

กระบวนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและลมร้อนสำหรับการผลิตแครอทชิพ  
MICROWAVE-VACUUM AND HOT AIR DRYING  
FOR CARROT CHIPS PRODUCTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและลมร้อนสำหรับการผลิตแครอทชิพ

MICROWAVE-VACUUM AND HOT AIR DRYING

FOR CARROT CHIPS PRODUCTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICROWAVE-VACUUM AND HOT AIR DRYING  
FOR CARROT CHIPS PRODUCTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและลมร้อนสำหรับการผลิตแครอทชิพ		
นักศึกษา	นางสาวกนกอร	ทัดเทียม	รหัสนักศึกษา 59010012
	นางสาวรวงคณา	ไกรยา	รหัสนักศึกษา 59011188
	นางสาววิภา	พิมพ์สมาน	รหัสนักศึกษา 59011232
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร		
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ		
พ.ศ.	2562		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไมโครเวฟต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทชิพจนมีความชื้นสุดท้าย  $0.06 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  ด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนหนึ่งการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (480-960 W, 5 kPa) และขั้นตอนที่สองการอบแห้งแบบลมร้อน (100 °C, 0.47 m/s) รวมถึงวิเคราะห์คุณภาพของแครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอน โดยมีวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนขั้นตอนเดียวเป็นวิธีการเปรียบเทียบ ผลการทดลองแสดงว่าวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มข้นต่างกันมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ระยะเวลาการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยความเข้มข้นที่ 960 W มีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ  $3.1426 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$  ใช้ระยะเวลาการอบแห้งและพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ 34.5 นาที และ 14.55 kWh/kg ตามลำดับเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มข้น 720 W, 480 W และการอบแห้งแบบลมร้อนขั้นตอนเดียว วิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของแครอทชิพ ได้แก่ การหดตัว สี เนื้อสัมผัส ปริมาณแคโรทีนอยด์ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนขั้นตอนเดียว ขณะที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันในวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนไม่ส่งผลให้คุณภาพของแครอทชิพแตกต่างกันทางสถิติมากนัก โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 720 W และ 960 W มีเพียงปริมาณแคโรทีนอยด์เท่านั้นที่แตกต่างกันทางสถิติในทุกสิ่งทดลอง โดยที่ความเข้มข้น 720 W ทำให้ได้ปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุดถึง 12.95 mg/L คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี ความแข็ง ความกรอบ รสชาติ และความชอบโดยรวมของแครอทชิพที่อบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มข้น 720 W ยังสูงกว่าแครอทชิพที่อบแห้งแบบลมร้อนในขั้นตอนเดียวด้วย

**คำสำคัญ:** แครอท, ชิพ, ไมโครเวฟ, สุญญากาศ, การอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Microwave-vacuum and hot air drying for carrot chips production		
<b>Authors</b>	Kanokon	Thudthiam	59010012
	Warangkhan	Kraiya	59011188
	Wipha	Phimsaman	59011232
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen		
<b>Year</b>	2019		

### Abstract

The objective of this research was to study the effect of microwave intensity on drying characteristics and energy consumption during the two-stage drying of carrot chips to the final moisture content of  $0.06 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  including the first stage of microwave-vacuum drying (480-960 W, 5 kPa) and the second stage of hot air drying (100 °C, 0.47 m/s). Quality of carrot chips undergoing the two-stage drying was evaluated as well. The single stage hot air drying was conducted as a comparative method. The results show that different microwave intensity of the two-stage drying had an effect on maximum drying rate, drying time and energy consumption. The microwave intensity of 960 W provided the greatest maximum drying rate of  $3.1426 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}\cdot\text{min}$  and required the minimum drying time and specific energy consumption of 34.5 minute and 14.55 kWh/kg respective as compared to the two-stage drying at the microwave intensity of 720 W, 480 W and the single stage hot air drying. The two-stage microwave-vacuum drying could significantly improve quality of carrot chips in relative to the single stage hot air drying. However, different microwave intensity values, especially between 720 and 960 W, did not statistically affect the carrot chips quality, excepting the carotenoid content. The microwave intensity of 720 W resulted in the highest carotenoid content of 12.95 mg/L. Preference scores for appearance, color, hardness, crispiness, taste and overall preference of the carrot chips subjected to the two-stage microwave-vacuum drying at 720 W were higher than those of the carrot chips from the single stage hot air drying.

**Keywords:** carrot, chips, microwave, vacuum, drying

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ ที่ช่วยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการจัดทำโครงการ รวมทั้งอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ วิศวกรรมเกษตร ที่สละเวลาให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ทั้งกำลัง ภายและกำลังใจในการทดลองเสมอ

ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนการทำงานและให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยเสมอมา คุณงามความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดาที่รักและเคารพ ตลอดจนจรรยาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ คณะผู้วิจัย

กนกอร ทัดเทียม  
วรางคณา ไกรยา  
วิภา พิมพ์สมาน

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แครอท	4
2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง	4
2.2.1 การอบแห้ง	4
2.2.2 ความชื้น	4
2.2.3 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร	5
2.2.4 ความชื้นสมดุล	6
2.2.5 อัตราส่วนความชื้น	6
2.2.6 อัตราการทำแห้ง	6
2.2.7 กราฟอัตราการทำแห้ง	6
2.3 ทฤษฎีไมโครเวฟ	7
2.4 ไมโครเวฟกับการอบแห้ง	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5 การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ	8
2.6 ทฤษฎีสถูญญากาศ	8
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ตัวอย่างและการเตรียมแครอท	15
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	16
3.3 แผนการทดลอง	19
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง	20
3.4.1 ความชื้น	20
3.4.2 อัตราส่วนความชื้น	21
3.4.3 อัตราการทำแห้ง	21
3.4.4 เวลาในการอบแห้ง	21
3.5 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง	21
3.6 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์	22
3.6.1 ปริมาตรและการหดตัว	22
3.6.2 สีและการเปลี่ยนแปลงสี	22
3.6.3 ประเมินเนื้อสัมผัส	23
3.6.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์	24
3.6.5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ลักษณะการอบแห้ง	27
4.2 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทีน	30
4.3.1 ปริมาณและการทดสอบ	31
4.3.2 สีและการเปลี่ยนแปลงสี	31
4.3.3 เนื้อสัมผัส	32
4.3.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์	33
4.3.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัส	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก	41
ภาคผนวก ข	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 กำหนดการดำเนินงานของงานวิจัย	3
ตารางที่ 3.1 คำนิยามและระดับความเข้มอ้างอิงของความแข็งและความกรอบในชิพชนิดต่าง ๆ	25
ตารางที่ 4.1 เวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมและอัตราการอบแห้งสูงสุด ของการอบแห้งแคโรทซิฟด้วยวิธีต่าง ๆ	29
ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแคโรทซิฟด้วยวิธีต่าง ๆ	30
ตารางที่ 4.3 ร้อยละการหดตัวของแคโรทซิฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ	31
ตารางที่ 4.4 ค่าสีของแคโรทซิฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ	32
ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของแคโรทสดและแคโรทซิฟที่ทำการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ	33
ตารางที่ 4.6 ระดับความเข้มของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแคโรทซิฟ	34
ตารางที่ 4.7 ระดับความชอบของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแคโรทซิฟ	35

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งและความชื้นของวัสดุ	7
รูปที่ 2.2 การแบ่งบริเวณของความดัน	9
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ของภาคตัดขวางของฟักทองอบแห้ง	10
รูปที่ 2.4 อัตราส่วนการคืบน้ำของฟักทองอบแห้งที่เวลาในการคืบน้ำต่าง ๆ	11
รูปที่ 2.5 ภาพถ่าย สเตอริโอไมโครกราฟ และไมโครกราฟของกล้วยอบแห้ง ที่ผ่านวิธีการอบแห้งต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.6 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของเซอร์รี่เปรี้ยวที่อบแห้งแบบพาความร้อน (CD) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และที่อบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (VMD) ที่กำลังไมโครเวฟต่าง ๆ	13
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นแครอทที่ใช้ในการอบแห้ง	15
รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ	16
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน	16
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดค่าสี	17
รูปที่ 3.5 เครื่อง Texture analyzer	17
รูปที่ 3.6 เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์	18
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่าพลังงาน	18
รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลอง	20
รูปที่ 3.9 พิกโนมิเตอร์	22
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางจากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	23
รูปที่ 3.11 ระดับความเข้มอ้างอิงของความสว่างของสี	26
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแครอทชิพ ด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน	28
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแครอทชิพ ด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน	28
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้ง แครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน	29
รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน และการอบแห้งแบบลมร้อน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.5 แครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ	31
รูปที่ 4.6 แครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ และการอบแห้งแบบลมร้อน	32
รูปที่ 4.7 แรงสูงสุดที่ทำให้แครอทชิพเริ่มแตกหรือทะลุของกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

แครอทเป็นพืชกินหัวที่นิยมปลูกและรับประทานอย่างมากทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากแครอทมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ซึ่งเบต้าแคโรทีนในแครอทจะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ช่วยบำรุงสายตาและผิวพรรณ และยังมีสารฟอลคารินอล (falcarinol) ที่มีคุณสมบัติช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งอีกด้วย (มูลนิธิโครงการหลวง, ม.ป.ป.) ปัจจุบันจึงมีการนำแครอทมาแปรรูปในรูปแบบต่าง ๆ มากมาย เพื่อถนอมอาหารและเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ เช่น แยมแครอท เยลลี่แครอท แครอทอบแห้ง เป็นต้น

การอบแห้ง เป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญได้ จึงช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการที่เกิดการถ่ายเทความร้อนแก่วัสดุ จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและคุณภาพของวัสดุ เช่น สี การหดตัว เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางอาหาร ซึ่งในกระบวนการอบแห้งที่แตกต่างกันอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะหรือคุณภาพที่แตกต่างกันด้วย กระบวนการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะช่วยลดความเสียหายด้านโครงสร้าง สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร โดยเฉพาะความเสียหายที่มีสาเหตุจากความร้อน นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดพลังงานในกระบวนการได้อีกด้วย (สั๊กมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

การอบแห้งแบบไมโครเวฟ เป็นการใช้คลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2,450 MHz ในการกระตุ้นน้ำภายในวัสดุให้เกิดการสั่นสะเทือน ทำให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุเกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ โดยมีรูปแบบการเกิดความร้อนจากการดูดซับคลื่นอยู่ 2 รูปแบบ คือ 1) Ionic Polarization เป็นการเกิดความร้อนจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในวัสดุ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้าจะถูกกระตุ้น และเร่งให้มีการเคลื่อนที่ เกิดการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน 2) Dipole Rotation เป็นการเกิดความร้อนกับวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วไฟฟ้า จากที่วางตัวกระจัดกระจาย เมื่อกระทบกับคลื่นไมโครเวฟ จะจัดเรียงตัวและเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศกลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ เกิดการวิ่งสลับเป็นหลายล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้น (Siamchemi, 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเด่นของการอบแห้งแบบไมโครเวฟ คือ เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบทั้งปริมาตร (volumetric heating) วัสดุจึงเกิดความร้อนทั่วทั้งชิ้นในเวลาเดียวกัน และไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ทำให้มีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลง ในการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟมักใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบอื่นเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นออกจากวัสดุ และช่วยให้วัสดุมีลักษณะปรากฏและคุณภาพดีขึ้น ในรายงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งที่ใช้ไมโครเวฟ โดยเฉพาะการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (microwave-vacuum drying) ได้ยืนยันว่าการอบแห้งระบบนี้ สามารถช่วยพัฒนากระบวนการและปรับปรุงคุณภาพของวัสดุได้ เช่น การอบแห้งขึ้นฟักทอง ให้ผลออกมาว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศใช้เวลาในการอบแห้งสั้นมาก และสามารถทำให้วัสดุมีรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งเป็นผลทำให้วัสดุมีความกรอบมากขึ้น ในการวัดค่าสีของวัสดุ พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมีค่าน้อยอีกด้วย (Monteiro et al, 2018) จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีแนวทางที่เป็นไปได้ในการใช้วิธีการอบแห้งแบบนี้เพื่อผลิตแครอทชิพ

การอบแห้งแบบสองขั้นตอน เป็นการใช้วิธีการอบแห้ง 2 วิธีในกระบวนการอบแห้ง โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ และขั้นตอนที่ 2 เป็นการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งในขั้นตอนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ จะมีอัตราการทำแห้งที่สูง และเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึง  $0.05-0.15 \frac{g_{water}}{g_{wet\ matter}}$  วัสดุที่อยู่ในระหว่างการอบแห้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและอาจเกิดสถานะ overheating ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดภายในวัสดุ (Ozcelik, 2017) การอบแห้งแบบลมร้อนในขั้นตอนที่ 2 จะทำให้ความเครียดในวัสดุเนื่องจากการลดความชื้นแบบรวดเร็วด้วยไมโครเวฟลดลง ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากกว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีไมโครเวฟต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน
- 2) เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของแครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ตัวอย่างเครื่องที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครื่องเงินเท่านั้น
- 2) ศึกษากระบวนการอบแห้ง
  - 2.1) ตัวแปรต้น คือ การอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน
  - 2.2) ตัวแปรตาม คือ ลักษณะการอบแห้ง พลังงานจำเพาะ และคุณภาพของแครอทชิพ ได้แก่ การหดตัว สี เนื้อสัมผัส ปริมาณแคโรทีนอยด์ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส
- 3) เครื่องอบแห้งสำหรับกระบวนการอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ ดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้กระบวนการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน
- 2) ได้ผลิตภัณฑ์แครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 กำหนดการดำเนินงานของงานวิจัย

ขั้นตอนดำเนินงาน	ปี / เดือน									
	พ.ศ. 2562					พ.ศ. 2563				
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
1. ค้นหาข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
2. ศึกษาลักษณะการอบแห้งของแครอทชิพ										
3. วิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง										
4. วิเคราะห์คุณภาพของแครอทชิพ										
5. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล										
6. ทำรายงานเล่มปริยญาณิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แครอท

แครอท (carrot) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Daucus carota* L. จัดอยู่ในวงศ์ผักชี (APIACEAE หรือ UMBELLIFERAE) มีถิ่นกำเนิดในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงและประเทศแถบเอเชียกลางอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) โดยเบต้าแคโรทีนในแครอทจะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ซึ่งช่วยบำรุงและรักษาสายตา รักษาโรคตาฟาง และต่อกระดูก และยังมีสารฟอลคารินอล (falcarinol) ที่มีคุณสมบัติช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง นอกจากนี้ยังมีวิตามินอีกมากมาย เช่น ธาตุแคลเซียม วิตามินอี และวิตามินซี เป็นต้น (มูลนิธิโครงการหลวง, ม.ป.ป.)

