



ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพของแตงโมที่ผ่านการทำแห้งแบบ
แช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ



โดย
นางสาววันชนก ไกรงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพของแตงโมที่ผ่านการทำ
แห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECTS OF FREEZING ON DRYING KINETICS AND QUALITY OF
ATMOSPHERIC FREEZE DRIED WATERMELON



By
MISS Wanchanok KAINGAM

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพของแตงโมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ
โดย	นางสาววันชนก ไกรงาม
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ)	
	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี)	
	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(อาจารย์ ดร. ขวัญใจ กลิ่นจงกล)	

620920100 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : การยืดอายุการเก็บรักษา การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ การระเหย การระเหิด การแช่เยือกแข็ง ไลโคปีน

นางสาว วันชนก ไกรงาม: ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพของแตงโมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี

แตงโมเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมมีรสชาติหวานเย็น มีคุณสมบัติให้ความรู้สึกสดชื่นแก่ผู้บริโภค เนื่องจากมีน้ำและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้เนื้อแตงโมเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ง่าย การทำแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ง่าย ใช้ยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร แต่อาจมีผลต่อคุณภาพและปริมาณไลโคปีน (lycopene) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญที่ให้คุณลักษณะสีแดงในแตงโม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric freeze drying; AFD) ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งและคุณภาพของชิ้นแตงโม โดยการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งที่ 2 สภาวะ ได้แก่ ที่ -18°C และ -40°C และนำไปทำแห้งตามโปรแกรมอัตโนมัติซึ่งมีขั้นตอน 6 step ในช่วงที่ 1 (step ที่ 1 – 5) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -24°C ไป 1.6°C และในช่วงที่ 2 (step ที่ 6) อุณหภูมิ 7.2°C ใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 75 ชั่วโมง 36 นาที ในระหว่างการทำแห้งมีการติดตามความชื้นสัมพัทธ์ขาเข้าและขาออกเพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่หายไปจากการระเหิดอ้างอิงจากกฎสมดุลก๊าซ จากการทดลองพบว่า ในช่วงที่ 1 เกิดการทำแห้งแบบระเหิด การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C และ -40°C มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อการสูญเสียน้ำใน step 4 ซึ่งมีอัตราการระเหิดเท่ากับ 0.141 ± 0.01 และ 0.138 ± 0.28 กรัมต่อวินาที ตามลำดับ การทำแห้งใน step 6 เกิดการระเหยของน้ำ จึงได้นำมาทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้ง จากการทดลองพบว่า สมการของ Page และ Modified page สามารถทำนายพฤติกรรมการทำแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งให้ค่า R^2 สูง ($0.9998 - 0.9999$) และ RMSE ต่ำ ($0.01 - 0.15$) การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นแตงโมมากกว่าที่อุณหภูมิ -40°C เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งที่ต่างกัน ได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบกด (Hot air drying) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying, FD) และการทำแห้งวิธี AFD พบว่าการทำแห้งแบบ AFD สามารถรักษาปริมาณไลโคปีนได้ไม่ต่างจากการทำแห้งแบบ FD ซึ่งมีปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 0.92 ± 0.03 และ 1.29 ± 0.03 mg/g dry matter สำหรับแตงโมที่ผ่านวิธี AFD และ FD ตามลำดับ ค่า Hue angle ซึ่งแสดงมุมของสีของเนื้อแตงโมที่ทำแห้งด้วย AFD ไม่ต่างจากเนื้อแตงโมสด ในขณะที่เนื้อสีขาวติดเปลือกของแตงโมที่ได้จากการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบกดให้ค่า Hue angle ใกล้เคียงของสด ดังนั้นการแช่เยือกแข็งที่ -40°C มีความเหมาะสมสำหรับการเตรียม

วัตถุดิบก่อนการทำแห้งแบบ AFD เมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$



620920100 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : watermelon; drying; atmospheric freeze drying; evaporation; sublimation; freezing; lycopene

MISS WANCHANOK KAINGAM : EFFECTS OF FREEZING ON DRYING KINETICS AND QUALITY OF ATMOSPHERIC FREEZE DRIED WATERMELON THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D.

Watermelon is a popular fruit due to its sweetness and refreshing flavor. The main components in watermelon flesh are water and sugars, which cause short shelf life and microbial spoilage. Drying is a common method to preserve agriculture products. However, drying might affect lycopene pigment which represents red color characteristic in the flesh of watermelon. The objective of this study was to investigate the effects of freezing and atmospheric freeze drying (AFD) on drying kinetic and quality of watermelon slice. Watermelon slices were frozen at 2 different temperatures (-18 and -40 °C) before drying. Drying process was conducted for 75 hours 36 minutes from step 1 to step 6. At the first drying period (step 1-5), temperature inside the drying chamber was increased from -24 °C to 1.6 °C and reached 7.2 °C in the second period (step 6). Temperature and relative humidity of air inlet and air outlet were monitored during the drying process for determination of sublimation rate using ideal gas law. In this study, sublimation was found in the first drying period. Freezing temperature significantly affected the water loss, especially in step 4 ($p \leq 0.05$). The rate of sublimation at the freezing temperatures of -18 and -40 °C were 0.141 ± 0.01 and 0.138 ± 0.28 g/s, respectively at this step. Evaporation of water content of watermelon was found in Step 6, which was therefore used for modeling of drying kinetics. Page's and Modified Page's equations were the best models to describe drying behaviors of watermelon with the high R^2 (0.9998 – 0.9999) and low RMSE (0.01 – 0.15). Freezing at -18 °C affected the shrinkage of dried products more than that -40 °C. The influence of different drying methods (tray drying; TD, freeze drying; FD, and AFD) on quality of dried watermelon were also investigated. AFD and FD showed high potential to preserve lycopene in dried products with the contents of 0.92 ± 0.03 and 1.29 ± 0.03 mg/ g dry matter, respectively. There was no difference between hue angle values of the dried

products obtained from AFD and fresh watermelon. Thus, freezing at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ was more suitable for watermelon preparation before AFD drying as compared with freezing at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จและลุล่วงไปได้ต้องกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราการณ มหาโยธี ผู้มอบโอกาสในการศึกษา ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนแนวความคิดในการทำงานวิจัยที่ดี จนเป็นเล่มวิทยานิพนธ์ รวมถึงแนวความคิดการดำเนินชีวิต และคำสอนต่างๆ ในการพัฒนาตัวเอง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ศราวุธ ภูไพบิตร์กุล ที่ช่วยแนะนำ สั่งสอน มอบความรู้ความเข้าใจ ทั้งทางด้านพื้นฐานความรู้ หรือแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ดี รวมถึงรูปแบบการนำเสนอผลการทดลองที่ดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจรรู ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือ ส่งผลให้มีความรู้ความเข้าใจ หลักการ ของเครื่องมือ และเพิ่มทักษะในการวิเคราะห์ค่าทางเคมีต่างๆ ที่สามารถนำมาเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยของตนเองได้

ขอขอบคุณ โครงการ The research of freeze-drying technique at atmospheric pressure ภายใต้การสนับสนุนของ บริษัท Panasonic Corporation ประเทศญี่ปุ่น ในการอนุญาตให้ใช้เครื่องมือสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.นิโลบล โกมลสิงห์ สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำเล่มวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการสนับสนุนต่างๆเพื่อให้งานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ขวัญใจ กลิ่นจกกล ที่อนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง และคำแนะนำในการตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณนางสาวกัญญาณี จันทิพย์วงษ์ นายฉัตรชัย วัฒนไพโรจน์ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกในเรื่อง เอกสารงานธุรการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา สถานที่ที่มีความพร้อมในการทำงานวิจัย และการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่รองรับการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูง

ขอขอบคุณคุณ เพื่อน และน้องๆทุกท่านสำหรับกำลังใจ กำลังใจโดยเฉพาะ พี่ แซนด์ ดริ้ม และกิต้า สำหรับการช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณแม่ และคุณพ่อ สำหรับการสนับสนุนในการศึกษา

นางสาว วันชนก ไกรงาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	19
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	19
1.2 วัตถุประสงค์.....	21
1.3 สมมุติฐาน.....	21
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	21
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.1 แต่งโม.....	23
2.2 รวงค์วัตถุ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแต่งโม.....	26
2.3 การสลายตัวของไลโคปีน.....	31
2.4 การแช่เยือกแข็ง.....	34
2.4.1 การแช่เยือกแข็งแบบช้า.....	36
2.4.2 การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว.....	37
2.4.3 การศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็งขึ้นตัวอย่างก่อนการทำแห้งต่อคุณภาพของแห้ง.....	38
2.5 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศ หรือ AFD.....	41
2.5.1 หลักการการทำแห้งแบบ AFD.....	41

2.5.2	ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการทำแห้งด้วย AFD	43
2.5.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเทคนิค AFD	44
2.5.4	โครงสร้างของตัวอย่างระหว่างการทำแห้ง	46
2.5.5	การศึกษาเทคนิคการทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์	46
2.5.6	จลนพลศาสตร์การทำแห้ง	53
2.5.7	ความดันไอของน้ำแข็ง และน้ำอุณหภูมิต่ำในสภาวะความดันบรรยากาศ	55
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	56
3.1	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี	56
3.2	วัตถุดิบ	58
3.3	วิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้ง	60
3.4	การวิเคราะห์คุณภาพของวัตถุดิบแห้งโมสดก่อนการทดลอง	61
3.4.1	คุณภาพผลแห้งโม	61
3.4.2	คุณภาพทางกายภาพของชิ้นแห้งโม	62
3.4.3	คุณภาพทางเคมีของชิ้นแห้งโม	64
3.5	การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งชิ้นแห้งโม ด้วยการทำแห้งแบบ Atmospheric freeze drying, AFD	70
3.5.1	กระบวนการแช่เยือกแข็ง	70
3.5.2	การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแห้งโมใน step 1-5 ด้วย AFD	72
3.5.3	การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแห้งโมใน step 6 ด้วย AFD	78
3.6	การศึกษาวิธีการทำแห้งต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแห้งโม ...	80
3.6.1	การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบภาค (TD)	80
3.6.2	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ (FD)	81
3.6.3	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะบรรยากาศ (AFD)	82

3.7 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ	83
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	84
4.1 คุณภาพของแตงโมสด	84
4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็ง	89
4.3 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อজনপলাস্ট্রিকারত্যাংগেট্যাংমোইন step 1 - 5 ด้วย AFD	92
4.3.1 জনপলাস্ট্রিকারত্যাংগেট্যাংমোইন step 1 - 5 ด้วยการত্যাংগেট্যাংมอ AFD	92
4.3.2 คุณภาพซึ่นแตงมอระหวังการต্যাংง่ใน Step 1 - 5 ด้วยการต্যাংง่มอ AFD.....	99
4.4 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อজনপলাস্ট্রিকারত্যাংগেট্যাংมอইন step 1 - 5 ด้วย AFD	104
4.4.1 জনপলাস্ট্রিকারত্যাংগেট্যাংมอ step 6 ด้วยการত্যাংง่มอ AFD	104
4.4.2 คุณภาพซึ่นแตงมอระหวังการต্যাংง่ใน step 6 ด้วยการত্যাংง่มอ AFD	110
4.5 ผลของวธิีการต্যাংง่ต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงมอ	116
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	126
รายการอ้างอิง	127
ภาคผนวก ก	136
ภาคผนวก ข	137
ภาคผนวก ช	144
ประวัติผู้เขียน	160

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในแตงโม	28
ตารางที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบได้ในเนื้อติดเปลือกแตงโม	30
ตารางที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแช่เยือกแข็งก่อนการอบแห้ง ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง	39
ตารางที่ 4 อิทธิพลของการทำแห้งต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร	51
ตารางที่ 5 สมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้อธิบายการทำแห้งแบบชั้นเดียว	53
ตารางที่ 6 รายละเอียดแตงโมที่ใช้ในการศึกษา	59
ตารางที่ 7 เวลา และอุณหภูมิของโปรแกรมที่ใช้ในการทำแห้ง	72
ตารางที่ 8 สมการที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งขึ้นแตงโมใน Step การทำแห้งที่ 6	79
ตารางที่ 9 คุณภาพด้านสีของขึ้นแตงโมสด	86
ตารางที่ 10 คุณภาพทางเคมีของขึ้นแตงโมสด	88
ตารางที่ 11 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในแต่ละ step การทำแห้ง	98
ตารางที่ 12 ลักษณะปรากฏของขึ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ระหว่างการทำแห้งแบบ AFD ใน step 1 - 5	100
ตารางที่ 13 ลักษณะปรากฏของขึ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ระหว่างการทำแห้งแบบ AFD ใน step 1 - 5	101
ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทำแห้งแตงโมในลำดับการทำแห้งที่ 6	109
ตารางที่ 15 คุณภาพด้านสีของขึ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ระหว่างการทำแห้งใน step 6	112
ตารางที่ 16 คุณภาพด้านสีของขึ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ระหว่างการทำแห้งใน step 6	114
ตารางที่ 17 คุณภาพด้านสีของขึ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ -40°C ระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 6	115

ตารางที่ 18 คุณภาพด้านสีของแดงโมอบแห้งจากการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ..... 119

ตารางที่ 19 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของแดงโมอบแห้ง 122

ตารางที่ 20 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแดงโมอบแห้ง 124

ตารางที่ 21 ร้อยละการคงอยู่และร้อยละการหายไปของปริมาณไลโคปีนที่พบในแดงโมอบแห้ง 125

ตารางที่ 22 ปริมาตรสารมาตรฐานไลโคปีน (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน 145

ตารางที่ 23 ปริมาตรสารมาตรฐานแกลลิก (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน..... 152

ตารางที่ 24 ปริมาตรสารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน 155

ตารางที่ 25 ปริมาตรสารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน 158



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ตัวอย่างผลแต่งโมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าเกษตร	23
ภาพที่ 2 ตัวอย่างบริเวณการสุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์ค่าทางเคมีของแต่งโมสด	24
ภาพที่ 3 ลักษณะของแต่งโม 5 สายพันธุ์ที่ระดับความแก่อ่อนที่ต่างกัน	25
ภาพที่ 4 การสังเคราะห์ไลโคปีนผ่าน carotenoid synthesis pathway ในเซลล์พืช	26
ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลไลโคปีน	27
ภาพที่ 6 วิธีการสลายตัวของไลโคปีน	32
ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการแช่เยือกแข็งของน้ำ	35
ภาพที่ 8 ภาพตัดขวางของผลึกน้ำแข็งรอบๆ ผิวปลาแซลมอนแช่แข็ง ด้านขวาคือการแช่เยือกแข็งแบบช้า และด้านซ้ายคือการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	37
ภาพที่ 9 ภาพตัดขวางของผลึกน้ำแข็งในมันฝรั่งหวานที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และแบบเร็ว..	38
ภาพที่ 10 ระบบพื้นฐานของอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ หรือ AFD....	42
ภาพที่ 11 ลักษณะการสัมผัสและแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างชั้นตัวอย่างอาหารกับอากาศเย็นระหว่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ หรือ AFD.....	42
ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งแบบถาด	48
ภาพที่ 13 เส้นทางการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งตามสมมุติฐานที่วางทับบนแผนภาพเฟสของน้ำ	49
ภาพที่ 14 กระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	49
ภาพที่ 15 ตัวอย่างกราฟการทำแห้งมะม่วงสไลด์ด้วยการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 °C เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากสมการของ Two-term Modified Page และ Page.....	54
ภาพที่ 16 ขั้นตอนการล้างผลแต่งโมด้วยน้ำสะอาด	58
ภาพที่ 17 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างขึ้นแต่งโม	60
ภาพที่ 18 ลักษณะการชั่งน้ำหนักผลแต่งโม	61
ภาพที่ 19 การวัดขนาดผลแต่งโม	61

ภาพที่ 20 อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพลักษณะปรากฏของชิ้นแต่งโม	62
ภาพที่ 21 ลักษณะขนาดและความหนาของชิ้นแต่งโมสด	62
ภาพที่ 22 ลักษณะการวัดสีชิ้นแต่งโม	63
ภาพที่ 23 การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C ด้วยเครื่องแช่แข็ง (conventional freezer)	71
ภาพที่ 24 การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C แทนการแช่แข็งแบบเร็ว ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็น (Air blast freezer)	71
ภาพที่ 25 ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างใน step 1 – 5 ระหว่างการทำแห้งด้วยเทคนิค AFD	74
ภาพที่ 26 การจัดเรียงตัวอย่างสำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งใน step 6 ของแต่งโมอบแห้งด้วยเทคนิค AFD	78
ภาพที่ 27 การทำแห้งแต่งโมด้วยตู้อบลมร้อนแบบลาด (TD) ที่อุณหภูมิ 70 °C	80
ภาพที่ 28 การทำแห้งแต่งโมด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ (FD)	81
ภาพที่ 29 การทำแห้งแต่งโมด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะบรรยากาศ (AFD)	82
ภาพที่ 30 ลักษณะปรากฏของชิ้นแต่งโมหลังการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้งทั้ง 8 รุ่น	85
ภาพที่ 31 กราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็ง ที่ - 18 °C	89
ภาพที่ 32 กราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็ง ที่ - 40 °C	90
ภาพที่ 33 ลักษณะชิ้นแต่งโมหลังการแช่เยือกแข็ง	91
ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทำแห้งแต่งโมใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C	92
ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทำแห้งแต่งโมใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C	93
ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C	94
ภาพที่ 37 การเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำระหว่างการทำแห้งแต่งโมใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C	95
ภาพที่ 38 ความชื้นของชิ้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 1	96

ภาพที่ 39 ความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 2.....	96
ภาพที่ 40 ความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 1.....	97
ภาพที่ 41 ความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 2.....	97
ภาพที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %การลดลงของความหนาขึ้นแดงโม เทียบกับขึ้นแดงโมสด ก่อนการอบแห้งต่อ ลำดับการทำแห้งที่ 1-5	102
ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %การลดลงของน้ำหนักขึ้นแดงโม เทียบกับขึ้นแดงโมสด ก่อนการอบแห้ง ต่อ ลำดับการทำแห้งที่ 1-5.....	103
ภาพที่ 44 อัตราส่วนความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page การ ทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2	105
ภาพที่ 45 อัตราส่วนความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page จาก 2 การทดลอง	106
ภาพที่ 46 อัตราส่วนความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page การ ทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2	107
ภาพที่ 47 อัตราส่วนความชื้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page จาก 2 การทดลอง	108
ภาพที่ 48 ลักษณะขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ระหว่างการทำแห้ง Step 6 โดย AFD	111
ภาพที่ 49 ลักษณะขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ระหว่างการทำแห้ง Step 6 โดย AFD	113
ภาพที่ 50 ลักษณะปรากฏของแดงโมอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ.....	117
ภาพที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และวิธีการในการทำแห้ง.....	120
ภาพที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า HUE และวิธีการในการทำแห้ง.....	121

ภาพที่ 67 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 6 สำหรับครั้งที่ 2.....	143
ภาพที่ 68 กราฟมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด	146
ภาพที่ 69 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 100 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	146
ภาพที่ 70 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 80 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	147
ภาพที่ 71 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 60 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	147
ภาพที่ 72 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	148
ภาพที่ 73 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 15 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	148
ภาพที่ 74 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 7.5 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	149
ภาพที่ 75 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 2 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC.....	149
ภาพที่ 76 กราฟมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	152
ภาพที่ 77 กราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชั่น (DPPH-assay).....	155
ภาพที่ 78 กราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชั่น (ABTS-assay).....	158

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แตงโม (Citrullus lanatus) เป็นผลไม้ที่มีรสชาติหวานเย็น มีกรดต่ำ เนื้อสัมผัสกรอบ มีคุณสมบัติให้ความสดชื่นแก่ผู้บริโภค (refreshing properties) (Liu และคณะ, 2018; Mendoza Enano และคณะ, 2019) องค์ประกอบหลักของแตงโมคือน้ำ และน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ น้ำตาลฟรุกโตส (fructose) และกลูโคส (glucose) น้ำตาลโมเลกุลคู่ คือ ซูโครส (sucrose) (Muhammad และคณะ, 2020) สีแดงของเนื้อแตงโมมาจากรงควัตถุที่สำคัญ ได้แก่ โไลโคปีน (lycopene) ซึ่งพบในปริมาณ 2.5 - 10 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด (Perkins-Veazie และคณะ, 2001) นอกจากนี้ยังพบ เบต้าแคโรทีน (β -carotene) ในปริมาณ 1.1 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด (Barba และคณะ, 2006) สารเหล่านี้มีความสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และเป็นสื่อกลางในการออกฤทธิ์ผ่านกลไกต่างๆในร่างกาย เช่น การควบคุมการเจริญเติบโตของเซลล์ การตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกัน และการปรับการแสดงออกของยีน (Edwards และคณะ, 2003)

