/kg water evaporated)						
			Heater	Blower	Microwave 1	Microwave 2	Total energy		Overall Energy
							Heat	Electricity*	
HA65	14	0.3131	105.08	20.33	-	-	105.08	20.33	125.41
HA65+MW400	8	0.3118	59.24	12.31	34.02	11.71	59.24	48.04	107.27
HA65+MW500	6	0.3108	35.91	9.04	31.62	21.08	35.91	61.74	97.65
HA65+MW600	4	0.3119	27.82	6.00	29.71	22.21	27.82	57.92	85.74

หมายเหตุ: *ค่าพลังงานไฟฟ้าในตารางเป็นค่าที่แสดงในรูปของพลังงานความร้อนด้วยคุณค่าแฟคเตอร์การแปลงพลังงาน 2.6

4. สรุป

การนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งแห้งหอมแตงเดือนไข้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดยวิธีการอบแห้งแห้งหอมแตงเดือนไข้ร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิ 600 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงที่อุณหภูมิ 400 W เป็น 500 W และ 600 W ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำ การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟทำให้ความอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าแห้งหอมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ มีค่าสีไม่แตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ อุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบคุณภาพแห้งหอมอบแห้งด้านสี เนื้อสัมผัส และวอเตอร์แอกทีวิตี และขอขอบคุณ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติ แจ่มใจ, อุทธรณ์ เกติพันธ์, วรารักษ์ สุขธิษณเลิศ, ทิพาพร อยู่วิทยา และนภาพร รัตนสมบูรณ์, "ผลของสภาวะการอบแห้งต่อปริมาณสารให้กลิ่นในแห้งหอม", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 24, ฉบับที่ 3, หน้า 288-297, กันยายน-ธันวาคม, 2544.
- [2] S. Paengkanya, S. Soponronnarit and A. Nathakannakule, "Application of microwave for drying of durian chips", *Food and Bioprocess Processing*, Vol. 96, pp. 1-11, 2015.
- [3] สิริธิชัย ศรีไทย, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมวงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง", วิทยานิพนธ์การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-109, 2559.
- [4] Association of Official Analytical Chemists Official Methods of Analysis of the AOAC International, 16th ed., Gaithersburg, MD, 1995.
- [5] A. Acharyaviriyi, S. Soponronnarit and J. Tiansuwan, "Study of longan flesh drying", *Drying Technology*, Vol. 19, pp. 2315-2329, 2001.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาว ลีสา มิตรประยูร
 วัน เดือน ปีเกิด 5 กุมภาพันธ์ 2515
 ภูมิลำเนา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
 ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
Graduate Diploma (Nuclear Technology)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2544
ศศ.บ. (บริหารการศึกษา)	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช	2548
วศ.บ. (ไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2542

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

-

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ

- ผู้วิจัย โครงการวัดระดับคุณภาพของสัญญาณ WIFI และสัญญาณโทรศัพท์เครือข่าย TRUE ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และ บริเวณรอบ ๆ รัศมีรวม 5 กิโลเมตร
- ผู้ร่วมวิจัย โครงการวิจัย เรื่องโครงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาวะไหลตของเครื่องทำน้ำเย็นแบบกับอุณหภูมิและพึงพอใจของผู้ใช้บริการศูนย์การแพทย์สมเด็จพระเทพรัตนสุตาฯ สยามบรมราชกุมารี อำเภอ องค์กรักษ์ จังหวัด นครนายก