



การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล
โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Product Development of Dried Nam Dok Mai Mango (*Mangifera indica* L.)
Without Sugar Solution Using Infrared Combined with Hot Air Drying

สุธินันท์ พัชรัชต์วิรากุล
Sutinon Patcharatvirakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566



การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล
โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Product Development of Dried Nam Dok Mai Mango (*Mangifera indica* L.)
Without Sugar Solution Using Infrared Combined with Hot Air Drying

สุธินันท์ พัชรัชต์วิรากุล
Sutinon Patcharatvirakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วิทยานิพนธ์	การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
ชื่อ นามสกุล	สุธินันท์ พันธ์ศิริวิรากุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน)
สาขาวิชา	วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล)

..... กรรมการ
(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

..... กรรมการและที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 22 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
ชื่อ นามสกุล	สุธินันท์ พิชร์ชัยวิรากุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อน โดยประเมิน จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของ มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง โดยนำมะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 18-19 °Brix หั่นเป็นแผ่นด้วยความหนา 1.5 cm อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 70-90 °C เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับ ลดระดับอุณหภูมิที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C และ 100 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง และการอบแห้งด้วยลมร้อน 70 °C โดยทั้งสามวิธีดำเนินการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นไม่ เกินร้อยละ 15 ฐานแห้ง จากผลการทดลอง พบว่าวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งอื่น ทำให้ใช้เวลาอบแห้งสั้น ส่งผลให้มีความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะทางด้านไฟฟ้าต่ำกว่าวิธีการอบแห้งอื่น มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับ ลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C มีค่าความสว่างของสี (L^*) ร้อยละของการหดตัว ความแข็ง และความหยุ่นตัวต่ำ กว่า แต่มีค่าสีแดง ($+a^*$) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) สูงกว่า และมีโครงสร้างภายในรูพรุนขนาดใหญ่กว่า เจือปนไขการอบแห้งอื่น ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับ อุณหภูมิที่ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความสว่างของสีและค่าสีเหลืองสูงที่สุด แต่ค่าสีแดงต่ำที่สุด การเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้งในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งทำให้ มะม่วงอบแห้งมีค่าความสว่างของสี ค่าสีเหลือง ความแข็ง ความเหนียว และเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลง แต่สีแดงเพิ่มขึ้น และขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น โดยเงื่อนไขที่แนะนำสำหรับอบแห้งมะม่วงคืออบแห้งด้วย อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วย 80 °C เป็น เวลา 1 ชั่วโมง และตามด้วย 70 °C

คำสำคัญ : การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน, มะม่วงอบแห้ง, จลนพลศาสตร์การอบแห้ง, ความแข็ง, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Thesis Title	Product Development of Dried Nam Dok Mai Mango (<i>Mangifera indica</i> L.) Without Sugar Solution Using Infrared Combined with Hot Air Drying
Author	Sutinon Patcharatvirakul
Degree	Master of Engineering (Sustainable Industrial Management Engineering)
Major Program	Sustainable Industrial Management Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2023

ABSTRACT

This research aims to develop dried “Nam Dok Mai” mango products using Far-Infrared combined with hot air (FIR+ HA) at constant temperature and temperature-reducing mode compared to hot air (HA) drying. The drying kinetics, specific energy consumption of the drying process, and quality of dried mangoes were evaluated. Mangoes with a total soluble solids content of 18–19 °Brix were sliced to a thickness of 1.5 cm and dried using infrared combined with hot air at a power of 650 W and hot air at a temperature of 70–90 °C. This was compared to infrared drying combined with hot air with temperature reduction at a power of 650 W, hot air at a temperature of 90 °C and 100 °C for 1-2 hours, and hot air drying at 70 °C. All three methods were dried until the samples had a moisture content of no more than 15% dry basis. The results showed that the infrared drying method combined with hot air at 90 °C had a higher drying rate than other drying methods, resulting in a shorter drying time and lower specific electrical energy consumption than other drying methods. Mangoes dried with infrared combined with hot air at 90 °C had lower lightness (L^*), shrinkage percentage, hardness, and elasticity, but higher redness ($+a^*$) and yellowness ($+b^*$) values, and a larger porous structure than other drying conditions. Meanwhile, mangoes dried with infrared combined with hot air at a temperature reduction of 90 °C for 1 hour had the highest lightness and yellowness values, but the lowest redness value. Increasing the temperature and drying time in the first step of the drying process resulted in lower lightness, yellowness, hardness, toughness, and shrinkage percentages, but higher redness and larger pore size. The recommended conditions for drying mangoes are drying with infrared combined with hot air at a temperature reduction of 90 °C for 1 hour, followed by 80 °C for 1 hour, and 70 °C for 1 hour.

Keywords : Infrared Combined with Hot Air Drying, Dried Mango, Drying Kinetics, Hardness, Specific Energy Consumption

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาให้คำแนะนำ รวมถึงการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม เพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุน การทำวิจัย

สุธินันท์ พันธ์ศิริวิรากุล



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ฉ)
สารบัญภาพ	(ช)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 สมมติฐานการวิจัย	3
1.5 กรอบแนวความคิด	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 มะม่วง	5
2.2 วอเตอร์แอกทิวตี้	11
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	11
2.4 การแผ่รังสีอินฟราเรด	18
2.5 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล	23
2.6 การรักษาผลิตภัณฑ์เบื้องต้นโดยการให้ความร้อน	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.8 โอกาสในการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 วัสดุดิบ	32
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	34
3.3 วิธีทดลอง	36
3.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี	37

สารบัญ (ต่อ)

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	37
3.6 การทดสอบในการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี	38
3.7 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	39
3.8 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว	39
3.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง	40
3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ	41
บทที่ 4 ผลการวิจัย	42
4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้	42
4.2 คุณภาพสีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง	45
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง	48
4.4 การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง	49
4.5 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง	49
4.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้	50
บทที่ 5 อภิปรายผล	52
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	57
6.1 สรุปผลการวิจัย	57
6.2 ข้อเสนอแนะ	58
บทที่ 7 การนำไปใช้ประโยชน์	59
7.1 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ	59
7.2 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์	59
เอกสารอ้างอิง	60
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	65

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงน้ำดอกไม้สุก 100 กรัม	9
2.2 ลักษณะของรังสีอินฟราเรด	20
2.3 ความลึกของการทะลุทะลวงอาหารชนิดต่าง ๆ ต่อฟลักซ์ความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสีของอุปกรณ์แผ่รังสี	21
4.1 สีของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ	46
4.2 การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ	49
4.3 เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีต่างๆ	50
4.4 ความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ	51



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 มะม่วงเขียวเสวย	7
2.2 มะม่วงแรด	7
2.3 มะม่วงอกร่อง	8
2.4 มะม่วงน้ำดอกไม้	8
2.5 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากอาหารในระหว่างการอบแห้ง	11
2.6 การลดลงของความชื้นของวัสดุในการอบแห้ง	14
2.7 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา	17
2.8 การลดลงของการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิววัสดุ	18
2.9 การอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยการแผ่รังสี	19
2.10 โพรไฟล์ (a) กำหนดเป็นอุณหภูมิ และ (b) กำหนดเป็นความชื้นระหว่างการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีของแผ่นวัสดุขึ้นเมื่อ 1 คือ เงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือสภาวะไม่สม่ำเสมอ	20
2.11 การสูญหายของรังสี	22
3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้พันธุ์สีทอง	32
3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	33
3.3 เครื่องวัดความหวาน รุ่น RHB-32/ATC Optical Refractometer	34
3.4 แผนภาพของเครื่องอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	35
3.5 เครื่องอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	36
3.6 เครื่องวัดสี Spectrophotometer	37
3.7 เครื่อง Texture Analyzer	38
3.8 เครื่องวอเตอร์แอคทีวิตี	38
3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope	39
4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ในขณะอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ [HA คือ ลมร้อน, 70 80 90 100 คืออุณหภูมิ, + คือ การร่วม, FIR คือ อินฟราเรด และ 650 คือ กำลังอินฟราเรด, 1 1.5 และ 2 คือ เวลาอบแห้ง, h คือ ชั่วโมง, / คือ ตามด้วย]	43
4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ และอุณหภูมิลมร้อนในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.3 ลักษณะสีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ	47
4.4 ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วงเป็นผลไม้เมืองร้อนตระกูลเดียวกับมะปราง มีถิ่นกำเนิดในแถบภาคตะวันออกเฉียงของประเทศไทย ต่อมาได้กระจายพันธุ์ไปยังบริเวณพื้นที่เขตร้อนใกล้เคียง รวมถึงประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ซึ่งมะม่วงมีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญ ได้แก่ วิตามินเอ วิตามินซี วิตามินบี โพแทสเซียม ประโยชน์ของมะม่วงคือนำมารับประทานเป็นผลไม้สดทั้งที่รสเปรี้ยวหรือหวาน หรือมีการไปทำเป็นอาหารคาว-หวานต่าง ๆ เช่น มะม่วงย่ำ ตำมะม่วง หรือจะทำเป็นข้าวเหนียวมะม่วง มะม่วงแก้ว มะม่วงแช่อิ่ม มะม่วงกวน เป็นต้น (นิดดา หงส์วิวัฒน์ และทวีทอง หงส์วิวัฒน์, 2550) อีกทั้งประเทศไทยได้มีการส่งออกมะม่วงเป็นอันดับ 3 รองจากประเทศฟิลิปปินส์ และประเทศเม็กซิโก (อรพินธุ์ สฤษดิ์น้ำ, 2558) ซึ่งปริมาณการส่งออกมะม่วงในปี 2563 ทั้งหมดจำนวน 117,656,521 kg คิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 4,602,181,631 บาท โดยมีการส่งออกมะม่วงสดหรือแช่เย็นจนแข็งเป็นจำนวน 90,244,545 kg คิดเป็นมูลค่า 2,367,329,148 บาท มะม่วงบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้เป็นจำนวน 22,452,215 kg คิดเป็นมูลค่า 1,243,178,100 บาท และมะม่วงอบแห้งเป็นจำนวน 4,959,761 kg คิดเป็นมูลค่า 991,674,347 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) โดยเฉพาะมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเป็นมะม่วงพันธุ์ที่มีความนิยมมากและมีแนวโน้มที่ดีในการส่งออก เนื่องจากการซื้อขายมะม่วงน้ำดอกไม้ในปัจจุบันมีการคัดเกรดผลที่ผิวสวยและสมบูรณ์ทำให้มีราคาสูง แต่ก็มีมะม่วงที่ตกเกรดไม่สามารถขายในราคาสูงได้ ดังนั้นจึงนำเอามะม่วงที่ตกเกรดเหล่านั้นมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า ซึ่งการแปรรูปที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการอบแห้ง และยังสามารถเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลานานมากยิ่งขึ้น (ณพวีร์ หวังใจชื่น, 2560)

วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากจัดหาเครื่องอบแห้งได้ง่าย ราคาถูก และการใช้งานไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนมีข้อเสียคือระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนาน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก (ประทีป ตุ่มทอง และมงคล สาแก้ว, 2559) เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งค่อนข้างต่ำ (60-70 °C) เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งไม่มีสีคล้ำเกินไป ถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงมากกว่าที่กำหนดไว้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งเกิดสีเข้มและผิวเหี่ยวยุบมาก (ศักดิ์รินทร์ รัสศรี, 2541) ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งมาก เนื่องจากวัสดุสัมผัสกับลมร้อนเป็นระยะเวลานาน และส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานมาก

การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูง ทำให้ใช้เวลาอบแห้งสั้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำ และผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพดีกว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุได้โดยตรง ซึ่งผลไม้ส่วนใหญ่มีส่วนประกอบหลักคือแป้ง น้ำ และโปรตีน ซึ่งช่วยดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ดี (วีระ ศรีอริยะกุล, 2564) ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสะท้อนและเกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ น้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว วัสดุอบแห้งได้รับความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น (ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง และเกียรติศักดิ์ ศรีประทีป, 2562) นอกจากนี้ยังสามารถลดการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้ (Apintanapong, 2009) เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัจจุบันมีการนำวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนมาใช้กับผลไม้หลายชนิด เช่น ลำไย (เพชรรัตน์ ใจบุญ, 2549) กล้วยหอมทอง (ภูมิใจ สอาดโคม, 2548) มะม่วงน้ำดอกไม้ (สิทธิชัย ศรีไทย, 2559) ขนุน (สุภวรรณ ภูริระวินิชกุล และคณะ, 2555)

อย่างไรก็ตามการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากมะม่วงหลังการลอกเปลือกจะเกิดเป็นสีน้ำตาลที่บริเวณผิวอย่างรวดเร็วซึ่งการเตรียมตัวอย่างมีหลายวิธี เช่น การแช่ในสารเคมี การนึ่ง การลวก และการแช่น้ำอุ่น เป็นต้น การแช่น้ำอุ่นถือเป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างทางเลือกใหม่สำหรับรักษาคุณภาพสีของมะม่วงสุกซึ่งสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องได้ เนื่องจากการหั่นมะม่วงแล้วนำมาแช่น้ำอุ่นจะทำให้เนื้อมะม่วงและ การเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่น้ำอุ่นเป็นการนำมะม่วงแช่ลงในน้ำอุ่นทั้งลูกที่อุณหภูมิไม่สูงมากและในเวลาที่เหมาะสม จากงานวิจัยของ ณพวีร์ หวังใจชื่น (2560) พบว่าการแช่มะม่วงทั้งผลในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 47 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 35 นาที ทำให้มะม่วงอบแห้งมีค่าความสว่างของสีและสีเหลืองสูงกว่าแต่มีสีแดงต่ำกว่ามะม่วงอบแห้งที่ไม่ผ่านการแช่น้ำอุ่น นอกจากนี้การแช่น้ำอุ่นยังช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบได้ด้วย (นรินทร์ เจริญพันธ์ และน้ำทิพย์ มีมุข, 2561) ซึ่งเป็นการช่วยในการปรับปรุงคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (Raikham et al., 2015) นอกจากนี้การแช่น้ำอุ่นยังเป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ง่าย สะดวก และไม่ซับซ้อน

จากข้อดีของการประยุกต์ใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับการอบแห้งดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งทางด้านสี ความหยุ่นตัว ความแข็ง การหดตัว วอเตอร์แอคทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้านสี ความแข็ง ความหนืด การหดตัว วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้มะม่วงน้ำดอกไม้พันธุ์สีทอง (*Mangifera indica* L.) ที่มีขนาดน้ำหนักอยู่ในช่วง 300-330 กรัม และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 18-19 °Brix

1.3.2 แช่มะม่วงทั้งผลในน้ำที่อุณหภูมิ 47 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

1.3.3 หั่นเนื้อมะม่วงเป็นแผ่นขนาด 1.5 cm ตามแนวความยาวของผล โดยจะได้ 4 ชิ้นต่อผล

1.3.4 ใช้รังสีอินฟราเรดไกลที่กำลัง 650 W และใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70-100 °C

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การประยุกต์ใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยปราศจากการแช่สารเคมีคาดว่าจะสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้ง ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้านสี ความแข็ง ความหนืด การหดตัว วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุได้โดยตรง ก่อให้เกิดความร้อนจากภายในวัสดุ ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว

1.5 กรอบแนวความคิด

1.5.1 ศึกษากระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

1.5.2 ศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 47 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนการอบแห้ง

1.5.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้วิธีการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเพื่อสุขภาพด้วยรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.6.2 ได้ผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเพื่อสุขภาพปราศจากการใช้สารเคมีในกระบวนการอบแห้งที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบดั้งเดิม สำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ

1.6.3 วิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนสามารถลดเวลาในการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งลงได้ และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

การอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการลดความชื้นภายในวัสดุให้อยู่ในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

ความชื้นฐานเปียก (Wet basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุชื้นมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ของกระบวนการอบแห้ง คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งมีหน่วยเป็น MJ/kg น้ำที่ระเหย

รังสีอินฟราเรด (Infrared) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.76-1000 μm ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่สายตามองไม่เห็นแต่สามารถรับรู้ถึงความร้อนที่เกิดขึ้นได้ โดยรังสีอินฟราเรดมีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้ทุกประการ

วอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity) คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) คือ อัตราส่วนของผลต่างของปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ และความชื้นที่สมดุลต่อผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลของวัสดุ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะม่วง