ในปัจจุบันแตงโมนิยมปลูกอย่างแพร่หลายในเขตร้อน และเขตกึ่งร้อน โดยเฉพาะในทวีปเอเชีย ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกแตงโมรวมทั้งสิ้น 37,853 ไร่ มีผลผลิตรวม 64,244 ตันต่อปี พื้นที่สำคัญในการเพาะปลูกแตงโมอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดสกลนคร นครพนม บึงกาฬ และสุรินทร์ เป็นต้น (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2561) สายพันธุ์แตงโมที่นิยมบริโภค ได้แก่ จินตรา ตอปีโต กินรี และซอนญา ปริมาณการส่งออกแตงโมสดของประเทศไทยเพิ่มขึ้นจาก 89 ตันในปี 2556 ไปเป็น 1746 ตันในปี พ.ศ. 2562 และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ประเทศที่นำเข้าแตงโมจากประเทศไทย ได้แก่ จีน และเวียดนาม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แตงโมมีอายุการเก็บรักษาสั้นเนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 92 - 94 (Olayinka และ Etejere, 2018) จึงเน่าเสียได้ง่ายจากเชื้อจุลินทรีย์ มักพบปัญหาภาวะผลผลิตแตงโมล้นตลาด และราคาตกต่ำในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว ดังนั้นการแปรรูปจึงมีความสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษา และเพิ่มมูลค่าให้แก่แตงโม

ไลโคปีน (Lycopene) สลายและเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป เนื่องจากอิทธิพลของอนุมูลอิสระ และออกซิเจน (Srivastava และคณะ, 2015) กระบวนการการสลายตัว หรือการเปลี่ยนโครงสร้างของไลโคปีนที่พบ ได้แก่ กระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) การเกิดไอโซเมอไรเซชันคือการเปลี่ยนรูปจาก trans-isomer เป็น cis-isomers เนื่องจากโมเลกุลของไลโคปีนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลต่างๆ ส่งผลต่อเสถียรภาพของโมเลกุล ตัวอย่างกระบวนการแปรรูปที่เหนี่ยวนำให้เกิดไอโซเมอไรเซชันเช่น การทำแห้ง (drying) การให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อ (retorting) กระบวนการแช่เยือกแข็ง (Freezing) และสถานะการเก็บรักษา เป็นต้น (Shi และ Maguer, 2000) ซึ่งกระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีน การเปลี่ยนรูปของไลโคปีนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆของการทำแห้ง หากในกระบวนการแปรรูปมีปัจจัยร่วมระหว่างอนุมูลอิสระ และออกซิเจน ซึ่งทั้ง 3 เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของไลโคปีน (Shi และคณะ, 2002)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเทคนิคที่ใช้อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ใกล้เคียงกับของสด อาศัยการระเหยในสภาวะสุญญากาศจากการทำงานของปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและมีต้นทุนสูง (Duan และคณะ, 2015) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (atmospheric freeze-drying, AFD) เป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำกว่าเนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานในการสร้างสภาวะสุญญากาศ และสามารถรักษาคุณภาพของวัตถุดิบใกล้เคียงกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยมีการระเหยเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดน้ำ อาศัยหลักการสมดุลมวลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) เหนี่ยวนำให้เกิดการทำแห้ง (Horie และคณะ, 2018)

กระบวนการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารจากของเหลวเป็นของแข็งเพื่อให้เกิดการระเหยในการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่นิยมใช้ในการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งคือ -18°C และ -40°C หรือต่ำกว่า ขนาดของผลึกน้ำแข็ง และอัตราการแช่เยือกแข็ง ส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพของอาหาร และสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในผลิตภัณฑ์แห้ง (Reyes และคณะ, 2011) นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังช่วยลดระยะเวลาการทำแห้ง และรักษาโครงสร้างของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีการคงรูปร่างได้ดีใกล้เคียงของสด (Tatemoto และคณะ, 2015) สอดคล้องกับ Noshad และคณะ (2020) พบว่า การแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้ง ส่งผลให้เกิดความสมดุลของของแข็งและของเหลวในเมทริกซ์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งให้สั้นลง ช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในองุ่นแห้ง เช่นเดียวกับ Tatemoto และคณะ (2015)

พบว่า การแช่เยือกแข็งส่งผลให้ผนังเซลล์ของพืชถูกทำลายจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง มีผลต่อการปลดปล่อยโมเลกุลของไลโคปีนจากเมทริกซ์ในเนื้อเยื่อของพืชออกสู่ภายนอกทำให้มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับของสด

อย่างไรก็ตามยังไม่มีการวิจัย ที่ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งแบบ AFD ต่อ จลนพลศาสตร์ และคุณภาพทางกายภาพของแตงโมอบแห้ง และประสิทธิภาพของการทำแห้งแบบ AFD ต่อคุณภาพทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแตงโมอบแห้งเมื่อเทียบกับการทำแห้ง ด้วยวิธีอื่น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งขึ้นแตงโม ด้วยการ ทำแห้งแบบ Atmospheric freeze drying (AFD)

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อลักษณะทางกายภาพของแตงโมอบแห้งด้วย วิธี AFD

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้ง (การทำแห้งแบบอบ การทำแห้งแบบแช่เยือก แข็ง และการทำแห้งแบบ AFD) ต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงโม อบแห้ง

1.3 สมมุติฐาน

วิธีการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของแตงโม ในการทำแห้งแบบ AFD วิธีการแช่ เยือกแข็งที่ต่างกันน่าจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในแตงโม ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธี AFD วิธีการทำแห้งที่ต่างกัน น่าจะส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีนและสารที่ มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 แตงโมที่ใช้ในการศึกษาใช้ สายพันธุ์ ซอนย่า ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 55 - 56 วันหลัง ดอกบาน มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) อยู่ในช่วง 8.0 - 9.0 องศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) ปริมาณความชื้นร้อยละ 92 - 93

1.4.2 การเตรียมตัวอย่างที่มีการปกเปลือกสีเขียวด้านนอกออก ชั้นแต่งโมที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีทั้งส่วนเนื้อสีขาวติดเปลือกแต่งโม (exocarp, thick rind) และเนื้อสีแดง (fleshy mesocarp) ควบคุมขนาดและความหนา ด้วยแม่พิมพ์สแตนเลสทรงสามเหลี่ยม ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร

1.4.3 การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งชั้นแต่งโมด้วยวิธี AFD ใช้การแช่เยือกแข็ง 2 วิธี ได้แก่ การแช่ในตู้แช่แข็ง (conventional freezer) ที่อุณหภูมิ - 18 °C สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบช้า และการใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (air blast freezer) ที่อุณหภูมิ - 40 °C สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

1.4.4 ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแต่งโมด้วยวิธี AFD มี 6 ระดับ (step) แบ่งศึกษาเป็น 2 ช่วงการทำแห้งตามอัตราเร็วในการทำแห้ง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ศึกษา step ที่ 1 ถึง step ที่ 5 และช่วงที่ 2 คือ step ที่ 6 โดยสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณความชื้นฐานเปียก (% wb) และค่า aw เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4.5 คุณภาพที่ศึกษา ได้แก่ ลักษณะปรากฏ ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณความชื้น (% wb) ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และ ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

1.4.6 วิธีการทำแห้งแต่งโมที่ศึกษาในตอนที่ 2 มี 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบลาด (HD) ที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 0.17 - 0.25 เมตรต่อวินาที ทำแห้งจนชั้นแต่งโมมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีต่ำกว่า 0.6 นาน 10 ชั่วโมง การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศ (FD) นาน 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ - 40 °C นาน 1 ชั่วโมง และลดลงถึง - 80 °C ที่ความดัน 0.500 mBar ตลอดการทำแห้ง และการทำแห้งแบบ AFD ตามโปรแกรมอัตโนมัติ ใน step 1-6 นาน 75 ชั่วโมง 36 นาที

1.4.7 ปริมาณไลโคปีนวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เปรียบเทียบโดยใช้สารมาตรฐานไลโคปีน (Sigma-aldrich) ความบริสุทธิ์ ≥ 85.0 %

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แดงโม

แดงโม (*Citrullus lanatus*) มีต้นกำเนิดในแถบแอฟริกาใต้ มีการเพาะปลูกมานานกว่า 5,000 ปี เป็นพืชล้มลุกปลูกและโตง่าย ลำต้นมีลักษณะเป็นเถาเลื้อยแผ่ตามระนาบพื้นดิน ใบมีลักษณะเว้าลึก 3 หยัก ก้านใบยาว บริเวณเถาและใบมีขนอ่อนปกคลุม ผลแดงโมมีหลายรูปร่าง เช่น ทรงกลม ทรงรี ทรงรีกว้าง และทรงขอบขนาน หรือยาวรี ปัจจุบันมีการดัดแปลงเป็นรูปทรงอื่นๆ เช่น ทรงสี่เหลี่ยม และทรงหัวใจ เพื่อสร้างจุดขายให้เป็นที่ไปตามความต้องการของผู้บริโภคซึ่งไม่ถือเป็นความผิดปกติด้านรูปทรง (มกษ., 20-2555) แดงโมสามารถเจริญเติบโตได้ทุกฤดูกาลในดินหลายชนิด แต่สภาพดินที่เหมาะสมที่สุดคือ ดินร่วนปนทราย มีสภาพความเป็นกรด - ด่างประมาณ 5.0 – 7.5

ในฤดูฝน แดงโมจะเกิดโรคเหี่ยวจำนวนมากทำให้ผลแดงโมน่า รสชาติจืดต่างจากแดงโมในฤดูร้อนหรือฤดูหนาว ในประเทศไทยนิยมปลูกแดงโมในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม (เฉลิมเกียรติ, 2560) นอกจากผลแดงโมสุกแล้ว ยังนิยมนำยอดอ่อน ผลอ่อน และเนื้อสีขาวติดเปลือก มาใช้ในการประกอบอาหารด้วย

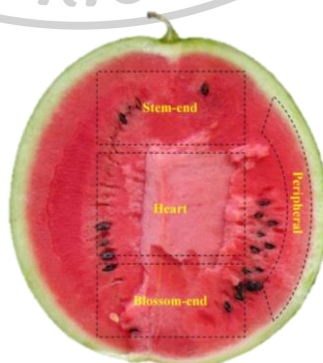


ภาพที่ 1 ตัวอย่างผลแดงโมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าเกษตร

ที่มา: มกษ. (2555)

แตงโมเป็นผลไม้ที่มีน้ำและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก ระดับความแก่อ่อนเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ เช่นที่ระดับความแก่อ่อนพร้อมรับประทาน มีปริมาณน้ำตาลซูโครส และน้ำตาลกลูโคส 20 - 40% ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตส 30 - 50% ของน้ำตาลทั้งหมด กรดอินทรีย์ที่พบมากในแตงโมคือ กรดมาลิก มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนน้อย องค์ประกอบทางเคมีของแตงโมจะขึ้นกับสายพันธุ์ พื้นที่เพาะปลูก ระดับความแก่ - อ่อน เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างทางกายภาพของผลแตงโมที่ต่างกัน จะมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่แตกต่างกันอีกด้วย (Muhammad และคณะ, 2020)

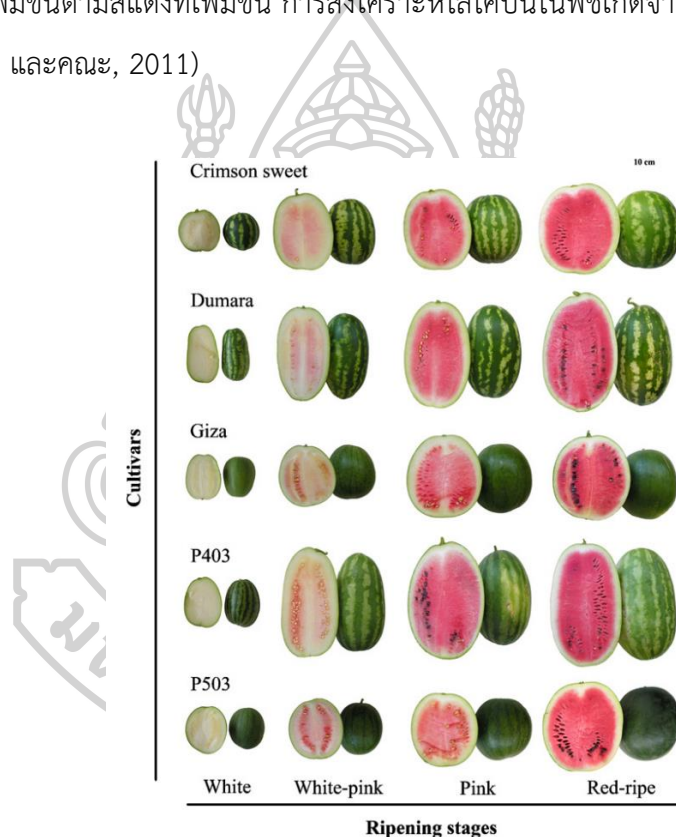
Oseni และคณะ (2013) ได้ศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแต่ละส่วนของผลแตงโมโดยแยกเฉพาะเนื้อแตงโม น้ำแตงโม เมล็ดแตงโม และวิเคราะห์รวมทั้งผล พบว่า ในน้ำแตงโมมีปริมาณฟลาโวนอยด์สูง เนื่องจากฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในน้ำ ในขณะที่ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันกลุ่มที่มีความสามารถในการจับกับไอออนของ (Fe^{2+} chelating ability) พบมากในเนื้อแตงโม และเมื่อวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH - radical พบว่า ตัวอย่างที่มาจากแตงโมทั้งผลมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากที่สุด สอดคล้องกับ Oko และคณะ (2013) พบว่าแตงโมในแต่ละส่วน เช่น เนื้อแตงโม เมล็ดแตงโม และเนื้อสีขาวติดเปลือกแตงโมให้ปริมาณพลังงานแตกต่างกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน เมล็ดแตงโมให้พลังงานสูง 282.23 ± 0.12 K/cal เนื่องจากมีไขมันเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่เนื้อแตงโมให้พลังงานเพียง 31.87 ± 0.08 K/cal เพราะมีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก เช่นเดียวกับ Tlili และคณะ (2011) พบว่าโครงสร้างทางกายภาพที่ต่างกันในผลแตงโมมีปริมาณไลโคปีนแตกต่างกัน เมื่อสุ่มตัวอย่างจากบริเวณต่างๆ แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างบริเวณการสุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์ค่าทางเคมีของแตงโมสด
ที่มา: Tlili และคณะ (2011)

พบว่าบริเวณ Blossom end, Stem end และ Heart มีปริมาณไลโคปีนอยู่ในช่วง 65.8 – 75.8 mg/kg fresh weight ในขณะที่ Peripheral มีปริมาณ DHA (mg/kg fresh weight) และปริมาณวิตามินซีทั้งหมด (mg/kg fresh weight) สูงที่สุด

นอกจากนี้ระดับความแก่ – อ่อนยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อปริมาณไลโคปีนในแตงโมเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบระดับความแก่ – อ่อนของแตงโมจำนวน 5 สายพันธุ์ แบ่งการเก็บเกี่ยวขณะเนื้อแตงโมมีระดับสีต่างกัน ได้แก่ เนื้อสีขาว, เนื้อสีขาวอมชมพู, เนื้อสีชมพู และ เนื้อสีแดง ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ปริมาณไลโคปีนทั้งหมดพบมากเมื่อเนื้อแตงโมเป็นสีแดง ปริมาณไลโคปีนในแตงโมจะเพิ่มขึ้นตามสีแดงที่เพิ่มขึ้น การสังเคราะห์ไลโคปีนในพืชเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Tlili และคณะ, 2011)



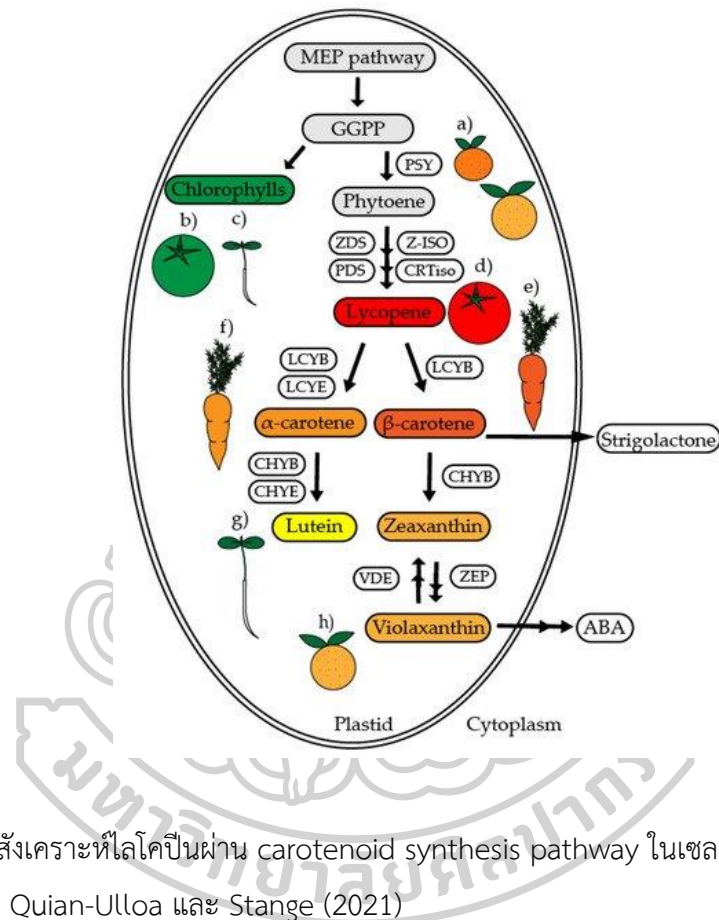
ภาพที่ 3 ลักษณะของแตงโม 5 สายพันธุ์ที่ระดับความแก่อ่อนที่ต่างกัน

ที่มา: Tlili และคณะ (2011)

พบว่าแตงโมทั้ง 5 สายพันธุ์ พบปริมาณไลโคปีน (mg/kg fresh weight) เบต้าแคโรทีน (mg/kg fresh weight) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/kg fresh weight) สูงสุดเมื่อแตงโมเป็นสีแดงทั้งผล

2.2 รงควัตถุ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแตงโม

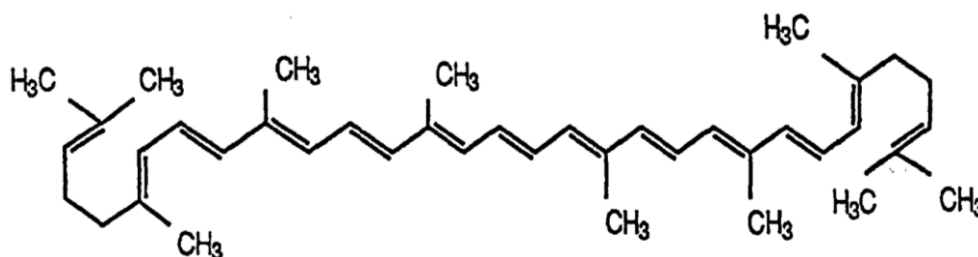
ไลโคปีน เป็นรงควัตถุให้สีแดงพบมากกว่า 85% ของรงควัตถุทั้งหมดในแตงโม สังเคราะห์ผ่าน carotenoid synthesis pathway ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) บริเวณคลอโรพลาสต์ในเซลล์พืช (Mi และคณะ, 2022) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การสังเคราะห์ไลโคปีนผ่าน carotenoid synthesis pathway ในเซลล์พืช
ที่มา: Quian-Ulloa และ Stange (2021)