กระบวนการทำแห้งแครอทในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) การอบแห้งด้วยคลื่นอัลตราโซนิคสุญญากาศ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การอบแห้งแบบลมร้อน และการอบแห้งด้วยอากาศ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการอบแห้งดังกล่าวส่วนใหญ่มักเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอาหารกึ่งสำเร็จรูป

#### 2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.2.1 การอบแห้ง คือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุที่มีความชื้น เพื่อกำจัดน้ำออกจากวัตถุ โดยการระเหยเป็นกระบวนการที่ลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, aw) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารได้ เพราะปริมาณน้ำในผลผลิตการเกษตรส่วนมากจะอยู่ในรูปของน้ำอิสระ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ และเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร

##### 2.2.2 ความชื้น (moisture content)

ความชื้น คือ ปริมาณสารที่ระเหยได้ทั้งหมด เป็นค่าที่บอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุ มีอยู่ 3 รูปแบบได้แก่ Bound water, Adsorbed water และ Free water น้ำที่สูญเสียไปจากการให้ความร้อนจะเป็น Free water ส่วน Bound Water และ Adsorbed water จะเกาะติดกับโมเลกุลของอาหารซึ่งยากที่จะแยกออกจากอาหาร จากนั้นก็สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า Moisture content ได้ ความชื้นเป็นสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของอาหาร เนื่องจาก

(1) ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) โดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ (microbial spoilage) ซึ่งกระทบต่ออายุการวางจำหน่าย (shelf life) อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย (perishable food) เนื่องจากมีสภาวะเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ความชื้นมีผลต่อความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) อาหารที่มีน้ำสูง เหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) และการสร้างสารพิษ (toxin) ที่ก่อให้เกิดโรค อาหารเป็นพิษ รวมถึงการสร้างสารพิษของรา (mycotoxin) เช่น aflatoxin และ patulin ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

(3) ความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่าง ๆ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat)

(4) ความชื้นมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของอาหาร ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking)

(5) ความชื้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

(6) ความชื้นมีผลต่อการกำหนดราคาสินค้า เช่น ข้าว เมล็ดธัญพืช กำหนดราคารับซื้อผันแปรตามปริมาณ

2.2.3 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร ปริมาณความชื้นของอาหารนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 รูปแบบ คือ

(1) ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าที่นิยมใช้ในทางการค้า สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$MC (\%wb) = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (2.1)$$

(2) ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารคงที่ อาจบอกเป็นจำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ( $g_{H_2O}/g_{solid}$ ) หรือเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสูตร (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ม.ป.ป.)

$$MC (\%db) = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ MC คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกหรือแห้ง (%wb, %db)

$W_w$  คือ มวลวัสดุเริ่มต้น (g)

$W_d$  คือ มวลวัสดุที่แห้ง (g)

## 2.2.4 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

เป็นปริมาณความชื้นของวัสดุที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วัสดุขึ้นจะไม่มี การดูดและคายความชื้นจากอากาศรอบ ๆ มีค่าความชื้นคงที่ สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าต้องการให้ความชื้นลดลงจากนี้ต้องเปลี่ยนสภาวะการ รอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุ เช่น ลดขนาด

2.2.5 อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุที่กำลังอบแห้ง เทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \times 100 \quad (2.3)$$

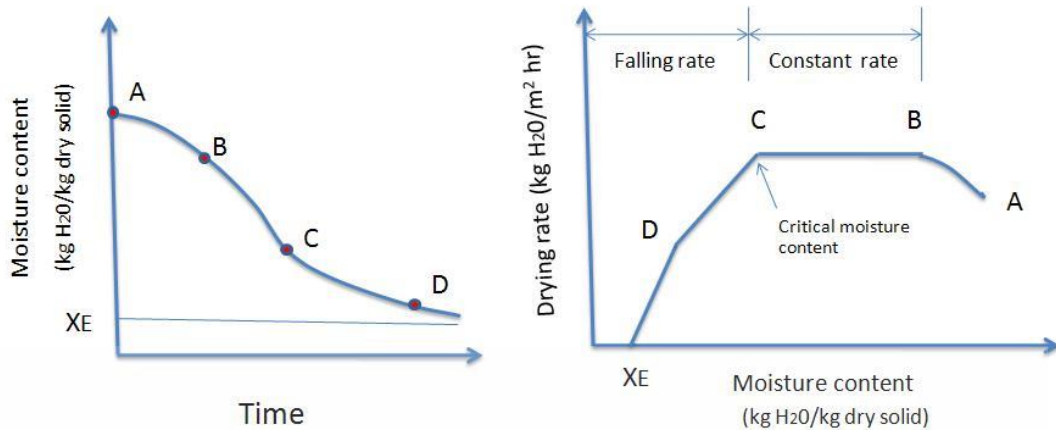
เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ( $g_{water}/g_{dry\ matter}$ )
	$M_0$	คือ ความชื้นเริ่มต้น ( $g_{water}/g_{dry\ matter}$ )
	$M_{eq}$	คือ ความชื้นที่สมดุล (มีค่าเท่ากับ 0) ( $g_{water}/g_{dry\ matter}$ )

2.2.6 อัตราการทำแห้ง (drying rate) คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการ ระเหยต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง (dehydration)

อัตราการทำแห้งของอาหาร ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และ สภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง (drier) อุณหภูมิ เวลา ความชื้น สัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) เป็นต้น (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ , ม.ป.ป.)

## 2.2.7 กราฟอัตราการทำแห้ง (drying rate curve)

เป็นกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในวัสดุเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทำแห้ง โดยปกติอัตราการทำแห้งของวัสดุจะไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งสามารถ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำให้แห้งและความชื้นของวัสดุ

ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate-อัตราการทำให้แห้ง>

(1) ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นจึงมีค่าสูง ในช่วงนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของอาหารสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสมดุลที่เงื่อนไขกำหนดในการอบแห้งเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศ อัตราการทำให้แห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราทำให้แห้งคงที่ (constant rate)

(2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period - BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า และระเหยออกไปด้วยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่อง เป็นช่วงที่ความชื้นเฉลี่ยของอาหารลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นวิกฤต (critical moisture content) อัตราการทำให้แห้งจะเริ่มลดลง

(3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าของอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง อัตราการอบแห้งและความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้อัตราการทำให้แห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ม.ป.ป.)

## 2.3 ทฤษฎีไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ (microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ชนิดที่สายตาไม่สามารถมองเห็นได้ แต่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือเฉพาะ ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1mm – 1m และมีความถี่ของคลื่นอยู่ในช่วง 300MHz-300000MHz ซึ่งคลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติดังนี้

1. การสะท้อนกลับ (reflection) คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านวัสดุที่เป็นโลหะได้ จะ

สะท้อนกลับหมดเมื่อกระทบวัสดุที่เป็นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การส่งผ่าน (transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุที่ไม่ใช่โลหะได้
3. การดูดซับ (adsorption) เมื่อวัสดุที่มีความชื้นหรือมีน้ำภายใน วัสดุจะดูดซับคลื่นบางส่วนเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่นสะสมและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจึงทำให้เกิดความร้อนตามมา หลังจากถูกดูดซับคลื่นไมโครเวฟจะสลายตัว ไม่ตกค้างในอาหาร (Siamchemi, 2560)

## 2.4 ไมโครเวฟกับการอบแห้ง

ไมโครเวฟถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร รวมทั้งใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีการนำมาใช้ทั้งไมโครเวฟระบบธรรมดาและระบบสุญญากาศ โดยจะใช้คลื่นความถี่ในช่วง 915-2450 MHz เป็นแหล่งกระตุ้นให้ภายในอาหารหรือวัสดุเกิดความร้อน นอกจากนี้ความชื้น ขนาดรูปร่าง อุณหภูมิ และมวลของวัสดุมีผลต่อความร้อนที่จะเกิดขึ้น ซึ่งรังสีไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นเมื่อผ่านเข้าไปในอาหารหรือของเหลว โมเลกุลของน้ำจะเกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนและอุณหภูมิสูงขึ้น (Siamchemi, 2560)

## 2.5 การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ

ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุเกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ตัวคลื่นไมโครเวฟไม่ได้เป็นตัวให้ความร้อน เมื่อคลื่นถูกดูดซับแล้วจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งน้ำที่เป็นโมเลกุลมีขั้วอยู่ในวัสดุหรืออาหาร เกิดปฏิสัมพันธ์กับคลื่นไมโครเวฟ (interaction) โดยเมื่อน้ำอยู่ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ จะจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ ทิศทางของขั้วสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟจะเปลี่ยนสลับไปมาหลายๆ ล้านครั้งต่อวินาที โดยเมื่อโมเลกุลของสนามไฟฟ้าสลับขั้วไปมาโมเลกุลของน้ำก็จะหมุนด้วยทิศทางหนึ่งด้วยความถี่สูงเช่นกัน ทำให้เกิดพลังงานจลน์สูงและต่อมาก็เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในอาหารหรือวัสดุมีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเช่นกัน (Siamchemi, 2560)

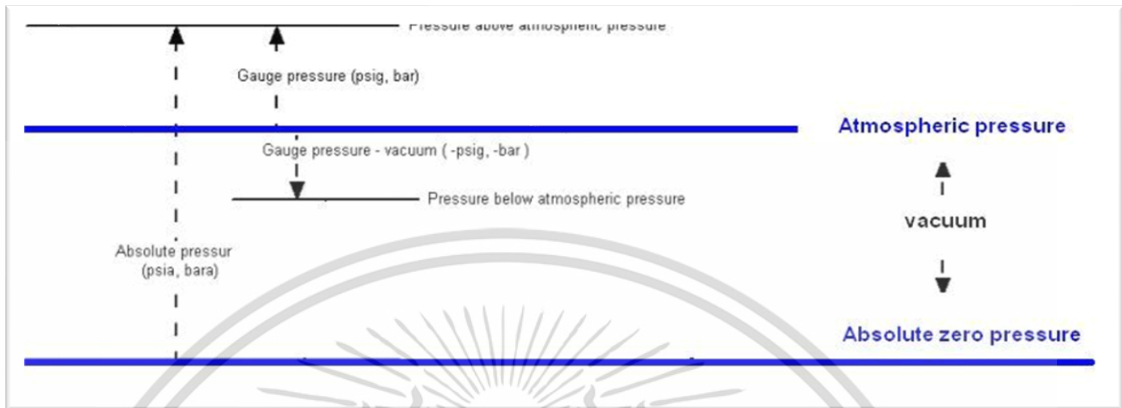
## 2.6 ทฤษฎีสัญญากาศ

สุญญากาศ (อังกฤษ: vacuum มาจากภาษาละตินแปลว่า ว่างเปล่า) คือปริมาตรของช่องว่างซึ่งมีความดัน (pressure) ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) ในความเป็นจริงไม่สามารถทำให้ปริมาตรของช่องว่างว่างเปล่าได้อย่างสมบูรณ์หรือที่เรียกว่า สุญญากาศสมบูรณ์ (perfect vacuum) ซึ่งมีความดันเป็นศูนย์ สุญญากาศสมบูรณ์จึงเป็นแนวความคิดที่ไม่สามารถสังเกตการณ์ได้ในทางปฏิบัติ นักฟิสิกส์มักจะถกเถียงเกี่ยวกับผลการทดลองในอุดมคติว่าจะเกิดอะไรขึ้นในสุญญากาศสมบูรณ์ โดยใช้คำว่าสุญญากาศแทนสุญญากาศสมบูรณ์ และใช้คำว่า สุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) แทนความหมายของสุญญากาศที่เกิดขึ้นได้จริง (Midwest Tungsten Service, ม.ป.ป.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันที่มีค่าน้อยกว่าความดันบรรยากาศปกติ เรียกว่า ความดันสุญญากาศ (vacuum pressure,  $P_{vac}$ ) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$P_{vac} = \text{Atmospheric pressure} - \text{Absolute pressure} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 การแบ่งบริเวณของความดัน

ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0846/vacuum>

การใช้สภาวะสุญญากาศที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหาร

1. ใช้กับอุปกรณ์แปรรูปอาหารที่ต้องการให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำซึ่งลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(oxidation) เพื่อรักษาคุณภาพของอาหาร เช่น เครื่องทำแห้งสุญญากาศ (vacuum drier) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เป็นต้น

2. การบรรจุอาหารในสภาวะสุญญากาศ (vacuum packaging) เป็นการบรรจุอาหารในภาชนะที่ปิดสนิทซึ่งภายในถูกกำจัดอากาศออกเพื่อรักษาคุณภาพอาหาร (พิมพ์พิเศษ พรเฉลิมพงศ์, ม.ป.ป.)

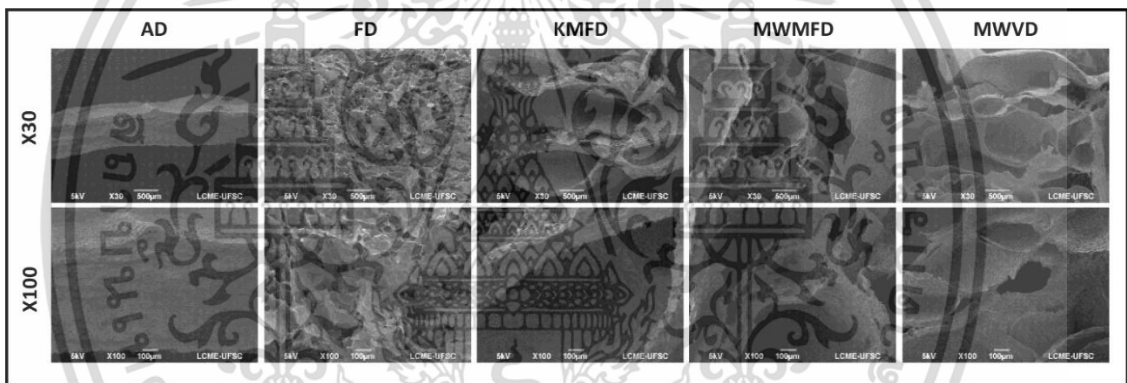
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การอบแห้งแบบไมโครเวฟมัลติเฟลซและการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศต่อโครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวของฟักทองแผ่น