2.1.1 ลักษณะของมะม่วง

มะม่วง (*Mangifera Indica* L.) เป็นผลไม้ที่จำหน่ายทั้งในรูปผลดิบและผลสุก พันธุ์มะม่วงที่นิยมส่งออกมักเป็นมะม่วงที่รับประทานผลสุก เช่น พันธุ์น้ำดอกไม้หนังกกลางวัน อกร่องทองดำ พิมเสนและแรด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565) มะม่วงเป็นไม้ผลที่นิยมปลูกแพร่หลายเพราะเป็นพืชที่ปลูกง่าย สามารถเจริญเติบโตได้ในดินเกือบทุกชนิด ทนต่ออากาศร้อนได้ดี จึงเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทยเนื่องจากสามารถบริโภคได้ทั้งดิบและสุก รสชาติอร่อย มีกลิ่นหอม และสามารถแปรรูปเก็บไว้สำหรับจำหน่ายหรือรับประทานนอกฤดู (สิทธิชัย ศรีไทย, 2559)

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะม่วงมีดังนี้

2.1.1.1 ราก

มะม่วงมีระบบเป็นรากแก้ว ความยาวของรากมีตั้งแต่ 6-8 เมตร หรือมากกว่า (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2556) สำหรับรากนั้นสามารถดูดซับอาหารได้หนาแน่นในบริเวณผิวดิน โดยลึกประมาณ 30-60 cm และแผ่กว้างออกเป็นรัศมีประมาณ 750 cm ในบางครั้งอาจเห็นรากมะม่วงเจริญโผล่ขึ้นมาบนดินให้เห็น หากขาดการพรวนดินพูนโคนเป็นเวลานาน

2.1.1.2 ลำต้น

ไม้ยืนต้น ลำต้นมีขนาดสูงประมาณ 10-14 m ลำต้นมีสีน้ำตาลเทาเกือบดำ เปลือกลำต้นแข็ง มีกิ่งก้านสาขาใหญ่และแข็งแรง (ออลส์เกษตร, 2567)

2.1.1.3 ใบ

ใบเดี่ยว ใบมะม่วงเป็นใบเดี่ยวเรียงตัวสลับกัน ทำให้มีลักษณะใบเรียงตัวเป็นเกลียว มีใบเกิดถี่ ใบไม่มีขน ด้านบนแผ่นใบเกลี้ยง ใบอ่อนมักมีสีออกแดง เมื่อใบแก่จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้ม ก้านใบยาว 1 – 10 เซนติเมตร แผ่นใบยาว 8 – 40 เซนติเมตร กว้าง 2 – 10 เซนติเมตร ใบมีรูปร่างแบบรูปโล่ รูปหอก รูปไข่ และเรียวยาว (ออลส์เกษตร, 2567)

2.1.1.4 ดอก

เป็นดอกช่อแยกแขนง ประกอบด้วยดอกไม่สมบูรณ์เพศ และดอกสมบูรณ์เพศในช่อเดียวกัน กลีบดอกมี 5 กลีบ กลีบเลี้ยงมี 5 กลีบ ดอกไม่สมบูรณ์เพศมีเกสรตัวผู้ 5 อัน เป็นหมัน 4 อัน ดอกสมบูรณ์เพศมีเกสรตัวผู้ 5 อัน มีเกสรตัวเมีย 1 อัน มีกลีบดอกสีขาวเหลือง (ออลล์ เกษตร, 2567)

2.1.1.5 ผล

ผลสด ผลเมล็ดแข็ง ผลอ่อนมีสีเขียว ผลแก่มีสีน้ำตาล ผลสุกมีสีเหลืองอมเขียว (ออลล์ เกษตร, 2567)

2.1.1.6 เมล็ด

เมล็ดอยู่ถัดจากผนังผลชั้นใน มีขนาดใหญ่ไปจนถึงเกือบไม่มีเมล็ด มีขนาดที่แตกต่างกันไปตามพันธุ์เปลือกหุ้มเมล็ดมีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น คือชั้นนอก และชั้นในเมล็ดบางชนิดเป็น (Monoembryony) ประกอบด้วย (Zygotic Embryo) เพียงอย่างเดียวส่วนเมล็ดบางชนิดเป็น (Polyembryony) ประกอบด้วยเอ็มบริโอ จำนวน 2–12 อัน ซึ่งเมล็ดแบบหลังนี้มี (Apomictic Embryo) เกิดจากผิวของเนื้อเยื่อ และลักษณะเด่นอีกอย่างของมะม่วงก็คือ มีน้ำยาอยู่ทุกส่วนของพืช (วนิสสา หวานเสนาะ, 2552)

2.1.3 ชนิดและสายพันธุ์ของมะม่วง

มะม่วงมีหลากหลายชนิดมีทั้งเพาะไว้บริโภคเอง และเพื่อการค้า โดยมะม่วงที่เพาะเป็นการค้าหลัก ๆ แบ่งออกเป็น 4 ชนิด (กมลรัตน์ นนทรี, 2546) ดังนี้

1) มะม่วงเขียวเสวย

เป็นมะม่วงยอดนิยมทั้งในประเทศ และต่างประเทศ นิยมรับประทานผลดิบหรือผลแก่เป็นหลัก เนื่องจากผลในระยะนี้จะมีสีขาวขุ่นหรือขาวขุ่นอมครีม เนื้อแน่น มีความกรอบ และมีรสหวานมัน จนได้รับขนานนามว่า “ราชินีของมะม่วงไทย”



ภาพที่ 2.1 มะม่วงเขียวเสวย
(อุทยานการอาชีพชัยพัฒนา, 2567)

2) มะม่วงแรด

เป็นผลไม้ที่เมื่อรับประทานแบบดิบจะมีรสเปรี้ยวจัด เมื่อแก่จัดมีรสหวานอมเปรี้ยว แต่ถ้าเป็นผลที่สุกจะมีผิวเป็นสีเหลือง เนื้อเหลือง รสหวาน มีเสี้ยนค่อนข้างมาก



ภาพที่ 2.2 มะม่วงแรด
(เทคโนโลยีชาวบ้าน, 2565)

3) มะม่วงอกร่อง

เป็นมะม่วงพันธุ์ท้องถิ่นของไทย พบปลูกมากในทุกครัวเรือนเพื่อรับประทานผลสุก ที่ให้รสหวานจัด หวานมากกว่ามะม่วงทุกชนิด และใช้ผลดิบสำหรับประกอบอาหาร อาทิ ข้าวคลุกกะปิ น้ำพริกมะม่วง และเมนูยำต่าง ๆ



ภาพที่ 2.3 มะม่วงอกร่อง

(องค์การบริหารส่วนตำบลคลองเขื่อน, 2567)

4) มะม่วงน้ำดอกไม้

เป็นมะม่วงที่นิยมรับประทานสุก ทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากผลสุกมีสีเหลืองทอง สวยงาม เนื้อมีสีเหลืองอมครีม เนื้อแน่นปานกลาง มีความนุ่ม รสหวาน นิยมรับประทานเป็นผลไม้สุกหรือใช้ทำขนมหวาน อาทิ ข้าวเหนียวมะม่วง ไอศกรีม เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 มะม่วงน้ำดอกไม้

(ยุนิ, 2567)

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการ

มะม่วงน้ำดอกไม้เป็นผลไม้ที่ช่วยลดไขมันในเส้นเลือดได้ดี และยังเป็นผลไม้ที่มีสรรพคุณในการป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น ช่วยในการป้องกันโรคหัวใจ ป้องกันโรคมะเร็ง ป้องกันโรคเบาหวานในการปรับสมดุลน้ำตาลในเลือด นอกจากนี้มะม่วงน้ำดอกไม้ยังเป็นตัวช่วยในการแก้ อาการคลื่นไส้ อาเจียน และอาการไอ (Puechkaset, 2560)

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงน้ำดอกไม้สุก 100 g

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ได้รับ	หน่วย
พลังงาน	79	kcal
น้ำ	80	g
น้ำตาล	15	g
ใยอาหาร	0.8	g
โปรตีน	0.06	g
ไขมัน	0.02	g
คาร์โบไฮเดรต	18.05	g
เกลือ	0.04	g
วิตามินซี	15	mg
โปแตสเซียม	197	mg
โซเดียม	2	mg
แมกนีเซียม	8	mg
แคลเซียม	4	mg
ฟอสฟอรัส	16	mg
ไอโอดีน	1.06	μg
เบต้าแคโรทีน	878	μg

ที่มา: สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2553)

2.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง

(ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร, 2560) ได้กำหนดมาตรฐาน ให้ผลิตภัณฑ์ในชุมชนผลไม้แห้งดังนี้

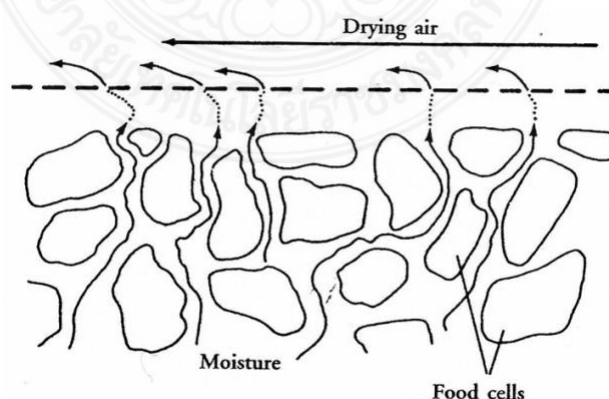
1. ลักษณะทั่วไป
ต้องคงลักษณะเนื้อที่ดีตามธรรมชาติของผักและผลไม้แห้ง ไม่เกาะติดกันการทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
2. สี
ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของผักและผลไม้แห้ง
3. กลิ่นและรสชาติ
จะต้องมีกลิ่นและรสชาติที่ดีตามธรรมชาติของผักและผลไม้แห้ง ปราศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นหืน กลิ่นอับ เป็นต้น
4. สิ่งแปลกปลอม
ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์
5. ความชื้น
ต้องไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก
6. วอเตอร์แอคทิวิตี
ต้องไม่เกินร้อยละ 0.75 (การทดสอบให้ใช้เครื่องวัดวอเตอร์แอคทิวิตีที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 บวกลบ 2 องศาเซลเซียส)
7. วัตถุเจือปนอาหาร
ห้ามใช้วัตถุกันเสียทุกชนิด หากมีการใช้สีและสารฟอกสี ให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด
8. จุลินทรีย์
 - 8.1 จุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องน้อยกว่า 1×10^6 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 g
 - 8.2 แซลโมเนลลา ต้องไม่พบในตัวอย่าง 25 g
 - 8.3 สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส ต้องน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 g
 - 8.4 เอสเชอริเชีย โคไล โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 g
 - 8.5 ยีสต์และรา ต้องน้อยกว่า 1×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 g

2.2 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลังการอบแห้งเพื่อรอการบริโภคหรือการจำหน่าย มักประสบปัญหาด้านการเสื่อมสภาพจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งรวดเร็วกว่าการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาจากเอนไซม์หรือปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีปริมาณของน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หลังจากกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดของการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ปริมาณน้ำนี้สามารถวัดได้ด้วยค่าวอเตอร์แอกทิวิตี คือปริมาณน้ำที่ต่ำที่สุดในอาหารโดยที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และสามารถนำมาใช้ในปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ได้ (ปริยา วิบูลย์เศรษฐ์ และคณะ, 2549)

2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

เป็นการให้พลังงานความร้อนแก่วัสดุอบแห้ง เพื่อระเหยน้ำในวัสดุ หรือลดปริมาณความชื้นในที่นี้จะกล่าวถึงการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเท่านั้น ซึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนมากจะไม่ใช้วัสดุที่สามารถทำให้แห้งจนความชื้นมีค่าเป็นศูนย์ได้ เช่น ทราย ผ้า แต่เป็นวัสดุที่ไม่สามารถทำให้แห้งจนความชื้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีความชื้นจำนวนหนึ่งแฝงอยู่ เช่น ผัก, ผลไม้ และเนื้อสัตว์ต่าง ๆ (ชิดชนก มากจันทร์ และคณะ, 2561) โดยความชื้นในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมาในบริเวณพื้นผิวได้ 2 วิธี คือ การเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบ (Capillary Force) ซึ่งจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ภายในวัสดุจะมีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่มีความต่อเนื่องกันเป็นทางแคบ จะเกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ วิธีนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะค่อย ๆ ซาลงทีละน้อย ทำให้ทางน้ำแคบลง และขาดตอนลงในที่สุด วิธีที่ 2 คือ การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์ของวัสดุ เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ ความชื้นจะแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์ ซึ่งความชื้นนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าวิธีการแรก (เกศินี มีทรัพย์, 2548)



ภาพที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากอาหารในระหว่างการอบแห้ง
(เกศินี มีทรัพย์, 2548)

2.3.1 ความชื้นของวัสดุ

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่าง ๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดก็คือความชื้นของวัสดุ หลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ชื้นหรือแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) โดยความชื้นในวัสดุมีทั้งความชื้นที่เกาะติดที่ผิวของวัสดุ (Unbound moisture) ซึ่งสามารถไล่ความชื้น นี้ออกไปได้หมดโดยการให้ความร้อน ความชื้นอาจ เกาะติดอยู่ภายในผนังด้านในท่อเล็ก ๆ (Capillaries) ที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ (Bound moisture) โดย ไม่สามารถไล่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุนี้ได้หมด ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1) ความชื้นฐานเปียก (Wet basis)

ความชื้นฐานเปียก คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุชื้น ซึ่งเมื่อคูณ ด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในสมการ (2.1) โดยความชื้นฐานเปียกเป็นความชื้นที่นิยม ใช้ในทางการค้าเพราะหาความชื้นได้เร็ว ทราบผลได้ทันที เช่น การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพืชหรือข้าวเปลือก

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ

M_w	คือ ความชื้นฐานเปียก, %
w	คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg
d	คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), kg

2) ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

ความชื้นฐานแห้ง คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง สามารถ หาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

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

เมื่อ

M_d	คือ ความชื้นฐานแห้ง, %
-------	------------------------

- w คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg
d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

2.3.2 อัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้นคืออัตราส่วนของผลต่างของปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ และความชื้นที่สมดุลต่อผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลของวัสดุ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$M_R = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (2.3)$$

เมื่อ

- M_R คือ อัตราส่วนความชื้น, ไม่มีหน่วย
 M คือ ค่าความชื้นของวัสดุ, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง
 M_e คือ ความชื้นสมดุล, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง
 M_0 คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง

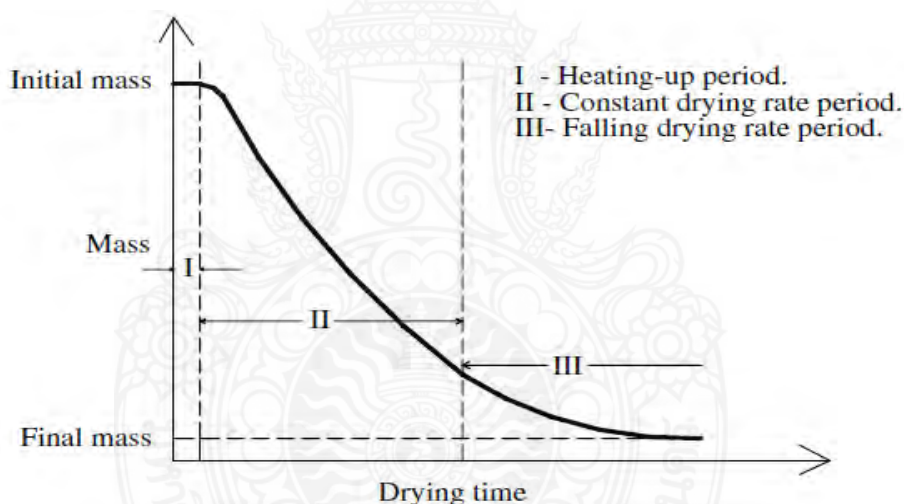
2.3.3 ช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง

ช่วงเริ่มต้นการอบแห้งเกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ในช่วงนี้จะมีค่าความชื้นสูงโดยความชื้นจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวของผลิตภัณฑ์ เมื่อความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากอากาศร้อน ทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้น้ำระเหยที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์มายังตัวกลางกระแสอากาศร้อน ในช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมากจนทำให้ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยได้อย่างรวดเร็วจนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งเกิดความสมดุลทางความร้อน กล่าวคืออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิอากาศร้อน (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