ไลโคปีนเป็นสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดี และมีประสิทธิภาพสูง (Penelope Perkins-Veazie และคณะ, 2001) จัดอยู่ในกลุ่มกลุ่มแคโรทีนอยด์แบบไม่มีข้าว มีคุณสมบัติละลายได้ดีในน้ำมันหรือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่นเดียวกับเบต้าแคโรทีน มีโครงสร้างหลักคือไอโซพรีน ซึ่งเป็นไดอีน (diene) $[CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2]$ เรียงต่อกันจำนวน 8 หน่วย มีคาร์บอนในโมเลกุลจำนวน 40 อะตอม เป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรงปลายเปิดของสารประกอบโพลีแบบไม่มีอิมัลชัน มีพันธะคู่ที่ไม่คอนจูเกตจำนวน 2 คู่ และพันธะคู่ที่คอนจูเกตจำนวน 11 คู่ รวมทั้งหมด 13 คู่ มีไอออนบริเวณวงแหวน ทำให้ไลโคปีนต่างจากสารตัวอื่นในกลุ่ม

แคโรทีนอยด์ แต่ไม่มีออกซิเจนในโครงสร้าง สูตรทางเคมีของไลโคปีนคือ C₄₀ H₅₆ (naveen kumar และคณะ, 2017) โครงสร้างโมเลกุลของไลโคปีนแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลไลโคปีน
ที่มา: naveen kumar และคณะ (2017)

มวลโมเลกุล (Molecular Weight) ของไลโคปีน มีค่าเท่ากับ 536.888 g/mol จุดหลอมเหลว (Melting Point) มีค่าเท่ากับ 175 °C จุดเดือด (Boiling Point) มีค่าเท่ากับ 660 °C จุดติดไฟ (Flash Point) มีค่าเท่ากับ 350 °C และค่าการวัด (Gravity) มีค่าเท่ากับ 350.7 g/mol

บริเวณการเกิดกิจกรรมทางชีวภาพของไลโคปีนคือบริเวณพันธะคู่ในโครงสร้าง พบว่ามีพันธะคู่มากกว่าเบต้าแคโรทีนประมาณสองเท่า ทำให้ไลโคปีนได้รับความสนใจจากผู้เชี่ยวชาญทางการแพทย์เป็นพิเศษในการผลิตอาหารเสริมที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยเฉพาะการป้องกันมะเร็งเยื่อปิว (Heber และ Lu, 2002)

ไลโคปีนมีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมากกว่าเบต้าแคโรทีนประมาณ 2 เท่า และมากกว่าวิตามินอีประมาณ 10 เท่า มีส่วนช่วยให้เซลล์ผิวมีความแข็งแรงสามารถต้านทานรังสีจากแสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ต่อมลูกหมากทำงานได้ดีขึ้นและยับยั้งการเกิดมะเร็งต่อมลูกหมากโดยพิจารณาจากค่า PSA (Prostate Specific Antigen) ที่บ่งบอกระดับความเสี่ยงของโอกาสในการเป็นมะเร็งต่อมลูกหมาก

นอกจากนี้ไลโคปีนยังช่วยลดอัตราการเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ ลดความเสี่ยงจากการเกิดโรคหลอดเลือดอุดตัน และโรคหัวใจ สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันของไขมันบริเวณหลอดเลือดลดการอักเสบ และยังช่วยลด Low density lipoprotein (LDL) ซึ่งเป็นไขมันไม่ดีในร่างกาย และ

คอเลสเตอรอลในเลือด อีกทั้งยังส่งผลให้เม็ดเลือดขาวชนิด T-Lymphocyte ทำงานได้ดีขึ้น (naveen kumar และคณะ, 2017)

ไลโคปีนในผักและผลไม้สดจะอยู่ในรูปแบบทรานส์ (trans-isomers) เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปที่มีความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นซิส (cis-isomers) ซึ่งร่างกายสามารถดูดซึมได้ดีกว่า โดยปกติร่างกายไม่สามารถสร้างไลโคปีนได้เองแต่จะได้รับโดยการบริโภคผักและผลไม้เท่านั้น ปริมาณที่ควรได้รับไม่ควรเกิน 75 มิลลิกรัมต่อวัน หากรับประทานมากเกินไปจะมีอาการข้างเคียง เช่น คลื่นไส้ และอาเจียน เป็นต้น

กระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนสูง และมีกระบวนการต่อเนื่องเป็นเวลานานจะส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีน (Shi และคณะ, 2000)

นอกจากไลโคปีนยังพบสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันกลุ่มอื่นๆ เช่น สารประกอบฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินต่างๆ เช่น วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี และวิตามินอี และแร่ธาตุที่พบมักอยู่ในรูปของเกลือเช่น โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) และสังกะสี (Zn) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในแตงโม

ลำดับที่	องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ	อ้างอิง
1	น้ำ	91.45	USDA 2006
	คาร์โบไฮเดรต	7.55 g	
	ไฟเบอร์ทั้งหมด (total dietary fiber)	0.4 g	
	โปรตีน	0.6 g	
	ส่วนที่รับประทานได้ (คิดจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม)	100 g	
2	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SSC)	8.93-10.56 °Brix	Muhammad และคณะ (2020)
	ปริมาณความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.38	
	น้ำตาลฟรุกโตส	51.34-53.5 mg/g fresh weight	
	น้ำตาลซูโครส	22.79-26.75 mg/g fresh weight	
	น้ำตาลกลูโคส	14.43-17.47 mg/g fresh weight	

ตารางที่ 1 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในแตงโม

ลำดับที่	องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ	อ้างอิง
3	กรดอินทรีย์ (organic acid) ที่พบมากที่สุด คือ Malic acid	14.75-22.86 mg/g dry weight	Liu และคณะ (2012)
4	โพแทสเซียม (K)	126±2.36 mg/100 g	Naz และคณะ (2013)
	แคลเซียม (Ca)	5.60±0.21 mg/100 g	
	โซเดียม (Na)	0.81±0.03 mg/100 g	
	เหล็ก (Fe)	0.26±0.01 mg/100 g	
5	สังกะสี (Zn)	0.031±0.00 mg/100 g	Oko และคณะ (2013)
	โปรวิตามินเอ (Carotene)	15.73±0.17 µg/100 g	
	วิตามินบีหนึ่ง (Thiamine)	0.09±0.00 µg/100 g	
	วิตามินบีสอง (Riboflavin)	0.03±0.00 µg/100 g	
	วิตามินบีสาม (Niacin)	0.02±0.00 µg/100 g	
6	วิตามินซี (Ascorbic Acid)	9.39±0.59 µg/100 g	Naz และคณะ (2013)
	ไลโคปีน	4.53±0.05 mg/100 ml	
	ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด TPC (%)	23.63±1.09	
7	สารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%)	29.11±1.91	Tlili และคณะ (2011)
	ฟลาโวนอยด์	0.19-0.26 mg RE/g FW	

เนื้อแตงโมสีแดงอุดมไปด้วยไลโคปีน ในขณะที่สารประกอบฟีนอลิกและสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันพบมากบริเวณเนื้อสีขาวติดเปลือกของผลแตงโม (watermelon rind) โดยประเภทของสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากในเนื้อสีขาวติดเปลือกแตงโมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบได้ในเนื้อติดเปลือกแตงโม

สารประกอบฟีนอลิก	ปริมาณ (µg/g of extract)	อ้างอิง
Gallic acid	3.21–5.12	Mushtaq และคณะ (2014)
Quercetin	4.69–171.27	
Caffeic acid	18.01–135.42	
Vanillic acid	26.13–2317.01	
Myricetine	16.18–135.13 6	
Chlorogenic acid	115.60–1611.04	

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้ มีความสำคัญด้านสุขภาพอย่างมาก Oseni และคณะ (2013) ได้ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของแตงโมพบว่าในแตงโมสดมีไลโคปีน สารประกอบกลุ่มฟีนอลิก และสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นหลัก ซึ่งมีส่วนช่วยในการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง

ในอุตสาหกรรมยาของประเทศจีนนิยมนำแตงโมมาทำแห้ง บดเป็นผง ชงดื่มเป็นชาหรือ แปรรูปเป็นอาหารว่างเพื่อบำรุงสุขภาพ Edwards และคณะ (2003) ทดสอบผู้บริโภคนจำนวน 23 คน ที่มีช่วงอายุระหว่าง 36 – 69 ปี พบว่าผู้ทดสอบที่ดื่มน้ำแตงโมเสริมไลโคปีนนาน 3 สัปดาห์มีความเข้มข้นของพลาสมาในเม็ดเลือดเพิ่มมากขึ้น เมื่อทดสอบควบคู่กับการควบคุมอาหาร นอกจากนี้เซลล์เม็ดเลือดแดงในพลาสมามีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ป้องกันความเสียหายของเซลล์ที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยรบกวนได้เป็นอย่างดี

เนื้อสีขาวติดเปลือกของแตงโม (exocarp, thick rind) อุดมไปด้วยซิทรูลีน (citrulline) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีความสามารถในการกระตุ้นการทำงานของหัวใจ โดยเฉพาะในผู้หญิงวัยหมดประจำเดือน บุคคลที่มีภาวะอ้วน และมีโรคประจำอื่น ๆ ร่วม สังกเหตุจากปริมาณอาร์จินีนในพลาสมาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ซิทรูลีนยังช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางเพศทั้งในเพศหญิงและเพศชายอีกด้วย (Wong และคณะ, 2016)

2.3 การสลายตัวของไลโคปีน

ไลโคปีนเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การแช่เยือกแข็ง การลวก และการทำแห้ง โดยกระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้โปรตีนและเนื้อเยื่อที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืชเกิดการแตกตัวหรืออ่อนตัว ส่งผลให้สารประกอบเชิงซ้อนของแคโรทีนอยด์ที่ละลายยากเกิดการกระจายตัวโมเลกุลของไลโคปีนจึงสามารถหลุดออกมาจากเนื้อเยื่อพืชได้ง่ายขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณไลโคปีน

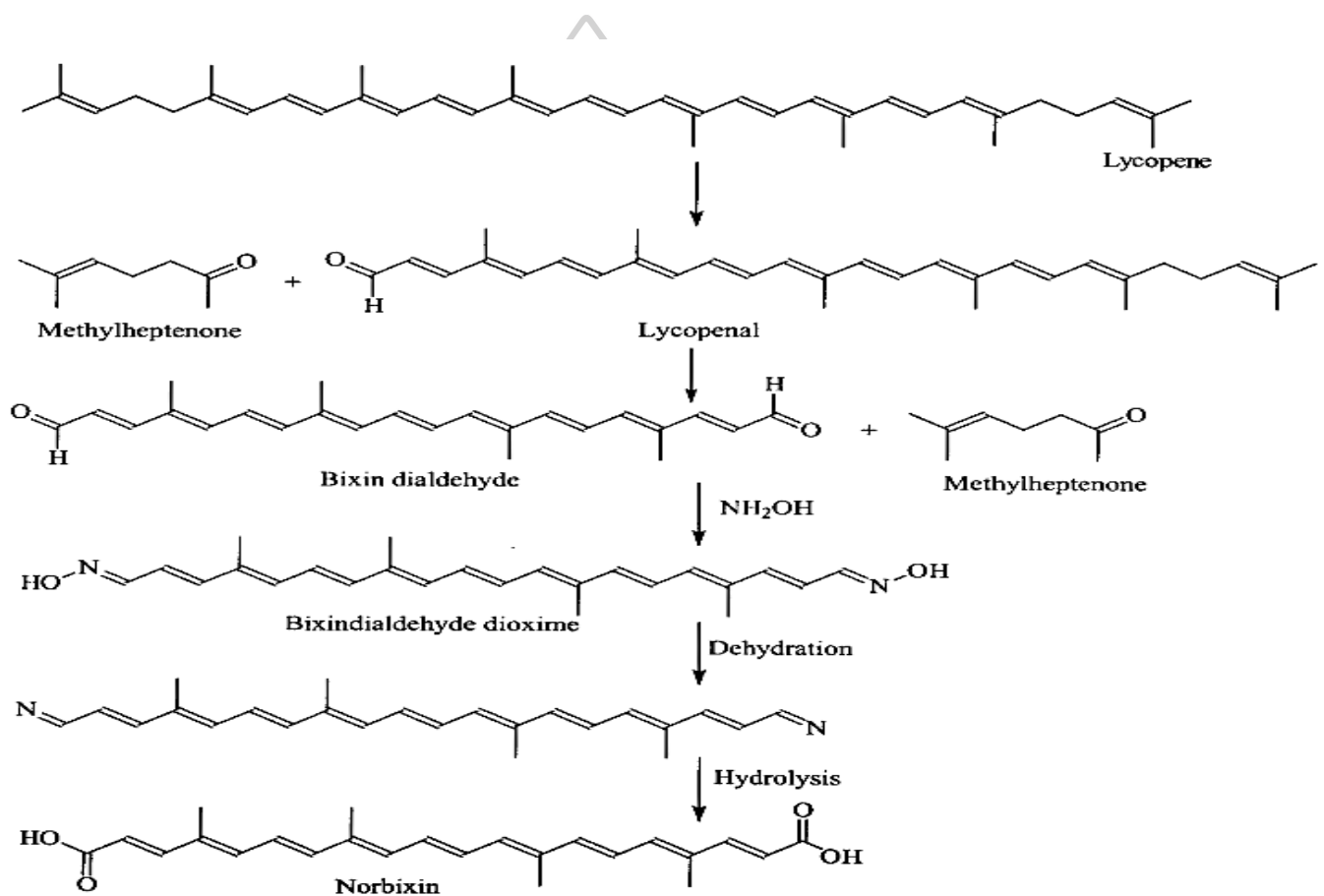
เมื่อไลโคปีนได้รับพลังงานจากปัจจัยรบกวนต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสง กรด ออกซิเจน หรือปัจจัยจากสภาพแวดล้อมเข้าสู่โมเลกุลเสถียรภาพของโครงสร้างจะลดลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างโมเลกุลจากทรานส์ (trans - isomer) ที่มีความเสถียรสูง แต่ร่างกายดูดซึมได้ยาก ไปเป็นซิส (cis - isomer) ที่มีความเสถียรต่ำแต่ร่างกายสามารถดูดซึมและนำไปใช้ได้ง่าย

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไลโคปีนระหว่างการแปรรูป และการเก็บรักษาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ปฏิกริยา ได้แก่ การเกิดไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) และการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) โดยทั้ง 2 ปฏิกริยาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างไลโคปีน ทำให้ความสามารถในการซึมเข้าสู่ร่างกาย คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไลโคปีนลดลง (Khoo และคณะ, 2011)

การเปลี่ยนรูปจาก Trans - isomer เป็น Cis - isomer ส่งผลให้ความเข้มข้นของสีลดลง เนื่องจากการดูดกลืนแสงของโครงสร้างเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้ความเป็นสีแดงของไลโคปีนลดลง และมีจุดหลอมเหลวต่ำลง ทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มสูงขึ้น ร่างกายจึงสามารถนำไปใช้ได้ง่ายกว่าในรูปแบบ trans - isomer

ปฏิกริยา isomerization มีเวลาและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักส่งผลให้เกิดการหักงอของโครงสร้างบริเวณพันธะคู่ลำดับที่ 7 เมื่อโครงสร้างได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะภายในโมเลกุลมีความเสถียรลดลง จึงเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนรูปนำไปสู่การสลายตัว เมื่อเกิด isomerization แล้วจะสามารถเกิดออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น การเกิด auto - oxidation จะพบมากระหว่างการเก็บรักษา เมื่อได้รับปัจจัยเร่งอย่างต่อเนื่องโครงสร้างจะเกิดการบิดตัวทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าใกล้กันพลังงานภายในจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียที่มากขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของโมเลกุลไลโคปีนมากที่สุด ได้แก่ ความร้อน แสง และออกซิเจน (Arocho และคณะ 2012)

Oberoi และคณะ (2017) ได้ศึกษาการสลายตัวของไลโคปีนในกากแตงโมที่ผ่านการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบด (fluidized-bed) และ เทคนิคคาบิเนต (cabinet dryer) ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 70 °C พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาในการทำแห้งนานและมีอัตราการไหลของอากาศที่หมุนเวียนภายในระบบมากจะเพิ่มอัตราการสลายตัวของไลโคปีน จากการทดลองสูญเสียปริมาณไลโคปีนระหว่างการทำแห้ง 19.02 – 60.57 % เมื่อเทียบกับตัวอย่างสด กระบวนการสลายตัวของไลโคปีนแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 วิธีการสลายตัวของไลโคปีน

ที่มา: Shi และคณะ (2000)

Sharma และคณะ (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของความร้อนต่อการลดลงของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ ในน้ำแตงโมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 50 ถึง 90 °C พบว่า ปริมาณไลโคปีนสลายตัวได้ง่ายที่สุดที่อุณหภูมิสูง น้ำแตงโมสดมีปริมาณไลโคปีน 4.403 mg/100 g และเหลือเพียง 0.82 mg/100 g หลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C โดยการลดลงของปริมาณไลโคปีนคือ 0.0874 - 0.2878 ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณไลโคปีนที่ลดลงสอดคล้องกับคุณภาพด้านสีที่ลดลงในน้ำแตงโมหลังผ่านการให้ความร้อน

Shi และคณะ (2000) กล่าวว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงต่างกัน ในระยะเวลาทำแห้งเท่ากัน ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณไลโคปีน 1.1 - 17.1% ในขณะที่การทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแต่ระยะเวลาในการทำแห้งต่างกัน การลดลงของปริมาณไลโคปีนมีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้ในการทำแห้งเช่นกัน

นอกจากนี้ออกซิเจนยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีน ในการทดลองที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนระหว่างการทำแห้งพบว่า หากในระบบมีปริมาณออกซิเจนมากกว่า 30% จะส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีนอย่างมากแม้ในระบบการทำแห้งจะมีอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่สภาวะการทำแห้งที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 5% พบการสลายตัวของไลโคปีนน้อยมาก

ปริมาณความเข้มแสงในการทำแห้งแสดงทิศทางเดียวกับออกซิเจนและความร้อน พบว่าเมื่อเพิ่มความสว่างในระบบโดยควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ พบว่าการสลายตัวของไลโคปีนมีค่าสูงขึ้นตามความสว่างที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นหากกระบวนการแปรรูปประกอบด้วย 3 ปัจจัยข้างต้นจะส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีนที่รวดเร็ว

การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับการใช้เทคนิคออสโมติกก่อนการทำแห้งสามารถรักษาปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์แห้ง เนื่องจากน้ำตาลในสารละลายช่วยลดการสัมผัสระหว่างออกซิเจนในอากาศและผิววัตถุ ทำให้ไลโคปีนในเมทริกซ์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ไม่สะดวก เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด ความร้อนทำให้เนื้อเยื่อวัตถุแตกตัว เพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิด isomerization โดยมีออกซิเจนภายในระบบเป็นตัวเร่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในสินค้าเชิงพาณิชย์ (Shi และคณะ, 1999)

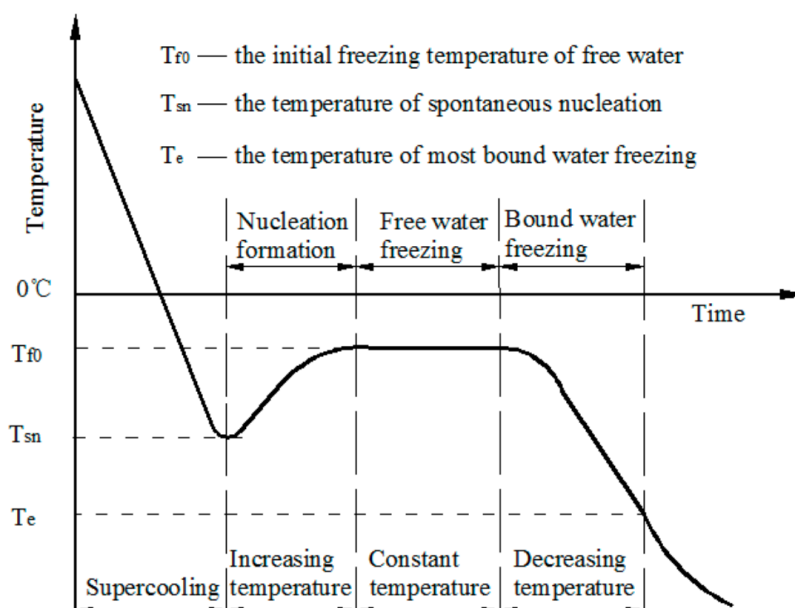
จากการทดลองของ Bhattacharjee และคณะ (2019) ได้ศึกษาคุณค่าทางสารอาหารในน้ำแตงโมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อ และน้ำแตงโมที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน พบว่าน้ำแตงโมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมีคุณค่าทางสารอาหารลดลง และส่งผลต่อลักษณะ