Monteiro et al. (2018) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการอบที่ต่างกันต่อโครงสร้างจุลภาค ความพรุนและเนื้อสัมผัสของฟักทองแผ่นเพื่อหากระบวนการที่ดีที่สุด โดยใช้กระบวนการอบแห้งที่ต่างกัน 1) ไมโครเวฟมัลติเฟลซ (MWMFD) โดยให้ความร้อนจนถึง 60 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ หยุดให้ความร้อนและเปิดสุญญากาศจนความดันเท่ากับ 5 kPa ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจะถูกรอบแห้งภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 7 นาที 2) ไมโครเวฟสุญญากาศ (MWVD) ให้ความร้อนที่ 1000 W เป็นเวลา 7 นาที 3) การอบแห้งมัลติเฟลซแบบนำความร้อน (KMFD) โดยฟักทองวางบนแผ่นความร้อนภายในห้องอบ ถูกทำให้ความร้อนจนถึง 60 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ หยุดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนและเปิดสุญญากาศจนความดันเท่ากับ 5 kPa ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจะถูกอบแห้งภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 184 นาที 4) การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) แช่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.02 mbar เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 5) การอบแห้งด้วยลม (AD) อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 22 % จากไมโครกราฟรูปที่ 2.3 แสดงรูพรุนภายในโครงสร้างจุลภาคที่ส่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่าการอบแห้งฟักทองแผ่นแบบมัลติแฟลช แบบนำความร้อน แบบไมโครเวฟสุญญากาศ และแบบไมโครเวฟมัลติแฟลช มีรูพรุนใหญ่กว่าฟักทองแผ่นที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศซึ่งมีโครงสร้างอัดแน่นและที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่แข็งโครงสร้างของเนื้อจะมีรูพรุนเล็ก ๆ ผลจากการทดสอบแบบกดทะลุตัวอย่างตัวอย่างจากอบแห้งแบบไมโครเวฟมัลติแฟลชมีความกรอบมากกว่าอบด้วยวิธีอื่น และจากการวัดค่าสีของตัวอย่างยังพบว่าการอบด้วยวิธี KMFD, MWVD และ MWMFD ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงสีต่ำ ดังนั้นกระบวนการอบแห้งแบบ MWMFD และ MWVD กระบวนการอบแห้งเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตฟักทองแห้งอบกรอบ



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ของภาคตัดขวางของฟักทองอบแห้ง (กำลังขยาย 30× และ 100×)

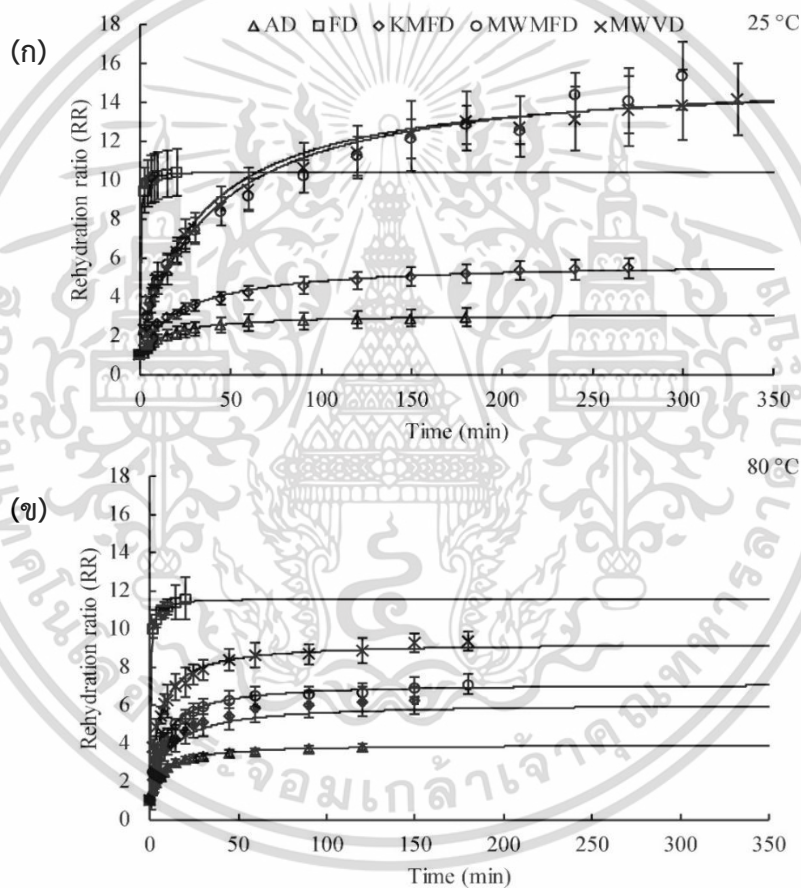
ที่มา: Monteiro et al. (2018)

### 2.7.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมัลติแฟลชสำหรับฟักทองแผ่น

Monteiro et al. (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งฟักทองด้วยไมโครเวฟสุญญากาศและอบแห้งด้วยไมโครเวฟมัลติแฟลชที่มีผลต่อคุณภาพของฟักทองอบแห้ง ซึ่งทำการศึกษาผลของการอบแห้งที่แตกต่างกันต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โครงสร้างผลิตภัณฑ์ จลนพลศาสตร์การฟื้นฟูและดัชนีการคืนสภาพของชิ้นฟักทองอบแห้ง ฟักทองจะถูกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ 5 วิธี 1) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟมัลติแฟลช (MWMFD) 2) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ (MWVD) 3) การอบแห้งแบบมัลติแฟลช (KMFD) 4) การอบแห้งแบบแช่แข็ง (FD) และ 5) การอบแห้งด้วยอากาศ (AD)

วิธีการอบแห้งทั้งหมดตอบอย่างต่อเนื่อง เวลาที่ใช้ในการอบของไมโครเวฟสุญญากาศคือ 1.28 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไมโครเวฟมัลติแฟลช คือ 1.32 ชั่วโมง และพบว่า การอบแห้งทั้งสองวิธีมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ จากไมโครชิปสเตอร์ไอกระบวนกรอบแห้งมัลติแฟลชแบบนำไฟฟ้า (KMFD และ MWMFD) และจาก MWVD โครงสร้างมีรูพรุนขนาดใหญ่ การศึกษาการคืนสภาพของขึ้นฟักทองที่ 25 และ 80 องศาเซลเซียส โดยพบว่า RR = 15 ที่ 25 องศาเซลเซียส และ RR = 12 ที่ 80 องศาเซลเซียส (RR = มวลของตัวอย่างที่คืนสภาพแล้ว/มวลของตัวอย่างแห้ง) ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลง (RR) และเมื่อนำตัวอย่างจากทั้ง 5 วิธีมาคืนสภาพที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวอย่างจาก MWVD และ MWMFD เมื่อทำการคืนสภาพจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธี KMED วิธี FD และวิธี AD จึงบอกได้ว่าการอบแห้งแบบ MWVD และ MWMFD เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งในเวลาอบแห้งที่สั้น

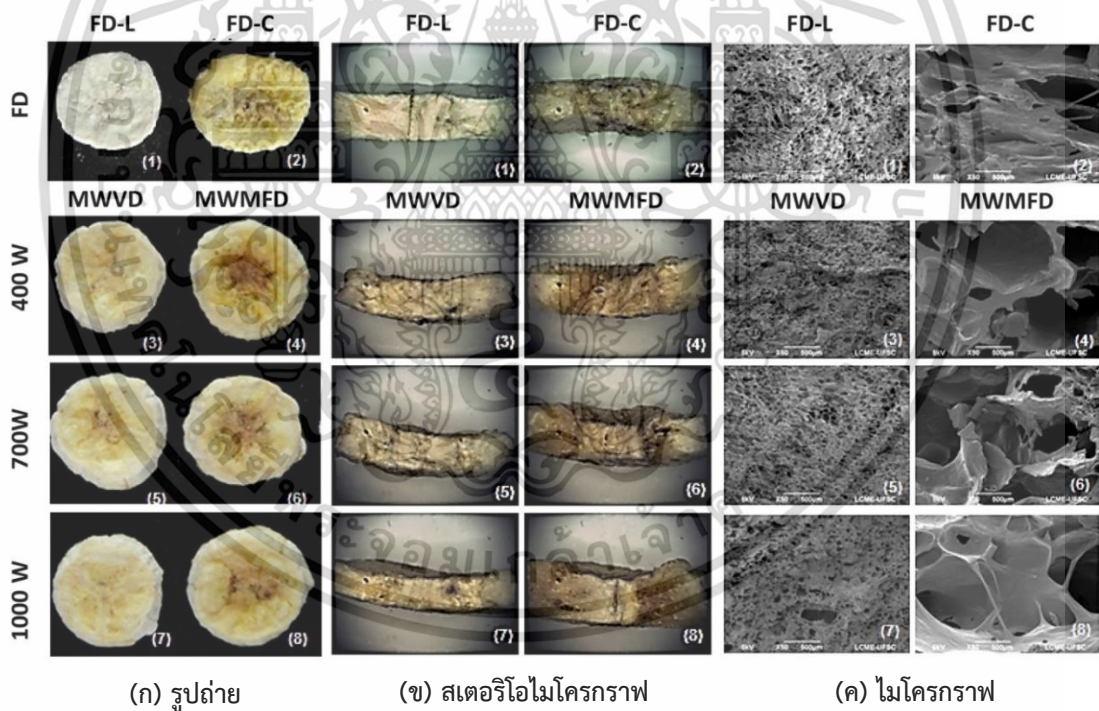


รูปที่ 2.4 อัตราส่วนการคืนน้ำของฟักทองอบแห้งที่เวลาในการคืนน้ำต่าง ๆ ที่ (ก) 25 °C และ (ข) 80 °C สำหรับตัวอย่างจาก (□) FD, (×) MWVD, (○) MWMFD, (◇) KMFD และ (Δ) AD โดยที่โมเดลของ Peleg (Peleg, 1998) แสดงด้วยเส้นต่อเนื่อง  
ที่มา: Monteiro et al. (2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 การอบแห้งแบบไมโครเวฟมัลติเฟลซสำหรับการผลิตกล้วยอบกรอบ

Monteiro et al. (2016) ได้ศึกษาหาวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันสำหรับผลิตภัณฑ์กล้วยอบแห้ง การศึกษาผลของการใช้ความร้อนไมโครเวฟร่วมกับพัลส์สุญญากาศต่อความกรอบของกล้วยอบแห้ง กล้วยสไลซ์ถูกอบแห้งโดยไมโครเวฟสุญญากาศ(MWVD) ที่กำลัง 400W 700W และ 1000W อบแห้งด้วยไมโครเวฟมัลติเฟลซ (MWMFD) ที่กำลัง 400W 700W และ 1000W โดยให้ความร้อนจนถึง 60 องศาเซลเซียส จากนั้นเปิดสุญญากาศให้ความดันประมาณ 8 kPa และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทำซ้ำ 3 ครั้ง และการอบแห้งแบบแช่แข็ง (FD) ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของกล้วยอบแห้งจากทั้งสามวิธี จะเห็นได้ว่าการทำแห้ง MWMFD ทำให้กล้วยอบแห้งมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าการอบแห้งแบบ MWVD และ แบบ FD และเมื่อทำการเจาะทดสอบตัวอย่าง ตัวอย่างจาก MWMFD มีความกรอบมากกว่าแบบ MWVD ผลการวิจัยเป็นได้ว่าสามารถทำผลไม้ออบกรอบโดยการใช่วงจรความร้อนและพัลส์สุญญากาศในสนามไมโครเวฟ จะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งแบบ MWMFD นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการอบแห้งแบบ MWVD ในการผลิตกล้วยอบแห้ง



รูปที่ 2.5 (ก) ภาพถ่าย (ข) สเตอริโอไมโครกราฟ (ค) ไมโครกราฟ ของกล้วยอบแห้ง (กำลังขยาย 50 เท่า) ที่ผ่านวิธีการอบแห้งต่าง ๆ: (1) FD-L, (2) FD-C, (3) MWVD-400 W, (4) MWMFD-400 W, (5) MWVD-700 W, (6) MWMFD-700 W, (7) MWVD-1000 W, (8) MWMFD-1000 W

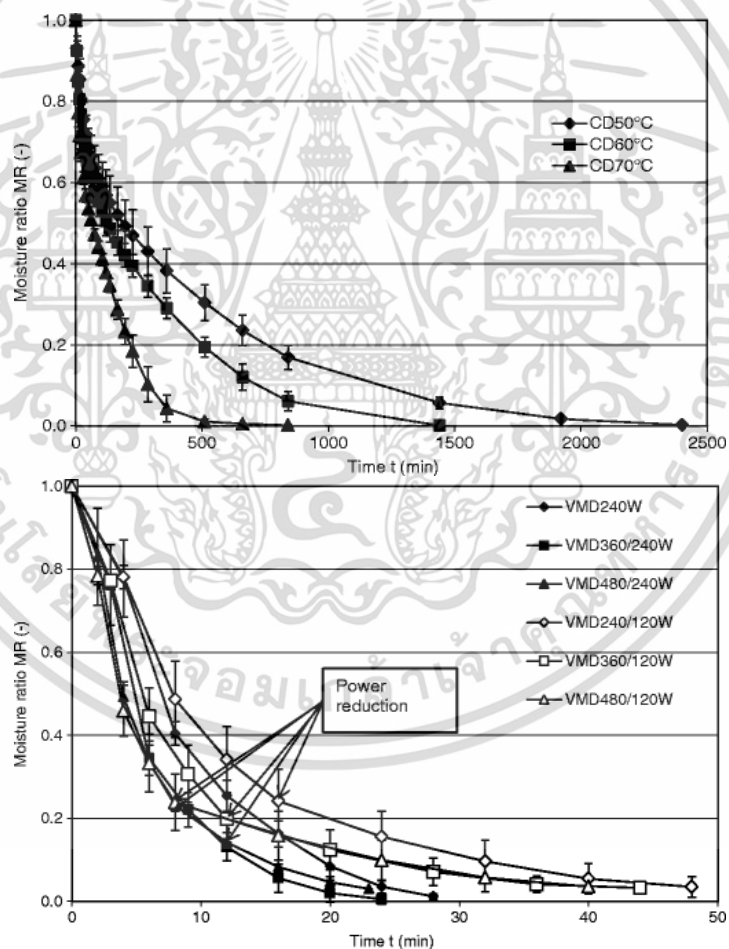
ที่มา: Monteiro et al. (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.4 การศึกษาผลของการอบแห้งโดยการพาความร้อนและการอบแห้งไมโครเวฟแบบสุญญากาศที่มีต่อสารประกอบทางชีวภาพ สี และความสามารถต้านอนุมูลอิสระของเชอร์รี่เปรี้ยว

จากงานวิจัยนี้ Wojdylo et al. (2014) พบว่าการอบแห้งแบบพาความร้อนโดยใช้ลมร้อนนั้นใช้เวลาค่อนข้างนานและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยสลายสารอาหารที่สำคัญ ซึ่งจะแตกต่างจากการโดยใช้ไมโครเวฟ เนื่องจากลดเวลาในการอบแห้งโดยไม่สูญเสียคุณภาพของผลผลิต

จากผลการทดลองของจุลศาสตร์การอบแห้งพบว่าจากการศึกษาอุณหภูมิการพาความร้อนและไมโครเวฟสุญญากาศจากกราฟแบบจำลองของ Page แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (VMD) ซึ่งใช้เวลาที่ 23-48 นาที เป็นการใช้เวลาในการอบแห้งที่เร็วกว่าการอบแห้งแบบพาความร้อน (CD) ซึ่งใช้เวลาที่ 14-40 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของเชอร์รี่เปรี้ยวที่อบแห้งแบบพาความร้อน (CD) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และที่อบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (VMD) ที่กำลังไมโครเวฟต่าง ๆ