การทำให้แห้งแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ น้ำที่อยู่ภายในอาหารเคลื่อนตัวมาที่ผิวหน้าอาหารและน้ำที่ผิวหน้าอาหารเกิดการระเหย โดยในช่วงแรกนั้นน้ำจะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าการระเหยของน้ำ ส่งผลให้ผิวหน้าอาหารมีความชุ่มชื้น ความร้อนช่วงนี้หมดไปกับการทำให้น้ำระเหย ช่วงนี้อัตราเร็วในการทำแห้งคงที่ ในช่วงที่สองนั้นน้ำจะเกิดการระเหยเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำไปที่ผิวหน้าอาหาร ส่งผลให้ผิวหน้าอาหารแห้ง ช่วงนี้อัตราเร็วในการทำแห้งลดลง จากการที่น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ แล้ว

เคลื่อนที่ออกมาภายนอกอาหารกระทั่งไม่เกิดการระเหยน้ำอีก เมื่อปริมาณความชื้นในอาหารเท่ากับปริมาณไอน้ำในอากาศ (สุพิชญา รุ่งเรือง และมณีกาญจน์ บุญส่ง, 2553)

ในช่วงการเริ่มต้นการอบแห้งเป็นช่วงที่เกิดขึ้นในช่วง I ดังในภาพที่ 2.6 ผลิตรกัณฑ์ในช่วงนี้จะมีความชื้นสูงโดยความชื้นจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวของผลิตรกัณฑ์ เมื่อความชื้นที่อยู่ภายในผลิตรกัณฑ์ได้รับความร้อนจากอากาศร้อนดังแสดงในสมการที่ 2.4 และทำให้น้ำภายในผลิตรกัณฑ์นั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้น้ำเกิดการระเหยที่บริเวณผิวของผลิตรกัณฑ์มายังตัวกลางกระแสอากาศร้อน (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ในช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิผิวผลิตรกัณฑ์ของและ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตรกัณฑ์มีค่าแตกต่างกันมากจนทำให้ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวของผลิตรกัณฑ์เกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็วจนกว่าอุณหภูมิที่อยู่บริเวณพื้นผิวของผลิตรกัณฑ์อบแห้งจะเกิดความสมดุลทางความร้อน กล่าวคืออุณหภูมิของผลิตรกัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิอากาศร้อน



ภาพที่ 2.6 การลดลงของความชื้นของวัสดุในการอบแห้ง

(Idris et al, 2004)

$$q = h'A(T_{\infty} - T_s) \quad (2.4)$$

เมื่อ

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, kJ/h

h' คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kJ/m² h °C

T_s คือ อุณหภูมิผิวของเม็ดของแข็ง, °C

T_{∞} คือ อุณหภูมิของกระแสของไหล, °C

A คือ พื้นที่ของวัสดุ, m^2

$$N_A = h'_A(C_{AS} - C_A) \quad (2.5)$$

เมื่อ

N_A คือ ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท, kg/h

h'_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, $kg/m \cdot h^2$ (kg/m^3)

C_{AS} คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว, kg/m^3

C_A คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A, kg/m^3

2.3.4 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน ความร้อนของวัสดุที่ได้รับในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำออกจากตัววัสดุการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศจะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อน และมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ และวัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังอากาศร้อนโดยมีผลต่างของอุณหภูมิ และผลต่างของความดันไอที่ผิวของวัสดุ และอากาศร้อนเป็นตัวผลักดัน ซึ่งอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาโดยที่การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำ ที่ผิวของกระเปาะเปียก และที่ผิวของอากาศรอบนอก (ณัฐพล กระจำง, 2560)

ปริมาณน้ำที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเคลื่อนที่ออกมาแทนที่น้ำที่อยู่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยไปอย่างเพียงพอ ทำให้ปริมาณน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ยังคงที่ตลอดเวลา (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) ซึ่งเขียนสมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลสารและสมการถ่ายโอนความร้อนของวัสดุอบแห้งได้ดังนี้

$$\dot{m}_w = h'_D \rho_a A (W_{wb} - W_{\infty}) \quad (2.6)$$

$$\dot{m}_w = \frac{h'_A (T_{\infty} - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.7)$$

สำหรับในกรณีระบบไอน้ำและอากาศจะได้

$$\frac{h'}{h_D} = \rho_a C_a \quad (2.8)$$

เมื่อ

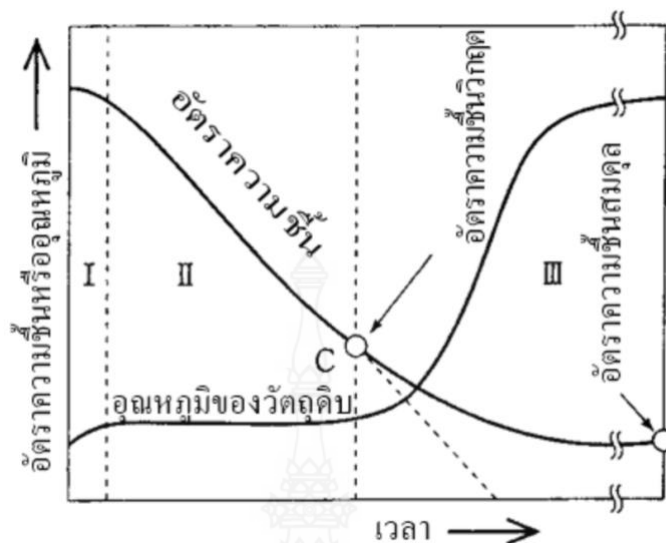
- $\dot{m}_w$ คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h
 h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ, kJ
 ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³
 C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg °C
 T คือ อุณหภูมิ, °C
 W คือ อัตราส่วนความชื้น, kg_{water} / kg_{dry air}

สัญลักษณ์กำกับล่าง

- w คือ น้ำ
 w_b คือ กระเปาะเปียก
 ∞ คือ กระแสการไหลอิสระ

2.3.5 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤติการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้นแต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุ น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลว หรือไอน้ำตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งคืออุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์โดยอัตราการระเหยจะถูกควบคุมโดยความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุ โดยวัสดุจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำลดลงแต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลจะยังมีค่าเท่าเดิม อัตราส่วนความชื้นจะไม่ลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาอีกต่อไป (เรียวโซ โทเอ, 2525) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา

(IEnergyGuru, 2558)

อีกทั้งเมื่ออบแห้งต่อไปเรื่อย ๆ จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในวัสดุหมด การระเหยของน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำที่ผิวหน้าของวัสดุ และภายในวัสดุแตกต่างกัน และอัตราการระเหยของน้ำลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำลดลงมาก (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) อัตราการอบแห้งลดลงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.9

$$\dot{m}_w = -\frac{AD\partial c}{\partial x} \quad (2.9)$$

เมื่อ

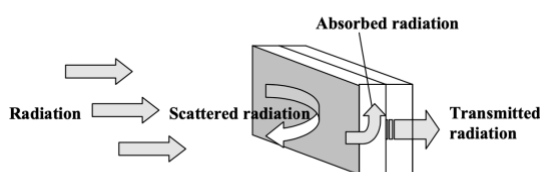
- D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
- A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวลสาร, m^2
- C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3
- x คือ ระยะ, m

2.4 การแผ่รังสีอินฟราเรด

การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นการให้ความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดอยู่ที่ ($0.76 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$) ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ ช่วงของรังสีอินฟราเรดนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ คลื่นสั้น คลื่นปานกลาง และคลื่นยาว การใช้งานรังสีอินฟราเรดจะต้องมีตัวปล่อยคลื่น (IR Emitter) ซึ่งประกอบด้วยตัวปล่อยคลื่นสั้น (Short Wave) ตัวปล่อยคลื่นปานกลาง (Medium Wave) และตัวปล่อยคลื่นยาว (Long Wave) เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน (ศุภชัย แก้วจิง, 2557) นอกจากนี้ความยาวคลื่นในช่วงนี้สามารถแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

1. รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR)
2. รังสีอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared, Mid-IR)
3. รังสีอินฟราเรดไกล (Far Infrared, FIR)

โดยรังสีอินฟราเรดใกล้จะมีความยาวคลื่นสั้น อินฟราเรดกลางมีความยาวคลื่นปานกลาง และอินฟราเรดไกลมีความยาวช่วงคลื่นมากที่สุด ซึ่งมีความยาวช่วงคลื่นในแต่ละระดับมีการกำหนดระดับที่แตกต่างกันไป (เพชรรัตน์ ใจบุญ, 2549) โดยที่มีการแผ่รังสีอินฟราเรดใกล้คือ การแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานความร้อน มาตกกระทบลงบนผิววัสดุ รังสีอินฟราเรดใกล้จะทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยที่พลังงานการทะลุ ผ่านของรังสีอินฟราเรดใกล้จะลดลงในรูปแบบเอกโพเนนเชียล (Exponential) ตามระยะความหนาจากผิววัสดุ ซึ่งมีการดูดซับพลังงานรังสีอินฟราเรดในเนื้อวัสดุ ทำให้โมเลกุลในเนื้อวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจนถึงระยะความหนาวัสดุที่รังสีอินฟราเรดใกล้ไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้จะมีการนำความร้อนในเนื้อวัสดุเข้าไปในชั้นต่อไป ดังนั้นเมื่อน้ำที่อยู่ในโมเลกุลวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดการแพร่ออกไปยังผิววัสดุทำให้วัสดุนั้นแห้งลง ข้อดีของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใกล้คือ รังสีอินฟราเรดใกล้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้ช่วยในเรื่องของการลดเวลาในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลง

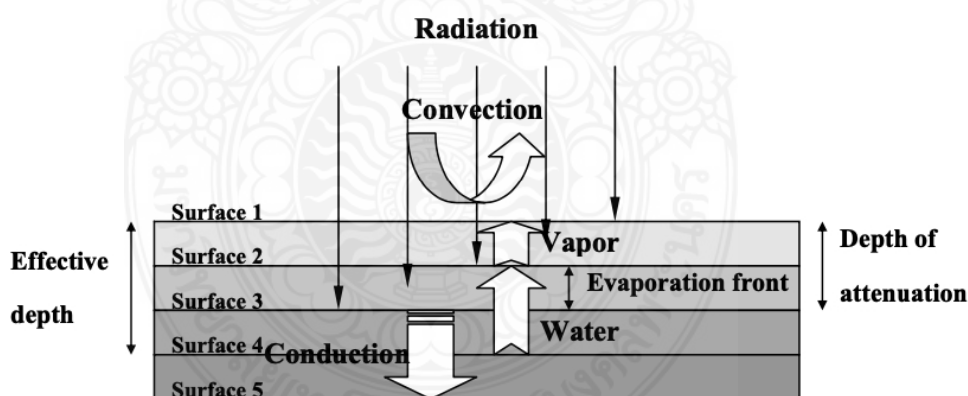


ภาพที่ 2.8 การลดลงของการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิววัสดุ

(ภูมิใจ สอาดโณม, 2548)

จากภาพที่ 2.8 ได้อธิบายถึงผลการตกกระทบของรังสีบนผิววัสดุ โดยจะมีพลังงานบางส่วนที่วัสดุดูดซับเอาไว้ในขณะที่บางส่วนถูกสะท้อนกลับออกไปตั้งแต่ที่ผิว และบางส่วนทะลุผ่านวัสดุไปโดยพุ่งตรงไปในแนวทิศทางเดิม หรือมีการหักเหของรังสี (ภูมิใจ สอาดโณม, 2548)

Sandu (1986) ได้กล่าวถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ โดยวิธีการจำลองการแผ่รังสี อินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งวัสดุขึ้น (Moist solid plate) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 รังสี อินฟราเรดแบบโพลิโครเมติกจะแผ่ออกมาตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นวัสดุขึ้นในด้านหนึ่ง โดยที่พื้นผิวด้านตรงข้ามจะสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิยาเบติก (Adiabatic) มีกระบวนการในการถ่ายเทความร้อน เป็นแบบ 1 มิติ และเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจะถูกแผ่นวัสดุดูดซับความชื้นทำให้อ่อนกำลังลงตามความลึก ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้เรียกว่า “ความลึกของการอ่อนกำลังลง (Depth of attenuation)” ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นตื้น ๆ (Superficial layer) และเป็นบริเวณที่มีเกิดความร้อนเกือบจะคงที่ ซึ่งโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลงนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งขึ้น โดยพื้นผิวที่ 1 จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อนซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 3 เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุขึ้นโดยการนำความร้อน



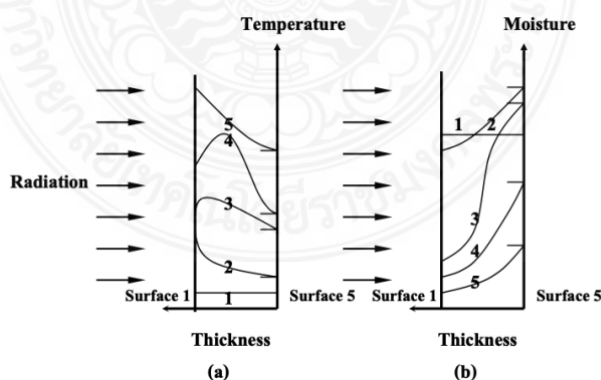
ภาพที่ 2.9 การอบแห้งวัสดุขึ้นด้วยการแผ่รังสี
(ภูมิใจ สอาดโณม, 2548)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด	อุณหภูมิอยู่ในช่วง	ความยาวคลื่น
รังสีอินฟราเรดใกล้	2,204 - 1,190 °C	1.2 – 2 mm
รังสีอินฟราเรดกลาง	1,190 - 458 °C	2 – 4 mm
รังสีอินฟราเรดไกล	458 - 204 °C	4 – 6 mm

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2567)

พิจารณาภาพที่ 2.10 ในสภาวะเริ่มต้นพบว่าแผ่นวัสดุชั้นมีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ น้ำจะเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการอ่อกำลังลง การถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นภายในแผ่นวัสดุชั้นไอน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังด้านหน้าผิวของการระเหย เนื่องจากแรงผลักดันต่าง ๆ เช่น การแพร่โมเลกุล, การแพร่ความร้อน และการแพร่แคปิลารีที่กระทำพร้อมกัน ในส่วนของการเพิ่มของความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 ซึ่งจะสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากน้ำเข้าสู่ภายในแผ่นวัสดุชั้นจะทำให้ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพแพร่ ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ซ้ดดังแสดงในภาพที่ 2.10 มีชื่อเรียกว่า “ข้อจำกัดของการถ่ายเทมวล เนื่องมาจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด” ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้น ต้องไม่มีความหนามากกว่าความลึกประสิทธิภาพเป็นชั้นที่ลึกที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิภาพนั้นจะเคลื่อนที่ออกมาด้วยการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน โดยตารางที่ 2.13 อธิบายถึงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีการดูดซับพลังงานได้มากที่สุด และความสามารถในการทะลุทะลวงผลิตภัณฑ์ ณ ความยาวคลื่นนั้น



ภาพที่ 2.10 โปรไฟล์ (ก) กำหนดเป็นอุณหภูมิ และ (ข) กำหนดเป็นความชื้นระหว่างการอบแห้ง ด้วยการแผ่รังสีของแผ่นวัสดุชั้นเมื่อ 1 คือ เงื่อนไขเริ่มต้น และ 2-5 คือสภาวะไม่สม่ำเสมอ (ภูมิใจ สอาดโณม, 2548)

ตารางที่ 2.3 ความลึกของการทะลุทะลวงอาหารชนิดต่าง ๆ ต่อฟลักซ์ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของอุปกรณ์แผ่รังสี

ผลิตภัณฑ์	ความยาวคลื่นที่ดูดซับมากที่สุด (μm)	ความลึกของการทะลุทะลวง (mm)
Dough, wheat	1	4-6
Bread, wheat	1	11-12
Bread biscuit, dried	1	4
Grain, wheat	1	2
Carrots	1	1.5
Tomato paste	1	1
Raw potatoes	1	6
Dry potatoes	0.88	15-18
Raw apples	0.16	4.1

ที่มา : ภูมิใจ สอาดโฉม (2548)

2.4.1 ข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด

Sakai and Hanzawa (1994) กล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไว้ โดยการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีข้อได้เปรียบที่เด่นชัด คือ ลดเวลาการอบแห้ง โดยข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีดังนี้