ทางประสาทสัมผัส เมื่อทดสอบโดยผู้บริโภครู้ผ่านการฝึกฝนพบว่า น้ำแต่งโมที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมีค่าการยอมรับสูงกว่าเมื่อเทียบกับน้ำแต่งโมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน

Ho และคณะ (2016) ศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในแต่งโมผง ที่ได้จากแต่งโม 2 สายพันธุ์ ได้แก่ แต่งโมเนื้อสีแดง และแต่งโมเนื้อสีเหลือง พบว่าวิธีการทำแห้งแบบเยือกแข็งสามารถรักษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในแต่งโมผงสีแดงได้ดีที่สุดตามด้วยตู้อบลมร้อนอบที่อุณหภูมิ 40 °C และ 60 °C ตามลำดับ ในขณะที่แต่งโมผงสีเหลืองพบว่าการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 °C และวิธีการทำแห้งแบบเยือกแข็ง เป็นวิธีการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพในการรักษาค่าทางโภชนาการของแต่งโมผงไว้ได้ดีที่สุด

2.4 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งนอกจากเป็นกระบวนการถนอมอาหาร ยังเป็นกระบวนการปรับสภาพขึ้นตัวอย่างก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงถึงจุดเยือกแข็ง ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิระหว่างผิวหน้าอาหารและอากาศเย็นภายในเครื่องแช่เยือกแข็งจะแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารจะมีค่าสูงกว่าอากาศเย็นภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอของน้ำที่บริเวณผิวหน้าอาหารและอากาศเย็นเหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นตัวอย่างไปยังอากาศ เมื่ออุณหภูมิ ณ จุดกลางของอาหารมีค่าต่ำลงน้ำจะเคลื่อนที่ได้ช้าลง การเรียงตัวของโมเลกุลมีความเป็นระเบียบมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง จะเกิดการก่อตัวของนิวเคลียสบริเวณผิวน้ำและขยายใหญ่ขึ้นเรียกว่านิวคลีไอ (Ming และคณะ, 2020) ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการแช่เยือกแข็งของน้ำ
ที่มา: Ming และคณะ (2020)

ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง กระบวนการแช่เยือกแข็งส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเรียงตัวเป็นเนื้อเดียวกันของเมทริกซ์ เพื่อให้ง่ายต่อการระเหิด อุณหภูมิที่นิยมใช้ในการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งคือ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือต่ำกว่า ขนาดของผลึกน้ำแข็ง และอัตราการแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง ส่งผลต่อคุณภาพของอาหารอย่างมาก เนื่องจากขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นสามารถทำลายเนื้อเยื่อของอาหารได้ ส่งผลโดยตรงต่อ ลักษณะทางกายภาพ การสูญเสียน้ำ (drip loss) ระหว่างการทำแห้ง และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์แห้ง (Reyes และคณะ, 2011)

Ketata และคณะ (2013) ได้ศึกษาการแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลวก่อนการแช่หิมะบลูเบอร์รี่ พบว่า การแช่เยือกแข็งช่วยลดระยะเวลาในการแพร์ลง เนื่องจากหิมะบลูเบอร์รี่ถูกทำให้บางลง เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กง่ายต่อการแพร์และสามารถรักษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารประกอบแอนโทไซยานินได้ใกล้เคียงบลูเบอร์รี่สด เมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งเร็วผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื้อเยื่อของอาหารจะถูกทำลายน้อย ส่งผลให้มีค่าการสูญเสียน้ำต่ำ และสามารถรักษาคุณภาพของอาหารได้ดี

การแช่เยือกแข็งแบบช้าอุณหภูมิที่ผิวหน้าอาหารจะลดลงอย่างช้าๆ การโตของผลึกน้ำแข็งจะค่อยๆ ก่อตัว ผลึกที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ ระหว่างการแช่เยือกแข็งเกิดการแลกเปลี่ยนความดันไอของน้ำ

ระหว่างผิวหน้าอาหาร และอากาศ นำไปสู่การสูญเสียน้ำระหว่างการแช่เยือกแข็ง ในรูปของการระเหิดของน้ำอิสระ (Free Liquid Water) ที่อยู่บริเวณผิวหน้าอาหาร (Superficial Water) อัตราการแช่เยือกแข็งต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งนาน การสูญเสียน้ำระหว่างการแช่เยือกแข็งอาจส่งผลต่อการสูญเสียสารประกอบทางชีวภาพบางชนิดที่ละลายได้ในน้ำ (Jiang และคณะ, 2005)

ในกรณีของสารละลายที่มีความเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นของการแช่เยือกแข็ง จะเริ่มเกิดผลึกของน้ำในอาหารส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของของเหลวที่ยังไม่แข็งตัว (Unfrozen) มีค่าต่ำกว่าปกติ โดยจุดเยือกแข็งของสารละลายที่มีความเข้มข้นจะลดลงจนถึงจุด Eutectic Point ของตัวถูกละลาย ทำให้เกิดผลึกของตัวถูกละลาย และผลึกน้ำแข็งขึ้น เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าต่ำลง (Sun, 2018)

การแช่เยือกแข็งในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การแช่เยือกแข็งโดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลาง การแช่เยือกแข็งแบบ plate และการแช่เยือกแข็งในของเหลว เป็นต้น การแช่เยือกแข็งโดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลาง สามารถแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบช้า และการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

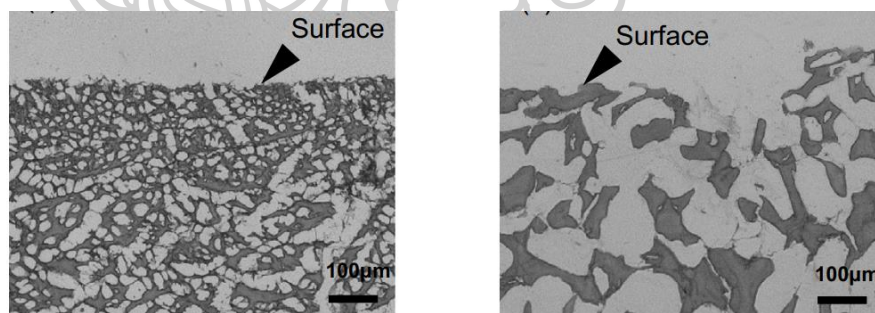
2.4.1 การแช่เยือกแข็งแบบช้า

Sharp Freezing หรือ Slow Freezing ขึ้นตัวอย่างถูกวางในห้องหรือตู้ที่มีอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -15°C ถึง -29°C อากาศภายในตู้ค่อนข้างนิ่ง เป็นตัวพาความร้อนที่ไม่ดี ตัวอย่างที่วางไว้ในอุณหภูมิต่ำเหล่านี้จะใช้เวลาในการแช่เยือกแข็ง ใช้เวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวันขึ้นกับเงื่อนไขการใช้งานและขนาดของผลิตภัณฑ์ อัตราการแช่เยือกแข็งเป็นตัวกำหนดขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งภายในผลิตภัณฑ์ ข้อเสียของการแช่เยือกแข็งแบบช้า คือผลึกน้ำแข็งเติบโตในตำแหน่งนอกเซลล์เกิดนิวเคลียสจำนวนน้อย เนื่องจากมีพลังงานในการดึงความร้อนออกไม่เพียงพอ การเติบโตของผลึกจึงมีมากกว่าการเกิดผลึกใหม่ ผลึกที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งจากการคายน้ำ เนื่องจากอัตราการแช่แข็งที่ช้ามีความผันผวนของอุณหภูมิมาก ขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นสร้างความเสียหายต่อผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้นน้ำภายในเซลล์จะแพร่ออกจากเซลล์ หรือที่เรียกว่ากระบวนการออสโมซิส ส่งผลให้เซลล์เกิดการหดตัว และมีขนาดเล็กลง คุณภาพของอาหารจึงลดลง เช่นการแช่แข็งด้วยตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -18°C เป็นต้น (Petzold และคณะ, 2009)

2.4.2 การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

Fast Freezing เป็นการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็ว โดยการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำโดยใช้เวลานั้น ระบบมักมีการไหลของอากาศที่รวดเร็วเพื่อรองรับการคายพลังงานความร้อนจากชิ้นตัวอย่าง ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก สม่าเสมอ กระจายตัวบริเวณภายใน และภายนอกเซลล์ ส่งผลให้เซลล์ไม่เกิดการหดตัว ซึ่งการเย็นจัดอย่างรวดเร็วจะทำให้คุณภาพอาหารเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อนำมาทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างของตัวอย่างแห้งจะมีสภาพใกล้เคียงกับตัวอย่างสดเช่น ระบบแอร์บลาสฟรีซซิ่ง (Air Blast Freezing) เป็นเทคนิคที่อาศัยการไหลเวียนที่รวดเร็วของอากาศเย็นช่วยให้การแช่แข็งสามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่รวดเร็วโดยผลิตภัณฑ์จะถูกวางลงบนถาดแบบหลวม ๆ ในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำและมีอากาศเย็นพัดผ่านผิวหน้าผลิตภัณฑ์ โดยอากาศจะถูกหมุนเวียนโดยพัดลมขนาดใหญ่ การแช่เยือกแข็งด้วยเทคนิคนี้ประหยัดเวลาในการแช่เยือกแข็ง และสามารถรองรับอาหารที่มีขนาดและรูปร่างได้หลากหลาย (Buonsanti และคณะ, 2008)

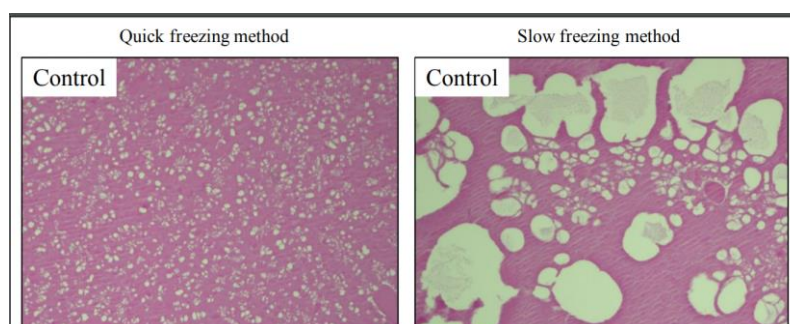
Kono และคณะ (2017) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแช่เยือกแข็ง ขนาดผลึกน้ำแข็ง และสีของเนื้อปลาแซลมอน พบว่าผลึกน้ำแข็งจากการแช่เยือกแข็งที่ -18°C ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ทำลายเนื้อเยื่อของปลาแซลมอน ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถรักษาสีของแซลมอนไว้ได้ดีกว่าและเกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อน้อย ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ภาพตัดขวางของผลึกน้ำแข็งรอบๆ ผิวปลาแซลมอนแช่แข็ง ด้านขวาคือการแช่เยือกแข็งแบบช้า และด้านซ้ายคือการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: Kono และคณะ (2017)

เช่นเดียวกับ Jia และคณะ (2018) พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของโครงสร้างไขมันฝรั่งจากอิทธิพลของขนาดผลึกน้ำแข็งดังแสดงในภาพที่ 9 นอกจากนี้การแช่เยือกแข็งแบบช้ายังส่งผลด้านลบต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น การเกิดเจลลาตินไนซ์ ในไขมันฝรั่ง




ภาพที่ 9 ภาพตัดขวางของผลึกน้ำแข็งในไขมันฝรั่งหวานที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และแบบเร็ว

2.4.3 การศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็งขึ้นตัวอย่างก่อนการทำแห้งต่อคุณภาพของแห้ง

พบว่า การแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำสามารถรักษาโครงสร้างของตัวอย่างแห้งได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการทำแห้ง และสามารถรักษาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่นได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 3

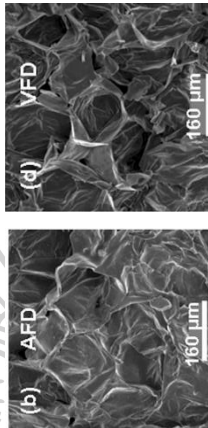


ตารางที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแช่เยือกแข็งก่อนการอบแห้ง ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

ตัวอย่าง	สภาวะแช่แข็ง	วิธีการทำแห้ง	ผลการทดลอง	อ้างอิง
แครอท	-ไม่แช่แข็ง -แช่แข็งที่ - 40°C นาน 10 ชั่วโมง (hot-air fluidized bed)	ฟลูอิดไดซ์เบด	การแช่แข็งก่อนการทำแห้งช่วยรักษารูปร่างของแครอทได้ดีเมื่อเทียบกับแครอทที่ไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็ง	Tatemoto และคณะ (2015)
				
			จากภาพแสดงแครอทสด แครอทที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้ง และแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้ง	
แครอท	-แช่แข็งที่ - 18°C นาน 15 ชั่วโมง -แช่ไนโตรเจนเหลว ที่ -196°C นาน 15 นาที	-การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	สภาวะแช่แข็งที่ T = - 18°C ลดอัตราการหดตัวของตัวอย่างในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ เมื่อเทียบกับ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	Reyes และคณะ (2010)

ตารางที่ 3 (ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแช่เยือกแข็งก่อนการอบแห้ง ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

ตัวอย่าง	สภาวะแช่แข็ง	วิธีการทำแห้ง	ผลการทดลอง	อ้างอิง
ฟักทอง	-แช่แข็งที่ - 18°C นาน 24 ชั่วโมง	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	สภาวะแช่แข็งที่ T = - 70°C เพิ่มอัตราเร็วในการทำแห้ง แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ด้านสี	Ciurzyn ' ska และคณะ (2014)
แอปเปิล	-แช่แข็งที่ - 18°C นาน 15 ชั่วโมง	-การทำแห้งแบบ AFD	-การแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลวส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แช่แข็งมีขนาดเล็กลงช่วยระบายน้ำได้ดี	Reyes และคณะ (2011)
	-แช่ไนโตรเจนเหลว นาน 15 นาที	-การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	-การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ให้โครงสร้างที่มีรูพรุนมากกว่า	
			-AFD รักษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่ต่างกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	
เบอร์รี่	-แช่แข็งที่ - 18°C นาน 15 ชั่วโมง	-การทำแห้งแบบ AFD	การแช่แข็งโดยไนโตรเจนเหลวมีความสามารถรักษา	Reyes และคณะ (2010)
	-แช่ไนโตรเจนเหลว 15 นาที	-การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	ความสามารถในการต้านออกซิเดชันในเบอร์รี่ได้ดีที่สุดในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ ในขณะที่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง สามารถรักษาสารประกอบฟีนอลิกไว้ได้มากที่สุด	

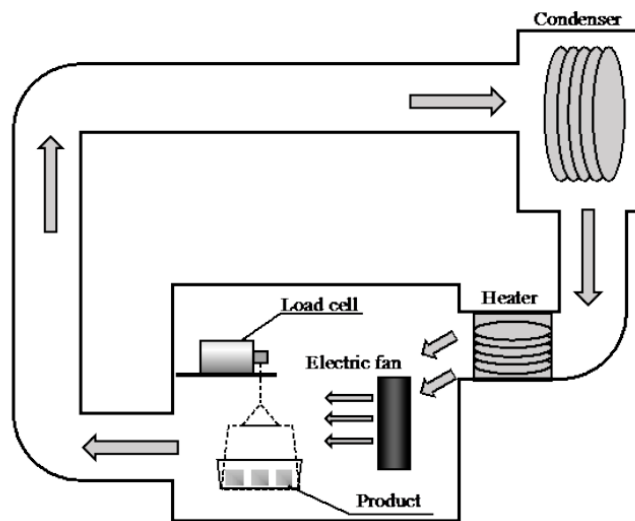


2.5 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศ หรือ AFD

2.5.1 หลักการการทำแห้งแบบ AFD

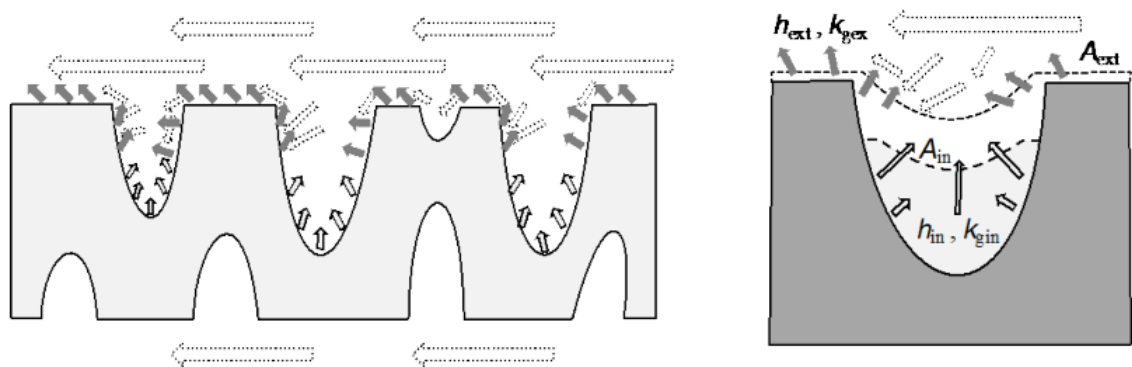
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ หรือ AFD อาศัยกลไกการระเหิด และการกลายเป็นไอในการทำแห้ง จากความแตกต่างของแรงดันไอของน้ำระหว่างเขตเยือกแข็งในตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำ และอากาศเย็นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อนขณะการทำแห้ง (Ryes และคณะ, 2011)

การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ความชื้นในอากาศจะต้องมีค่าต่ำมากพอเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการทำแห้ง คอนเดนเซอร์ทำหน้าที่ดึงความชื้นในอากาศที่เข้ามาออก โดยการเปลี่ยนน้ำในอากาศที่เข้ามาจากสถานะก๊าซเป็นสถานะของแข็งโดยเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิด desublimation คอนเดนเซอร์จึงเป็นต้องมีอุณหภูมิต่ำมา จากนั้นอากาศแห้งและเย็นจะไหลเข้าสู่บ่มให้ความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการ อากาศที่ไหลเข้าห้องทำแห้งควรมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ในการทำแห้งแบบ AFD เครื่องอบแห้งประกอบด้วยคอนเดนเซอร์และอุปกรณ์ทำความร้อนดังแสดงในภาพที่ 10 โดยอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์จะถูกตั้งไว้ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิในระบบเสมอ และอุณหภูมิของอากาศควบคุมโดยเครื่องทำความร้อน อัตราการไหลในห้องอบแห้งถูกควบคุมโดยพัดลมไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าข้อดีของวิธีการทำแห้งแบบ AFD คือการใช้ฮีทปั๊มในการปรับอุณหภูมิ ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับบ่มสุญญากาศในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน และมีอัตราเร็วในการทำแห้งต่ำเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่น (Horie และคณะ, 2018)



ภาพที่ 10 ระบบพื้นฐานของอบแห้งแบบแขยือกึ่งภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ หรือ AFD
ที่มา: Horie และคณะ (2018)

การทำแห้งด้วยวิธี AFD ตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งด้วยอากาศแห้งเย็นที่หมุนเวียนผ่านผิวหน้า
ชั้นอาหาร เหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทมวล โดยผลึกของน้ำแข็งที่กระจายตัวอยู่ในชั้นตัวอย่างจะถูก
กำจัดออกด้วยการระเหิด ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ลักษณะการสัมผัสและแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างชั้นตัวอย่างอาหารกับอากาศเย็น
ระหว่างการทำแห้งแบบแขยือกึ่งภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ หรือ AFD

ที่มา : Horie และคณะ (2018)

2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการทำแห้งด้วย AFD

2.5.2.1. การกระจายตัวของผลึกน้ำแข็งในเมทริกซ์ของชิ้นอาหาร

กระบวนการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อขนาดและความหนาของรูพรุนที่เกิดขึ้น และช่วยสร้างสมดุลให้กับของเหลวและของแข็งในตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) เพื่อต่อต้านการระเหิด หรือช่วยเตรียมความพร้อมของชิ้นตัวอย่างในการวิเคราะห์หัตถิพลของการทำแห้งอันเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ และส่งผลต่ออัตราการทำแห้ง เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ - 18 °C เทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็งพบว่าแครอทหลังการทำแห้งมีรูปร่างดีกว่า การหดตัวเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง โครงสร้างของแครอทที่ได้จากการทำแห้งด้วย AFD มีลักษณะใกล้เคียงกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศเนื่องจากโครงสร้างของแครอทมีเซลลูโลส และไฟเบอร์ที่แข็งแรงสามารถลดการยุบตัวของชิ้นตัวอย่างได้ มีปริมาณน้ำตาลที่น้อยมากส่งผลให้มีหัตถิพลของการหดตัวเนื่องจากความเข้มข้นของของสารละลายที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งน้อย (Reyes และคณะ, 2010)