ที่มา: Wojdylo et al. (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าสีของเซอร์รี่เปรี้ยวเป็นสมบัติที่สำคัญและขึ้นอยู่กับสารแอนโทไซยานิน (anthocyanins) กล่าวได้คือ เซอร์รี่เปรี้ยวจะมีปริมาณแอนโทไซยานินค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลเบอร์รี่สีแดงและผลไม้อื่นๆ และจากการทดลองอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟแบบสุญญากาศพบว่าที่ กำลัง 120W มีการรักษาการสูญเสียแอนโทไซยานินได้ถึง 70-90% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยการ พาคความร้อนแบบอบลมร้อน

จากการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ของสีเซอร์รี่เปรี้ยวได้ค่าพารามิเตอร์ทางสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  พบว่าการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟแบบสุญญากาศแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของฟีนอลิกทั้งหมดโดยเฉพาะอย่างยิ่งแอนโทไซยานิน ความสามารถในการ ต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงการเปลี่ยนสีขั้นต่ำของตัวอย่างพบว่าได้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด คือการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟแบบสุญญากาศที่ลดกำลังเหลือ 120W

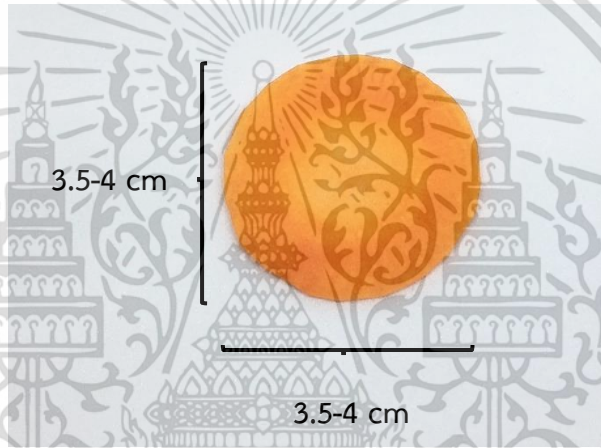


### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 ตัวอย่างและการเตรียมแครอท

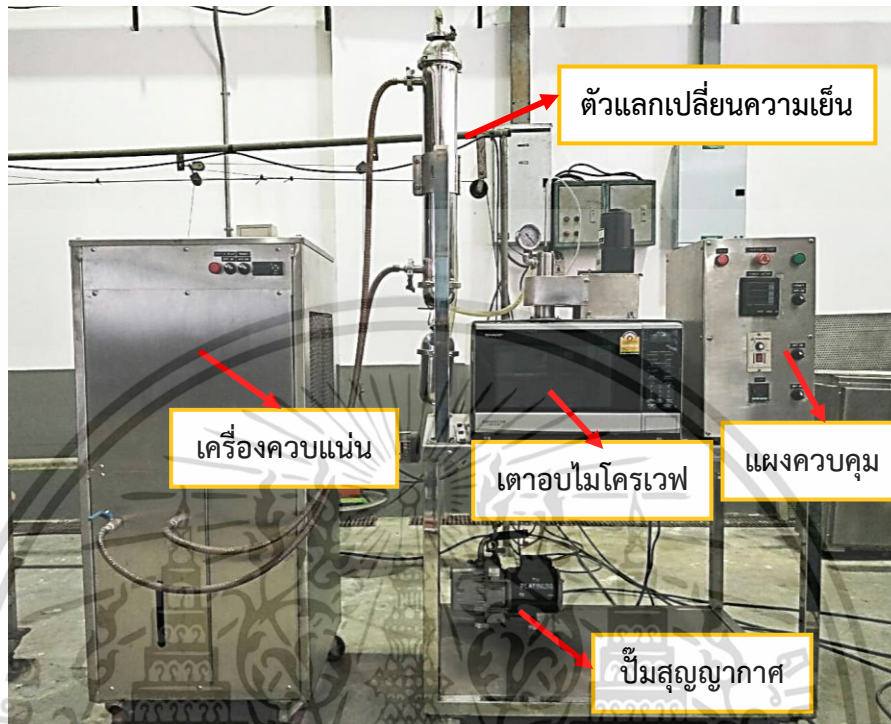
ตัวอย่างแครอทที่ใช้ในการทดลองเป็นแครอทจีน ชื้อจากตลาดในเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เส้นผ่านศูนย์กลางแครอทที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 3.5-4.0 cm ความชื้นเริ่มต้น  $0.90 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  แครอทถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-5 °C เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง เตรียมตัวอย่างแครอทชิพ โดยหั่นเป็นชิ้นบาง มีความหนา 1 mm แครอทชิพจะถูกพักไว้ให้มีอุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนนำมาเข้ากระบวนการอบแห้ง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นแครอทที่ใช้ในการอบ

## 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

### 3.3.1 เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ

### 3.2.2 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (UF 160, memmert, Germany) (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 เครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan EZ) (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดค่าสี

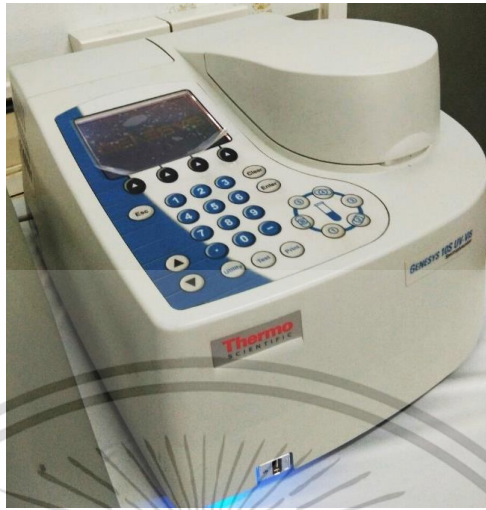
### 3.2.4 เครื่อง Texture analyzer (รูปที่ 3.5) ใช้หัวกดแบบทรงกระบอก (หัวกด SMS P/2)



รูปที่ 3.5 เครื่อง Texture analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

### 3.2.6 เครื่องวัดค่าพลังงาน (ยี่ห้อ Metrel รุ่น MI 2883 Energy Master) (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่าพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.7 อุปกรณ์อื่น ๆ และสารเคมี

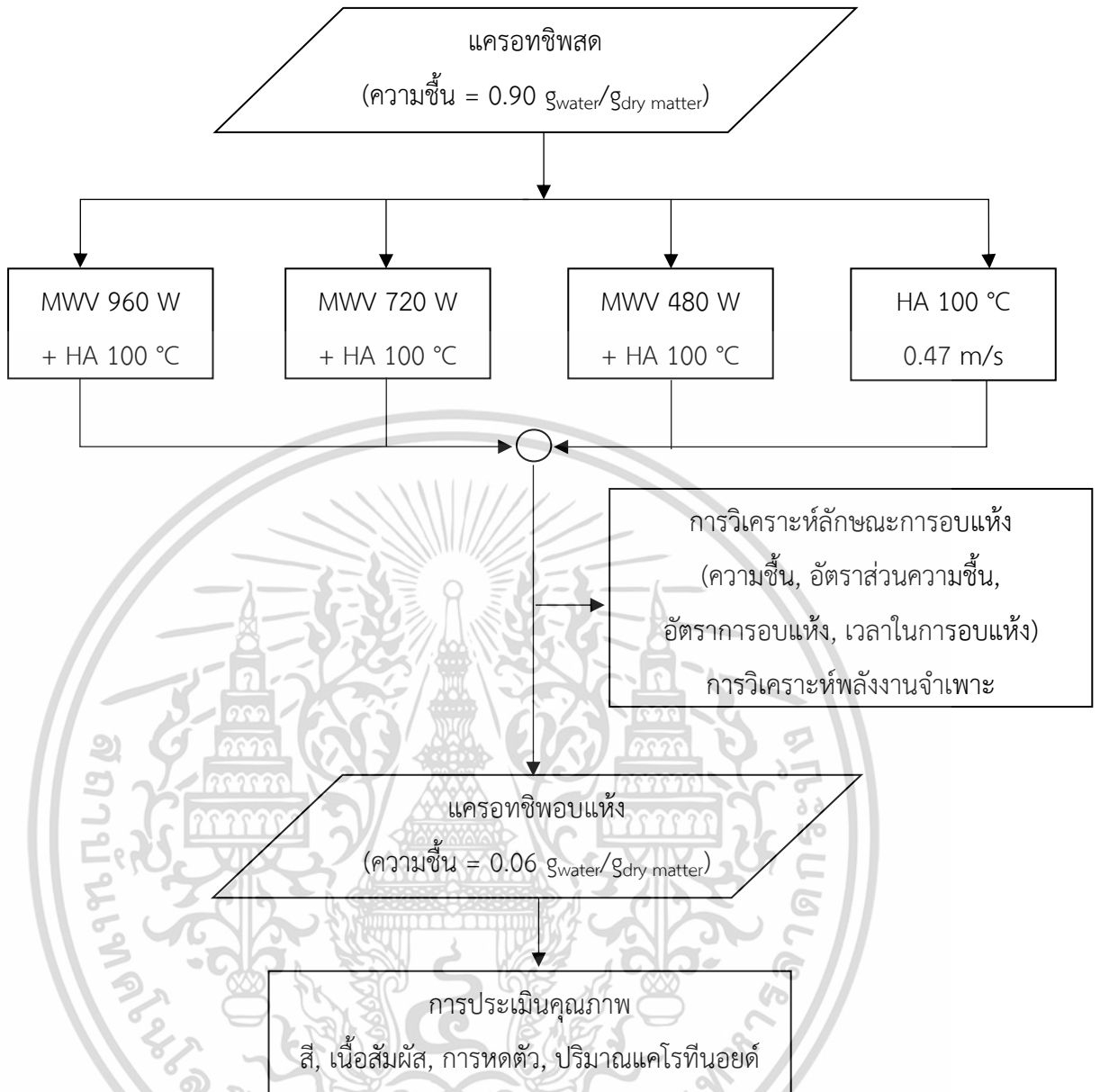
- (1) โถดูดความชื้น (desiccation)
- (2) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- (3) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
- (4) moisture cans
- (5) pycnometer (ยี่ห้อ Gardco ปริมาตร 100 ml)
- (6) Acetone (ของ CARLO ERBA Reagents)
- (7) Toluene (ของ CARLO ERBA Reagents)

### 3.3 แผนการทดลอง

ในการทดลองอบแห้งแคโรทซิฟ ใช้เทคนิคการอบแห้ง 2 วิธี ได้แก่ วิธีอบแห้งแบบสองขั้นตอน คือการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ (MWW) + ลมร้อน (HA) และวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (วิธีการควบคุม) การอบแห้งเริ่มจากนำแคโรทซิฟสด 30 g วางบนถาดในห้องอบเป็นชั้นเดียว โดยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนเริ่มจากการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศที่ความเข้มข้นรังสี 960 W, 720 W และ 480 W และความดันสมบูร์น 5 kPa จนแคโรทซิฟมีความชื้นไม่ต่ำกว่า 0.40  $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$  จากนั้นนำแคโรทซิฟไปอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และความเร็วลม 0.47 m/s จนแคโรทซิฟมีความชื้นสุดท้ายเป็น 0.06  $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$  นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้กำหนดสิ่งทดลองควบคุมเป็นแคโรทซิฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน โดยใช้ อุณหภูมิการอบแห้ง 100 °C และความเร็วลม 0.47 m/s ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่กำหนดเช่นกัน

เพื่อเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้ง ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทำการนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาที่กำหนด และนำข้อมูลน้ำหนักวัสดุไปคำนวณหาความชื้นต่อไป (หัวข้อ 3.4)

เมื่อได้กระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแคโรทซิฟแล้วจึงทำการวัดค่าพลังงานและวิเคราะห์พลังงานจำเพาะ (หัวข้อ 3.5) และเมื่อได้ผลิตภัณฑ์แคโรทซิฟออกมาแล้วจะทำการวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ต่อไป (หัวข้อ 3.6)



รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลอง

### 3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

#### 3.4.1 ความชื้น

นำวัสดุไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้น้ำหนักแห้งของวัสดุ และวิเคราะห์ความชื้นของวัสดุ จากการน้ำหนักของวัสดุ ณ เวลาใด ๆ ที่บันทึกไว้ในกระบวนการอบแห้ง และนำไปคำนวณหาความชื้นจากสูตรต่อไปนี้

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	MC	คือ ความชื้น ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$W_w$	คือ น้ำหนักเปียก (g)
	$W_d$	คือ น้ำหนักแห้ง (g)

### 3.4.2 อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.2)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	$M_t$	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_0$	คือ ความชื้นเริ่มต้น ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_e$	คือ ความชื้นที่สมดุล (มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากเป็นการอบแห้งแบบแผ่รังสีและเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง) ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )

### 3.4.3 อัตราการทำแห้ง

$$DR = \frac{M_{t-dt} - M_t}{d_t} \quad (3.3)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราการทำแห้ง ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ )
	$M_{t-dt}$	คือ ความชื้นที่เวลาก่อนหน้า ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_t$	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$d_t$	คือ ผลต่างเวลาอบแห้ง (min)

### 3.4.4 เวลาในการอบแห้ง

เวลาในการอบแห้งหาได้จากการวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง (drying curve) โดยใช้ปริมาณความชื้นสุดท้ายที่ต้องการในวัสดุมาเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง

## 3.5 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

ทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแครอทหิพสดก่อนการอบแห้ง วัดพลังงานโดยใช้เครื่องวัดค่าพลังงานต่อตรงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟของอุปกรณ์ จดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในกระบวนการอบแห้ง แล้วนำตัวอย่างแครอทหิพอบแห้งมาชั่งน้ำหนักสุดท้าย และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยทั่วไปสำหรับกระบวนการอบแห้งค่า SEC สามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งและปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้งดังสมการที่ 3.4

$$SEC = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้า (kW}\cdot\text{h)}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออก (kg)}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานนี้ มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

#### 3.6.1 ปริมาตรและการหดตัว

ปริมาตร วัดจากน้ำหนักของวัสดุที่เข้าไปแทนที่น้ำ โดยใช้สารโทลูอินของ CARLO ERBA Reagents ซึ่งมีความหนาแน่น 0.867 g/ml แทนน้ำเพื่อป้องกันการซึมเข้าของน้ำ โดยเติมสารโทลูอินให้เต็มฟิคโนมิเตอร์แล้วปิดฝา ชั่งน้ำหนักแล้วจดบันทึก นำขึ้นแคโรทซิฟที่ต้องการหาปริมาตรใส่ลงในฟิคโนมิเตอร์แล้วปิดฝาชั่งน้ำหนักและจดบันทึก จะได้ผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังใส่ตัวอย่าง นำมาคำนวณหาปริมาตรของวัสดุได้จากสมการที่ 3.5

$$V_{\text{วัสดุ}} = \frac{m_{\text{โทลูอิน}}}{D_{\text{โทลูอิน}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $V_{\text{วัสดุ}}$  คือ ปริมาตร ( $m^3$ )  
 $D_{\text{โทลูอิน}}$  คือ ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )  
 $m_{\text{โทลูอิน}}$  คือ มวล (ผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังใส่วัสดุ) ( $kg$ )