2.4.1.1 ข้อดีของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด

- 1) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์สูงเนื่องจากรังสีอินฟราเรดไกลสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ ทำให้สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง
- 2) รังสีสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง
- 3) ควบคุมการทำงานของหลอดรังสีอินฟราเรดได้ง่าย
- 4) แหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรดมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานไดอิเล็กตริกและไมโครเวฟ เนื่องจากแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรดมีอายุการใช้งานยาวนาน และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ

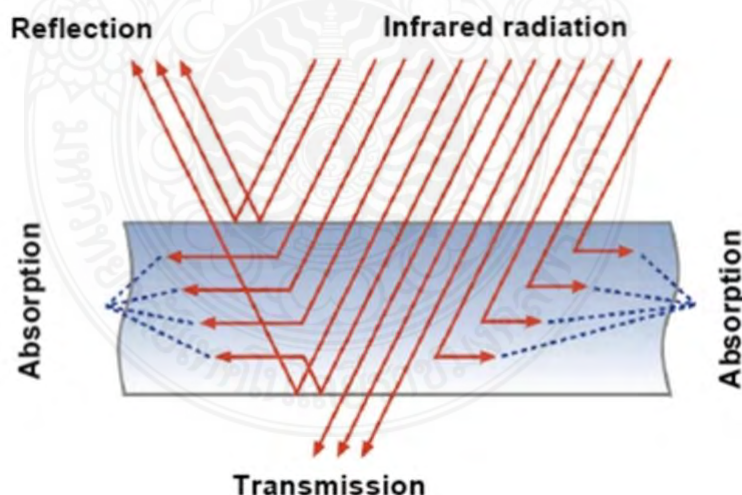
- 5) การติดตั้งอุปกรณ์รังสีอินฟราเรดใช้พื้นที่น้อย สามารถติดตั้งร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไปได้ง่าย
- 6) สภาพแวดล้อมการทำงานภายนอกของเครื่องอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดจะสะอาดมากกว่า เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน
- 7) ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีคุณภาพดี

2.4.1.2 ข้อเสียของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด

- 1) ในการอบแห้งวัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีข้อจำกัดในการเพิ่มขนาดของหลอดรังสีอินฟราเรด
- 2) ไม่สามารถอบแห้งวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ได้ (ภูมิใจ สอาดโณม, 2548)

2.4.2 หลักการของรังสีอินฟราเรด

เมื่อรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบหรือแพร่กระจายผ่านวัสดุทำให้เกิดการสูญหายของรังสี เนื่องจากรังสีบางส่วนจะถูกวัสดุนั้นดูดกลืนเข้าไปในตัวของวัสดุ และเกิดเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุบางส่วนเกิดการกระเจิง ทำให้รังสีมีทิศทางที่แตกต่างจากทิศทางของรังสีจากแหล่งกำเนิด และส่วนที่เหลือจะเกิดการส่งผ่านวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การตกกระทบของรังสีอินฟราเรดบนวัสดุ (IEnergyGuru, 2558)

2.5 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction)

การเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อเยื่อของผัก และผลไม้ได้ถูกทำลายลง โดยจะเกิดสีคล้ำหรือสีน้ำตาลตรงบริเวณที่ปลอกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการทางรสชาติ และสีทำให้ไม่รู้สึกรับประทาน อีกทั้งยังเกิดมูลค่าทางการตลาดลดลงอีกด้วย ดังนั้น การเกิดปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลจึงจัดว่าเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องมีการแก้ไข และปรับปรุงเพื่อไม่ให้เกิดขึ้น

นิธิยา รัตนานนท์ (2536) อธิบายรายละเอียดการเกิดขึ้นของปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งในอาหารมี 2 แบบ คือปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง และปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์จะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ข้างในของพืชถูกทำลายลงจากการเตรียมพืชในกระบวนการแปรรูป และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้เกิดปฏิกริยาของสารประกอบโมโนฟีนอลในตัวพืช เกิดการสัมผัสกับออกซิเจนภายในอากาศ ซึ่งสารนี้จะถูกออกซิไดซ์เกิดขึ้นมาจากปฏิกริยาการเร่งด้วยเอนไซม์นี้ ก็จะทำการรวมตัวกันแล้วเกิดปฏิกริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่น ๆ และจะเกิดปฏิกริยาเมลลาร์ดกับกรดอะมิโนได้ออกมาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล

2. ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเกิดขึ้นต่อเมื่ออาหารเกิดการสูญเสียน้ำ, การสลายตัว, และการควบแน่น ซึ่งจะเกิดจากความร้อนของหม้ออะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซ์จนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเป็นสีเหลือง สีน้ำตาล และน้ำตาลแดง ส่งผลให้อาหารมีรสชาติ และกลิ่นมีความเฉพาะตัว ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การเกิดคาราไมเซชัน และปฏิกริยาเมลลาร์ดดังต่อไปนี้

2.1 การเกิดคาราไมเซชัน จะเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในน้ำตาลที่ปราศจากสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งโมเลกุลของน้ำตาลจะแยกสลายตัวออกมา จากนั้นสารประกอบคาร์บอนจะเกิดการสารพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้สีน้ำตาลออกมา

2.2 ปฏิกริยาเมลลาร์ด จะเกิดขึ้นเมื่ออาหารที่มีสารประกอบไนโตรเจน และน้ำตาลรีดิวซ์ ได้รับความร้อนส่งผลให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง

2.6 การรักษาผลิตภัณฑ์เบื้องต้นโดยการให้ความร้อน

การที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกริยาเคมีต่าง ๆ ในสิ่งมีชีวิตได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำลายเอนไซม์ ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพเกิดการเสื่อมเสียได้อย่างรวดเร็ว ตัว

เอนไซม์ (Polyphenol oxidase) จะเป็นสาเหตุที่สำคัญให้เกิดปฏิกิริยาการสีน้ำตาลเร่งด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้สิ่งมีชีวิตเกิดการหยุดเจริญเติบโต และในที่สุดก็ถึงตาย ดังนั้น การใช้ความร้อนเพื่อกำจัดแมลงจะต้องเลือกใช้อุณหภูมิ และระยะเวลา (ณพวีร์ หวังใจชื่น, 2560) การให้ความร้อนแก่วัตถุที่ยังส่งผลต่อวัตถุหลายอย่าง อาทิเช่น ลดระยะเวลาในการทำให้แห้ง ทำให้เนื้อสัมผัสของอาหารนุ่มลงในระหว่างการเก็บรักษา และทำให้เกิดการสูญเสียของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ ที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการให้ความร้อน คือ ภายหลังจากให้ความร้อนแล้ว จะต้องรีบทำการลดอุณหภูมิทันที เพราะการให้ความร้อนนั้นจะทำให้ผลผลิตเกิดการเสื่อมสภาพ และเกิดการสุกได้อย่างรวดเร็ว

2.6.1 การใช้น้ำร้อน

การใช้น้ำร้อนจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดผลทำให้วัตถุเกิดการเสียหาย ทำได้โดยการจุ่มวัตถุลงไปในอ่างน้ำร้อน เมื่อครบกำหนดเวลาก็ยกขึ้นมาแช่ในน้ำเย็น หรือปล่อยให้วัตถุเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องลงในอ่างน้ำร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้น้ำร้อนในการรักษาลักษณะอย่างมากมาย (ณพวีร์ หวังใจชื่น, 2560)

2.6.2 การใช้ไอน้ำร้อน

การใช้ไอน้ำร้อนไหลไปสัมผัสกับวัตถุ เป็นวิธีการในการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของไอน้ำให้กลายเป็นหยดน้ำบนผิวของตัววัตถุ โดยวิธีนี้ อุณหภูมิของวัตถุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้ากว่าการใช้น้ำร้อน ทำให้วัตถุมีคุณภาพดี นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อวัตถุในการที่ได้รับอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน (ณพวีร์ หวังใจชื่น, 2560)

2.6.3 การใช้อากาศร้อน

การใช้อากาศร้อนนั้นเป็นวิธีที่ช้าที่สุด ถ้าเทียบกับวิธีการใช้น้ำร้อน และไอน้ำร้อน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง คืออากาศนั้นเกิดได้ช้า การใช้อากาศร้อนนี้ใช้ได้กับผลไม้ที่มีการสูญเสียน้ำต่ำเท่านั้น เพราะจะทำให้ผลเหี่ยวเฉา และผู้บริโภคจะไม่อยากรับประทานผลไม้ (ณพวีร์ หวังใจชื่น, 2560)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศรัณย์ ศักดิ์สุวรรณ (2560) ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยใช้เทคนิคการอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยที่มะม่วงนำดอกไม้ตกรวมมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยให้มะม่วงมีคุณภาพที่สูงยิ่งขึ้น โดยใช้วิธีการอบแห้งแบบธรรมชาติไม่แช่

สารละลายน้ำตาล โดยใช้วิธีการอบแห้ง 3 แบบ คือ การอบแห้งด้วยวิธีการปรับลดอุณหภูมิลมร้อน และการอบแห้งลมร้อนอุณหภูมิคงที่ในการอบแห้งมะม่วงมหาชนก และการอบแห้งแบบไมโครเวฟกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง มะม่วงที่นำมาใช้คือมะม่วงเป็นแบบห่าม และสุกที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 16-20 °Brix และแช่ในสายละลายเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาล เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วจึงนำเอามะม่วงหลังการอบแห้งมาเรียบเทียบผลในด้านจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของมะม่วงอบแห้งทางด้านสี เนื้อสัมผัส การหดตัว วอเตอร์แอกทิวิตี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมะม่วงที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่า และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการปรับลดอุณหภูมิลมร้อน ในด้านคุณภาพของสีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองนั้นจะคล้ำไหม้เนื่องจากการอบด้วยไมโครเวฟที่นาน และใช้กำลังไฟที่สูง ส่วนมะม่วงมหาชนกนั้นมีการปรับลดอุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกเป็นเวลานาน สีของมะม่วงจึงคล้ำ ในส่วนของ การหดตัว ความแข็ง และความเหนียวของมะม่วงที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีค่าน้อยกว่ามะม่วงอบแห้งด้วยวิธีการปรับลดอุณหภูมิลมร้อน มะม่วงที่อบแห้งจนเหลือ 16% จะมีอยู่ได้ถึง 6 เดือน

ณพวีร์ หวังใจชื่น (2560) ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนามะม่วงอบแห้งธรรมชาติโดยใช้ลมร้อนร่วมกับการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ โดยการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ ซึ่งมีระดับความสุกอยู่ที่ 80% มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 10-18 °Brix และมีการรักษาอุณหภูมิโดยการแช่น้ำอุ่น 47 °C เป็นเวลา 95 นาที ทำการศึกษาผลด้วยกำลังไมโครเวฟ และการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วง คุณภาพของมะม่วงด้านสี เนื้อสัมผัส และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง โดยหลังจากการทดลองนั้นพบว่า การอบแห้งที่ใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟค่าเดียว มีคุณภาพของมะม่วงอบแห้งด้านสีดีกว่า ความแข็ง ความเหนียวต่ำกว่า และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่า

ณัฐพล กระจำง (2560) ได้ศึกษาเรื่องการอบแห้งเข้มข้นด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยการอบแห้งเข้มข้นพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับการอุณหภูมิ และกำลังของอินฟราเรด โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ และกำลังของอินฟราเรดสูงส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับการอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งเข้มข้นด้วยลมร้อน และอัตราส่วนของน้ำหนักของตัวอย่างต่อกำลังของอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งเข้มข้นด้วยรังสีอินฟราเรดตามรูปแบบสมการของ Arrhenius โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรดผลการวิเคราะห์แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางเข้มข้น สรุปได้ว่า

แบบจำลองของ Two Term สามารถทำนายผลกลนพลศาสตร์การอบแห้งของขมิ้นชันด้วยลมร้อนได้ดีที่สุดในส่วนของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน ขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ สภาวะการอบแห้งอื่น ๆ

สิทธิชัย ศรีไทย (2559) ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิ และแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง โดยมะม่วงน้ำดอกไม้พันธุ์สีทองที่ตกเกรดไม่มีการเติมสารละลายน้ำตาล และไม่มีส่วนผสมของซัลไฟต์เจือปนด้วยวิธีการอบแห้ง 3 รูปแบบ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิ การอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง และการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติสำหรับการส่งออกแทนที่ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งแช่อิ่มที่มีปริมาณน้ำตาลสูงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่ห่วงใยสุขภาพ และได้ยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลสำหรับแช่มะม่วงก่อนการอบแห้ง เป็นการอบแห้งมะม่วงที่ระดับความสูงต่างกัน 3 ระดับคือ ห้ามถึงสูง สูง และสูงมาก มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 16-19 °Brix ด้วยอุณหภูมิในช่วง 45-90 °C หลังการทดลองพบว่า การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่า และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิ ทำให้คุณภาพมะม่วงน้ำดอกไม้แห้งนั้นให้สีที่สว่างไม่แตกต่างกันมาก มีการหดตัว รวมไปถึงความแข็ง และความเหนียวน้อยกว่ามะม่วงที่อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ชนิรัตน์ ผึ้งบรรหาร และการันต์ ผึ้งบรรหาร (2559) ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่อิ่มแบบเร็ว โดยสูตรพื้นฐานของมะม่วงเบาแช่อิ่ม จึงได้สร้างสูตรของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่อิ่มแบบเร็ว และศึกษาอายุการเก็บรักษา วิธีการทดลองศึกษาสูตรพื้นฐานมะม่วงเบาแช่อิ่ม 3 สูตร และทำการประเมินผลทางประสาทสัมผัส สูตรที่ได้รับการคัดเลือก คือสูตรที่ 3 มีมะม่วงเบา เกลือ น้ำปูนใส น้ำตาลทราย และน้ำ เป็นส่วนประกอบ ตามลำดับ และนำไปใช้สร้างสูตรมาตรฐานของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่อิ่มแบบเร็ว ประเมินผลทางประสาทสัมผัสสูตรที่ได้รับการคัดเลือก คือ สูตรที่ 2 (แช่น้ำปูนใสกับน้ำสารส้ม) มีมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อน การยอมรับของผู้บริโภคในด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม อยู่ที่ระดับความชอบปานกลาง เวลาในการทำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่อิ่มแบบเร็ว คือ 32 ชั่วโมง ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่อิ่มแบบเร็วบรรจุถุงปิดผนึก เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง พบว่า แบบทดลองที่ 1 (ใส่เชื้อดองมะม่วง) มีอายุ 26 วัน แบบทดลองที่ 2 (ไม่ใส่เชื้อดองมะม่วง) มีอายุ 8 วัน และแบบทดลองที่ 3 (อุ่นน้ำเชื่อมก่อนบรรจุถุง) มีอายุ 24 วัน

สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล และคณะ (2555) ศึกษาเรื่องการอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพ และการทดสอบประสิทธิภาพสัมผัส โดยสภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ และคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธุ์ทองประเสริฐ ด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข คือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรด และลมร้อน การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟ ลมร้อน และสุดท้ายคือการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว พบว่าอัตราการอบแห้งขนุนขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้งอย่างมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างสามารถใช้อธิบายพฤติกรรม การอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้เป็นอย่างดีตามลำดับ พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่ากรณีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การหัดตัว สี และความยอมรับในการบริโภคพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น

นริศ พัวพันวัฒนะ และคณะ (2551) ศึกษาเรื่องจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรดอุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลมที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพร้อมทั้งทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎี โดยทำการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยที่มีความชื้นขึ้นด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในห้องปฏิบัติการพบว่าอัตราการอบแห้ง และอุณหภูมิของเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรด และอุณหภูมิลมร้อนทำให้ใช้เวลาอบแห้งลดลง โดยที่ความเร็วลมไม่มีผลต่อเวลาอบแห้ง และอุณหภูมิลำไยจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ความชื้นโดยรวม และพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งได้สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ความชื้นโดยรวมของเนื้อลำไยเป็นฟังก์ชันกับกำลังอินฟราเรด และอุณหภูมิลมร้อน