2.5.2.2 อุณหภูมิของชิ้นอาหาร และอุณหภูมิของอากาศในระบบ

อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทำแห้งแบบ AFD มักจะอยู่ในช่วงประมาณ - 10 ถึง 0 °C หรือต่ำกว่านั้น อุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งควรมีค่าแตกต่างกับอุณหภูมิของอากาศ เพื่อให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ ความดันไอนี้มีค่าสูงเมื่อความชื้นสูง และลดลงเมื่อความชื้นต่ำ Nakagawa และคณะ (2020) พบว่าเมื่อทำแห้งชิ้นแอปเปิลด้วย AFD พบว่าความดันไอสมบูรณ์ของชิ้นแอปเปิลมีค่าต่ำลง เพราะน้ำในชิ้นแอปเปิลลดลง และน้ำบางส่วนที่โครงสร้างเชื่อมกับโมเลกุลน้ำตาล หรือ กรด มีแรงยึดเหนี่ยวสูง ส่งผลให้ต้องใช้แรงที่มากกว่าปกติในการแพร่ออกมา ความดันไอนี้มีค่าต่ำลงส่งผลให้เวลาในการทำแห้งนานขึ้น หากอุณหภูมิในระบบไม่เหมาะสมอาจทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น

Xu และคณะ (2015) ได้ศึกษาสภาวะในการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างกันในการทำแห้งกระเทียมสไลด์ด้วยวิธี AFD ทั้งหมด 3 สภาวะ ได้แก่ ที่อุณหภูมิ - 5 °C ตลอดการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ -10 °C ตลอดการทำแห้ง และโปรแกรมควบคุมการเปลี่ยนอุณหภูมิอัตโนมัติ จำนวน 4 step คือ Step ที่ 1 อุณหภูมิ - 5 °C ในชั่วโมงที่ 0 - 8, Step ที่ 2 อุณหภูมิ - 10 °C ในชั่วโมงที่ 8 - 12, Step ที่ 3 อุณหภูมิ - 15 °C ในชั่วโมงที่ 12 - 20 และ Step ที่ 4 อุณหภูมิ 40 °C ในชั่วโมงที่ 20-26 พบว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิอัตโนมัติระหว่างการทำแห้งใช้เวลาการทำแห้ง และใช้พลังงานต่ำที่สุด

โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านสีของชิ้นกระเทียมสไลด์และมีคุณภาพด้านสี และโครงสร้างใกล้เคียงกับกระเทียมสไลด์ที่ผ่านการทำให้แห้งแบบ FD ในขณะที่ การควบคุมอุณหภูมิที่ -5°C และ -10°C ตลอดการทำให้แห้งเกิดการละลายของตัวอย่างระหว่างการทำให้แห้ง ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นกระเทียมสไลด์ เช่นเดียวกับ Duan และคณะ (2013) พบว่าเมื่อเทียบอุณหภูมิในการทำให้แห้งที่แตกต่างกัน ในการทำให้แห้งชิ้นแอปเปิล พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอัตโนมัติระหว่างการทำให้แห้งแบบ AFD สามารถลดเวลาในการทำให้แห้งลง 8 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับ การทำให้แห้งที่ -5 และ -10°C ตลอดการทำให้แห้ง โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของชิ้นแอปเปิล และมีคุณภาพด้านต่างๆ เช่น โครงสร้าง ค่าสี และเนื้อสัมผัสไม่ต่างจากการทำให้แห้งที่ 10°C ตลอดการทำให้แห้ง

2.5.2.3 ความเร็วลมระหว่างการทำให้แห้ง

อัตราการไหลของลมที่เหมาะสม จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำให้แห้งมากขึ้น เนื่องจากอากาศแห้งจะมีความสามารถรับความชื้นจากชิ้นตัวอย่างได้ดี อัตราการไหลต่อพื้นผิว 1 รอบที่ต่างกัน จะสามารถรองรับความชื้นได้ต่างกัน ขึ้นกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วย เมื่ออัตราไหลพอเหมาะกับการทำให้แห้งนั้นๆ จะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดน้ำ โดยทั่วไปอัตราการไหลของลมที่นิยมใช้คือ 0.1 - 0.5 เมตรต่อวินาที Bantle และคณะ (2011) ศึกษาพฤติกรรมการทำให้แห้งในผลไม้เพื่อประยุกต์ใช้กับสมการการทำให้แห้งด้วยเทคนิค AFD ในแอปเปิล ลูกแพร์ และสับปะรดเปรียบเทียบที่อัตราเร็วของลมต่างกันพบว่า อัตราการเร็วของลมในระบบส่งผลต่อระยะเวลาในการทำให้แห้ง เมื่อเทียบอัตราเร็วของลมที่ 0.1, 0.2 และ 0.3 เมตรต่อวินาที โดยอัตราเร็วของลมที่ 0.1 เมตรต่อวินาที สามารถพาไอน้ำจากชิ้นตัวอย่างไปได้มาก เมื่อเทียบกับอัตราเร็วที่ 0.2 เมตรต่อวินาทีกลับใช้เวลาในการทำให้แห้งลูกแพร์เพิ่มขึ้นจาก 3 ชั่วโมงเป็น 24 ชั่วโมงแสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วการไหลของอากาศไม่ได้เป็นตัวกำหนดอัตราการทำให้แห้ง แต่ขึ้นกับความสามารถในการอุ้มน้ำของอากาศที่ไหลผ่านผิวหน้าชิ้นตัวอย่างในอัตราเร็วที่เหมาะสม

2.5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำให้แห้งด้วยเทคนิค AFD

อัตราการทำให้แห้งแบบ AFD มีค่าข้ามากเมื่อเทียบกับการทำให้แห้งด้วยวิธีอื่น ซึ่งเป็นไปได้ยากในเชิงอุตสาหกรรมที่จะนำมาใช้ในการผลิตสินค้าปริมาณมาก แต่มีการพัฒนาจนมีความเป็นไปได้ ในปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมที่ประเทศฮังการีซึ่งเป็นโรงงานแห่งแรกที่มีการใช้เทคโนโลยี AFD ในการทำให้แห้งระดับอุตสาหกรรม (Bantle และคณะ, 2013) และมีความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีสำหรับการทำให้แห้งเพิ่มมากขึ้น ในกระบวนการทำให้แห้งตัวอย่างจะถูกวางเรียงแบบชั้นเดียว ในการ

อธิบายจลนพลศาสตร์การทำแห้งในปัจจุบัน สมการที่ใช้มีความหลากหลายมาก ขึ้นกับเงื่อนไขในการทำแห้ง แต่มีจำนวนน้อยที่สามารถนำมาใช้กับ AFD ได้จริง

Bantle และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้สมการของ Weibull ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งด้วยแบบ AFD ในถั่วลันเตา แอปเปิล สับปะรด ปลายคอต และแพลงค์ตอนจากสัตว์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 5 อุณหภูมิ ได้แก่ -6°C , -3°C , 0°C , 10°C และ 20°C และความเร็วแตกต่างกันที่ 1, 1.8, 2.6, 3.1, และ 4.7 เมตร/วินาที ขนาดตัวอย่าง 8.7, 15.7, และ 28.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยวิธี AFD ในระบบใช้พัดลมเป็นตัวขับเคลื่อนอากาศภายในห้องทำแห้ง การทำแห้งแบ่งเป็น Step แบบต่อเนื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบออนไลน์อัตโนมัติ ในกระบวนการทำแห้งน้ำหนักจะค่อยๆ ลดลงในแต่ละ Step ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบ จากสมการ non-linear พบว่าการทำแห้งแบบ AFD ถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทมวลภายใน (internal mass transfer) โดยอัตราการแพร่ขึ้นกับชนิดวัตถุดิบ และเงื่อนไขการทำแห้ง สมการของ Weibull สามารถอธิบายได้ว่า การทำแห้งด้วย AFD ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ขนาดชิ้นตัวอย่าง และอุณหภูมิของลมที่เข้ามาในห้องทำแห้ง ในขณะที่อัตราเร็วของลมมีผลน้อยมากต่อพฤติกรรมการทำแห้ง เมื่อพิจารณาค่า R^2 (ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายหรือตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง) พบว่ามีค่าสูง และค่า X^2 (ค่าความแปรปรวน) มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงสามารถใช้ทฤษฎีนี้ในการอธิบายการทำแห้งแบบ AFD ได้

Reyes และคณะ (2010) เปรียบเทียบสภาวะเงื่อนไขในการทำแห้งด้วยเทคนิค AFD ที่ต่างกันในการทำแห้ง Murtilla หรือเบอร์รี่พื้นเมืองในแถบประเทศจีน โดยแบ่งการทำแห้งออกเป็น 2 step ได้แก่ การระเหิดและการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า อุณหภูมิของลมที่ใช้ในระบบที่ต่างกัน มีผลต่อการแพร่ของความชื้น และพฤติกรรมการทำแห้ง ในช่วงที่ 1 ชั่วโมงการทำแห้งที่ 1 ถึง 7 ใช้สมการที่อ้างอิงจากรูปแบบของผิวน้ำที่เป็นน้ำแข็ง (retreating ice front model) หรือสมการในการระเหิดอธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง ในขณะที่การทำแห้งในช่วงที่ 2 เริ่มหลังการทำแห้งในชั่วโมงที่ 7 สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของ Page มีตัวแปรที่สำคัญได้แก่ค่า n และค่า k โดยที่ค่า n คือค่าคงที่จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล และค่า k คืออัตราการทำแห้ง

2.5.4 โครงสร้างของตัวอย่างระหว่างการทำแห้ง

การทำแห้งผลไม้ด้วยวิธี AFD พบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหนา การทำแห้งอาจต้องคำนึงถึงการหดตัวของโครงสร้าง เกิดการซ้อนทับของเนื้อเยื่อ ระหว่างการทำแห้ง จาก การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง นอกจากนี้การหดตัวจากการทำแห้งอาจส่งผลต่อความเหนียวเหนอะ ของตัวอย่างแห้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในผลไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุดิบทางการเกษตร Eikevik และคณะ (2012) พบว่าเมื่อทำแห้งลูกแพร์เขียวด้วย AFD เกิดการหดตัวของตัวอย่างเนื่องจากการเป็นการทำแห้งที่สูงกว่า T_g ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการยุบตัวเพื่อให้เกิด การแพร่ของน้ำได้ดีระหว่างการทำแห้ง

2.5.5 การศึกษาเทคนิคการทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากงานวิจัยพบว่า การทำแห้งด้วยเทคนิค AFD สามารถรักษาคุณภาพที่สำคัญของวัตถุดิบได้ใกล้เคียงกับการทำแห้งแบบแช่เยือกในสภาวะสุญญากาศ เมื่อเปรียบเทียบการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ พบว่าอุณหภูมิและเทคนิคการทำแห้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของ คุณภาพทางกายภาพและเคมี

Barroca และคณะ (2006) ได้ศึกษาการทำแห้งลูกแพร์สไลด์ ด้วยการตากแดด และการอบด้วยความร้อนพบว่า โครงสร้างของลูกแพร์มีความเป็นรูพรุนค่อนข้างต่ำในการทำแห้งโดยการตากแดด ในขณะที่พบการหดตัวของชิ้นแพร์อย่างมากในการทำแห้งที่ให้ความร้อนสูง เช่นเดียวกับ Moreira และคณะ (2000) ได้ศึกษาผลของเทคนิคการทำแห้งต่อคุณภาพของแอปเปิลอบแห้ง ได้แก่ การทำแห้งด้วยลมร้อน เปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศ พบว่า ระหว่างการทำแห้งชิ้นแอปเปิลที่อุณหภูมิสูง มีการหดตัวอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นแอปเปิลสด และมีความเหนียวเพิ่มขึ้นระหว่างการทำแห้งจากการสูญเสียน้ำที่รวดเร็วระหว่างการทำแห้ง

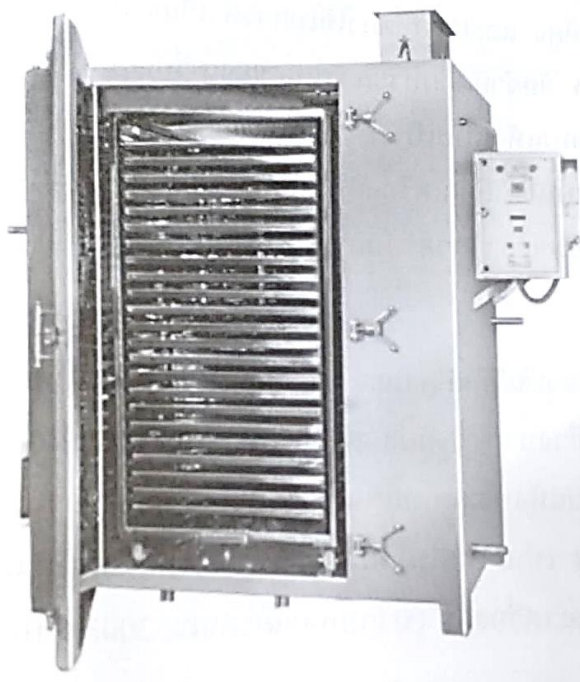
การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอาหารหลังการทำแห้งมีทั้งการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นที่ต้องการและ ไม่ต้องการ เช่นปฏิกิริยาการเปลี่ยนสี หรือเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในอาหาร เป็นต้น สภาวะในการอบแห้งที่แตกต่างกันส่งผลต่อตัวอย่างที่มีฤทธิ์ในการรักษาในพืชหรือสมุนไพรหลายชนิด ปริมาณยาที่ ต้องการอาจแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง เมื่อสภาวะในการทำแห้งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่งผล ต่อคุณลักษณะหรือฤทธิ์ทางชีวภาพที่ต้องการ

Nakilcioğlu Taş และคณะ (2021) ได้ออกแบบเตาแห้งด้วยตู้อบลมร้อน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อคุณภาพของแตงโมอบแห้ง โดยทำแห้งที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 °C พิจารณาคุณภาพ 2 แบบ ได้แก่คุณภาพทางกายภาพคือค่าสี เน้นพิจารณาจากค่า a^* และดัชนีการเกิดสีน้ำตาล คุณภาพทางเคมีได้แก่ ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของเพอริก ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด กรดแอสคอร์บิก น้ำตาลทั้งหมด ไกลโคปีน และแคโรทีนอยด์ทั้งหมด พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งแตงโมแห้งอยู่ในช่วง 65 – 70 °C สำหรับการผลิตแตงโมอบแห้งเพื่อจำหน่าย เมื่อทำแห้งแตงโมที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 °C พบว่าอัตราการลดลงของไกลโคปีนมีค่าสูงขึ้น และดัชนีการเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นจากปฏิกิริยา non – enzymatic browning ที่เกิดขึ้นขณะให้ความร้อน เช่นเดียวกับ Lee Hoon และคณะ (2016) พบว่าเมื่อทำแห้งแตงโมด้วยตู้อบลมร้อนเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาค่าทางโภชนาการในแตงโมสีแดงอบแห้งได้ดีที่สุด ตามด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิสูงเหมาะสำหรับการทำแห้งแตงโมที่มีเนื้อสีเหลืองมากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง Ho และคณะ (2018) พบว่าในการทำแห้งเปลือกแตงโมสำหรับแปรรูปเป็นแป้ง โดยเทียบการทำแห้ง 2 วิธีได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาลักษณะทางกายภาพเช่น สี ลักษณะปรากฏ รวมถึงคุณภาพทางเคมีในเปลือกแตงโม ได้มากกว่าการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อน เป็นต้น ดังนั้นวิธีการทำแห้ง จึงมีอิทธิพลอย่างมากในการทำแห้งอาหาร

2.5.5.1 การทำแห้งที่อุณหภูมิสูง

นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเป็นตู้สูงภายในจัดเรียงเป็นชั้นสำหรับบรรจุอาหารที่ต้องการอบแห้ง ผนังด้านในบุด้วยฉนวน ในแต่ละถาดจะบรรจุอาหารขึ้นบางๆ ขนาด 2 - 6 เซนติเมตร อากาศร้อนจะไหลหมุนเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5 - 5 เมตร/วินาที มีระบบท่อ เพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดเพื่อให้ลมร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดในการผลิตอาหารในปริมาณสูง (1 - 20 ตัน/วัน) หรือสำหรับใช้ในโรงงาน ดังแสดงในภาพที่ 12 ภายในตู้อบจะมีการติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนอากาศร้อนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางการอบแห้ง เพื่อให้วัตถุดิบได้รับพลังงานความร้อนอย่างทั่วถึง การหมุนเวียนอากาศในตู้อบแห้งคือหลักการสำคัญของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ จุดเด่นของเครื่องอบแห้งแบบถาดคือสามารถอบแห้งวัสดุ

ได้หลากหลายชนิด สามารถใช้ได้ทั้งกับวัสดุที่ต้องใช้เวลานาน หรือใช้เวลาสั้น สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานได้ง่าย อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งแบบถาดก็มีข้อเสียในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูง และเวลาที่ต้องใช้ในการลำเลียงวัตถุดิบเข้า และออกจากเครื่องอบแห้ง

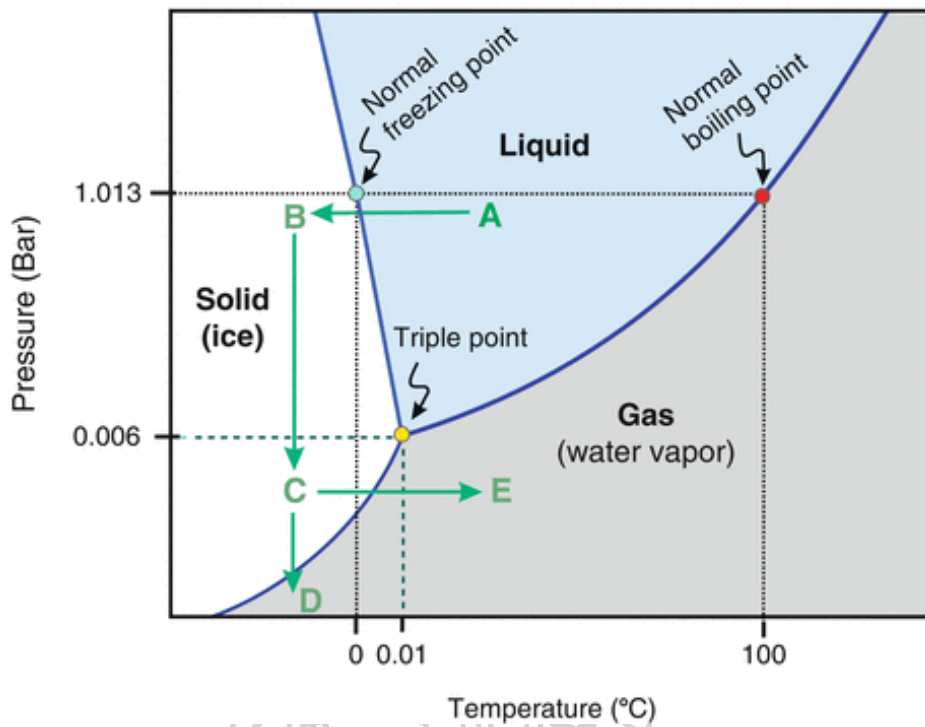


ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งแบบถาด

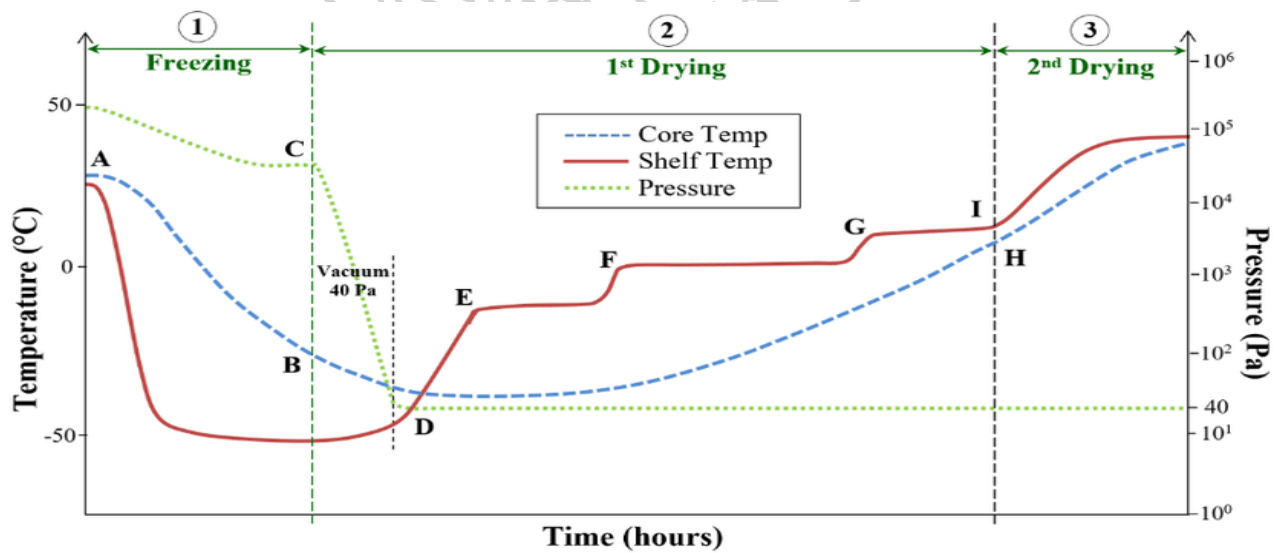
ที่มา: <http://www.chitamachineries.com>