รูปที่ 3.9 ฟิคโนมิเตอร์

การหดตัว คำนวณจากปริมาตร ผลต่างระหว่างปริมาตรของวัสดุที่วัดได้ต่อปริมาตรวัสดุเริ่มต้นดังสมการที่ 3.6

$$\% \text{ การหดตัว} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $V_1$  คือ ปริมาตรของแคโรทซิฟสด ( $m^3$ )  
 $V_2$  คือ ปริมาตรของแคโรทซิฟอบแห้ง ( $m^3$ )

#### 3.6.2 สีและการเปลี่ยนแปลงสี

วัดจากเครื่องวัดสี ในระบบการวัดสีแบบ  $L^*$  (ค่าที่บอกความสว่าง)  $a^*$  (ค่าที่บอกความเป็นสีแดง)  $b^*$  (ค่าที่บอกความเป็นสีเหลือง) โดยทำการวัดค่าสีของแคโรทซิฟสดและแคโรทซิฟอบแห้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) จากสมการ

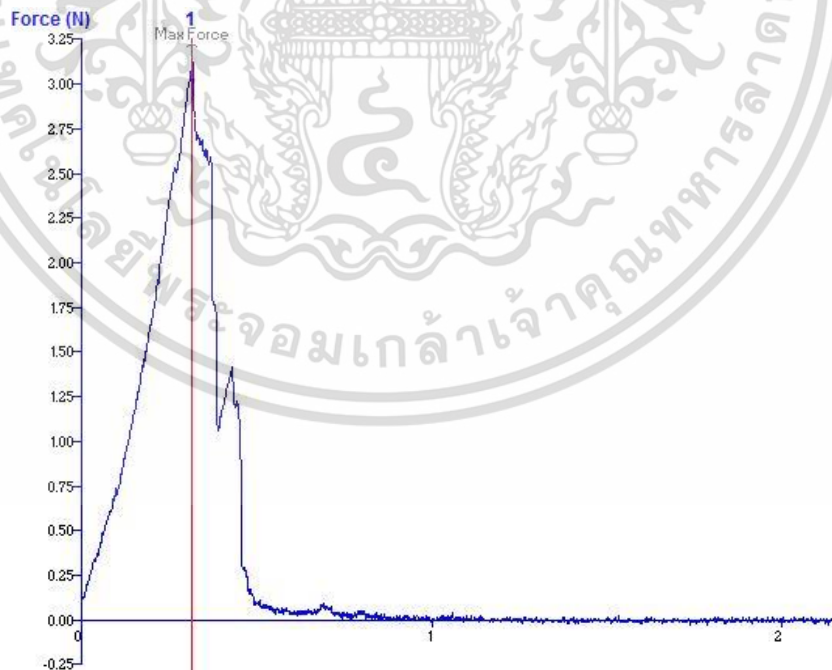
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \tag{3.7}$$

เมื่อ	$\Delta E$	คือ ความแตกต่างของสี
	$L^*$	คือ ค่าความสว่างของแคโรทีนพอบแห้ง
	$L_0^*$	คือ ค่าความสว่างของแคโรทีนพสด
	$a^*$	คือ ค่าความแดงของแคโรทีนพอบแห้ง
	$a_0^*$	คือ ค่าความแดงของแคโรทีนพสด
	$b^*$	คือ ค่าความเหลืองของแคโรทีนพอบแห้ง
	$b_0^*$	คือ ค่าความเหลืองของแคโรทีนพสด

### 3.6.3 ประเมินเนื้อสัมผัส

ทดสอบด้วยการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analysis) โดยใช้เครื่อง Texture analyzer และใช้หัวกดแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm การวิเคราะห์ผลการทดสอบความกรอบ พิจารณาจากกราฟแรงและระยะทาง (force-distance curve) โดยวิเคราะห์แรงสูงสุด (Maximum force) ที่ทำให้ชิ้นวัสดุแตก หากค่าแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุแตกมีค่าต่ำ แสดงว่าวัสดุมีความเปราะและมีรูพรุนมาก วัสดุนั้นจะมีความกรอบเปราะ ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าแรงสูงสุดมีค่าสูง แสดงว่าวัสดุมีความแน่นเนื้อมากและรูพรุนน้อย วัสดุจึงมีลักษณะแน่นแข็ง



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทาง (force-distance curve) จากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดยแกนตั้งเป็นค่าแรงที่กดวัสดุ (N) และแกนนอนเป็นค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของแรง (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์

ทำการสกัดตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างแครอทสดและแครอทชิฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ มาบดละเอียด 1 g แล้วนำมาสกัดด้วยสารละลายอะซิโตน กรองกากออก และปรับปริมาตรสารละลายด้วยอะซิโตนจนมีปริมาตร 30 ml จากนั้นหุ้มขวดสีชาที่บรรจุสารละลายด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ นำสารละลายที่สกัดได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 nm, 645 nm และ 663 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ บันทึกค่าที่วัดได้และนำมาคำนวณดังสมการต่อไปนี้ (Kundu et al., 2016)

$$\text{chlorophyll a (mg/L)} = [12.7(A_{663}) - 2.69(A_{645})] \quad (3.8)$$

$$\text{chlorophyll b (mg/L)} = [22.9(A_{645}) - 4.68(A_{663})] \quad (3.9)$$

$$\text{Total Carotenoid (mg/L)} = [1000(A_{470}) + 3.27\{(\text{chlorophyll a}) - (\text{chlorophyll b})\}] / 229 \quad (3.10)$$

โดยที่ A = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)

### 3.6.5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

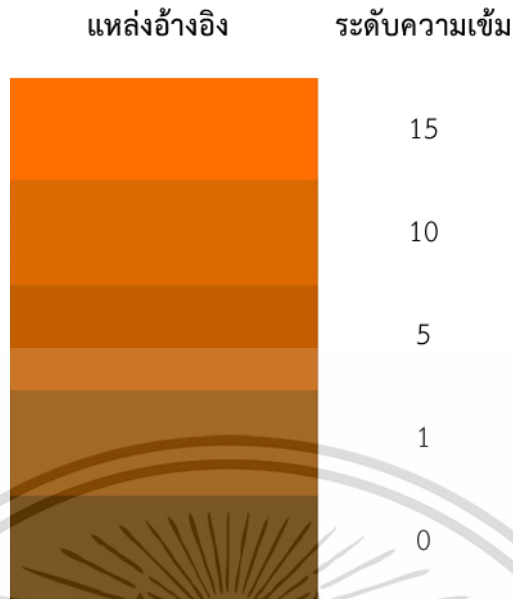
#### (1) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความเข้ม

ประเมินคุณภาพโดยผู้ทดสอบจำนวน 8 คน (นิสิตระดับปริญญาโทและระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร) ที่ผ่านการฝึกเรื่องการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของชิฟ โดยผู้ทดสอบได้รับการฝึกฝนให้ประเมินความเข้ม ความกรอบ และความสว่างของสีของชิฟชนิดต่าง ๆ ตามแบบฟอร์มแบบทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความเข้ม (ภาคผนวก ก) ซึ่งผู้ทดสอบได้ลงความเห็นร่วมกัน ให้คำนิยามและระดับความเข้มอ้างอิงของความเข้มและความกรอบในชิฟชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 และระดับความเข้มอ้างอิงของความสว่างของสี ดังรูปที่ 3.11 ผู้ทดลองใช้แบบทดสอบระดับความเข้มแบบสเกลเชิงเส้น 0-15 เซนติเมตร โดย 0 คือ ระดับความเข้มที่น้อยที่สุด และ 15 คือ ระดับความเข้มที่มากที่สุด โดยผู้ทดสอบได้ตีมั้ระหว่างตัวอย่าง เพื่อทำความสะอาดปากก่อนทุกครั้ง

ตารางที่ 3.1 คำนิยามและระดับความเข้มอ้างอิงของความแข็งและความกรอบในชิพชนิดต่าง ๆ

คำนิยาม	แหล่งอ้างอิง	ระดับความเข้ม
	Kellogg's Corn Flakes (บริษัท เคลล็อก ประเทศไทย จำกัด จ.ระยอง)	4
ความแข็ง คือ แรงที่ใช้ในการกัดตัวอย่างครั้งแรกเมื่อวางตัวอย่าง	เลย์ มันฝรั่งแท่งทอดกรอบแผ่นเรียบ (บริษัท เป๊ปซี่-โคล่า(ไทย) เทรดิง จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา)	6
ระหว่างพื้กล้ำมบนและล่าง (Evans et al, 2010)	โตริโทส รสนาโซชีส (บริษัท เป๊ปซี่-โคล่า(ไทย) เทรดิง จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา)	7
	มุซ่า ขนมปังกรอบ (บริษัท ทูปี อินเทอร์เน็ต จำกัด จ.ปทุมธานี)	8
คำนิยาม	แหล่งอ้างอิง	ระดับความเข้ม
	โอเค ทิน บิสกิต ขนมปังกรอบ ชนิดแผ่นบาง (บริษัท กว่างตง โกลเด้น พูจี ไบโอบีเทคโนโลยี ฟู้ดส์ จำกัด)	4
	มุซ่า ขนมปังกรอบ (บริษัท ทูปี อินเทอร์เน็ต จำกัด จ.ปทุมธานี)	6
ความกรอบ คือ เสียงที่ได้ยินในระหว่างที่กัดตัวอย่างให้แตก (Evans et al, 2010)	เลย์ มันฝรั่งแท่งทอดกรอบแผ่นเรียบ (บริษัท เป๊ปซี่-โคล่า(ไทย) เทรดิง จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา)	8
	โตริโทส รสนาโซชีส (บริษัท เป๊ปซี่-โคล่า(ไทย) เทรดิง จำกัด จ.พระนครศรีอยุธยา)	10
	Kellogg's corn flakes (บริษัท เคลล็อก ประเทศไทย จำกัด จ.ระยอง)	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ระดับความเข้มอ้างอิงของแสงสว่างของสี

(2) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ

ประเมินความชอบด้วยผู้ทดสอบที่เป็นตัวแทนของผู้บริโภคจำนวน 30 คน (นิสิตระดับปริญญาโทและระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร) โดยใช้แบบฟอร์มแบบทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ (ภาคผนวก ก) ซึ่งเป็นสเกลแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) กำหนดการให้คะแนน ดังนี้ 9 = ชอบอย่างยิ่ง, 8 = ชอบมาก, 7 = ชอบปานกลาง, 6 = ชอบเล็กน้อย, 5 = เฉย ๆ, 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 3 = ไม่ชอบปานกลาง, 2 = ไม่ชอบมาก, 1 = ไม่ชอบอย่างยิ่ง ในการดำเนินการทดลอง ผู้ทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างในการประเมิน โดยผู้ทดสอบจะไม่ทราบว่าเป็นของสิ่งทดลองใดและประเมินครั้งละ 1 ตัวอย่าง เพื่อลดการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่าง และให้ผู้ทดสอบดื่มน้ำระหว่างตัวอย่างเพื่อทำความสะอาดปากก่อนทุกครั้ง

## บทที่ 4

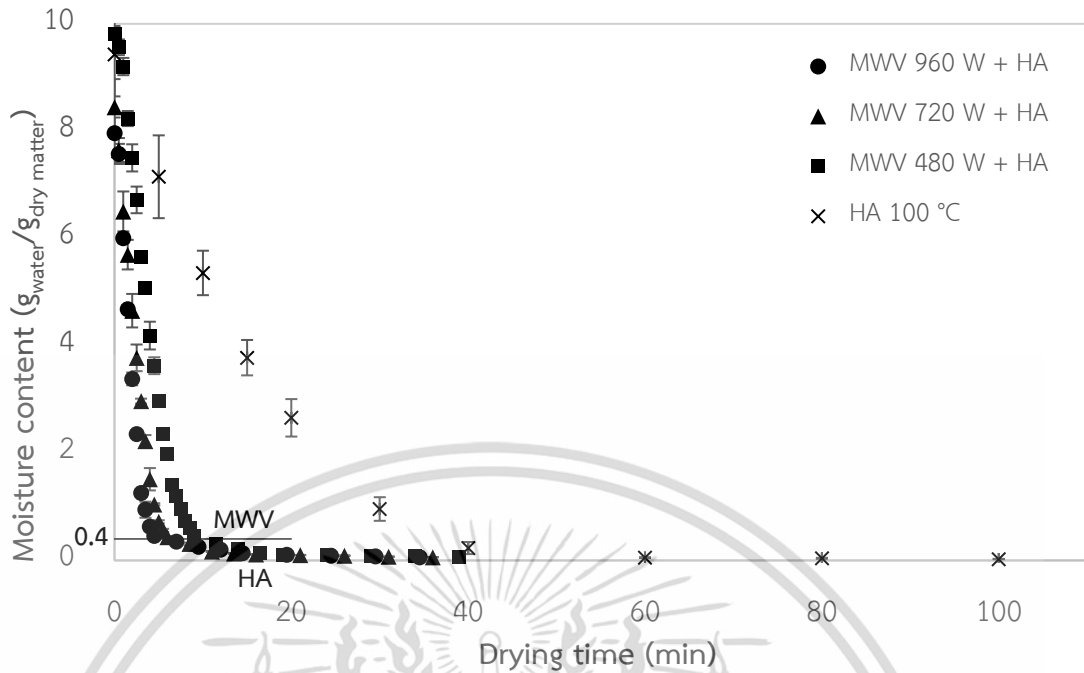
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะการอบแห้ง