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และคณะ (2550) ศึกษาเรื่องการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และอินฟราเรดไกล โดยปัจจุบันมีการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด โดยใช้เนื้อวุ้น และพริกเป็นตัวอย่างในการทดลอง พารามิเตอร์ที่เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง โดยสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงประมาณ 25-30% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนของคุณสมบัติการหัดตัว และการเปลี่ยนแปลงสี พบว่าการอบแห้งทั้งสองวิธีการให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสรุปผลของการหัดตัว และการเปลี่ยนแปลงของสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง พลังงานที่ป้อนให้กับ

แท่งอินฟราเรด หรือลดความเร็วลม สำหรับการหาสมการเอมไพริคัลที่เหมาะสมในการทำนายความชื้น และเวลาการอบแห้งของเนื้อ พบว่าสมการที่สามารถทำนายผลได้ดีที่สุด คือ สมการ Two-term exponential ซึ่งมีค่าความผิดพลาด (RMSE) ในส่วนของสมการเอมไพริคัลที่สามารถทำนายความชื้น และเวลาการอบแห้งของพริกได้ดีที่สุด คือ สมการ Diffusion approach

เพชรรัตน์ ใจบุญ (2549) ศึกษาเรื่องการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ โดยการนำเอารังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อน และบีบความร้อนเปรียบเทียบกับกรอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อน และบีบความร้อนเพียงอย่างเดียวในด้านลักษณะเฉพาะของการอบแห้งคือการหดตัวการคืบตัว ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้วอเตอร์แอกทิวิตีเนื้อสัมผัสโครงสร้างระดับจุลภาค และการทดสอบด้านประสาทสัมผัส พบว่าการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยกับการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนหรือบีบมีความร้อนช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง และลดเวลาในการอบแห้งลงผลของรังสีอินฟราเรดไกลทำให้เนื้อลำไยมีรูพรุน และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดรังสีอินฟราเรดไกลมีค่าเพิ่มขึ้น รูพรุนที่เกิดขึ้นทำให้เนื้อลำไยมีการหดตัวน้อยคืบตัวมาก มีค่าความแข็งและความหยุ่นตัวน้อยกว่าเนื้อลำไยที่อบแห้งด้วยลมร้อนหรือบีบมีความร้อนเพียงอย่างเดียว รังสีอินฟราเรดไกลทำให้สีของเนื้อลำไยมีสีแดงคล้ำ การอบแห้งร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลใช้พลังงานจำเพาะรวมน้อยลงเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดรังสีอินฟราเรดไกลเนื่องจากเวลาที่ใช้ออบแห้งน้อย การอบแห้งด้วยบีบมีความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลใช้พลังงานจำเพาะรวมน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ภูมิใจ สอาดโฉม (2548) ศึกษาเรื่องการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยหอมทองด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยรังสีอินฟราเรดไกลมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงในการอบแห้งทำให้เกิดความร้อนขึ้นในกล้วยหอม แต่เมื่ออบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจะทำให้จุดเดือดของน้ำภายในกล้วยหอมต่ำลง และน้ำจะระเหยออกได้เร็วในอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ทำให้มีคุณภาพที่ดี จึงนำเอามาใช้ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเฉลี่ย และอุณหภูมิกึ่งกลางของกล้วยหอม ทำการอบแห้งกล้วยหอมแล้วทำการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเฉลี่ย และอุณหภูมิกึ่งกลางของกล้วยหอม ในการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลได้ดีเยี่ยม

อนุสร นาคี และคณะ (2555) ศึกษาเรื่องจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน โดยการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้งคุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 W ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600% มาตรฐานแห้ง และ 8-12% มาตรฐานแห้ง

ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 W ร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว คือ แบบจำลอง Logarithmic ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน คือ แบบจำลองของ Page โดยผลการทดลองที่ค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองดังกล่าว ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า ร้อยละการคืนตัวและค่าสีในระบบ CIE (L^* , a^* และ b^*) แสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

วีระ ศรีอริยะกุล (2555) ศึกษาเรื่องการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรด ไกลร่วมกับอากาศร้อน โดยหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิค รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน และประเมินคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกหลังการอบแห้ง โดยอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่มีความชื้นเริ่มต้น 332% Dry Basic และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 16-20°Brix ด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และใช้ความเร็วอากาศร้อน 0.3 m/s จนกระทั่งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกมีความชื้นสุดท้ายที่ 16% Dry Basic ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาอบแห้งที่ใช้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งนี้ คือ การแช่มะม่วงน้ำดอกไม้สุกในสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาล และการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 350 นาทีจะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 68.84 MJ/kg_{evap} ส่วนการทดสอบคุณภาพด้านสีและความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้ง พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดงลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และมะม่วงน้ำดอกไม้สุกอบแห้งมีความแข็งเฉลี่ย 3.46 N นอกจากนี้ยังพบว่า สมการอบแห้งชั้นบางของ Modilli สามารถทำนายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเทคนิครังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และค่าโคสแควร์เท่ากับ 0.9995, 0.0061 และ 4.15×10^{-5} ตามลำดับ

2.8 โอกาสในการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน

2.8.1 การเลือกโอกาสการพัฒนา (Selected Opportunity)

เหตุผลที่เลือกพัฒนาดัชนีมะม่วงน้ำดอกไม้ และทำการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อนนั้นเพื่อการถนอมอาหารให้อยู่ได้นานยิ่งขึ้น และสร้างรายได้ให้เกษตรกรไทย เพราะใช้วัตถุดิบมะม่วงน้ำดอกไม้ที่คนไทยสามารถต่อยอดได้เองภายในประเทศ อีกทั้งได้มะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีคุณภาพดี สามารถลดพลังงานจำเพาะลงได้ และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งจากต่างประเทศ ซึ่งสิ่งต่างๆ ที่กล่าวมานี้ นับเป็นจำนวนเงินที่มาก โดยการวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างความมั่นคงทั้งด้านพลังงาน ด้าน

เศรษฐกิจ และด้านสังคม ให้กับประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน ในการตัดสินใจทำการพัฒนาอบแห้งด้วยมะม่วงน้ำดอกไม้ และทำการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยมีการแบ่งโอกาสได้ดังนี้

โอกาสที่ 1 การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง เพื่อผู้บริโภคที่รักสุขภาพ เพราะปราศจากสารเคมี และไม่มีน้ำตาล

โอกาสที่ 2 การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเพื่อจำหน่ายภายในประเทศ เพื่อจะได้เก็บไว้รับประทานได้นาน ๆ ตลอดทั้งปี

โอกาสที่ 3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเพื่อส่งจำหน่ายต่างประเทศเพื่อนำรายได้เข้าประเทศ

ดังนั้นจึงเลือกโอกาสที่ 1 เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยทำการพรีทรีตเมนต์มะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยการลวก และการนึ่งแทนการใช้สารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทุก ๆ ด้านในตัวผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนนั้นเป็นสิ่งที่ดีมาก

- 1) เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง
- 2) ปริมาณความต้องการที่จะบริโภคผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งของผู้บริโภคทั่วโลกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง

2.8.2 เป้าหมาย

2.8.2.1 ได้ผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีคุณภาพสูง สามารถนำไปใช้ในการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งในอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาและต่อยอด

- 1) ได้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้คุณภาพสูง
- 2) ลักษณะของตลาดกลุ่มเป้าหมาย

จากการพิจารณาเป้าหมายทางการตลาดดังกล่าวข้างต้นนั้น สามารถระบุกลุ่มเป้าหมายได้ 2 กลุ่มดังนี้

2.8.2.2 กลุ่มเป้าหมายหลัก คือ กลุ่มเกษตรกรที่สนใจ และผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง ที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่าย

2.8.2.3 กลุ่มเป้าหมายรอง คือ ผู้บริโภคที่รักสุขภาพ เพราะปราศจากสารเคมี

2.8.3 รูปแบบความต้องการตลาดกลุ่มเป้าหมาย

กำหนดตำแหน่งผลิตภัณฑ์ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งคำนึงถึงคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้หลังอบแห้งด้วยหรือไม่ได้ดังนี้

1) ต้องการรักษาสิ่งแวดล้อม ขั้นตอนการทำมะม่วงน้ำดอกไม้บแห้งในการวิจัยนี้ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ เพราะอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ซึ่งจะไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการประหยัดพลังงาน สะดวกในการใช้งาน และมีจิตสำนึกที่ดีต่อสังคมและส่วนรวม

2) ต้องการความประหยัด มะม่วงน้ำดอกไม้บแห้งที่ได้จากการวิจัยนี้ เมื่อนำมาขายภายในประเทศ ผู้บริโภคจะไม่ต้องเสียเงินซื้อด้วยราคาที่มีต้นทุนแฝงจากค่าขนส่งนำเข้าจากต่างประเทศ และพ่อค้าคนกลาง ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลง

3) ผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยปราศจากสารละลายน้ำตาล และสารเคมี ทำให้ผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพชื่นชอบ ทำให้เกิดรายได้มากขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยมีเนื้อหาประกอบไปด้วย วัตถุประสงค์ อุปกรณ์การทดลอง วิธีการทดลอง การทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งทางด้านสี ความหยุ่นตัว ความแข็ง การหดตัว วอเตอร์แอคทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค และการคำนวณหาความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้คือมะม่วงน้ำดอกไม้พันธุ์สีทองโดยซื้อมาจากตลาดในกรุงเทพมหานคร โดยคัดเลือกผลที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 18-19 °Brix และมีน้ำหนักของผลประมาณ 300-550 g โดยผลต้องที่มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีตำหนิ และไม่มีร่องรอยการทำลายของแมลง และผลที่มีสีผิวใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้พันธุ์สีทอง
(สุจินี โกกกลีน, 2567)

3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยนำมะม่วงน้ำดอกไม้แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 47 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของมะม่วงก่อนการอบแห้ง จากนั้นปอกเปลือกมะม่วงเหลือเฉพาะเนื้อแล้วหั่นตามแนวความยาวของผลด้วยความหนาประมาณ 1.5 cm จะได้ 4 ชิ้น/ผล

3.1.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

การทดลองนี้ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (A&D, FX-2000i, Japan) ซึ่งมีความละเอียด 0.01 g ดังแสดงในภาพที่ 3.2 สำหรับอ่านค่าน้ำหนักของมะม่วงในขณะอบแห้ง และใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของมะม่วงก่อนและหลังการอบแห้งเพื่อหาปริมาณความชื้นของตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.1.3 การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

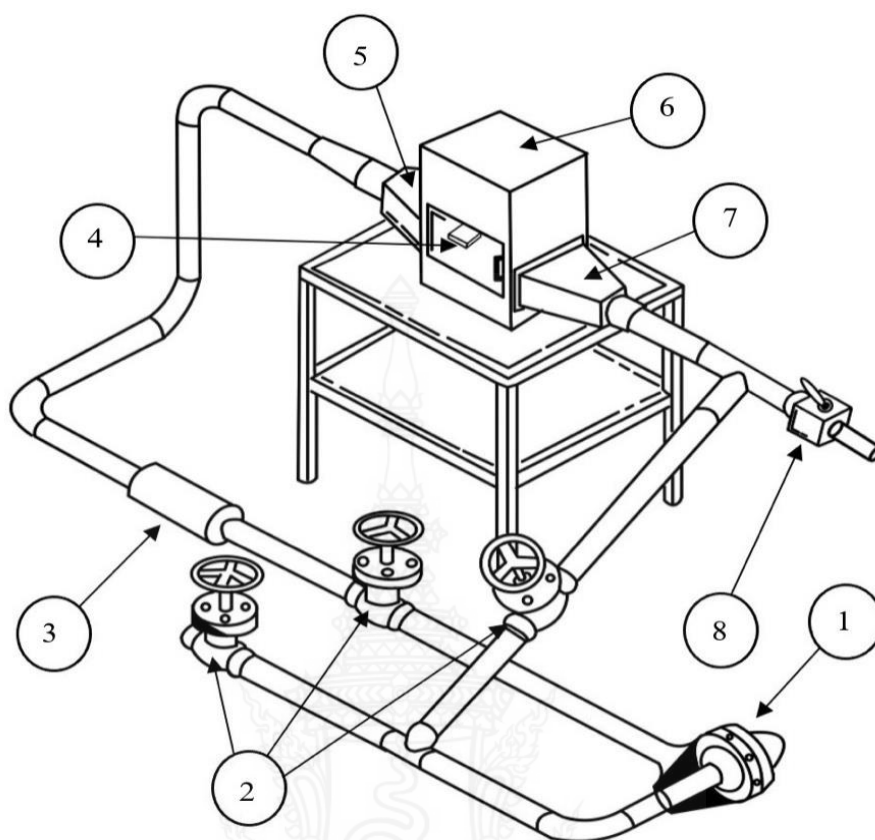
การทดลองนี้จะพิจารณาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพื่อเป็นเงื่อนไขในการทดลอง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงวัดด้วยเครื่อง Refractometer (ATC, RHB-32/ATC, Thailand) ซึ่งสามารถวัดดัชนีการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นผลึก โดยวิธีการทำงานคือนำเอาหยดน้ำที่ผ่านการกรองของเนื้อมะม่วงสดผ่านผ้าในการกรองหยดลงแผ่นปริซึม แล้วปิดด้วยแผ่นปิดจากนั้นจึงส่องลงไปในห้องที่มีแสงผ่าน โดยความเข้มข้นของน้ำตาลภายในหยดน้ำที่ผ่านการกรองเนื้อมะม่วงสดนั้นมีหน่วยวัดเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) เครื่องวัดที่ใช้สำหรับการทดลองจะมีช่วงของการวัด 0-32 °Brix มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 0.2\%$ ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้คือเครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 3.5 และแผนภาพของเครื่องอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในภาพที่ 3.4 โดยเครื่องอบแห้งประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาดความกว้าง 30 cm ความยาว 34 cm และความสูง 50 cm เครื่องเป่าลมขนาด 1/8 แรงม้า สำหรับเป่าอากาศเคลื่อนผ่านเครื่องผลิตความร้อนขนาด 1.2 kW ซึ่งทำหน้าที่ผลิตความร้อนให้ได้ตามที่ต้องการโดยใช้ระบบอุณหภูมิอากาศอบแห้งแบบ PID (Proportional Integral Derivative) control หลอดอินฟราเรดขนาดกำลังสูงสุด 650 W มีความกว้าง 60 mm และความยาว 245 mm ทำหน้าที่ในการผลิตรังสีอินฟราเรดสำหรับใช้ในการอบแห้งและควบคุมอุณหภูมิอากาศโดยใช้ระบบ PID



- | | |
|-----------------------------------|---------------|
| 1. เครื่องเป่าลม | 2. วาล์ว |
| 3. เครื่องผลิตความร้อน | 4. อินฟราเรด |
| 5. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศทางเข้า | 6. ห้องอบแห้ง |
| 7. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศทางออก | 8. แดมเปอร์ |

ภาพที่ 3.4 แผนภาพของเครื่องอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน



ภาพที่ 3.5 เครื่องอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้วัดด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้ดังต่อไปนี้

1) ก่อนเริ่มต้นการอบแห้งทุกครั้ง ควรเปิดเครื่องอบแห้งจนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นในระดับที่ต้องการ

2) นำตัวอย่างมะม่วงที่เตรียมไว้แล้วชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 260 ± 1 กรัม พร้อมวัดอุณหภูมิของตัวอย่างเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (EXTECH, model IR250) มีความถูกต้อง $\pm 3\%$ จดบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้วัดที่เตรียมไว้แล้วนำมาวางเรียงบนตะแกรงไฟเบอร์แล้วนำเข้าไปในห้องอบแห้ง และดำเนินการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ วิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรด ไกลร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่โดยใช้เงื่อนไขกำลังอินฟราเรด 650 W ร่วมกับลมร้อน 70 80 และ 90 °C วิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิโดยใช้เงื่อนไขกำลังอินฟราเรดคงที่ 650 W ร่วมกับลมร้อน 90 และ 100 °C เป็นเวลา 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามด้วย 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ ตามด้วย 70 °C และวิธีการอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C โดยทั้ง 3 วิธี ใช้ความเร็วลม 0.5 m/s ใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ 20% เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จากนั้นจึงใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% และอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 15% ฐานแห้ง

3) เมื่อดำเนินการอบแห้งเสร็จสิ้นแล้วบันทึกน้ำหนัก และอุณหภูมิของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างทิ้งไว้ที่สภาวะอากาศแวดล้อมประมาณ 30 นาที เพื่อให้ตัวอย่างคลายความร้อน จากนั้นจึงนำตัวอย่าง