2.5.5.2 การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมยา และอาหาร ที่ต้องการรักษาสมบัติทางยา กลิ่นรส หรือสารที่สามารถเสื่อมสลายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง แต่เทคนิคนี้ไม่เหมาะกับอาหารที่มีไขมันสูง การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเริ่มจากการนำวัสดุไปผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง (Freezing) จนกระทั่งวัสดุมีอุณหภูมิต่ำกว่า -30°C หรือต่ำกว่านั้น จากนั้นนำไปใส่เครื่องทำแห้ง กระบวนการทำแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ การอบแห้งขั้นปฐมภูมิ และการอบแห้งขั้นทุติยภูมิ โดยอาศัยอุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศที่ต่ำกว่า triple point ของน้ำ หรือของเหลวอื่นที่ต้องการขจัดออกจากวัตถุดิบเพื่อให้เกิดการระเหิด (Sublimation) ของน้ำแข็งกลายเป็นไอ ดังแสดงในภาพที่ 13 และภาพที่ 14



ภาพที่ 13 เส้นทางการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งตามสมมุติฐานที่วางทับบนแผนภาพเฟสของน้ำ
ที่มา: Keskinetepe และคณะ (2015)



ภาพที่ 14 กระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
ที่มา: Mawilai และคณะ (2019)

จากภาพจะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก (Freezing Stage) เป็นการแช่เยือกแข็งวัตถุดิบให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C โดยทั่วไปแล้วไม่นิยมแช่เยือกแข็งวัตถุดิบอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มในไนโตรเจนเหลว เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก ทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการระเหิดน้ำแข็งออกมีขนาดเล็กตามไปด้วย ส่งผลให้อัตราการอบแห้งต่ำ และต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานเนื่องจากความซับซ้อนของระยะทางในการเคลื่อนที่ของน้ำในชิ้นตัวอย่าง

ขั้นตอนที่สองของกระบวนการอบแห้ง คือขั้นตอนการอบแห้งขั้นปฐมภูมิ (Primary Drying Stage) เป็นการระเหิดเอาน้ำแข็งอิสระ (Free Ice) ในอาหารออก ลำดับการระเหิดจะเกิดบริเวณผิวหน้าอาหารเป็นลำดับแรก จากนั้นน้ำในชิ้นอาหารจะค่อยๆ เคลื่อนที่และระเหิดผ่านรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยการลดอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ เกิดการสูญเสียน้ำในรูปของก๊าซ ข้อควรระวังในกระบวนการคือควรควบคุมไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุดิบเร็วเกินไปเพราะอาจทำให้เกิดการละลายหรือเสียสภาพ (Collapse) ของวัตถุดิบได้ สำหรับขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือขั้นตอนการอบแห้งแบบทุติยภูมิ (Secondary Drying Stage) เป็นการขจัดความชื้นที่ยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลขององค์ประกอบอื่นๆ ออกจากวัตถุดิบด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นแต่ยังอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้ความชื้นของวัตถุดิบเคลื่อนที่ออกไปในรูปของไอ ดังนั้นโครงสร้างของวัตถุดิบจึงเกิดการเสียหายจากผลของแรงตึงผิว (Surface Tension Force) ของของเหลวขณะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างน้อยมาก (Mawilai และคณะ, 2019)

ทั้งนี้แรงตึงผิวของไอน้ำมีค่าต่ำกว่าแรงตึงผิวของของเหลวมากด้วยเหตุนี้ วัสดุที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงมีโครงสร้างที่มีความพรุน (Porosity) สูง สามารถดูดน้ำกลับได้รวดเร็ว เทคนิคนี้อาศัยอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่ต่ำกว่าจุดร่วมสามของของเหลวจึงเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน และมีหลายขั้นตอน ส่งผลให้การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน (สั๊กมน, 2555)

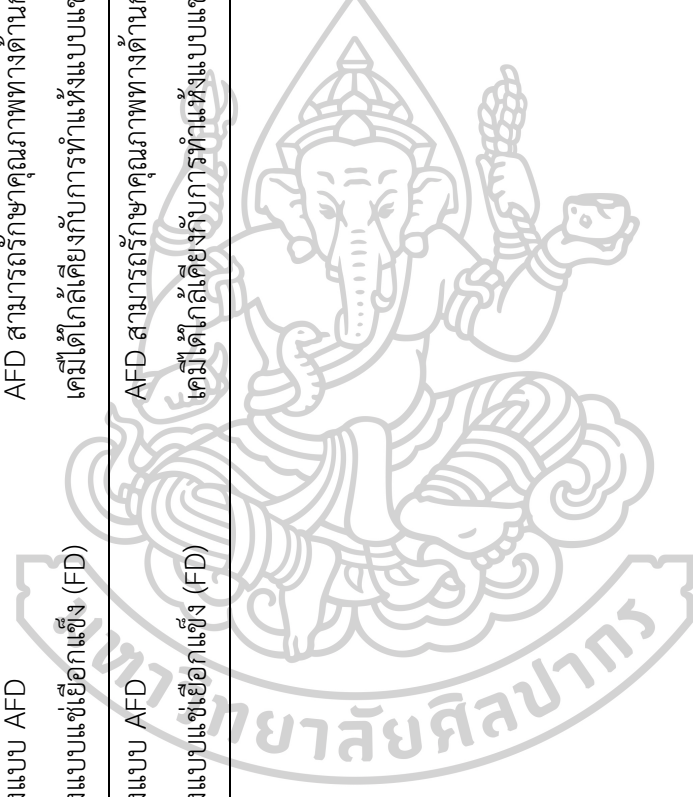
อิทธิพลของการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำส่งผลต่อคุณภาพด้านต่างๆ และมีต้นทุนด้านพลังงานที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อธิพลของการทำแห้งต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร

ตัวอย่าง	เทคนิคการทำแห้ง	ผลการทดลอง	รายการอ้างอิง
เห็ด	-การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	การทำแห้งแบบ AFD สามารถรักษาพารามิเตอร์ค่าสี เช่น Total color difference (ΔE^*) เทียบกับตัวอย่างสด ค่า browning index และ Chroma (C*) ได้ดีไม่ต่างจากการทำแห้งแบบ FD ที่ระดับความชื้น 95%	Carrión และคณะ (2018)
กระเทียมสไลด์	-การอบแห้งแบบถาด (Tray drying) -การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	การทำแห้งแบบ AFD สามารถรักษาปริมาณ allicin ในกระเทียมได้ไม่แตกต่างจากการทำแห้งแบบ FD ที่ระดับความชื้น 95%	Xu และคณะ (2015)
ผงจากเปลือก แตงโม	-การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) -การทำแห้งแบบลมร้อน hot-air drying	freeze drying และ hot-air oven drying ที่อุณหภูมิ 40 °C คือวิธีที่สามารถรักษาคงประกอบทางเคมีในแตงโมแดงและเปลือกได้ดีที่สุด	Lee Hoon และคณะ (2016)
โปรตีนจากมันฝรั่ง เข้มข้น	-การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) -การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)	การทำแห้งแบบ AFD เป็นกระบวนการที่สามารถรักษาพารามิเตอร์บ่งชี้คุณภาพเช่น สี ปริมาณความชื้น การเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน ได้ดีที่สุด	Clausen และคณะ (2007)
Hawthorns	-การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD) -การทำแห้งแบบ AFD	FD ใช้พลังงานสูงและใช้เวลาในการทำแห้งนาน และมีคุณภาพไม่ต่างจากการทำแห้งแบบ AFD ที่ใช้พลังงานต่ำกว่า	Duan และคณะ (2017)

ตารางที่ 4 (ต่อ) อิทธิพลของการทำแห้งต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร

ตัวอย่าง	เทคนิคการทำแห้ง	ผลการทดลอง	รายการอ้างอิง
เห็ดกระดุม	-การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	AFD สามารถรักษาคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีได้ดีเคียงกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	Carrión และคณะ (2018)
แอปเปิลสไลด์	-การทำแห้งแบบ AFD -การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FD)	AFD สามารถรักษาคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีได้ดีเคียงกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	Reyes และคณะ (2011)



2.5.6 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งจากการลดลงของน้ำที่หายไประหว่างการทำแห้ง ให้ผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณภาพสูงสุด และเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด มักนำข้อมูลมาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง เพื่อ ออกแบบ เพิ่มประสิทธิภาพ และการควบคุมพลังงานที่ใช้ในการทำแห้ง เกณฑ์ทางสถิติที่ใช้ประเมินแบบจำลองที่ดีที่สุดคือค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายหรือตัวแปรอิสระ และตัวแปรตอบสนอง (R^2) ควรเข้าใกล้ 1 ในขณะที่การวัดค่าทางสถิติอื่น ควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (Inyang และคณะ, 2018)

การทำแห้งโดยนิยมนศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งแบบชั้นเดียว (thin layer) เพื่อให้ง่ายต่อเลือกปัจจัยควบคุม หรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษา และขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา (Gupta และคณะ, 2014)

กลไกการทำแห้งเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าตัวอย่าง จากการแพร่ของของเหลวหรือของแข็งในรูปพอรุนการทำแห้งจะดำเนินต่อไปจนกว่าความชื้นจะมีค่าคงที่ อัตราการทำแห้งขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ อุณหภูมิความเร็วลมในการทำแห้ง ทิศทางการไหลของอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์มีผลอย่างมากต่อการทำแห้ง (Srikiatden และคณะ, 2007)

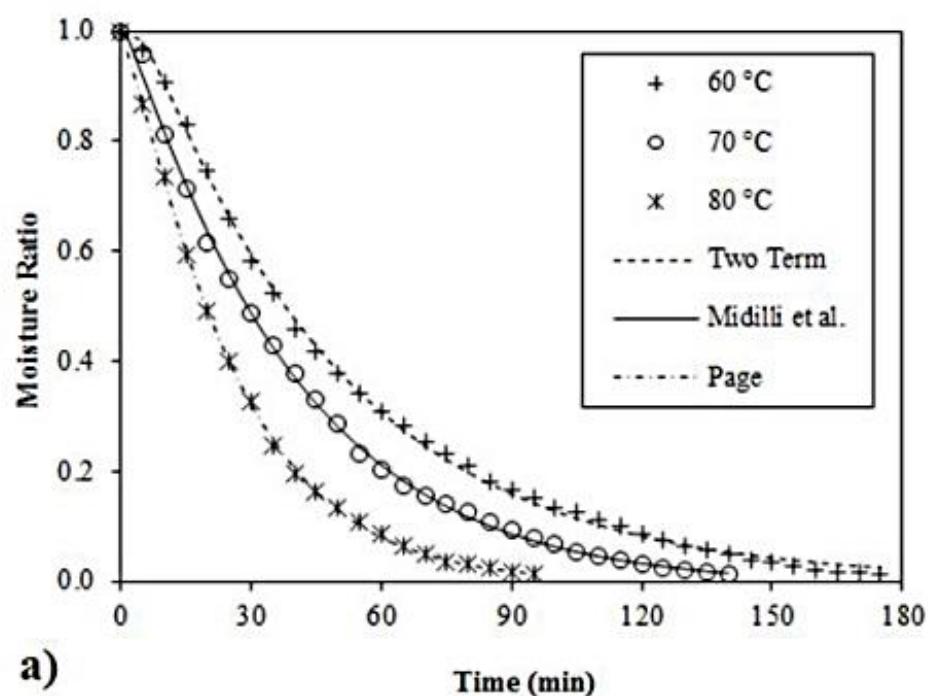
แบบจำลองทางทฤษฎีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมาจากกฎข้อที่ 2 ของ Fick ในการอธิบายการแพร่ของน้ำระหว่างการทำแห้ง และให้ทิศทางของผลลัพธ์ที่หลากหลายจึงส่งผลให้อาจมีข้อผิดพลาดได้มากในการนำมาใช้ในการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งจึงได้มีการใช้สมการเข้ามาช่วยเพิ่มความเข้าใจ โดยเฉพาะสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาก (Panchariya และคณะ, 2002) โดยสมการแบบชั้นเดียวที่นิยมใช้แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้อธิบายการทำแห้งแบบชั้นเดียว

ลำดับที่	ชื่อ	สมการ
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$

ที่มา: Inyang และคณะ (2018)

Lzli และคณะ (2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้งต่อพารามิเตอร์การทำแห้งมะม่วง โดยศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำแห้งแบบไมโครเวฟ (120 และ 350 W) และตู้อบลมร้อนที่ 60, 70 และ 80 °C ต่อคุณภาพด้านสี พฤติกรรมการทำแห้ง ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่น และปริมาณสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมดในมะม่วงสไลด์ พบว่า Two-term และ Page เป็นโมเดลที่สามารถอธิบายการทำแห้งได้ดีที่สุด การทำแห้งโดยไมโครเวฟที่ 350 W มีอัตราการทำแห้งสั้นที่สุด เมื่อพิจารณาค่า R^2 , RMSE และ χ^2 วิธีการทำแห้งส่งผลต่อคุณภาพด้านต่างๆของมะม่วงสไลด์ และอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการทำแห้ง ตัวอย่างกราฟการทำแห้งแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ตัวอย่างกราฟการทำแห้งมะม่วงสไลด์ด้วยการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 °C เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากสมการของ Two-term Modified Page และ Page ที่มา: Lzli และคณะ (2017)

2.5.7 ความดันไอของน้ำแข็ง และน้ำอุณหภูมิต่ำในสภาวะความดันบรรยากาศ

ความดันไอของน้ำแข็ง และน้ำอุณหภูมิต่ำในสภาวะความดันบรรยากาศ ขึ้นกับหลายปัจจัย การกลายเป็นไอที่เกิดขึ้น เกิดจากการระเหยความร้อนในสภาวะบรรยากาศ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในการวัดความดันไอของน้ำแข็งหรือน้ำที่อุณหภูมิต่ำภายใต้ความดันบรรยากาศ โดนสอดคล้องกับ triple point ของน้ำ การตรวจสอบความดันไอของน้ำในสถานะของแข็งในสภาวะบรรยากาศหาได้จากหลายสมการ ตามปัจจัยในการศึกษา ปัจจุบันนิยมใช้สมการของ Goff และ Gratch (1946) ในการหาความดันไอของน้ำอิมิตัวที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถหาได้ที่อุณหภูมิต่ำมากที่สุด $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Murphy และคณะ, 2005)

ในสภาวะบรรยากาศ ค่าความดันบรรยากาศมีค่า $611.657 \pm 0.01\text{ Pa}$ ณ อุณหภูมิ 273.16 K (Johnson และคณะ 1975) ความดันไอของน้ำในอากาศจะมีค่าต่ำลงหากอุณหภูมิต่ำลง เราอาจสันนิษฐานได้ว่าความดันไอนั้นเป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas law) ในการหาความดันไอของน้ำในสถานะของแข็งหรือน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำในบรรยากาศปกติยังไม่มีสมการที่ใช้ได้แน่นอนในปัจจุบัน เนื่องจากการวัดถูกขัดขวางโดยเฉพาะอาหารมีองค์ประกอบที่หลากหลาย เมื่อน้ำไปผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งจะมีทั้งส่วนที่เป็นของแข็ง (ice phase) และส่วนที่ยังเป็นของเหลว (liquid phase) กระจายตัวอยู่ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเฉพาะขนาดผลึกของน้ำแข็งที่กระจายตัวบริเวณผิวหน้าอาหาร ด้วยความซับซ้อนนี้จึงเป็นเรื่องยากในการหาสมการที่แน่นอนในการนำมาหาปริมาณความดันไอน้ำในอาหารภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ

สมการที่สามารถนำมาอธิบายความดันไอของน้ำในสถานะของแข็งและของเหลวที่กระจายตัวอยู่ร่วมกันในปัจจุบันนิยมใช้สมการของ Goff และ Gratch (1946) โดยมีอุณหภูมิต่ำในช่วง $184 < T < 273.16\text{ K}$ สำหรับน้ำแข็ง และ $273.15 < T < 373.15\text{ K}$ สำหรับของเหลวอุณหภูมิต่ำ ในการคำนวณหาความดันไอของน้ำในสภาวะความดันบรรยากาศ (Murphy และคณะ, 2005)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

อุปกรณ์และเครื่องมือ

- กล้องถ่ายภาพ, Nikon รุ่น 1J5
- เครื่องวัดสี ColorFlex EZ Spectrophotometer (Hunterlab, Reston, VI, USA)
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance รุ่น BP 221S, Sartorius AG, Inc., Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance รุ่น TE 3102S, Sartorius AG, Inc., Germany)
- เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (benchtop water activity meter รุ่น AQUALAB 4TE , METER Group, Inc., USA)
- เครื่องปั่น (blender รุ่น 600 วัตต์ HR2120, Royal Philips Electronics, Inc., Thailand)
- เครื่องเขย่าผสมสาร (vortex mixer, รุ่น Vortex-Genie 2 G560E, Scientific Industries, USA)
- เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (tray dryer, ประเทศไทย)
- เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศ (atmospheric freeze-drying (AFD), Panasonic, Japan)
- เครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศ (Freeze dryer, Telstar รุ่น Lyoq, Meditop co.,ltd., Spain)
- ตู้อบลมร้อน (Hot air dryer, Binder รุ่น FD260, BINDER GmbH (Headquarters), Germany)
- ตู้แช่แข็ง (conventional freezer, รุ่น SF – PC697, บริษัท พานาโซนิค แอ็ฟไอลแอนซ์โคลเซน (ประเทศไทย) จำกัด, ประเทศไทย)
- ตู้แช่เยือกแข็งแบบเป่าลม (Air blast freezer, Hiber รุ่น GCM015S, Ali Group S.r.l. a Socio Unico, Italy)
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (thermos recorder, TANDD รุ่น TR-72nw, T&D Corporation, Japan)
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger, Graphtec รุ่น GL840-WV, Graphtec corporation, Japan)
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/Vis spectrophotometer, รุ่น UV-1800, Shimadzu, Japan)

- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, รุ่น Shimadzu model RF-20 prominence PDA, degassing unit (DGU-20A3R); LC20AD, Shimadzu, Japan)
- คอลัมน์ Luna 5 ไมโครเมตร C18 (2) 100 อังสตรอม ขนาด 250x4.6 มิลลิเมตร (column, Phenomenex, Torrance, USA)
- พีเอชมิเตอร์ (pH meter, Mettler-Toledo AG 8603 Schwerzenbach, Switzerland)
- บิวเรต (burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- มาตรฐานดัชนีหักเหแสง (refractometer รุ่น 2110-w06 Atago, Co. Ltd., Japan)
- เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (rotary evaporator, IKA รุ่น RV10, IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Germany)
- เครื่องปั่นละเอียด (homogenizer, BEC Thai, Bangkok Equipment & Chemical Co.,Ltd., Thailand)
- พิมพ์สแตนเลสทรงสามเหลี่ยม ขนาด กว้าง 5 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร