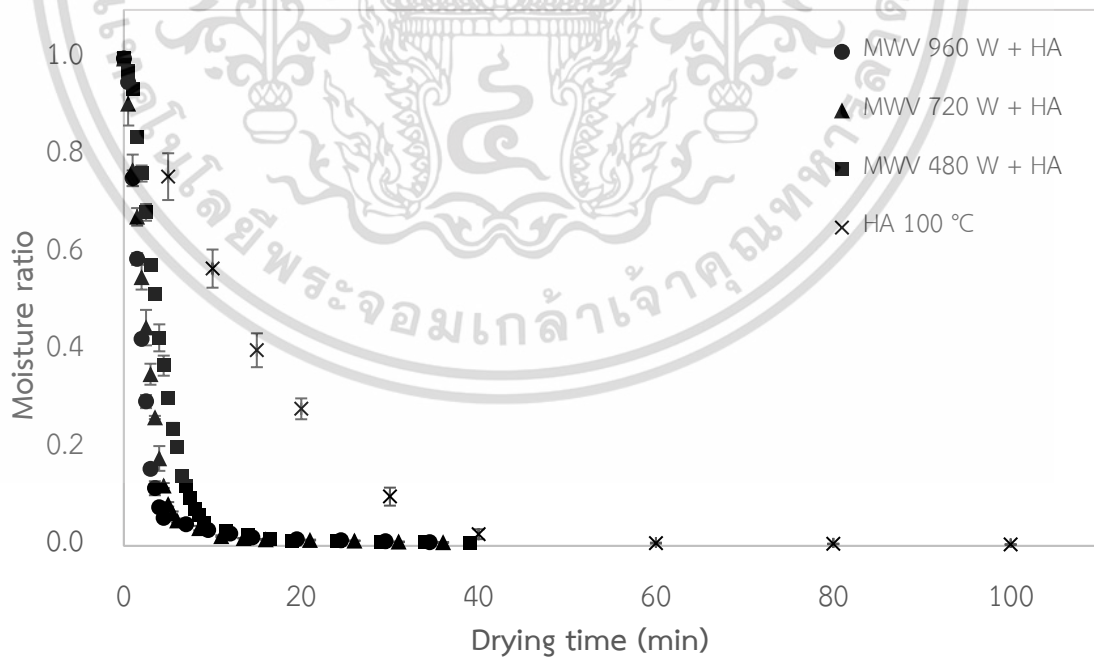
แสดงลักษณะของการอบแห้งในรูปของความชื้น (MC) อัตราส่วนความชื้น (MR) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าในช่วงการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศของกระบวนการอบแห้งแครอทชิพแบบสองชั้น ทำให้ความชื้นในแครอทชิพลดลงได้อย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาที่สั้น โดยแครอทชิพจะถูกลดความชื้นลงจนถึงความชื้นประมาณ  $0.4 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  หลังจากนั้นจะเป็นช่วงของการอบแห้งต่อด้วยลมร้อน เนื่องจากในช่วงท้ายของการอบแห้ง แครอทชิพจะมีความชื้นต่ำกว่า  $0.4 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  จึงทำให้ความชื้นลดลงอย่างช้า ๆ และต้องใช้เวลาจนถึงจะลดความชื้นจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการคือ  $0.06 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงอัตราการอบแห้ง (DR) ของทั้ง 4 วิธีการอบแห้ง ซึ่งจากแนวโน้มของกราฟนี้พบช่วงอัตราการอบแห้งทั้ง 3 ช่วง คือ ช่วงปรับสภาพ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งพบว่าการอบแห้งแบบสองชั้นตอนจะเกิดอัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งการเกิดอัตราการอบแห้งคงที่เนื่องมาจากการแผ่รังสีของไมโครเวฟที่ส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์ถูกกระตุ้นเกิดเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว จึงเกิดมีอัตราการระเหยน้ำที่สูงและคงที่ (constant rate period) (ปองพล สุริยะกันธร, 2555) และแครอทชิพสดที่มีความชื้นสูงก็ส่งผลให้เกิดอัตราการอบแห้งคงที่ได้เช่นกัน

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  และการอบแห้งแบบสองชั้นตอน โดยมีค่าความเข้มของรังสีเป็น 960 W, 720 W และ 480 W ร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบสองชั้นตอนใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าและมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า โดยใช้น้อยกว่าถึงเกือบ 3 เท่าและมีอัตราการอบแห้งสูงสุดมากกว่าถึง 4-7 เท่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งพบว่าวิธีการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มรังสีต่างกันมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งด้วย โดยที่ความเข้มรังสีเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้ความชื้นของแครอทลดลงอย่างรวดเร็ว ยิ่งความเข้มรังสีสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็จะลดลง และอัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

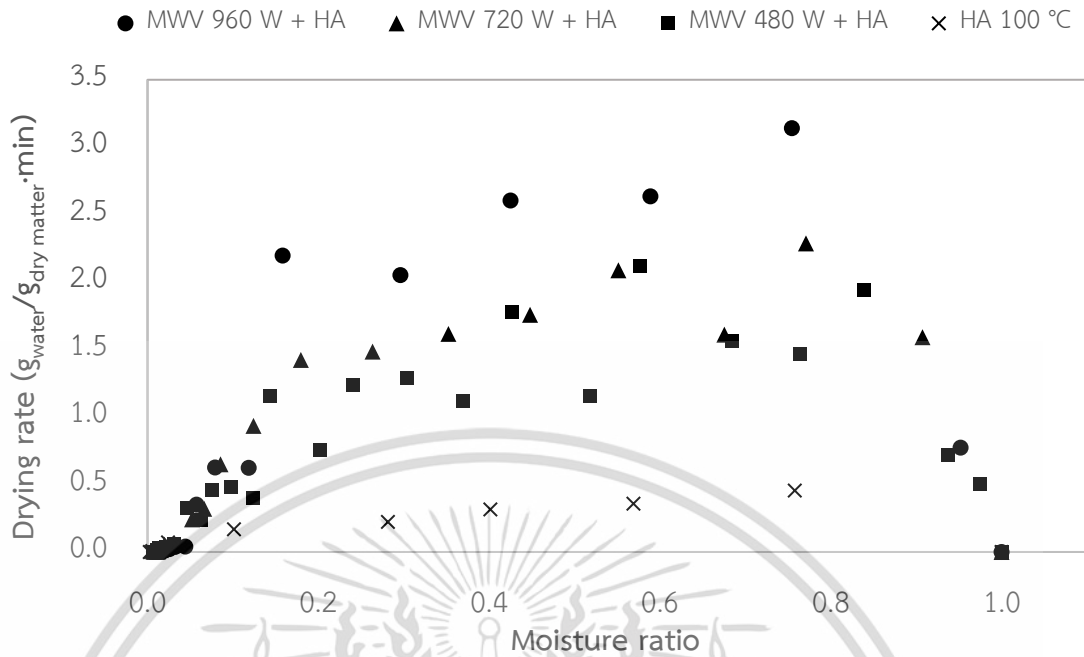


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน เส้น  $0.4 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  แสดงการเปลี่ยนวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศเป็นการอบแห้งด้วยลมร้อน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและการอบแห้งแบบลมร้อน

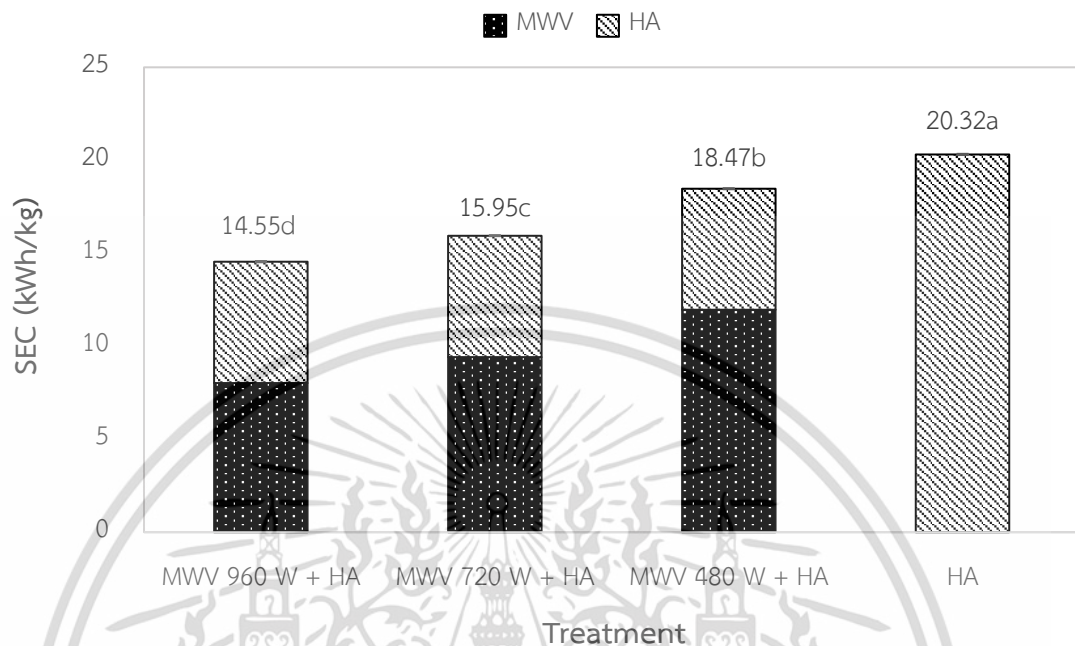
ตารางที่ 4.1 เวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมและอัตราการอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีต่าง ๆ

Treatment	Drying time (min)	Maximum drying rate ( $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ )
MWV 960 W + HA 100 °C	34.5 (4.5+30)	$3.1426 \pm 0.1911^a$
MWV 720 W + HA 100 °C	36 (6+30)	$2.4733 \pm 0.1340^b$
MWV 480 W + HA 100 °C	39 (9+30)	$2.1855 \pm 0.3296^b$
HA 100 °C	100	$0.4563 \pm 0.0904^c$

#### 4.2 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

มีการเปรียบเทียบการใช้พลังงานของการอบแห้งแบบต่าง ๆ ค่าพลังงานที่ได้เป็นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากแครอทชิพ จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกันมาจากการทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ เมื่อพิจารณาพบว่าพลังงานที่ใช้มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วย โดยจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบสอง

ขั้นตอนมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 960 W มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด



รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีการอบแห้งแบบสองขั้นตอน และการอบแห้งแบบลมร้อน

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแครอทชิพด้วยวิธีต่าง ๆ

Treatment	SEC (kWh/kg)
MWV 960 W + HA 100 °C	14.5511 ± 0.0320 <sup>d</sup>
MWV 720 W + HA 100 °C	15.9478 ± 0.0266 <sup>c</sup>
MWV 480 W + HA 100 °C	18.4708 ± 0.0272 <sup>b</sup>
HA 100 °C	20.3158 ± 0.0342 <sup>a</sup>

### 4.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์แครอทชิพ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าแครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีสีส้มใกล้เคียงในแต่ละระดับความเข้มข้นสี มีเนื้อบางกรอบ และไม่ค่อยหดตัว ส่วนแครอทชิพที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อนจะมีสีน้ำตาลเข้ม มีเนื้อแน่นแข็ง และมีการหดตัวมาก



รูปที่ 4.5 แครอทซีฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

#### 4.3.1 ปริมาตรและการหดตัว

จากการวัดปริมาตรของแครอทซีฟโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว ผลปริมาตรและร้อยละการหดตัวของแครอทซีฟเมื่อเทียบกับแครอทสดชิ้นบาง แสดงดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าร้อยละการหดตัวของแครอทซีฟจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มรังสีไมโครเวฟ 960 W, 720 W, และ 480 W ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยแครอทซีฟจากการอบแห้งแบบลมร้อนมีปริมาตรน้อยกว่าและหดตัวมากกว่าแครอทซีฟจากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการหดตัวของแครอทซีฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Treatment	Volume (cm <sup>3</sup> )	Shrinkage (%)
MWV 960 W + HA 100 °C	$6.19 \times 10^{-8}$	$78.82 \pm 0.46^b$
MWV 720 W + HA 100 °C	$6.27 \times 10^{-8}$	$78.55 \pm 0.31^b$
MWV 480 W + HA 100 °C	$6.34 \times 10^{-8}$	$78.30 \pm 0.60^b$
HA 100 °C	$2.77 \times 10^{-8}$	$90.53 \pm 0.16^a$

#### 4.3.2 สีและการเปลี่ยนแปลงสี

จากตารางที่ 4.4 พบว่าแครอทซีฟจากกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ใช้ไมโครเวฟสูงสุญญากาศที่ความเข้มรังสี 960 W และแครอทสดมีค่าพารามิเตอร์ทางค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ค่าพารามิเตอร์สีของแครอทซีฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนกับแครอทสดและที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้จากรูปที่ 4.5 พบว่าสีของแครอทซีฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นมีสีเข้มกว่าอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากใช้ระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาถึงค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) ของแครอทซีฟที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนทั้งสามความเข้มรังสีมีค่าต่ำซึ่งสามารถบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสีน้อยในระหว่างการอบแห้งและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

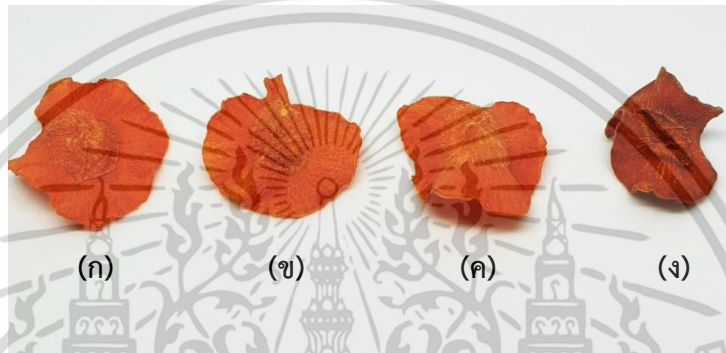
ดังนั้นการอบแห้งแบบสองขั้นตอนสามารถทำผลิตภัณฑ์แครอทซีฟที่มีสีสม่ำเสมอได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าสีของแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