บรรจุไว้ในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ป้องกันความชื้นและแสง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C ในระหว่างรอทดสอบคุณภาพ

3.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของมะม่วงการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer (Konica Minolta, CM-3500d, Japan) ดังในภาพที่ 3.6 โดยใช้การวิเคราะห์สีของตัวอย่างหลังการอบแห้งด้วยระบบ 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) ซึ่งก่อนจะทำการวัดสีมะม่วงอบแห้งจะต้องเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานทั้งแผ่นสีดำและแผ่นสีขาวทุกครั้งในการวัดค่าของสี ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดสีตรงตำแหน่งบริเวณผิวของมะม่วง จำนวน 2 จุด คือ ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างในการวิจัยจำนวน 10 ชิ้น ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยของสีในแต่ละค่า



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดสี Spectrophotometer

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้งสามารถประเมินได้จากค่าความแข็งและค่าความหยุ่นตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System, model TA.XT. Plus, Surrey, UK) ที่ความแม่นยำ 0.001 N แสดงดังในภาพที่ 3.7 ซึ่งในการทดลองต้องทำการวางแท่นหนักมาตรฐาน 2,000 g ลงบนเครื่องก่อนใช้งานเสมอ เพื่อให้ค่าความแข็งที่ได้มีความถูกต้อง และเป็นที่น่าเชื่อถือ โดยการวัดค่าจะใช้หัวกดแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm ใช้ความเร็วหัวกด 2 mm/s และความเร็วหลังกด 10 mm/s โดยค่าความแข็งสามารถพิจารณาได้จากแรงกดสูงสุด (Peak Force) ค่าความเหนียวพิจารณาได้จากกระยะการเปลี่ยนรูป

(Deformation) และแรงกดสูงสุด (Peak Force) ซึ่งทำตามเงื่อนไขการทดลองจะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



ภาพที่ 3.7 เครื่อง Texture Analyzer

3.6 การทดสอบในการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงอบแห้งโดยใช้เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี (Novasina Model Lab Master-aw, Switzerland) ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 °C จะทำการทดสอบดำเนินการโดยหั่นหรือบดมะม่วงอบแห้งเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขึ้น แล้วจึงลงใส่ในภาชนะทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ในปริมาณ 3/4 ของภาชนะทดสอบ จากนั้นนำภาชนะทดสอบที่บรรจุมะม่วงอบแห้งใส่เข้าไปในเครื่องใช้เวลาประมาณ 30 นาที สำหรับแต่ละตัวอย่าง โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองดำเนินการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี 3 ซ้ำ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.8 เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี

3.7 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้บแห้งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, Model JSM-5410 LV, Tokyo, Japan) ดังแสดงในภาพที่ 3.9 โดยนำชิ้นมะม่วงอบแห้งแช่แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 30% v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อมาใช้แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 50% v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงจะแช่แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 70% v/v เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นแช่แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 95% v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสุดท้ายแช่แอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 100% v/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะใช้ตัวอย่างที่ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อจะหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำตัวอย่างมาหักออกตามแนวขวางของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างที่หักออกวางบน Stub แล้วนำไปเคลือบด้วยทองที่บริเวณผิวของภาคตัดขวางของมะม่วงอบแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างไปส่องดูโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง SEM โดยใช้ความต่างศักย์ในการเร่งอิเล็กตรอน 15 kV และถ่ายภาพภาคตัดขวางโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างอบแห้งที่ตรงตำแหน่งตรงกลางของชิ้นตัวอย่างด้วยขนาดกำลังขยาย 150



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope

3.8 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การทดสอบคุณภาพทางด้านการหดตัวของมะม่วงอบแห้งดำเนินการโดยหาปริมาตรของแผ่นมะม่วงก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง สำหรับการหาปริมาตรของแผ่นมะม่วงก่อนและหลังอบแห้งใช้วิธีการแทนด้วยเหลว โดยของเหลวที่ใช้ในการทดสอบคือ n-heptane [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$] ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.684 g/cm^3 การหาปริมาตรของตัวอย่างดำเนินการโดยนำตัวอย่างซึ่งในอากาศและซึ่งในของเหลว จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาตรของตัวอย่าง (เพชรรัตน์ ใจบุญ, 2549) สำหรับการหดตัวของแผ่นมะม่วงอบแห้ง (%Shrinkage) คำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$\% \text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ

V_0 คือปริมาตรของเนื้อมะม่วงสด, cm^3

V คือปริมาตรของเนื้อมะม่วงหลังจากการอบแห้ง, cm^3

ปริมาตรของแผ่นมะม่วงก่อนและหลังการอบแห้งสามารถหาได้จากสมการ (3.2)

$$V = \frac{m_{\text{มวลในอากาศ}} - m_{\text{มวลในของเหลว}}}{\rho_{\text{n-heptane}}} \quad (3.2)$$

3.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้ง สามารถวัดจากค่าพลังงานไฟฟ้าได้โดยสามารถวัดได้จากกิโลวัตต์ฮาร์มิเตอร์ 1 เฟส (DAI-ICHI, DD28, Thailand) โดยพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งงานวิจัยนี้แสดงในรูปของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) มีหน่วยเป็น $\text{MJ/kg}_{\text{water evaporated}}$ ในรูปของพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งทางด้านความร้อนและทางด้านไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$\text{SEC}_{\text{thermal}} = \frac{E_{\text{Heater}}}{m_w} \quad (3.3)$$

$$\text{SEC}_{\text{electricity}} = \frac{E_{\text{FIR}} + E_{\text{Blower}}}{m_w} \quad (3.4)$$

เมื่อ

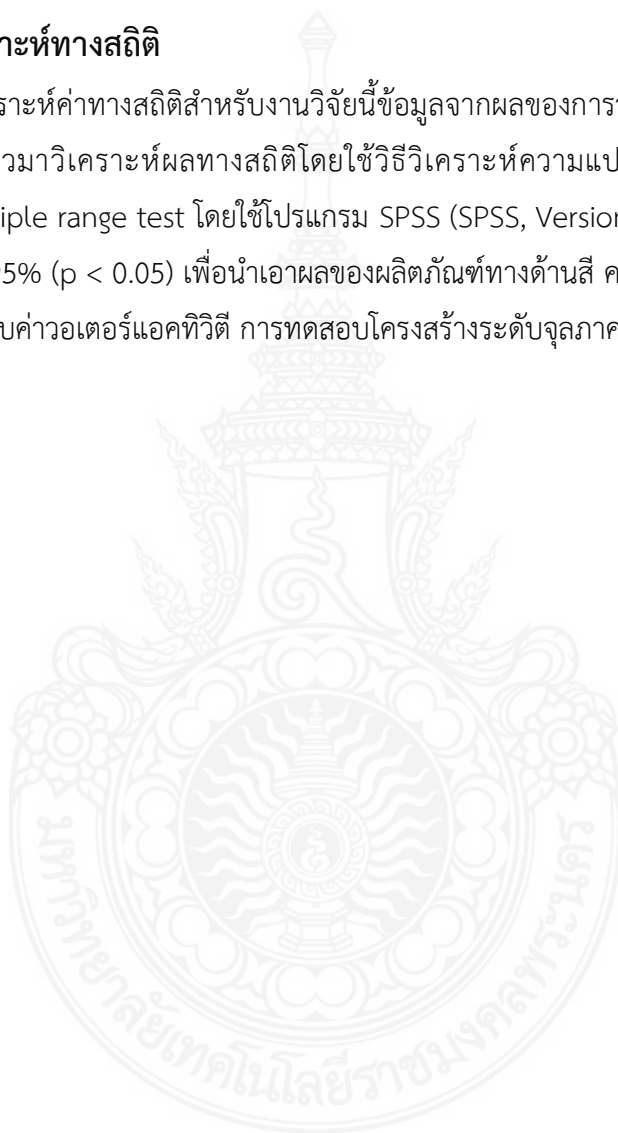
$\text{SEC}_{\text{thermal}}$ คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านความร้อนของกระบวนการอบแห้ง, MJ/kg ของน้ำระเหย

$\text{SEC}_{\text{electricity}}$ คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านไฟฟ้าของกระบวนการอบแห้ง, MJ/kg ของน้ำระเหย

E_{FIR}	คือ พลังงานที่ใช้สำหรับอินฟราเรด, MJ
E_{Heater}	คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องทำความร้อน, MJ
E_{Blower}	คือ พลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลม, MJ
m_w	คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะม่วงอบแห้ง, kg

3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติสำหรับงานวิจัยนี้ข้อมูลจากผลของการวัดคุณภาพของมะม่วง โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS, Version 13, Inc., Chicago, IL) ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ($p < 0.05$) เพื่อนำเอาผลของผลิตภัณฑ์ทางด้านสี ความแข็ง ความหนืด การหดตัว การทดสอบค่าวอเตอร์แอคทิวิตี การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค



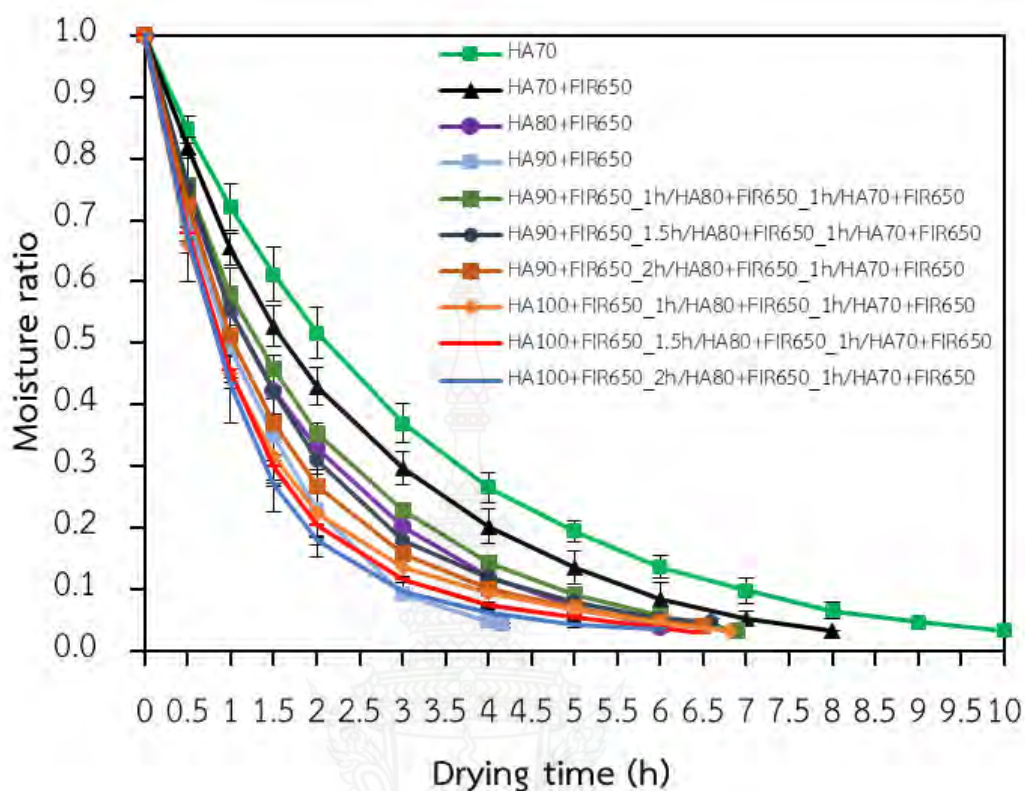
บทที่ 4

ผลการวิจัย

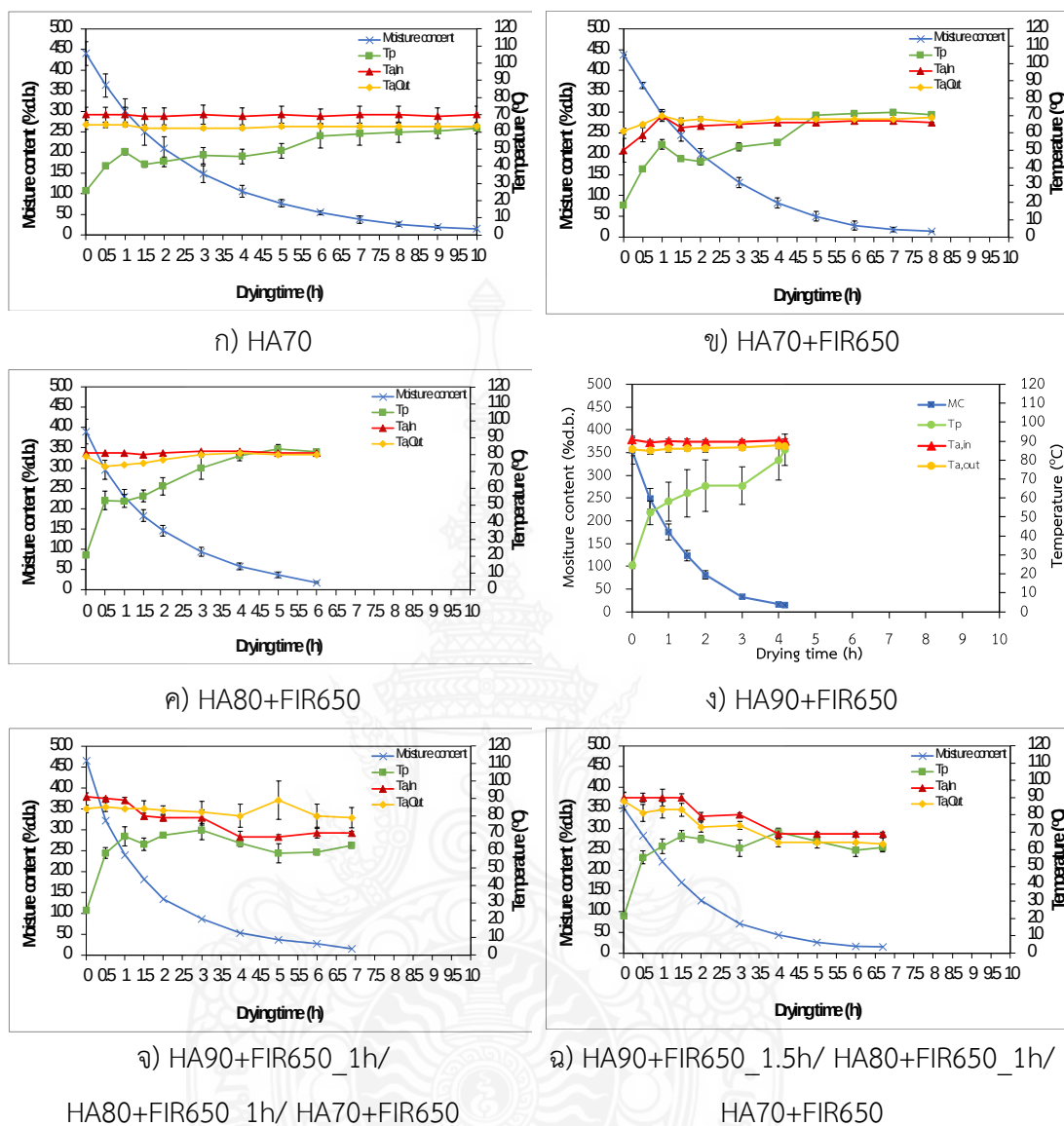
ผลการวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้โดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ ทางด้านสี เนื้อสัมผัส การหดตัว วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้ออธิบายได้ดังนี้

4.1 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

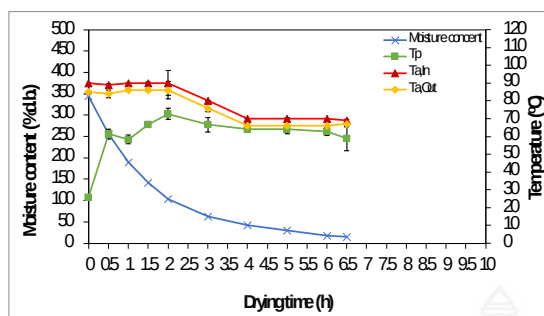
การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่โดยใช้ อินฟราเรดที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 °C และการอบแห้งด้วย อินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 และ 100 °C เป็นเวลา 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามด้วย 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตามด้วย 70 °C เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C โดยมะม่วงน้ำดอกไม้มีความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 450-540% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 15% ฐานแห้ง จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.1 และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ในขณะอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ในขณะอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ
 [HA คือ ลมร้อน, 70 80 90 100 คืออุณหภูมิ, + คือ การร่วม, FIR คือ อินฟราเรด และ 650 คือ
 กำลังอินฟราเรด, 1 1.5 และ 2 คือ เวลาอบแห้ง, h คือ ชั่วโมง, / คือ ตามด้วย]