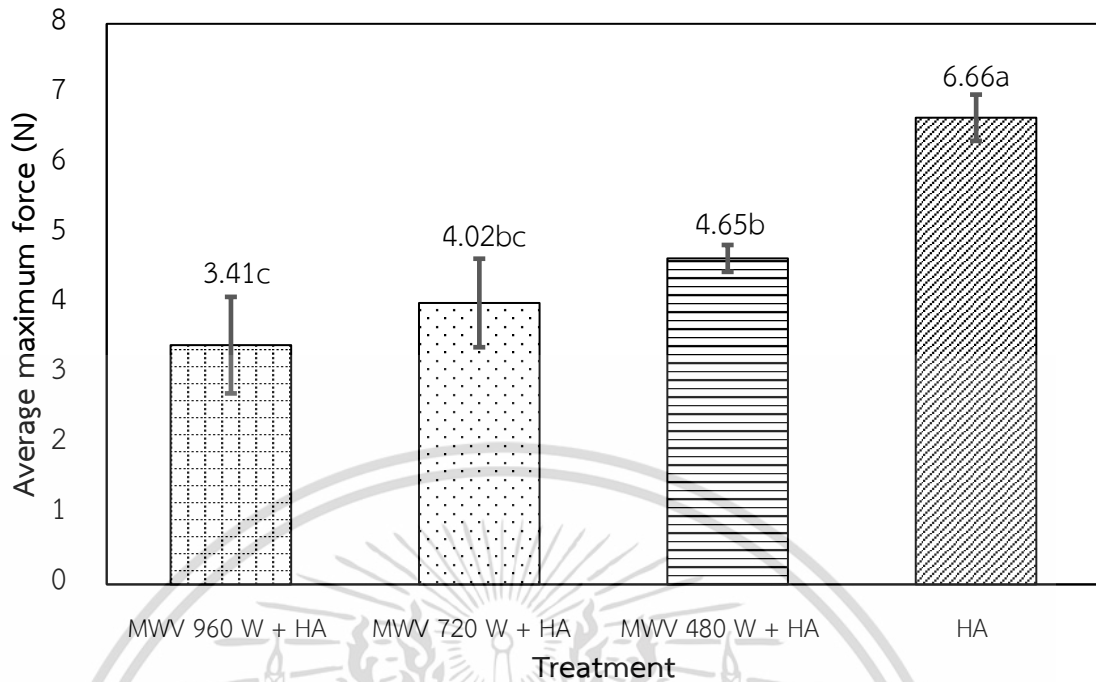
Treatment	L*	a*	b*	$\Delta E$
Fresh	55.35±0.25 <sup>a</sup>	40.63±0.18 <sup>a</sup>	44.61±0.33 <sup>a</sup>	-
MWV 960 W + HA 100 °C	50.81±0.98 <sup>a</sup>	38.33±0.36 <sup>ab</sup>	43.02±0.45 <sup>ab</sup>	14.03±0.45 <sup>a</sup>
MWV 720 W + HA 100 °C	48.07±0.76 <sup>a</sup>	34.55±0.72 <sup>b</sup>	40.45±0.63 <sup>b</sup>	17.77±0.35 <sup>a</sup>
MWV 480 W + HA 100 °C	48.39±0.54 <sup>a</sup>	34.83±0.31 <sup>b</sup>	39.45±0.86 <sup>b</sup>	14.82±0.53 <sup>a</sup>
HA 100 °C	34.50±0.07 <sup>b</sup>	28.40±1.88 <sup>c</sup>	33.18±1.34 <sup>c</sup>	31.14±1.51 <sup>b</sup>



รูปที่ 4.6 แคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ (ก) อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 960 W (ข) อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 720 W (ค) อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 480 W (ง) อบแห้งแบบลมร้อน 100 °C

#### 4.3.3 เนื้อสัมผัส

จากรูปที่ 4.7 แสดงแรงสูงสุดที่ทำให้แคโรทีนเริ่มแตกหรือทะลุในแต่ละกระบวนการอบแห้ง เห็นได้ว่าแคโรทีนจากการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 960 W ใช้แรงต่ำที่สุด และแคโรทีนจากการอบแห้งแบบลมร้อนใช้แรงมากที่สุด แสดงว่าแคโรทีนอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 960 W มีความแข็ง (hardness) น้อยกว่าแคโรทีนจากการอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งแบบสองชั้นตอนมีการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศที่เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบทั้งปริมาตรและใช้อุณหภูมิต่ำในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ จึงลดการเกิด local overheating และ case-hardening ได้ (Powder/Bulk Solids, 2012) ประกอบกับแคโรทีนจากการอบแห้งแบบสองชั้นตอนมีร้อยละการหดตัวที่น้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน (ตารางที่ 4.3) และที่ความเข้มข้นรังสีต่างกันมีร้อยละการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แรงสูงสุดที่ทำให้แคโรทีนเริ่มแตกของการอบแห้งแบบสองชั้นตอนจึงมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันในระดับความเข้มข้นรังสีที่แตกต่างกัน แคโรทีนอบแห้งแบบสองชั้นตอนจึงมีความกรอบมากกว่าแคโรทีนอบแห้งแบบลมร้อนที่จะมีความแน่นแข็ง



รูปที่ 4.7 แรงสูงสุดที่ทำให้แคโรทีนเริ่มแตกหรือทะลุของกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

#### 4.3.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์

จากการทดลองเพื่อหาปริมาณแคโรทีนอยด์ของแคโรทีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ จากตารางที่ 4.5 การอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ความเข้มรังสี 720 W แสดงค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สูงที่สุดเท่ากับ 12.95 mg/L จากงานวิจัยของ Song et al. (2017) ซึ่งปริมาณแคโรทีนอยด์จะลดลงเมื่อความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มรังสี 480 W ปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยที่สุดเท่ากับ 7.36 mg/L เมื่อเทียบกับความเข้มรังสีอื่นและการอบแห้งแบบลมร้อนอาจเนื่องมาจากแคโรทีนได้รับความเข้มรังสีเป็นเวลานานถึงระดับที่เกิดการลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ได้เมื่อเทียบกับแคโรทีนสด แคโรทีนมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าแคโรทีนสดในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการอบแห้งช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เมื่อรับประทานแคโรทีนในปริมาณที่เท่ากันอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของแคโรทีนสดและแคโรทีนที่ทำกรอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Treatment	Carotenoid (mg/L)
Fresh	2.20±0.06 <sup>c</sup>
MWV 960 W + HA 100 °C	9.46±0.02 <sup>b</sup>
MWV 720 W + HA 100 °C	12.95±0.04 <sup>a</sup>
MWV 480 W + HA 100 °C	7.36±0.04 <sup>d</sup>
HA 100 °C	7.90±0.03 <sup>c</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ในการประเมินคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัส ผู้ทดลองได้พิจารณาให้การอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสีโมโครเวฟ 720 W เป็นสิ่งทดลองที่ใช้ในการประเมิน เนื่องจากแครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ 720 W ได้แครอทชิพที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุด (ตารางที่ 4.5) และจากผลการประเมินเนื้อสัมผัสของแครอทชิพอบแห้ง มีความกรอบไม่แตกต่างกับความเข้มข้นสีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 4.7) นอกจากนี้ ที่ 720 W ยังได้แครอทชิพที่มีการหดตัวและสีไม่แตกต่างกับแครอทชิพที่ความเข้มข้นสีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกด้วย (ตารางที่ 4.3 และ 4.4)

#### (1) คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความเข้ม

จากการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสโดยฝึกผู้ทดสอบ ระดับความเข้มของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 720 W และการอบแห้งแบบลมร้อน ได้ผลดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าความสว่างของสีและความแข็งของแครอทชิพมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ความกรอบไม่แตกต่างกัน โดยความสว่างของสีของแครอทชิพที่อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 720 W มีค่ามากกว่าแครอทชิพที่อบแห้งแบบลมร้อนและความแข็งของแครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 720 W มีค่าน้อยกว่าแครอทชิพอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับการประเมินเนื้อสัมผัส (รูปที่ 4.6) ที่แครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนมีความแข็งน้อยกว่าแครอทชิพอบแห้งแบบลมร้อน

ตารางที่ 4.6 ระดับความเข้มของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแครอทชิพ

Attribute (n=8)	MWV 720 W + HA	HA
Lightness of a color	12.13±0.58 <sup>a</sup>	4.71±3.05 <sup>b</sup>
Hardness	3.03±1.23 <sup>a</sup>	7.31±0.53 <sup>b</sup>
Crispness	9.39±2.42 <sup>ns</sup>	9.69±1.73 <sup>ns</sup>

#### (2) คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ

จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบระดับความชอบของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแครอทชิพที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 720 W และการอบแห้งแบบลมร้อน เห็นได้ว่าระดับความชอบในลักษณะปรากฏ สี รสชาติ และความชอบโดยรวมของแครอทชิพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่แครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นสี 720 W มีระดับความชอบมากกว่าแครอทชิพอบแห้งแบบลมร้อน ถึงแม้ที่ระดับความชอบในความแข็งและความกรอบของแครอทชิพไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ค่าเฉลี่ยของระดับความชอบของทั้งสอง

คุณลักษณะนี้สำหรับแครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนก็ยังมีค่าสูงกว่า ซึ่งสามารถตีความได้ว่า ผู้บริโภคตัวอย่างชอบแครอทชิพอบแห้งแบบสองชั้นตอนมากกว่า

ตารางที่ 4.7 ระดับความชอบของคุณลักษณะต่าง ๆ ในแครอทชิพ

Attribute (n=30)	MWV 720 W + HA	HA
Appearance	7.40±1.00 <sup>a</sup>	4.77±1.65 <sup>b</sup>
Color	7.67±1.06 <sup>a</sup>	4.63±1.75 <sup>b</sup>
Hardness	6.87±1.31 <sup>ns</sup>	6.00±1.78 <sup>ns</sup>
Crispness	7.20±1.40 <sup>ns</sup>	6.77±1.55 <sup>ns</sup>
Taste	6.93±1.41 <sup>a</sup>	5.33±1.75 <sup>b</sup>
ความชอบโดยรวม (overall)	7.20±0.85 <sup>a</sup>	5.53±1.43 <sup>b</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและลมร้อนสำหรับการผลิตแครอทชิพพบว่าอัตราการอบแห้งสูงสุดของกระบวนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีค่ามากกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ใช้ระยะเวลาและพลังงานในการอบแห้งน้อยกว่า โดยที่ความเข้มข้น 960 W มีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ  $3.1426 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$  ใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยที่สุด 34.5 นาที และใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด  $14.5511 \text{ kWh/kg}$

จากการวิเคราะห์ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แครอทชิพที่ผ่านการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าแครอทชิพที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อน คือแครอทชิพที่ได้จากการอบแห้งแบบสองขั้นตอนมีการหดตัวที่น้อยกว่า มีสีสว่างและความกรอบมากกว่าแครอทชิพที่อบแห้งด้วยลมร้อน และผลิตภัณฑ์แครอทชิพที่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้งยังส่งผลต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการรับประทานแครอทสดในปริมาณที่เท่ากัน เมื่อสอบถามความชอบของแครอทชิพทั้งสองแบบแล้วพบว่าแครอทชิพที่ผ่านการอบแห้งแบบสองขั้นตอนเป็นที่ชื่นชอบของผู้ทดสอบมากกว่าแครอทชิพที่อบแห้งแบบลมร้อน

สรุปได้ว่ากระบวนการอบแห้งที่ใช้ไมโครเวฟสุญญากาศเข้ามาร่วมด้วยทำให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งยังส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งแครอทชิพดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

## เอกสารอ้างอิง

- Kate Evans, Lisa Brutchter, Bonnie Konishi, Bruce Barritt. (2010). **Correlation of Sensory Analysis with Physical Textural Data from a Computerized Penetrometer in the Washington State University Apple Breeding Program.** Technology and Product Reports, 1027.
- M. Ozcelik, P.A. Püschner. (2017). **Microwave plant requirements and process control for advanced applications.** Woodhead Publishing Series in Food Science, 350-380.
- Midwest Tungsten Service. (ม.ป.ป.). **Basic vacuum theory.** [Online]. Available: <https://www.tungsten.com/tips/basic-vacuum-theory>. (วันที่สืบค้น 25 สิงหาคม 2562).
- Monteiro, R. L., Carciofi, B. A.M. and Laurindo, J. B. (2016). **A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas.** Journal of Food Engineering, 178, 1-11.
- Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A.M. and Laurindo, J. B. (2018). **Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices.** LWT-Food Science and Technology, 96, 612-619.
- Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A.M. and Laurindo, J. B. (2018). **Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices.** Journal of Food Engineering, 232, 1-10.
- Pallabi Kundu, Anitha K and Ramani N. (2016). **Feeding Impact of The Vegetable Mite, Tetranychus neocaledonicus André (Acari: Tetranychidae) on Mentha Rotundifolia L.** International Journal of Recent Scientific Research. 7(4), 10406-10409.
- Powder/ Bulk Solids. (2012). **Advantages of Using Microwave Energy for Process Heating.** [Online]. Available: <https://www.powderbulksolids.com/article/advantages-using-microwave-energy-process-heating>. (วันที่สืบค้น 13 ธันวาคม 2562).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- S. Eleeyah, S. Fameera, and H. Radchadaporn, (2012). **Moisture diffusivity coefficient specific energy consumption and specific moisture extraction rate betel nut drying using combined thermal energy.** Burapha Science Journal. vol.17, no.1, 142–149.
- Siamchemi. (2560). **คลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติ และประโยชน์คลื่นไมโครเวฟ.** [Online]. Available: <http://www.siamchemi.com/คลื่นไมโครเวฟ/>. (วันที่สืบค้น 25 สิงหาคม 2562).
- T. Supawan, L. Sakena, and T. Yutthana. (2012) **Combined infrared/microwave and hot air drying for jackfruit: kinetics, quality and sensory analysis.** Burapha Science Journal, vol.17, no.1, 117–129.
- Wojdylo, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., Oszmianski, J. (2014). **Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries.** Food Bioprocess Technol. 7. 829-841.
- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี . (ม.ป.ป.). **เทคโนโลยีการแปรรูปแครอท.** [Online]. Available: <https://www.mhesi.go.th/main/th/103-knowledge/technology-integration/food-processing-technology/1305-2010-02-03-05-17-54>. (วันที่สืบค้น 31 สิงหาคม 2562).
- ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. (2555, เมษายน). **เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน.** วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 35: ฉบับที่ 2. หน้า 269-282.
- ปองพล สุริยะกันธร และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2555). **แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ.** วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 18: ฉบับที่ 1. หน้า 59-67.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (ม.ป.ป.). **แครอท.** [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2231/carrot>. (วันที่สืบค้น 29 สิงหาคม 2562).
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (ม.ป.ป.). **ความชื้น.** [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0830/moisture-content-ความชื้น>. (วันที่สืบค้น 29 สิงหาคม 2562).
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (ม.ป.ป.). **อัตราการทำแห้ง.** [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate-อัตราการทำแห้ง>. (วันที่สืบค้น 2 กันยายน 2562).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. (ม.ป.ป.). Vacuum / สูญญากาศ. [Online].

Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0846/vacuum-สูญญากาศ>. (วันที่สืบค้น 25 สิงหาคม 2562).

มูลนิธิโครงการหลวง. (ม.ป.ป.). แครอท. [Online]. Available:

<http://www.royalprojectmarket.com/productDetail.php?pid=125>. (วันที่สืบค้น 29 สิงหาคม 2562).

วิไล รังสาดทอง. (2546). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น.

สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ. (2537). การอบแห้งเมล็ดพืช, พิมพ์ครั้งที่ 6, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: ท้อป.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส: ระดับความเข้ม

### ตัวอย่างทดสอบ: แครอทชิพ

รหัสผู้ทดสอบ..... เพศ..... อายุ.....ปี วันที่.....

คำชี้แจง: โปรดตีมน้ำระหว่างตัวอย่าง

#### ระดับความเข้ม

ให้ผู้ทดสอบพิจารณาคูณลักษณะต่อไปนี้ และประเมินว่าท่านรับรู้ถึงคุณลักษณะเหล่านี้มากน้อยเพียงใด โดยขีดเส้นความเข้มของคุณลักษณะตั้งฉากกับเส้นคะแนนที่กำหนดให้ พร้อมเขียนรหัสตัวอย่างกำกับไว้เหนือขีด

ตัวอย่าง ความเหนียว

น้อย	112	มาก
<hr/>		
1. ความสว่างของสี		
น้อย		มาก
<hr/>		
2. ความแข็ง (แรงที่ใช้ในการกัดตัวอย่างครั้งแรกเมื่อวางตัวอย่างระหว่างฟันกล่อมบนและล่าง)		
น้อย		มาก
<hr/>		
3. ความกรอบ (เสียงที่ได้ยินในระหว่างที่กัดตัวอย่างให้แตก)		
น้อย		มาก
<hr/>		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส: ระดับความชอบ

### ตัวอย่างทดสอบ: แครอทชิพ

รหัสผู้ทดสอบ..... เพศ..... อายุ.....ปี วันที่.....