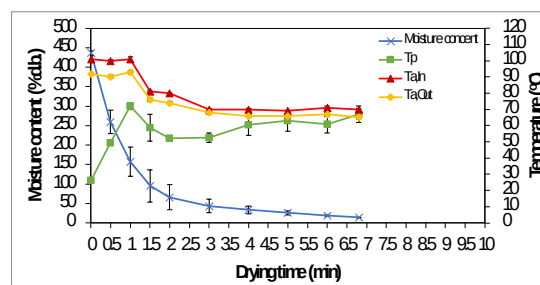


ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ และอุณหภูมิลมร้อนในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ



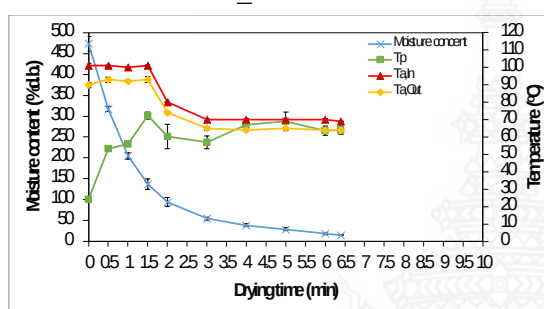
ช) HA90+FIR650_2h/

HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650



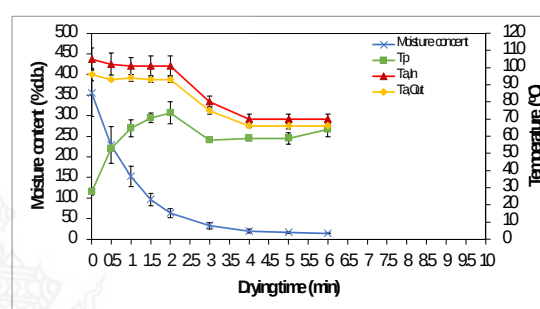
ช) HA100+FIR650_1h/ HA80+FIR650_1h/

HA70+FIR650



ณ) HA100+FIR650_1.5h/

HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650



ณ) HA100+FIR650_2h/ HA80+FIR650_1h/

HA70+FIR650

ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ และอุณหภูมิลมร้อนในขณะอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ (ต่อ)

4.2 คุณภาพสีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

สีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า สีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วง 54.26-71.38 ค่าสีแดง ($+a^*$) อยู่ในช่วง 13.58-19.34 และค่าสีเหลือง ($+b^*$) อยู่ในช่วง 48.66-61.62 โดยลักษณะสีของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 สีของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	L^*	a^*	b^*
HA70	63.29±1.78 ^{bc}	17.68±1.06 ^c	55.01±1.85 ^{bc}
HA70+FIR650	66.77±1.90 ^{ef}	15.11±0.53 ^a	56.19±1.72 ^{cd}
HA80+FIR650	63.46±1.47 ^{bc}	18.58±1.26 ^{cd}	54.73±1.61 ^{bc}
HA90+FIR650	54.26±1.82 ^a	19.34±1.38 ^d	48.66±1.92 ^a
HA90+FIR650_1h/HA80+FIR6501h/ HA70+FIR650	71.38±1.97 ^g	13.58±1.10 ^a	61.62±1.97 ^f
HA90+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	68.25±1.78 ^f	14.63±1.82 ^{ab}	59.91±1.80 ^e
HA90+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	64.48±1.93 ^{cd}	15.41±1.08 ^b	55.97±1.93 ^{cd}
HA100+FIR650_1h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	67.34±1.57 ^f	14.81±1.05 ^b	56.91±1.51 ^d
HA100+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	65.47±1.75 ^{de}	15.28±0.89 ^b	56.13±1.97 ^{cd}
HA100+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	62.06±1.89 ^b	18.79±1.48 ^{cd}	54.08±1.75 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$)



ก) HA70



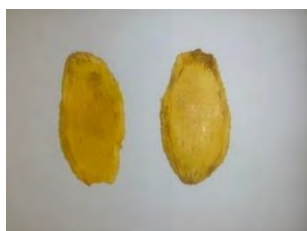
ข) HA70+FIR650



ค) HA80+FIR650



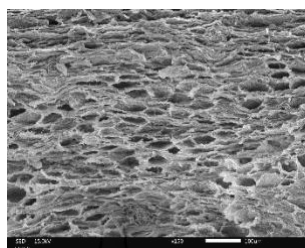
ง) HA90+FIR650

จ) HA90+FIR650_1h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650ฉ) HA90+FIR650_1.5h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650ช) HA90+FIR650_2h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650ซ) HA100+FIR650_1h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650ฌ) HA100+FIR650_1.5h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650ญ) HA100+FIR650_2h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650

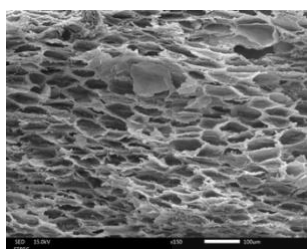
ภาพที่ 4.3 ลักษณะสีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

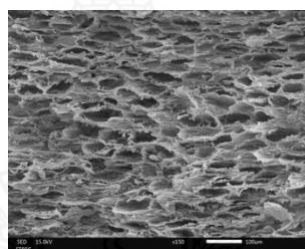
ภาพตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้ที่อบแห้งด้วยตามเงื่อนไขต่างๆ



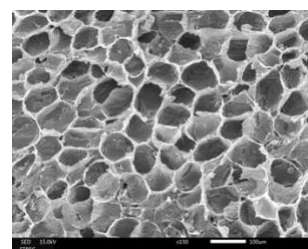
ก) HA70



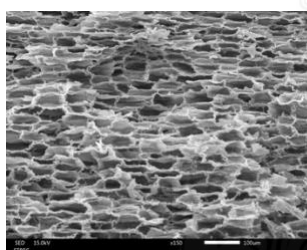
ข) HA70+FIR650



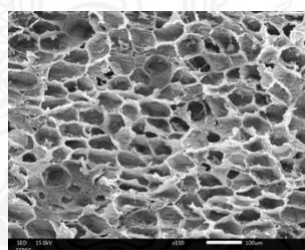
ค) HA80+FIR650



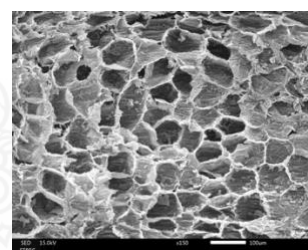
ง) HA90+FIR650



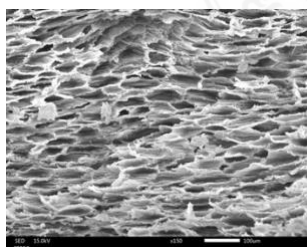
จ) HA90+FIR650_1h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650



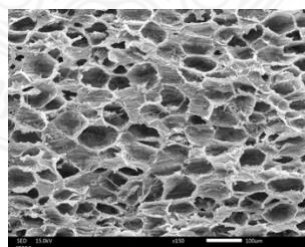
ฉ) HA90+FIR650_1.5h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650



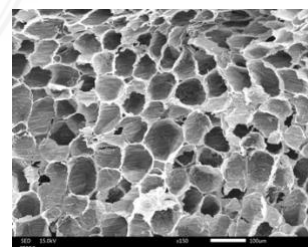
ช) HA90+FIR650_2h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650



ซ) HA100+FIR650_1h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650



ฌ) HA100+FIR650_1.5h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650



ญ) HA100+FIR650_2h/
HA80+FIR650_1h/
HA70+FIR650

ภาพที่ 4.4 ภาพตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

4.4 การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ มีร้อยละของการหดตัวอยู่ในช่วง 69.97-84.44 มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิมีร้อยละของการหดตัวต่ำกว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่มะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีร้อยละของการหดตัวมากที่สุดคือ 84.44

ตารางที่ 4.2 การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Shrinkage (%)	Drying time (h)
HA70	84.44±1.92 ^f	10.0
HA70+FIR650	80.26±2.59 ^e	8.0
HA80+FIR650	78.46±2.28 ^{de}	6.0
HA90+FIR650	69.97±1.90 ^a	4.2
HA90+FIR650_1h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	76.89±2.36 ^d	6.9
HA90+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	74.10±2.29 ^c	6.7
HA90+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	73.50±2.38 ^{bc}	6.5
HA100+FIR650_1h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	73.59±2.17 ^{bc}	6.8
HA100+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	71.37±2.38 ^{abc}	6.4
HA100+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h/HA70+FIR650	70.73±2.28 ^{ab}	6.0

หมายเหตุ: ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิ และการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ อยู่ในช่วง 6.67 - 17.46 N ค่าความเหนียวของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ อยู่ในช่วง 6.45 - 14.11 N.mm และยังพบว่าวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.534-0.578

ตารางที่ 4.3 เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีต่างๆ

Drying methods	Hardness (N)	Toughness (N.mm)	Water activity	Drying time (h)
HA70	13.79±2.23 ^e	13.25±2.43 ^d	0.571±0.010 ^b	10.0
HA70+FIR650	13.30±1.53 ^{de}	10.45±2.38 ^{bc}	0.534±0.010 ^a	8.0
HA80+FIR650	13.19±2.44 ^{de}	11.11±2.09 ^c	0.578±0.007 ^b	6.0
HA90+FIR650	6.37±2.01 ^a	6.26±2.16 ^a	0.573±0.010 ^b	4.2
HA90+FIR650_1h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	11.89±2.44 ^{cd}	9.58±2.22 ^{bc}	0.539±0.007 ^a	6.9
HA90+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1 h/HA70+FIR650	11.57±1.47 ^{bcd}	9.82±2.41 ^{bc}	0.534±0.010 ^a	6.7
HA90+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	11.15±2.27 ^{cd}	8.81±2.03 ^b	0.565±0.003 ^b	6.5
HA100+FIR650_1h/HA80+FIR650_1h /HA70+FIR650	11.95±2.53 ^{cd}	10.69±1.82 ^c	0.537±0.002 ^a	6.8
HA100+FIR650_1.5h/HA80+FIR650_1 h/HA70+FIR650	10.24±2.26 ^{bc}	6.89±2.29 ^a	0.531±0.002 ^a	6.4
HA100+FIR650_2h/HA80+FIR650_1h /HA70+FIR650	9.88±2.48 ^b	6.55±1.87 ^a	0.538±0.004 ^a	6.0

หมายเหตุ: ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคต่างๆ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่เงื่อนไขการใช้อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในด้านความร้อนต่ำที่สุด คือ 41.10 MJ/kg water evaporated ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่โดยใช้อุณหภูมิ 90 °C มีความสิ้นเปลือง

พลังงานจำเพาะทางด้านไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 14.48 MJ/kg water evaporated เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 4.2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Drying time (h)	Evaporated water (kg)	SEC (MJ/kg water evaporated)				
			Infrared	Heater	Blower	Total energy	
						Heat	Electricity
HA70	10.0	0.199	0.00	56.27	16.90	56.27	16.90
HA70+FIR650	8.0	0.205	5.44	45.21	13.13	45.21	18.57
HA80+FIR650	6.0	0.203	7.38	47.54	9.94	47.54	17.32
HA90+FIR650	4.2	0.199	7.44	57.20	7.04	57.20	14.48
HA90+FIR650_1h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.9	0.202	7.04	41.10	11.75	41.10	18.79
HA90+FIR650_1.5h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.7	0.197	7.24	43.66	11.36	43.66	18.60
HA90+FIR650_2h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.5	0.200	7.55	47.28	10.88	47.28	18.43
HA100+FIR650_1h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.8	0.197	6.32	55.97	11.67	55.97	17.99
HA100+FIR650_1.5h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.4	0.196	6.81	62.00	11.00	62.00	17.81
HA100+FIR650_2h/ HA80+FIR650_1h/ HA70+FIR650	6.0	0.204	7.71	67.99	9.89	67.99	17.60

บทที่ 5

อภิปรายผล

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับการอภิปรายผลการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบใช้อุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยนำผลมะม่วงน้ำดอกไม้แช่้ำที่อุณหภูมิ 47 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง แล้วปอกเปลือกและหั่นเนื้อมะม่วงเป็นแผ่นขนาดความหนา 1.5 cm จากนั้นอบแห้งเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ที่เงื่อนไขอินฟราเรดที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C และวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่กำลัง 650 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 และ 100 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ตามด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตามด้วยอุณหภูมิ 70 °C เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งในด้านสี การหดรัด ความแข็ง วอเตอร์แอคทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมดัลมร้อนปรับลดระดับอุณหภูมิ และการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าวิธีการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ในขณะที่อบแห้งทั้งสองวิธีสูงกว่าอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งเกิดจากอินฟราเรดสามารถถูกดูดซับได้โดยตรงโดยมะม่วง ทำให้น้ำภายในวัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Nathakaranakule et al., 2010) ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลของวัสดุสูงกว่าส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศรีณย์ ศักดิ์สุวรรณ (2560) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยใช้เทคนิคการอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิลมร้อนที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิลมร้อนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบ

อุณหภูมิคงที่ที่เงื่อนไข 90 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไข 80 °C และ 70 °C ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้ง 4.2 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ในทำนองเดียวกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่เงื่อนไขใช้อุณหภูมิ 100 °C ในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่ 90 °C ในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งที่มีต่ออุณหภูมิของกระบวนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในขั้นตอนแรกของการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าซึ่งเกิดจากวัสดุสัมผัสกับอุณหภูมิลมร้อนเป็นเวลานานกว่า ทำให้น้ำภายในวัสดุระเหยออกได้เร็วกว่า

สีของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่เงื่อนไข 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งมีค่าความสว่างของสี (L^*) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) สูงที่สุด แต่มีค่าสีแดง ($+a^*$) ต่ำที่สุด โดยมีค่าความสว่างของสี ค่าสีเหลือง และค่าสีแดง เท่ากับ 71.38 61.62 และ 13.58 ตามลำดับ เนื่องจากการอุณหภูมิของวัสดุในขณะอบแห้งสูงเฉพาะในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องของลงได้ ในขณะที่มะม่วงอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 90 °C มีค่าความสว่างของสีและค่าสีเหลืองต่ำที่สุด และค่าสีแดงสูงที่สุด เนื่องจากการอุณหภูมิของวัสดุในขณะอบแห้งสูงกว่า ส่งผลให้วัสดุอบแห้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องมากขึ้น จึงทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีสีคล้ำกว่าเงื่อนไขการอบแห้งอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้งในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งที่มีต่อสีของมะม่วงอบแห้ง พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิและเวลาอบแห้งในขั้นตอนแรกของกระบวนการอบแห้งทำให้มะม่วงอบแห้งมีค่าความสว่างของสีและค่าสีเหลืองต่ำลง แต่ค่าสีแดงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอุณหภูมิของวัสดุในขณะอบแห้งเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องมากขึ้น

โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับที่อบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีโครงสร้างภายในเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้ง เนื่องจากวัสดุมีอุณหภูมิในขณะอบแห้งต่ำกว่า ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวล

ต่ำกว่า จึงทำให้โครงสร้างเกิดการขยายตัวได้น้อยกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ในทางตรงกันข้ามมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากผลของอินฟราเรดทำให้น้ำภายในวัสดุเกิดความร้อนและทำให้เกิดการระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้โครงสร้างภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้เกิดการขยายตัว ในขณะที่มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนที่ 70°C อุณหภูมิของวัสดุในขณะที่อบแห้งค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ความดันภายในเนื้อวัสดุค่อนข้างต่ำทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ในขณะที่การเพิ่มระดับของระดับอุณหภูมิการอบแห้งมากขึ้นสำหรับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้ง ทำให้โครงสร้างภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งมากขึ้นทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของไอน้ำภายในวัสดุเพิ่มขึ้น

การหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีร้อยละของการหดตัวสูงกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้ง เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งเพียงอย่างเดียวมีโครงสร้างภายในเกิดรูพรุนขนาดเล็กกว่า ในทางตรงกันข้ามมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้งมีร้อยละของการหดตัวต่ำกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้งมีโครงสร้างเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าซึ่งเกิดจากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าทำให้แรงดันไอน้ำภายในวัสดุสูงกว่า ดังนั้นโครงสร้างของวัสดุจึงเกิดการขยายตัวและเกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้วัสดุหดตัวต่ำกว่า (ชลลดา ไร่ขาม, 2556) สอดคล้องกับงานวิจัยของสิทธิชัย ศรีไทย (2559) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง ทำให้ร้อยละของการหดตัวลดลง เนื่องจากโครงสร้างภายในของวัสดุมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอินฟราเรดและไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกันซึ่งสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อของวัสดุอบแห้งโดยตรง ทำให้กลไกการอบแห้งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพียงแต่อินฟราเรดทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อของวัสดุได้น้อยกว่า

เนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้งเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า

มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นั้นค่าความแข็งและค่าความเหนียวสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้ง เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นั้นมีร้อยละของการหดตัวสูงกว่า ทำให้วัสดุมีความแน่นของเนื้อวัสดุที่สูงกว่า การขยายตัวของโครงสร้างของวัสดุภายในน้อยกว่า (ชลลดา ไช้ขาม, 2556) ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความแข็งต่ำกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทั้งสองเทคนิคการอบแห้งมีโครงสร้างภายในเนื้อมะม่วงเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่ามะม่วงน้ำอบแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอนแรกของการอบแห้งที่มีต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่าการเพิ่มระดับอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลาในขั้นตอนแรกของการอบแห้งมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งและความหยุ่นตัวของมะม่วงอบแห้งลดลง เนื่องจากเนื้อวัสดุมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นและร้อยละของการหดตัวต่ำลง โดยมะม่วงอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ 90 °C มีค่าความแข็งและความหยุ่นตัวต่ำกว่ามะม่วงอบแห้งที่ 80 °C และ 70 °C ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันมะม่วงอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่ 2 ชั่วโมง ในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง มีค่าความแข็งและค่าความหยุ่นตัวต่ำกว่ากรณีอบแห้งที่ 1.5 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง ตามลำดับ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าวิธีการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในด้านความร้อนต่ำที่สุดคือ 41.10 MJ/kg water evaporated ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ 90 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในด้านไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 14.48 MJ/kg water evaporated เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ทำให้เครื่องเป่าลมใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่อพิจารณาผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มระดับอุณหภูมิมากขึ้นทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระดับอุณหภูมิอบแห้งมากขึ้นทำให้เครื่องผลิตความร้อนใช้พลังงานมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านไฟฟ้ากลับลดลง เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งลดลง ทำให้เครื่องเป่าลมใช้พลังงานลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล กระจำง (2560) ที่ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้งที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ

กระบวนการอบแห้ง พบว่ากระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่ากระบวนการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้หลังผ่านการอบด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ จะมีความชื้นสูงกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่อบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ที่โดยมะม่วงน้ำดอกไม้จะมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดอยู่ที่ 14.48 และมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 18.79 เมื่อนำมาเทียบกับพลังงานความร้อนรวมต่ำที่สุดจะมีค่า 41.10 และมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 67.99 ทำให้ใช้เวลาในการทำให้ความชื้นระเหยออกจากวัสดุมากขึ้น



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบปรับลดระดับอุณหภูมิเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว มะม่วงน้ำดอกไม้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำอยู่ในช่วง 18-19 °Brix นำมาปอกเปลือกและหั่นเนื้อม่วงด้วยความหนาประมาณ 1.5 cm ดำเนินการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 320-480% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 15% ฐานแห้ง โดยประเมินจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งในด้านสี ความแข็ง ความหยุ่นตัว การหดตัว วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยสามารถสรุปผลการทดลองในด้านต่างๆได้ดังนี้

1) จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ พบว่าการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ 90 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าทุกเงื่อนไขการทดลอง ทำให้ใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดทำให้ใช้เวลาอบแห้งนานที่สุด

2) การประเมินคุณภาพด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนแรกของการอบแห้ง มีค่าความสว่างของสี (L^*) และค่าสีเหลือง ($+b^*$) สูงกว่า แต่มีค่าสีแดง ($+a^*$) ต่ำกว่ามะม่วงอบแห้งด้วยเงื่อนไขอื่น

3) การประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ 90 °C มีค่าความแข็งและค่าความหยุ่นตัวต่ำกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีอื่น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งลดลง สำหรับค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่ามะม่วงอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 ซึ่งปลอดภัยจากจุลินทรีย์และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

4) การประเมินคุณภาพด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ 90 °C มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า

มะม่วงน้ำที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอื่น การเพิ่มระดับลมร้อนมากขึ้นทำให้โครงสร้างภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

5) การประเมินคุณภาพทางด้านการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ 90°C มีร้อยละของการหดตัวต่ำที่สุด

6) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง พบว่าวิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ 90°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ $14.48 \text{ MJ/kg water evaporated}$ ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดระดับอุณหภูมิที่ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทางด้านความร้อนต่ำที่สุดคือ $41.10 \text{ MJ/kg water evaporated}$

7) เจลนัซที่แนะนำสำหรับอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วย 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตามด้วย 70°C เนื่องจากผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งมีค่าความสว่างของสีและค่าสีเหลืองสูงที่สุดแต่มีค่าสีแดงต่ำที่สุด ในขณะที่ค่าความแข็ง ค่าความหยุ่นตัว และการหดตัวต่ำกว่า แต่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ามะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งทางด้านความร้อนต่ำที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเพิ่มการวิเคราะห์หาสารอาหารและตรวจสอบความสามารถในการต่อต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งหลังการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ
- 2) ควรเพิ่มขนาดของกำลังอินฟราเรดให้มากยิ่งขึ้นเพื่อให้สามารถอบแห้งได้เร็วขึ้น
- 3) ควรศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการแช่สารเคมี และการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 47°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อดูผลของการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

บทที่ 7

การนำไปใช้ประโยชน์

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการนำงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนไปใช้ประโยชน์ โดยเนื้อหาประกอบด้วย การนำไปใช้ในประโยชน์เชิงวิชาการ และการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ โดยรายละเอียดในแต่ละหัวข้อสามารถอธิบายได้ดังนี้

7.1 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการ

การนำงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนไปใช้ในเชิงวิชาการได้โดยนำผลที่ได้จากการวิจัยไปนำเสนอในงานประชุมวิชาการ หรือเผยแพร่ในรูปแบบบทความวิชาการในวารสารต่างๆ ทั้งระดับชาติหรือนานาชาติ หรือสามารถใช้ในการบูรณาการสำหรับการเรียนการสอนกับการวิจัยได้อย่างแท้จริง โดยใช้ประโยชน์ในการให้บริการทางวิชาการ (สอน/บรรยาย/ฝึกอบรม) การใช้ประโยชน์ในการพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนการสอน การเขียนตำราเพื่อใช้ในการเรียน หรือเป็นรายงานวิจัยเพื่อต่อยอดโครงการวิจัยทางด้านการพัฒนาการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ไม่ได้ต่อไป

7.2 การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

นอกจากได้ต้นแบบวิธีการผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลที่ใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการแล้ว ยังสามารถนำไปต่อยอดให้เกิดช่องทางการสร้างรายได้โดยจำหน่ายผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลซึ่งเหมาะกับผู้ที่ใส่ใจในสุขภาพอีกด้วย เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเติมสารละลายน้ำตาลลงในผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้งซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพให้กับผู้บริโภค หรือการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับจำหน่ายให้กับเกษตรกรหรือผู้ประกอบการผู้ที่สนใจสำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้และผลไม้ต่าง ๆ และนำผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการแ่สารเคมีไปจำหน่ายซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเกษตรกรผู้ปลูกมะม่วงน้ำดอกไม้ไม่ได้ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาราคามะม่วงน้ำดอกไม้ตกต่ำในฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่มีปริมาณออกสู่ตลาดในปริมาณมาก

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2567. เทคโนโลยีการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด.

[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/3825>, 9 มีนาคม 2567.

กมลรัตน์ นนทริย์. 2546. “ต้นทุนและผลตอบแทนของการเพาะเลี้ยงเห็ดหอมในอำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาบัญชี). บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2565. การผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออก. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://mediatank.doae.go.th>, 9 มีนาคม 2567.

กอบพัชรกุล เป็นบุญ. 2550. “การอบแห้งลำไยแผ่นโดยใช้เทคนิคสมระหว่างเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบลมร้อนและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร). บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

การหลุ่ร่ว่งของช่อดอกและช่อผลของมะม่วงน้ำดอกไม้.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (เกษตรศาสตร์). พิษสวน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เกศินี มีทรัพย์. 2548. “สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องต้มยำแห้ง ที่ผลิตโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน.” บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชนิรัตน์ ผึ้งบรรหาร, การันต์ ผึ้งบรรหาร. 2559. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลอ่อนแช่แข็งแบบเร็ว.” มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ชลลดา ไร่ขาม, ยุทธพันธ์ คำวัน, ปภากร จันทะวงศ์ฤทธิ์ และศิริทรัพย์ แก้วม่วง. 2560. “ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนกากน้ำตาลที่มีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ทำจากเปลือกมังคุดและเปลือกเงาะ.” (สาขาวิชาวารสารวิชาการ). วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

ชลลดา ไร่ขาม. 2556. “การพัพฟิงกล้วยด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน.” (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชิดชนก มากจันทร์, วิรัช กองสิน, สุธี ลีจิงเพิ่มพูน, กิตติพงศ์ คล้ายดี และ เอกชัย รัตนบรรลือ, 2561. “โครงการเครื่องอบแห้งเปลือกแก้วด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับปั๊มความร้อน.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ณพวีร์ หวังใจชื่น. 2560. “การพัฒนามะม่วงอบแห้งธรรมชาติโดยใช้ลมร้อนร่วมกับการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม). พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ณัฐพล กระจำง. 2560. “การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาฟิสิกส์). วิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เดชา ปะเขทานัง, เชิดพงษ์ เขียวชาญวัฒนา, จักรมาส เลาหวณิช, พิระยศ แข็งขัน, สุพรรณ ยั่งยืน. 2563 “อิทธิพลของรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการเทมเปอริง ต่อร้อยละการงอกและการเจริญเติบโตต้นอ่อนของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105.” มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- เทคโนโลยีชาวบ้าน. 2565. มะม่วงแรด ลักษณะโดดเด่น รสชาติดี. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_51771, 9 มีนาคม 2567.
- ธีรยุทธ ชาดิชนะยืนยง และ เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป. 2562. “เครื่องอบแห้งรังสีอินฟราเรด-ลมร้อน เอกชนต่อยอดเชิงพาณิชย์.” มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- นรินทร์ เจริญพันธ์ และ น้ำทิพย์ มีมุข, 2561. “ผลของวิธีการลวกที่แตกต่างกันต่อคุณภาพมันเทศเนื้อสีส้ม.” คณะเทคโนโลยีการเกษตร. มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว.
- นริศ พัวพันวัฒนะ, ภารดร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. 2551. “จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิดดา หงส์วิวัฒน์ และทวีทอง หงส์วิวัฒน์, 2550. “หนังสือผลไม้ 111 ชนิดคุณค่าอาหารและการกิน.” กรุงเทพมหานคร : แสงแดด.
- นิธิยา รัตนพานนท์. 2536. เคมีอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- นิสสา หวานเสนาะ. 2552. “ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเอ็นเอเอ และเอทีฟอน เพื่อการชักนำการหลุดร่วงของช่อดอกและช่อผลของมะม่วงน้ำดอกไม้.” ปริญญาโท. (ภาควิชาเกษตรศาสตร์). พืชสวน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บริษัท ยูนิ-เพรสซิเดนซ์ (ประเทศไทย) จำกัด. 2567. มะม่วงน้ำดอกไม้. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.unifhealthwallet.com>, 9 มีนาคม 2567.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ประทีป ตุ่มทอง และ มงคล साแก้ว. 2559. “เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน.” การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชมงคลสุรินทรวินิจฉัย ครั้งที่ 8". 22-23 (ธันวาคม). 384-388.
- ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์ และ สุธาสัย ตริวานิช. 2546. “จุลินทรีย์ในอาหาร.” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549. “การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน). พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ภูมิใจ สอาดโนม. 2548. “การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยหอมทองด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน). พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เรียวโซ โทเอ. 2525. “อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม.” โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรมสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วนิสสา หวานเสนาะ. 2552. “ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเอ็นเอและเอทีฟอนเพื่อการชักนำไวรัส ศรีอริยะกุล. 2555. “การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน.” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 17, 3. 2697-5548.
- ศรัณย์ ศักดิ์สุวรรณ. 2560. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ระหว่างมะม่วงอบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาลโดยใช้เทคนิคการอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศักดิ์รินทร์ รัสศรี. 2541. “การอบแห้งมะม่วงแช่แข็งโดยใช้ป้อนความร้อน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน). พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศุภชัย แก้วจิง. 2557. “ศึกษาอิทธิพลรังสีอินฟราเรดกับการอบแห้งกะปิ.” คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.
- ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร. 2560. ผลไม้แห้ง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.foodnetworksolution.com>, 9 มีนาคม 2567.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. สถิติการส่งออกมะม่วง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.oae.go.th/assets/portals/1>, 9 มีนาคม 2567.
- สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2553. คุณค่าทางโภชนาการในผลไม้. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://nutrition2.anamai.moph.go.th>, 9 มีนาคม 2567.
- สิทธิชัย ศรีไทย. 2559. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งโดยปราศจากการเติมสารละลายน้ำตาล โดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบปรับลดอุณหภูมิและแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุธินี โกกิลัน. 2567. น้ำดอกไม้สีทอง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://khlengkhuuan.com>, 9 มีนาคม 2567.
- สุพิชญา รุ่งเรือง และ มณีกาญจน์ บุญส่ง. 2553. “การศึกษากรรมวิธีการอบแห้งเห็ดเป่าฮือ.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล, สากีนา ลาแมปะ และยุทธนา ฐิระวณิชกุล. 2555. “การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน: จลนพลศาสตร์ คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17, 1 (กุมภาพันธ์). 117-129.
- องค์การบริหารส่วนตำบลคลองเขื่อน. 2567. มะม่วงอกร่องพิบูล. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://khlengkhuuan.com/>, 9 มีนาคม 2567.
- อนุสรานาดี, ยุทธนา ฐิระวณิชกุล และ สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล. 2555. “จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17, 2 (กุมภาพันธ์). 130-138.
- อรพินธุ์ สฤษดิ์น้ำ. 2558. “การศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมมะม่วงโดยเทคนิคเครื่องหมายโมเลกุลเอส เอส อาร์.” มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ออลส์ เกษตร. 2567. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์มะม่วง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.allkaset.com/plant>, 9 มีนาคม 2567.
- อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และ ธนภัทร สุวรรณภู. 2550. “การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด.” วิศวกรรมสาร มข. 34, 2 (มีนาคม-เมษายน) : 189-201.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- อุทยานการอาชีพชัยพัฒนา. 2567. มะม่วงเขียวเสวย. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://chaipatpark.com/tips>, 9 มีนาคม 2567.
- Apintanapong, M. 2009. “Infrared drying of holy basil leaves and its effect on sensory characteristics.” **Agricultural Science Journal**, 52, 2: 135-155.
- Idris, A., and Khalid, K. and Omar, W. 2004. “Drying of silica sludge using microwave heating.” **Elsevier**. 24, 5-6 (April): 905-918.
- IEnergyGuru. 2558. Drying. [Online] Available : <https://ienergyguru.com/2015/09/drying/>, March 9, 2024
- 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.
- Raikhom, 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**.
- Sakai, N., and Hanzawa, T. (1994). “Application and advances in far-infrared heating in Japan.” **Trends in Food Science & Technology**, 5, 357-362.
- Sandu, C. 1986. “Infrared radiative drying in food engineering: Process Analysis.” **Biotechnology Progress**.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีสุธินันท์ พชรชัยวิรากุล	
วัน เดือน ปีเกิด	31 กรกฎาคม 2540	
ภูมิลำเนา	เขตบางพลัด แขวงบางพลัด จังหวัดกรุงเทพฯ	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรปริญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2563
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน		
บริษัท วิรัชญา ดีไซน์ จำกัด		