คำชี้แจง: โปรดตม้่น้ำระหว่างตัวอย่าง

ระดับความชอบ

ให้ผู้ทดสอบพิจารณาคูณลักษณะต่อไปนี้ และประเมินว่าท่านชอบคุณลักษณะของตัวอย่างมากน้อยเพียงใดโดยใช้คะแนนความชอบดังนี้

9 = ชอบอย่างยิ่ง

4 = ไม่ชอบเล็กน้อย

8 = ชอบมาก

3 = ไม่ชอบปานกลาง

7 = ชอบปานกลาง

2 = ไม่ชอบมาก

6 = ชอบเล็กน้อย

1 = ไม่ชอบอย่างยิ่ง

5 = เฉย ๆ

คุณลักษณะ	รหัสตัวอย่าง	
ลักษณะปรากฏ (appearance)		
สี (color)		
ความแข็ง (hardness)		
ความกรอบ (crispness)		
รสชาติ (taste)		
ความชอบโดยรวม (overall)		

แสดงความคิดเห็นเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณลักษณะของตัวอย่างทดสอบ

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่  
ความเข้มรังสี 960 W

เวลา (นาที)	Moisture content ( $g_w/g_{dm}$ )		Moisture ratio		Drying rate ( $g_w/g_{dm}\cdot\text{min}$ )	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.00	7.9620	0.2915	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.50	7.5752	0.1874	0.9517	0.0113	0.7735	0.2083
1.00	6.0040	0.0918	0.7545	0.0161	3.1426	0.1911
1.50	4.6853	0.0741	0.5888	0.0123	2.6373	0.0353
2.00	3.3828	0.1193	0.4249	0.0006	2.6051	0.0904
2.50	2.3557	0.0208	0.2962	0.0135	2.0542	0.2802
3.00	1.2568	0.0288	0.1581	0.0094	2.1978	0.0160
3.50	0.9449	0.1496	0.1183	0.0144	0.6237	0.3565
4.00	0.6313	0.0861	0.0791	0.0080	0.6273	0.1374
4.50	0.4557	0.0126	0.0573	0.0019	0.3510	0.1545
7.00	0.3515	0.0310	0.0441	0.0025	0.0417	0.0086
9.50	0.2573	0.0109	0.0323	0.0015	0.0377	0.0097
12.00	0.2015	0.0037	0.0253	0.0012	0.0223	0.0034
14.50	0.1359	0.0071	0.0171	0.0003	0.0262	0.0035
19.50	0.1071	0.0075	0.0134	0.0005	0.0058	0.0003
24.50	0.0895	0.0022	0.0112	0.0001	0.0035	0.0011
29.50	0.0750	0.0029	0.0094	0.0006	0.0029	0.0009
34.50	0.0597	0.0005	0.0075	0.0003	0.0031	0.0005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่  
ความเข้มรังสี 720 W

เวลา (นาที)	Moisture content ( $g_w/g_{dm}$ )		Moisture ratio		Drying rate ( $g_w/g_{dm}\cdot\text{min}$ )	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.00	8.4446	0.5248	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.50	7.6478	0.2234	0.9073	0.0445	1.5937	0.8559
1.00	6.5040	0.3719	0.7708	0.0323	2.2875	0.3232
1.50	5.6985	0.2757	0.6753	0.0180	1.6110	0.2624
2.00	4.6542	0.3124	0.5514	0.0254	2.0885	0.1807
2.50	3.7753	0.2483	0.4479	0.0364	1.7580	0.3844
3.00	2.9675	0.0472	0.3523	0.0216	1.6155	0.4036
3.50	2.2246	0.1120	0.2636	0.0032	1.4859	0.2309
4.00	1.5129	0.2081	0.1794	0.0254	1.4234	0.4405
4.50	1.0453	0.0205	0.1240	0.0051	0.9352	0.4137
5.00	0.7194	0.0292	0.0853	0.0045	0.6516	0.0456
5.50	0.5591	0.0300	0.0663	0.0044	0.3207	0.0115
6.00	0.4372	0.0173	0.0519	0.0041	0.2437	0.0369
8.50	0.3068	0.0240	0.0365	0.0046	0.0522	0.0051
11.00	0.1663	0.0077	0.0198	0.0019	0.0562	0.0065
13.50	0.1317	0.0030	0.0156	0.0006	0.0139	0.0041
16.00	0.1121	0.0056	0.0133	0.0009	0.0078	0.0024
21.00	0.1010	0.0023	0.0120	0.0009	0.0022	0.0009
26.00	0.0891	0.0017	0.0106	0.0007	0.0024	0.0002
31.00	0.0706	0.0045	0.0084	0.0007	0.0037	0.0006
36.00	0.0596	0.0012	0.0071	0.0003	0.0022	0.0010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบสองชั้นตอนที่  
ความเข้มรังสี 480 W

เวลา (นาที)	Moisture content ( $g_w/g_{dm}$ )		Moisture ratio		Drying rate ( $g_w/g_{dm}\cdot\text{min}$ )	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0.00	9.8154	0.1443	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.50	9.5633	0.1461	0.9743	0.0094	0.5043	0.1881
1.00	9.2038	0.1609	0.9377	0.0032	0.7191	0.1669
1.50	8.2345	0.1400	0.8390	0.0110	1.9384	0.2184
2.00	7.5018	0.2531	0.7642	0.0165	1.4655	0.5129
2.50	6.7185	0.2484	0.6844	0.0171	1.5666	0.0163
3.00	5.6570	0.0945	0.5764	0.0104	2.1230	0.3768
3.50	5.0788	0.0542	0.5175	0.0056	1.1563	0.0983
4.00	4.1900	0.2586	0.4270	0.0277	1.7776	0.4542
4.50	3.6286	0.1566	0.3699	0.0206	1.1228	0.3649
5.00	2.9829	0.0509	0.3040	0.0097	1.2915	0.2312
5.50	2.3642	0.0997	0.2409	0.0115	1.2374	0.2142
6.00	1.9868	0.0781	0.2024	0.0080	0.7547	0.0853
6.50	1.4075	0.0735	0.1434	0.0082	1.1586	0.0635
7.00	1.2059	0.0405	0.1228	0.0025	0.4033	0.2033
7.50	0.9632	0.0154	0.0981	0.0022	0.4853	0.0776
8.00	0.7340	0.0499	0.0748	0.0050	0.4585	0.1303
8.50	0.6155	0.0105	0.0627	0.0004	0.2368	0.0910
9.00	0.4522	0.0082	0.0461	0.0004	0.3266	0.0161
11.50	0.3040	0.0247	0.0309	0.0021	0.0593	0.0066
14.00	0.2093	0.0101	0.0213	0.0007	0.0378	0.0060
16.50	0.1371	0.0042	0.0140	0.0002	0.0289	0.0026
19.00	0.1056	0.0040	0.0108	0.0003	0.0126	0.0001
24.00	0.0951	0.0017	0.0097	0.0001	0.0021	0.0005
29.00	0.0872	0.0016	0.0089	0.0001	0.0016	0.0000
34.00	0.0767	0.0036	0.0078	0.0004	0.0021	0.0009
39.00	0.0609	0.0010	0.0062	0.0002	0.0032	0.0008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบลมร้อน

เวลา (นาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·min)	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
	0	9.4313	0.7834	1.0000	0.0000	0.0000
5	7.1500	0.7717	0.7578	0.0480	0.4563	0.0904
10	5.3576	0.4144	0.5690	0.0392	0.3585	0.0786
15	3.7785	0.3299	0.4015	0.0347	0.3158	0.0213
20	2.6573	0.3494	0.2813	0.0214	0.2242	0.0360
30	0.9581	0.2199	0.1011	0.0185	0.1699	0.0138
40	0.2307	0.1127	0.0240	0.0101	0.0727	0.0117
60	0.0528	0.0057	0.0057	0.0010	0.0089	0.0059
80	0.0386	0.0092	0.0041	0.0007	0.0007	0.0007
100	0.0256	0.0037	0.0027	0.0003	0.0006	0.0004

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่  
ความเข้มรังสี 960 W

ครั้งที่	ปริมาณน้ำที่ ระเหยออก (kg)	พลังงาน (kW-h)		SEC (kW-h/kg)
		Microwave-vacuum	Hot air	
1	0.02751	0.223	0.178	14.5583
2	0.02754	0.222	0.180	14.5788
3	0.02759	0.219	0.182	14.5161

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่  
ความเข้มรังสี 720 W

ครั้งที่	ปริมาณน้ำที่ ระเหยออก (kg)	พลังงาน (kW-h)		SEC (kW-h/kg)
		Microwave-vacuum	Hot air	
1	0.02756	0.261	0.178	15.9289
2	0.02761	0.260	0.180	15.9363
3	0.02760	0.259	0.182	15.9783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.7 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่ ความเข้มข้น 480 W

ครั้งที่	ปริมาณน้ำที่ระเหยออก (kg)	พลังงาน (kW-h)		SEC (kW-h/kg)
		Microwave-vacuum	Hot air	
1	0.02763	0.333	0.178	18.4944
2	0.02771	0.332	0.180	18.4771
3	0.02771	0.329	0.182	18.4410

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งแบบลมร้อน

ครั้งที่	ปริมาณน้ำที่ระเหยออก (kg)	พลังงาน (kW-h)	SEC (kW-h/kg)
1	0.02752	0.560	20.3488
2	0.02781	0.564	20.2805
3	0.02766	0.562	20.3181

ตารางที่ 6.9 ปริมาตรของชิ้นแครอทชิพสดและชิ้นแครอทชิพที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ

Treatment	ปริมาตรของชิ้นวัสดุ (cm <sup>3</sup> )		
	1	2	3
Fresh	0.2826	0.2953	0.2987
MWV 960 W + HA 100 °C	0.0600	0.0611	0.0646
MWV 720 W + HA 100 °C	0.0611	0.0623	0.0646
MWV 480 W + HA 100 °C	0.0600	0.0634	0.0669
HA 100 °C	0.0265	0.0277	0.0288

ตารางที่ 6.10 ร้อยละการหดตัวของชิ้นแครอทชิพที่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อเทียบกับชิ้นแครอทชิพสด

Treatment	ร้อยละการหดตัว				
	1	2	3	Avg.	S.D.
Fresh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MWV 960 W + HA 100 °C	78.78	79.30	78.38	78.82	0.46
MWV 720 W + HA 100 °C	78.37	78.91	78.38	78.55	0.31
MWV 480 W + HA 100 °C	78.78	78.52	77.61	78.30	0.61
HA 100 °C	90.61	90.62	90.35	90.53	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.11 ค่าสีของแคโรทีนที่สกัด

ครั้งที่	L*	a*	b*
1	58.25	42.84	46.73
2	58.51	42.93	46.16
3	58.74	43.18	46.72

ตารางที่ 6.12 ค่าสีของแคโรทีนที่อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 960 W

ครั้งที่	L*	a*	b*
1	47.05	35.77	40.74
2	47.14	36.39	41.60
3	48.79	35.78	40.96

ตารางที่ 6.13 ค่าสีของแคโรทีนที่อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 720 W

ครั้งที่	L*	a*	b*
1	47.49	34.85	39.75
2	47.78	35.06	40.63
3	48.93	33.73	40.98

ตารางที่ 6.14 ค่าสีของแคโรทีนที่อบแห้งแบบสองชั้นตอนที่ความเข้มข้นรังสี 480 W

ครั้งที่	L*	a*	b*
1	47.80	35.19	40.24
2	48.51	34.69	39.58
3	48.85	34.61	38.54

ตารางที่ 6.15 ค่าสีของแคโรทีนที่อบแห้งแบบลมร้อน

ครั้งที่	L*	a*	b*
1	34.43	26.58	31.96
2	34.50	30.34	34.61
3	34.57	28.26	32.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.16 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ของแครอตซีฟสด

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)			Chlorophyll (a) (mg/L)	Chlorophyll (b) (mg/L)	Carotenoid (mg/L)
	470 nm	645 nm	663 nm			
1	0.514	0.023	0.021	0.2048	0.4284	2.2435
2	0.488	0.006	0.005	0.0474	0.1140	2.1307
3	0.511	0.01	0.010	0.1001	0.1822	2.2310

ตารางที่ 6.17 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ของแครอตซีฟที่อบแห้งแบบสองขั้นตอน  
ที่ความเข้มรังสี 960 W

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)			Chlorophyll (a) (mg/L)	Chlorophyll (b) (mg/L)	Carotenoid (mg/L)
	470 nm	645 nm	663 nm			
1	2.162	-0.005	-0.005	-0.0501	-0.0911	9.4411
2	2.165	-0.004	-0.005	-0.0016	-0.0021	9.4542
3	2.170	-0.006	-0.005	-0.0015	-0.0035	9.4760

ตารางที่ 6.18 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ของแครอตซีฟที่อบแห้งแบบสองขั้นตอน  
ที่ความเข้มรังสี 720 W

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)			Chlorophyll (a) (mg/L)	Chlorophyll (b) (mg/L)	Carotenoid (mg/L)
	470 nm	645 nm	663 nm			
1	2.974	-0.002	-0.002	-0.0200	-0.0364	12.9869
2	2.955	-0.004	-0.004	-0.0400	-0.0729	12.9039
3	2.969	-0.004	-0.003	-0.0273	-0.0776	12.9651

ตารางที่ 6.19 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ของแครอตซีฟที่อบแห้งแบบสองขั้นตอน  
ที่ความเข้มรังสี 480 W

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)			Chlorophyll (a) (mg/L)	Chlorophyll (b) (mg/L)	Carotenoid (mg/L)
	470 nm	645 nm	663 nm			
1	1.678	-0.005	-0.006	-0.0628	-0.0864	7.3275
2	1.695	-0.005	-0.006	-0.0628	-0.0864	7.4018
3	1.683	-0.005	-0.005	-0.0501	-0.0911	7.3494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.20 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ของแครอตซีฟที่อบแห้งแบบลมร้อน

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)			Chlorophyll (a) (mg/L)	Chlorophyll (b) (mg/L)	Carotenoid (mg/L)
	470 nm	645 nm	663 nm			
1	1.804	-0.006	-0.006	-0.0601	-0.1093	7.8778
2	1.818	-0.004	-0.004	-0.0400	-0.0729	7.9389
3	1.807	-0.005	-0.005	-0.0501	-0.0911	7.8908



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้