สารเคมี

- สารมาตรฐานไลโคปีน เกรด HPLC (lycopene analytical standard, Sigma-Aldrich, Product of China MW=538.87g/mol, assay≥85.05% (HPLC))
- สารมาตรฐาน 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐาน 2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐาน 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox standard, Sigma-Aldrich, USA)
- โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate, Ajax Finechem, Australia)
- เมทานอลบริสุทธิ์เกรด AR (absolute methanol AR 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- เมทานอลบริสุทธิ์เกรด HPLC (absolute methanol HPLC 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- อะซิโตนไนไตรล์บริสุทธิ์เกรด HPLC (absolute acetonitrile HPLC 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- เฮกเซนเกรด AR (hexanes AR 99.0%, RCI Labscan, Thailand)
- เฮกเซนเกรด HPLC (absolute hexanes HPLC 99.0%, RCI Labscan, Thailand)

- Ethanol AR (Ethanol AR 99.0%, RCI Labscan, Thailand)
- Acetone AR (Acetone AR 99.0%, RCI Labscan, Thailand)
- Petroleum Ether AR (Petroleum Ether AR 99.0%, RCI Labscan, Thailand)
- น้ำกลั่น (distilled water, Vunique, Thailand)
- น้ำกลั่นบริสุทธิ์เกรด HPLC
- กรดแกลลิก (gallic acid) (Fluka Sigma-AldrichTM , Germany)
- สารโฟลีน เซลเคลทีส ฟีนอล (Folin-Ciocalteu's phenol reagent) (Merck, Germany)

3.2 วัตถุดิบ

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้แตงโมสายพันธุ์ ซอนย่า ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว หลังจากดอกบาน 55 - 56 วัน ภายหลังจากเก็บเกี่ยว ซึ่งจากตลาดปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย โดยคัดเลือกขนาด 3 - 5 กิโลกรัมต่อผล จำนวน 5-7 ผลขึ้นกับจำนวนตัวอย่างที่ต้องการใช้ในการทดลอง ผลแตงโมต้องปราศจากโรค ไม่มีเชื้อราและตำหนิต่างๆ สำหรับการทดลองทั้งหมดใช้แตงโมจำนวน 8 รุ่น แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6 เมื่อแตงโมถึงห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาทำความสะอาด เพื่อกำจัดคราบดิน และฟุ้งบริเวณเปลือกออกด้วยการล้างผ่านน้ำไหลดังแสดงในภาพที่ 16 จากนั้นผึ่งให้แห้ง สำหรับใช้ในการทดลองทันที



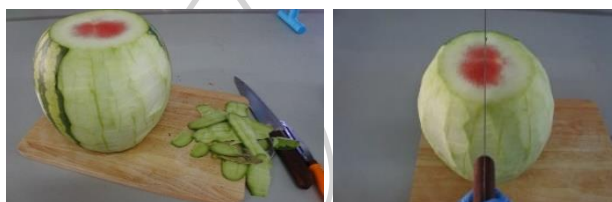
ภาพที่ 16 ขั้นตอนการล้างผลแตงโมด้วยน้ำสะอาด

ตารางที่ 6 รายละเอียดแตงโมที่ใช้ในการศึกษา

รุ่นที่	จำนวนผล (ลูก)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	การทดลอง
1	5	20	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ต่อจลนพลศาสตร์ การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 1-5 การทดลองซ้ำที่ 1
2	6	26	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ต่อจลนพลศาสตร์ การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 1-5 การทดลองซ้ำที่ 2
3	6	27	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ต่อจลนพลศาสตร์ การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 1-5 การทดลองซ้ำที่ 1
4	6	25	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ต่อจลนพลศาสตร์ การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 1-5 การทดลองซ้ำที่ 2
5	6	27	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C และ - 40 °C ต่อ จลนพลศาสตร์การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 6 การทดลองซ้ำที่ 1
6	7	30	ศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C และ - 40 °C ต่อ จลนพลศาสตร์การทำแห้งชิ้นแตงโม ด้วยการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 6 การทดลองซ้ำที่ 2
7	7	28	ศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้ง ต่อลักษณะทางกายภาพ และ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงโม การทดลองซ้ำที่ 1
8	7	29	ศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้ง ต่อลักษณะทางกายภาพ และ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงโม การทดลองซ้ำที่ 2

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้ง

นำแตงโมที่ผ่านการล้างและสะเด็ดน้ำให้แห้งมาทำการตัดแต่ง เริ่มจากตัดขั้วผลทั้งสองด้าน ออก จากนั้นปอกเปลือกสีเขียวด้านนอกออก แบ่งผลแตงโมเป็น 4 ส่วน ตามแนวตั้ง ตัดเป็นชิ้นรูป สามเหลี่ยมโดยใช้แม่พิมพ์เป็นตัวกำหนดขนาด และความหนาของชิ้นแตงโม มีความ กว้าง x ยาว x หนา คือ 5 cm x 6 cm x 1 cm ชิ้นแตงโมจะประกอบด้วยเนื้อสีขาวติดเปลือกแตงโม (exocarp, thick rind) และเนื้อสีแดง (fleshy mesocarp) ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถรับประทานได้ จากนั้นคัดเลือก เฉพาะชิ้นที่ไม่มีเมล็ดเท่านั้น ก่อนนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป การเตรียมตัวอย่างชิ้นแตงโม แสดงดังภาพที่ 17



ปอกเปลือกเฉพาะสีเขียวด้านนอกออก โดยเหลือเนื้อสีเขียวอ่อนหรือขาวด้านในไว้



ผ่าผลแตงโมเป็น 4 ซีก ตามแนวยาว และตัดเป็นชิ้นให้มีความหนาประมาณ 1 cm



กำหนดขนาดด้วยพิมพ์ 3 เหลี่ยม ขนาด กว้าง 5 cm x ยาว 6 cm x หนา 1 cm ตัดแต่ง ส่วนเกินออก ชิ้นแตงโมจะประกอบด้วยส่วนเนื้อสีขาวติดเปลือกบริเวณฐาน และสีแดงคัดเลือกเฉพาะ ชิ้นที่ไม่มีเมล็ดสำหรับใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 17 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชิ้นแตงโม

3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของวัตถุดิบแตงโมสดก่อนการทดลอง

3.4.1 คุณภาพผลแตงโม

3.4.1.1 น้ำหนักผลแตงโม

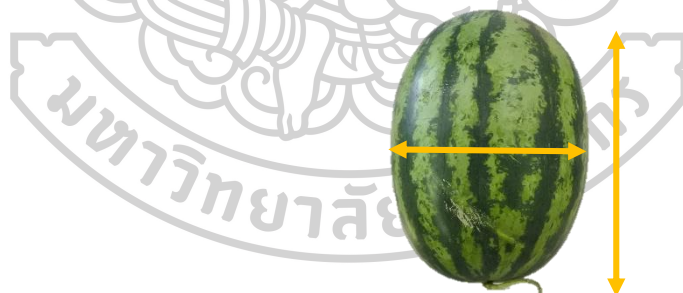
ส้มแตงโม 3 ผลต่อรุ่น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 3 ตำแหน่งในหน่วยกิโลกรัม ทำการบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะการชั่งน้ำหนักผลแตงโม

3.4.1.2 ขนาดผลแตงโม

ส้มแตงโม 3 ผลต่อรุ่น วัดขนาดด้วยสายวัด โดยวัดความยาวรอบผลในแนวนอนและแนวตั้ง และ ทำการบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การวัดขนาดผลแตงโม

ทำการสุ่มตัวอย่างชิ้นแตงโมมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และทางเคมีดังนี้ คุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นแตงโมที่ผ่านการตัดแต่งที่ศึกษาได้แก่ ลักษณะปรากฏ ขนาด และค่าสี คุณสมบัติทางเคมีที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity) และค่าวอเตอร์แอคทิวิตี

3.4.2 คุณภาพทางกายภาพของชิ้นแต่งโม

3.4.2.1 ลักษณะปรากฏของชิ้นแต่งโม

โดยการถ่ายภาพ โดยใช้กล้องถ่ายภาพยี่ห้อ Nikon รุ่น 1J5 โดยวางผลิตภัณฑ์ในกล่องถ่ายภาพทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีการควบคุมแสงโดยบุผนังด้วยผ้ากำมะหยี่สีดำภายในตู้ ขนาดกว้าง 38.5 cm สูง 40 cm ลึก 38.0 cm โดยปริมาตรพื้นที่ที่แสงกระจายขนาด กว้าง 38.5 cm สูง 16.5 cm ลึก 38.0 cm ดังแสดงในภาพที่ 20 แหล่งกำเนิดแสงคือ DAI-ICHI ชุดหลอดโคมไฟเพดานแบบ LED กำลังไฟฟ้า 24 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 220-240 โวลต์ การสั่นสะเทือนของกระแสไฟฟ้า 50/60 Hz



ภาพที่ 20 อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพลักษณะปรากฏของชิ้นแต่งโม

3.4.2.2 ความหนาของชิ้นแต่งโม

ทำการสุ่มชิ้นแต่งโมมาวัดความหนาโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ จำนวน 36 ชิ้น ต่อชุดการทดลอง โดยลักษณะการวัดแสดงดังภาพที่ 21 ทำการบันทึกค่า



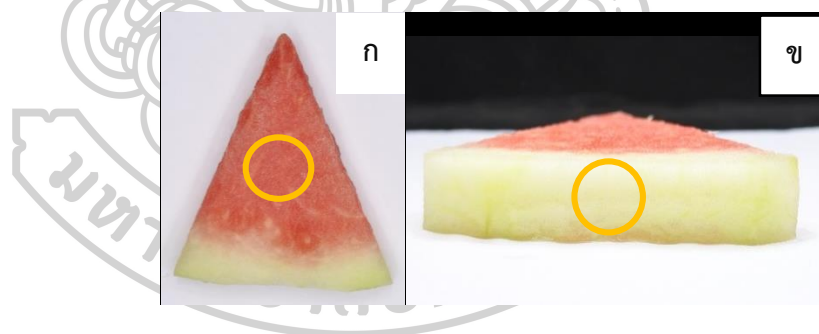
ภาพที่ 21 ลักษณะขนาดและความหนาของชิ้นแต่งโมสด

3.4.2.3 น้ำหนักขึ้นแดงโม

สุ่มขึ้นแดงโม 36 ชิ้นต่อ 1 ชุดการทดลอง ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ทำการบันทึกค่า

3.4.2.4 ค่าสี

ทำการสุ่มตัวอย่างขึ้นแดงโมจำนวน 36 ชิ้นมาวิเคราะห์ค่าสีในหน่วย L^* , a^* และ b^* โดยทำการวิเคราะห์ขึ้นแดงโมสดหลังการตัดแต่ง ด้วยเครื่องวัดสี ColorFlex EZ Spectrophotometer (Hunterlab, Reston, VI, USA) ใช้ระบบ CIE L^* , a^* , b^* มี Pulsed Xenon Lamp ชนิด D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสง เนื้อสีแดงวัดที่ตำแหน่งตรงกลางด้านหน้าของชิ้นตัวอย่างขึ้นแดง 1 ตำแหน่ง เนื้อสีขาวติดเปลือกบริเวณกลางฐานขึ้น โดยใช้รูเปิดขนาด 1 เซนติเมตร (ภาพที่ 22) จากนั้นนำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณค่า Chroma (C^*), hue angle (h°) และ ΔE ดังสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ในขึ้นแดงโมแห้งจะวิเคราะห์ 2 บริเวณเช่นกัน โดยบริเวณเนื้อสีขาวติดเปลือกจะมีการหดตัวหลังการทำแห้ง จึงต้องนำมาคล้อกให้มีความกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และวางทางบนช่องวัดตัวอย่างครอบด้วยฝาครอบและกดวิเคราะห์ค่า



ภาพที่ 22 ลักษณะการวัดสีขึ้นแดงโม

โดย ก คือบริเวณที่วิเคราะห์ค่าสีของเนื้อแดงโม

ข คือบริเวณที่วิเคราะห์ค่าสีของเนื้อติดเปลือกแดงโม

$$\text{Chroma} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

สมการที่ 1

$$\text{hue angle} = \tan^{-1} \frac{a^*}{b^*}$$

สมการที่ 2

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*}$$

สมการที่ 3

3.4.3 คุณภาพทางเคมีของขึ้นแฉงโม

3.4.3.1 ปริมาณความชื้น (moisture content)

สุ่มตัวอย่างขึ้นแฉงโมสดที่ผ่านการตัดแต่งจำนวน 9 ชิ้นต่อชุดทดลอง แบ่งเป็น 3 ส่วน (ส่วนละ 3 ชิ้น) ทำการปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมจีไนซ์ จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างแต่ละส่วน 3 กรัม บรรจุในกระป๋องอลูมิเนียม (moisture can) สำหรับหาปริมาณความชื้น โดยบันทึกน้ำหนักเริ่มต้นของกระป๋องอลูมิเนียมก่อนใส่ตัวอย่าง และกระป๋องอลูมิเนียมรวมน้ำหนักตัวอย่าง นำกระป๋องอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาปิดฝากระป๋องอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างหลังอบ ทิ้งให้เย็นในโหลบรรจุซิลิกาเจล 5 - 10 นาทีและนำกระป๋องอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง นำข้อมูลที่ได้คำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อ 1 ชุดการทดลอง ดังแสดงในสมการที่ 4

$$MC(w.b.) = \left(\frac{W_i - W_t}{W_i} \right) \times 100$$

สมการที่ 4

เมื่อ MC หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานเปียกในหน่วยเปอร์เซ็นต์

W_i หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_t หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

3.4.3.2 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water activity; a_w)

นำแฉงโมปั่นละเอียดจากข้อ 3.4.3.1 ในแต่ละส่วนบรรจุใส่ภาชนะสำหรับวิเคราะห์ ค่า a_w ให้มีปริมาณ 3 ส่วนใน 4 ส่วนของภาชนะ หรือประมาณ 3 กรัม วิเคราะห์ส่วนละ 1 ซ้ำ หรือ 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ที่อุณหภูมิ 25 ± 0.2 °C ทำการบันทึกค่า

3.4.3.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids; TSS)

ตัวอย่างปั่นละเอียดจาก 3.4.3.1 ทั้ง 3 ส่วนนำมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยในแต่ละส่วนวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ตักเนื้อแฉงโมปั่นละเอียดกรองผ่านผ้าขาวบาง 2 ชั้นด้วยการบีบคั้น นำน้ำแฉงโมที่ได้หยดลงบนมาตรดัชนีหักเหแสง (refractometer) โดยมาตรดัชนีหักเหแสงจะถูกทำความสะอาด และเทียบมาตรฐานด้วยน้ำกลั่น ก่อนการวิเคราะห์ ทำการบันทึกค่า

3.4.3.4 วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

นำน้ำแดงโมที่ได้จากข้อ 3.4.3.3 ทั้ง 3 ส่วนมาวิเคราะห์ความเป็นกรด - ด่างด้วย pH - meter ก่อนการใช้งานเครื่องมือที่ใช้ผ่านการเทียบมาตรฐานด้วยน้ำยาสอบเทียบ (pH Buffer Solution) ที่มีค่า pH 2, 4, 7 และ 10 โดยล้างทำความสะอาดเพื่อเชิ้ออิเล็กโทรด (pH electrode) ด้วยน้ำกลั่นก่อนและหลังการใช้งาน แต่ละส่วนวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ทำการบันทึกค่า

3.4.3.5 วัดปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity, TA) วิเคราะห์ตาม A.O.A.C. (1990) นำเนื้อแดงโมปั่นละเอียดในข้อ 3.4.3.1 ทั้ง 3 ส่วน ชั่งน้ำหนักส่วนละ 5.00 ± 0.20 กรัมตัวอย่าง ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวางบนเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จุ่ม pH electrode ของเครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง สำหรับตรวจสอบจุดยุติ จากนั้นไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนมีค่า pH เท่ากับ 8.1 นำปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปคำนวณหาค่า TA (%) เทียบกับกรดมาลิก ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง การคำนวณค่า TA (%) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$TA\% = \frac{\text{Volume of NaOH (ml)} \times 0.1M \times 0.064}{10 \text{ g of sample} \times 10^2} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ 0.064 คือ Malic acid equivalent

3.4.3.6 การสกัดตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant capacity) และสารประกอบฟีนอลิก

สุ่มชิ้นแดงโมสดจำนวน 3 ชิ้นหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮมोजิไนซ์ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ชั่งน้ำหนักเนื้อแดงโมปั่นละเอียดจำนวน 3.00 ± 0.50 กรัมตัวอย่างสด หรือ 1.00 ± 0.10 กรัมตัวอย่างแห้ง บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอนโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลโดย แบ่งเติมเมทานอลจำนวน 3 ครั้ง ครั้งแรกเติมเมทานอล 10 มิลลิลิตร นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้เซลล์หรือโมเลกุลของสารนั้นแยกออก (sonicate) นาน 30 นาที จากนั้นนำสารละลายสกัดที่ได้ผ่านกระดาษกรองเบอร์ Whatman No.1 ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิ

ลลิตร นำเนื้อแตงโมที่เหลือมาสกัดซ้ำครั้งที่ 2 โดยเติมเมทานอล 5 มิลลิลิตร นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้เซลล์หรือโมเลกุลของสารนั้นแยกออกอีกครั้ง นาน 30 นาที นำสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรองเดิมลงในขวดปรับปริมาตรที่เตรียมไว้ จากนั้นนำเนื้อแตงโมที่เหลือ เติมเมทานอลอีก 5 มิลลิลิตร นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิกนาน 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรองใส่ในขวดปรับปริมาตรเดิม เมื่อสกัดครบทั้ง 3 ครั้ง ทำการปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตร ควบคุมและป้องกันสารสกัดจากแสงตลอดกระบวนการสกัดโดยคลุมด้วยถุงพลาสติกสีดำ ทำการสกัดจำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง 1 ชุดการทดลอง สารสกัดที่ได้เก็บรักษาที่ -18°C ระหว่างรอการนำมาวิเคราะห์ (ดัดแปลงจาก Wojdylo และคณะ, 2007)

3.4.3.7 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic contents)

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดย ดัดแปลงวิธีของ (Singleton & Rossi, 1965) นำสารสกัดที่ได้ในข้อ 3.4.3.6 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาขนาด 5 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับสาร 10% Folin Cioculciu's reagent ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมโดยใช้เครื่องเขย่าผสมสาร (Vortex Mixer) นาน 15 วินาที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 5 นาที เติมสารละลาย 7.5% (w/v) โซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เขย่าโดยเครื่องเขย่าผสมสาร 15 วินาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance; A) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนที่ดีควรมีค่าในช่วง $0.2 < A < 0.8$ วัดด้วยเครื่อง UV/Vis สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) จากนั้นนำค่าที่ได้คำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในหน่วยมิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (mg gallic acid/g dry matter) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.4.3.8 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant capacity)

3.4.3.8.1 ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity

โดยดัดแปลงจาก Brand -Williams และคณะ (1994) โดยทำการปิเปตสารสกัดแตงโมในข้อ 3.4.2.6 ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ที่มีความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 120 นาที นำสารสกัดแตงโมที่ทำปฏิกิริยาแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Vis สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายเมทานอลเป็น blank ในการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ใช้สาร Trolox เป็นสารมาตรฐาน กราฟมาตรฐานในการทดลองวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 25, 50,

100, 150, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้สร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อนำสมการเส้นตรงมาใช้ในการคำนวณหา ความสามารถในการต้านออกซิเดชันในสารสกัดแห้งโม และรายงานในหน่วยไมโครโมลสมมูล ของ Trolox ต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (mg trolox/g dry matter) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.4.3.8.2 ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) radical cation decolourization assay

ทำการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS โดยดัดแปลงวิธีจาก Re และคณะ (1999) ทำการเตรียมสารละลาย 2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) ที่มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ผสมกับ สารละลายโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์ความเข้มข้น 2.6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 16 ชั่วโมง จากนั้นเจือจางสารละลาย ABTS ด้วยสารละลายเมทานอล นำไปวัดด้วยเครื่อง UV/Vis สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร เพื่อตรวจสอบความพร้อมของ สารละลาย ABTS สังเกตจากค่าการดูดกลืนแสงจะอยู่ในช่วง 1.100 ± 0.020 จากนั้นปิเปตสารสกัดแห้งโมในข้อที่ 3.4.3.6 ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยา โดยผสม ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยมีสารละลายเมทานอลเป็น blank วิธีนี้ใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน โดยเตรียมกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และรายงานเป็น ไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (mg trolox/g dry matter) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.4.3.9 ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Total carotenoids contents)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ตามวิธีของ Silva da Rocha และคณะ (2015) วิเคราะห์ตัวอย่างแห้งโมสด และแห้งโมแห้ง โดยหั่นด้วยมีดให้ละเอียด ชั่งน้ำหนัก 2.0000 ± 0.3000 กรัมตัวอย่างสดและตัวอย่างแห้ง ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติม acetone แซ่เย็นปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮมจีไนซ์ นาน 15 วินาที ให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารสกัดพร้อมกากที่ได้วางบนเครื่องกวนสาร ใส่แ่งแม่เหล็กกวนสาร หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที เมื่อครบเวลานำสารสกัดที่ได้กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ลงในกรวยแยก (separated funnel) จากนั้นเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าเพื่อเร่งการสกัด และเอียงกรวยแยก

ประมาณ 45 องศา และเปิดก๊อกเปิดปิด (stop cock) เพื่อไล่อากาศออก จำนวน 3 ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ทิ้งไว้ 10 นาที เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เพื่อแยกสารสกัดที่ละลายได้ในน้ำออกทิ้งไว้ 10 นาที เมื่อสารสกัดที่ได้จะแยกออกเป็น 2 ชั้น ด้านบนจะเป็นสารสกัดสีเหลืองที่ละลายอยู่ในปิโตเลียมอีเทอร์ ชั้นล่างจะเป็นสารละลายใสที่ไม่ต้องการ เทส่วนใสออกจากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตรอีกครั้ง หลังจากเขย่าและไล่อากาศแล้ว ทิ้งไว้ 10 นาที เทส่วนใสออกและแยกส่วนสีเหลืองใสในปิโตรเลียมอีเทอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร กำจัดน้ำส่วนเกินด้วยการเติม sodium sulfate จำนวน 3 กรัม จากนั้นเทส่วนสีเหลืองใสขนาดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยปิโตเลียมอีเทอร์ นำสารสกัดที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยมีปิโตเลียมอีเทอร์ เป็น blank ในระหว่างการสกัดต้องควบคุมและป้องกันแสงตลอดกระบวนการโดยการใช้ถุงพลาสติกสีดำคลุมภาชนะที่ใช้ในการทดลอง ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อชุดการทดลอง ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\text{Total carotenoid content (mg } \beta\text{-carotene/100 g DW)} = \frac{A \times V \times 10^3}{E_{1\text{cm}}^{1\%} \times W} \quad \text{สมการที่ 6}$$

A คือค่าการดูดกลืนแสงที่ 450 นาโนเมตร

V คือปริมาตรสุดท้ายของสารสกัด คือ 50 มิลลิลิตร

$E_{1\text{cm}}^{1\%}$ คือค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของ β -carotene ในปิโตเลียมอีเทอร์ ($E_{1\text{cm}}^{1\%} = 2592$)

w คือน้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

3.4.3.10 วิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด (Lycopene content) ด้วย HPLC

3.4.3.10.1 การสกัดสารสกัดจากแตงโมสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีน

ทำการวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนทั้งหมดโดยดัดแปลงจากวิธีของ Barba และคณะ (2006) สุ่มแตงโมสดและแตงโมแห้งนำมาหั่นให้ละเอียด จากนั้นชั่งน้ำหนักแตงโม 3.0000 ± 0.2000 กรัม ใส่ในขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน ที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ควบคุมไม่ให้สัมผัสกับแสง จากนั้นเติมสารสกัดประกอบด้วย Hexane / Acetone / Methanol ในอัตราส่วน 50:25:25 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยแบ่งเติมจำนวน 3 รอบ รอบที่ 1 เติมน้ำกลั่นปริมาตร 40 มิลลิลิตร ทำการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ความเร็ว 12000 รอบต่อนาที นาน 15 วินาที ให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารสกัดพร้อมกากที่ได้วางบนเครื่องกวน

สาร ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร หมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที เมื่อครบเวลากรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่ในกรวยแยกสารสีชา ขนาด 500 มิลลิลิตร ปิดฝากรวยแยกทิ้งไว้ นำชิ้นแท่งโมที่เหลือจากการสกัดครั้งที่ 1 เติมสารสกัดปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ ความเร็ว 12000 รอบต่อนาที นาน 15 วินาที จากนั้นนำสารสกัดพร้อมกากที่ได้วางบนเครื่องกวนสาร ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร หมุนที่ความเร็วคงที่นาน 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่กรวยแยกสีชาที่เตรียมไว้ นำแท่งโมที่เหลือจากการสกัดรอบที่ 2 เติมสารสกัดเพิ่มปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ให้เป็นเนื้อเดียวกันกับสารสกัด จากนั้นนำสารสกัดพร้อมกากที่ได้วางบนเครื่องกวนสาร อีก 30 นาที เมื่อครบเวลาเทสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 ใส่กรวยแยกสารสีชา เมื่อสกัดครบ 3 ครั้ง เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร เขย่าเพื่อเร่งการสกัดและไล่อากาศออก 3 ครั้ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้นที่สมบูรณ์นาน 10 นาที จะสังเกตเห็นการแยกชั้น โดยชั้นบนจะเป็นสารละลายสีส้มเข้ม ในขณะที่ชั้นล่างจะเป็นของเหลวสีใสหรือขาวขุ่น แยกชั้นใสด้านล่างทิ้งเทชั้นสีเหลืองด้านบนใส่ขวดปริมาตรก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร ชะล้างสารตกค้างบริเวณกรวยแยกด้วยสารละลายเฮกเซน จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 35 °C ความเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 15-18 นาที หรือจนกว่าสารสกัดจะมีลักษณะแห้ง จากนั้นนำมาละลายด้วยเฮกเซนและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ต่อด้วย เครื่องโครมาโทกราฟีชนิดเหลวประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography : HPLC) ทำการวิเคราะห์ 2 ขั้นตอนสุดท้ายทดลอง

3.4.3.10.2 การวิเคราะห์สารสกัดแต่งโมและสารมาตรฐานไลโคปีนด้วยวิธี

HPLC

นำสารสกัดที่จาก 3.4.3.10.1 กรองด้วยตัวกรอง Nylon Syringe Filters ขนาด 0.45 ไมโครเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนต่อด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง โดยใช้คอลัมน์ C18 ในการแยกสาร ในการวิเคราะห์ควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ที่ 35 °C สารสกัดแต่งโมที่ฉีดเข้าเครื่อง HPLC ในแต่ละครั้งใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ระบบการชะโดยใช้ตัวชะชนิดเดียวกัน มีปริมาตรคงที่ (isocratic) ตลอดการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ 1 ครั้งใช้เวลา 60 นาที สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ประกอบด้วยสารละลายอะซิโตนไนไตรล์บริสุทธิ์ (absolute acetonitrile) และสารละลายเมทานอลบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 10:90 ใช้อัตราการไหลที่ 0.9 มิลลิลิตรต่อวินาที ติดตาม

ปริมาณสารไลโคปีนที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร การวิเคราะห์ในการทดลองนี้สามารถคำนวณปริมาณไลโคปีนในสารสกัดแต่งโมเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานไลโคปีนที่ได้จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานไลโคปีนที่มีความเข้มข้นต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 3.75, 7.5, 15, 30, 60, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปวิเคราะห์ด้วย HPLC ในการคำนวณนำพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้นมาสร้างสมการเส้นตรง แสดงในหน่วยของไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นหาปริมาณสารไลโคปีนจากสารสกัดแต่งโม โดยนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากตัวอย่างแต่งโม ไปแทนค่าในสมการ $y = 292954x - 229051$ ซึ่งเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานไลโคปีน และรายงานเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง

3.5 การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งขึ้นแต่งโม ด้วยการทำให้แห้งแบบ Atmospheric freeze drying, AFD

ในการศึกษานี้ทำการศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง 2 วิธี ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบช้า และการแช่เยือกแข็งแบบเร็วต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งขึ้นแต่งโม โดยแบ่งการทำแห้งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ step ที่ 1- 5 และ step ที่ 6 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 กระบวนการแช่เยือกแข็ง

3.5.1.1 การแช่เยือกแข็งแบบช้า (Slow freezing pretreatment)

นำขึ้นแต่งโมที่ผ่านการตัดแต่งคัดเลือกเฉพาะชิ้นที่ไม่มีเมล็ดจำนวน 36 ชิ้น เรียงแบบชั้นเดียว (single layer) บนภาชนะรองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นสุมเสียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Probes) เข้าไปในขึ้นแต่งโมจำนวน 1 ชิ้นโดยให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลอยู่ระดับกึ่งกลางของชิ้น บันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นแต่งโม สำหรับหาเวลาที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็ง โดยเทียบกับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของตู้แช่แข็ง ในการแช่เยือกแข็งแบบช้า ศึกษาที่อุณหภูมิ - 18 °C ด้วยเครื่องแช่แข็ง (conventional freezer) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C ด้วยเครื่องแช่แข็ง (conventional freezer)

3.5.1.2 การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Fast freezing pretreatment)

นำชิ้นแตงโมที่ผ่านการตัดแต่งคัดเลือกเฉพาะชิ้นที่ไม่มีเมล็ดจำนวน 36 ชิ้น เรียงแบบชั้นเดียว (single layer) บนถาดที่รองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นสุมเสียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Probes) เข้าไปในชิ้นแตงโมจำนวน 1 ชิ้น โดยให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลอยู่ระดับกึ่งกลางของชิ้น บันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกับ 3.5.1.1 แต่ในการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ศึกษาที่อุณหภูมิ - 40 °C ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็น (Air blast freezer) ทำการทดลอง 2 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C แทนการแช่แข็งแบบเร็ว ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็น (Air blast freezer)

3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแคงโมใน step 1-5

ด้วย AFD

ในการศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแคงโมแบบ AFD ใน step 1-5 ทำการทดลองจากชิ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ จำนวน 2 ชั่วโมง และชิ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ จำนวน 2 ชั่วโมง โดยมีสภาวะการทำแห้งและการคำนวณปริมาณน้ำดังนี้

3.5.2.1 สภาวะการทำแห้ง

นำชิ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครั้งละ 36 ชิ้น วางเรียงเป็นชั้นเดียว (single layer) บนตะแกรง เรียงชิ้นแคงโม 12 ชิ้นต่อ 1 ตะแกรง รวมทั้งหมด 3 ตะแกรง จากนั้นปล่อยให้เครื่องทำงานอัตโนมัติ โดยมีสภาวะการทำแห้งแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เวลา และอุณหภูมิของโปรแกรมที่ใช้ในการทำแห้ง

STEP	mode Time (min)	Target temp.($^{\circ}\text{C}$)
0	1400	-24.0
1	240	-24.0
2	500	-16.5
3	1000	-8.7
4	1000	-4.5
5	600	1.6
6	-	7.2

mode Time(min) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการทำแห้งแต่ละ step การทำแห้ง

Target temp ($^{\circ}\text{C}$) หมายถึง อุณหภูมิที่ต้องการใน step การทำแห้งนั้นๆ

ในการทำแห้งแบบ AFD แบ่งการทำแห้งเป็น 6 step เมื่อเครื่องอบแห้งเริ่มทำงานจะมีการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 3 จุด ได้แก่ ลมก่อนเข้าห้องทำแห้ง ลมหลังออกจากห้องทำแห้ง และบนตะแกรงวางตัวอย่าง ใน step ที่ 0 คือการวอร์มเครื่องนาน 1400 นาทีเพื่อลดอุณหภูมิในระบบให้ต่ำลงในระดับที่พอเหมาะสำหรับการทำแห้ง เมื่อเข้าสู่ step ที่ 1 จะหยุดการทำงานของเครื่อง AFD ชั่วครู่ จากนั้นเรียงชิ้นแคงโมแช่เยือกแข็งบนตะแกรง ให้มีระยะห่างเท่ากัน ใช้แคงโมจำนวน 36 ชิ้นต่อรอบการทำแห้ง จากนั้นปล่อยให้เครื่องทำงานตามโปรแกรมอัตโนมัติ เมื่อเวลาผ่าน

ไปจนถึงขั้นสุดท้ายแต่ละ step การทำแห้ง ทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และเคมี ระหว่างการทำแห้ง แสดงดังภาพที่ 25 โดยมีการติดตามอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ก่อนและหลังเข้าสู่ระบบอบแห้งตลอดการทำแห้ง เมื่อสิ้นสุดการทำแห้งนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ พฤติกรรมการทำแห้งโดยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของก๊าซ สำหรับการทำแห้งใน step ที่ 1 - 5 ต่อไป

หลังจากเปิดเครื่องจะเริ่มบันทึกอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลแบบ อิเล็กทรอนิกส์



เมื่อเข้าสู่ step 1 วางชั้นแผงโมแซ่เยือกแข็งเรียงเป็นชั้นเดียวบนตะแกรง (single layer) ใช้ตัวอย่างจำนวน 36 ชิ้น ต่อบรรยากาศ

STEP 1



อุณหภูมิ - 24 °C นาน 240 นาที



เมื่อสิ้นสุด Step ที่ 1 ชักตัวอย่างจำนวน 4 ชิ้น นำไปถ่ายภาพ วัดความหนา ชั่งน้ำหนักชั้นแผงโมแซ่ วิเคราะห์ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ตามข้อ 3.4.2.1, 3.4.2.2, 3.4.2.3, 3.4.3.1 และ 3.4.3.2

STEP 2



อุณหภูมิ - 16.5 °C นาน 500 นาที



ซักรับตัวอย่างจำนวน 4 ชิ้น นำไปถ่ายภาพ วัดความหนา ชั่งน้ำหนักขึ้นเตงโม วิเคราะห์ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ตามข้อ 3.4.2.1, 3.4.2.2, 3.4.2.3, 3.4.3.1 และ 3.4.3.2 เช่นเดียวกับ Step

3, 4 และ 5



STEP 3



อุณหภูมิ - 8.7 °C นาน 1000 นาที



STEP 4



อุณหภูมิ - 4.5 °C นาน 1000 นาที



STEP 5



อุณหภูมิ 1.6 °C นาน 600 นาที



STEP 6

อุณหภูมิ 7.2 °C

ภาพที่ 25 ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างใน step 1 - 5 ระหว่างการทำแห้งด้วยเทคนิค AFD

3.5.2.2 การคำนวณปริมาณน้ำที่หายไปโดยใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ขาเข้า และขาออกในการทำแห้งขึ้นแดงโมใน step 1 – 5 ด้วยการทำให้แห้งแบบ AFD

พฤติกรรมการทำให้แห้งในช่วงแรก ได้แก่ step 1 - 5 จากการทดลองพบว่าไม่สามารถศึกษาพฤติกรรมการทำให้แห้ง (Drying curve) ด้วยการชั่งน้ำหนักระหว่างการทดลองได้ แต่มีข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลเข้าออกห้องทำให้แห้งระหว่างการทำให้แห้ง จากการทำให้แห้งจะเกิดการระเหยความชื้นภายในห้องทำให้แห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้นนำมาคำนวณการเพิ่มขึ้นของความดันไอของน้ำในอากาศที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทำให้แห้ง แทนการชั่งน้ำหนัก โดยน้ำที่เพิ่มขึ้นมาจากขึ้นแดงโม จากข้อมูลนี้นำมาเทียบหาปริมาณความชื้นที่ลดลงของแดงโมระหว่างการทำให้แห้งเทียบกับปริมาณความชื้นจากผลการทดลองที่ว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ซึ่งเป็นการทำนายการลดลงของความชื้นทางอ้อม โดยอาศัยกฎของก๊าซอุดมคติ

$$PV = n RT$$

สมการที่ 7

$$n = \frac{PV}{RT}$$

สมการที่ 8

โดยที่ P คือความดัน

V คือปริมาตรอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

n คือ จำนวนโมล (1mol = 18.01528 g/mol)

T คืออุณหภูมิ (เคลวิน, K) โดยที่ 0 °C = 273.15 K

R คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.3145 J / mol · K)

ค่า P สัมบูรณ์ (P_{sat}) ในช่วงความถูกต้องที่ระบุโดย Triple point สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์หาได้จากสมการของ Goff and Gratch, (1946)

$$\log(P_{ice}) = -9.09718 \left\{ \left(\frac{273.16}{T} \right) - 1 \right\} - 3.56654 \log \left(\frac{273.16}{T} \right) + 0.876793 \left\{ 1 - \left(\frac{T}{273.16} \right) \right\} + \log(610.71)$$

สมการที่ 9

$$\log(P_{liq}) = -7.90298 \left\{ \left(\frac{373.16}{T} \right) - 1 \right\} - 5.02808 \log \left(\frac{373.16}{T} \right) - 1.3816 \times 10^7 \left(10^{11.344 \left(1 - \frac{T}{373.16} \right)} - 1 \right) + 8.1328 \times 10^{-3} \left(10^{3.49149 \left(\frac{373.16}{T} - 1 \right)} - 1 \right) + \log(101325)$$

สมการที่ 10

โดยที่ T คืออุณหภูมิ

เมื่อได้ค่า P_{sat} จะสามารถหาค่าความดันไอจาก (Pa)

P_{ice} คือ ความดันไอของน้ำสถานะของแข็ง (Pa)

P_{liq} คือ ความดันไอของน้ำสถานะของเหลว (Pa)

เมื่อได้ค่าความดันไออิ่มตัวแล้ว นำมาหาค่าความดันไอของน้ำโดยอาศัยความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลอง

$$RH (\%) = \frac{P_w}{P_{sat}}$$

สมการที่ 11

$$P_w = \frac{P_{sat} \times RH}{100}$$

สมการที่ 12

โดยที่ RH คือความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ได้จากการทดลอง

จากสมการที่ 7 ค่า v หาได้จากความเร็วลมในระบบบอบแห้ง และพื้นที่ในห้องทำแห้ง

$$V = vA$$

สมการที่ 13

โดยที่ V คือปริมาตรอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

v คือความเร็วลม (m/s)

A คือพื้นที่ใน chamber (m^3)

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ สามารถคำนวณหาน้ำหนักของน้ำ m จากสมการที่ 7 โดย

$$m = \frac{n(18.01528) PV}{RT}$$

สมการที่ 14

โดย m คือน้ำหนักของน้ำ (กรัม)

เมื่อทราบมวลโมเลกุลของน้ำในอากาศที่เข้าและออกจากห้องทำแห้ง จากสมการที่ 8 จะสามารถคำนวณหาน้ำหนักของน้ำเข้าและออกได้จากสมการที่ 14 เมื่อระบบมีอัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออก ผลต่างระหว่างน้ำหนักของน้ำเข้ากับน้ำหนักของน้ำออกสันนิษฐานได้ว่ามา

จากน้ำในชั้นแทงโม ในการวิเคราะห์ข้อมูลเทียบกับความชื้นฐานเปียกที่ได้จากการทดลอง สามารถหาได้จากสมการที่ 15

$$MC(w.b.) = \left(\frac{w-d}{w} \right) * 100 \quad \text{สมการที่ 15}$$

โดยที่ MC(w.b.) คือความชื้นฐานเปียก

w คือน้ำหนักวัตถุดิบ

d คือน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง

จะสามารถหาปริมาณน้ำในตัวอย่าง (mass wight) ได้ด้วยการเทียบบัณญัติไตรยางค์ เช่น

ตัวอย่าง 0.100 กิโลกรัม มีปริมาณความชื้น หรือน้ำ 93.27 กรัม

ตัวอย่าง 0.588 กิโลกรัม มีน้ำ $(93.27 * 0.588) / 100 = 0.52$ กิโลกรัม

และคำนวณวัตถุดิบแห้ง (mass dried solid) เช่น

ตัวอย่าง 100 กรัม มีน้ำ $100 - 93.27$ กรัม

ตัวอย่าง 588 กรัม มีน้ำ $((100 - 93.27) * (0.588)) / 100 = 37.58$ กรัมของแข็ง

เมื่อนำค่า MW ที่ได้ในแต่ละจุดรวมกับปริมาณน้ำที่คำนวณได้จากค่าความดันไอ จะได้การเปลี่ยนแปลงของน้ำทั้งหมดในระบบ ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำไปคำนวณปริมาณความชื้นในระบบที่เปลี่ยนไปตามเวลาโดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

V Chamber	0.108 m ³
v ความเร็วลม	0.29 m/s
v ปริมาตรอากาศ	0.5890486

3.5.3 การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแคงโมใน step 6 ด้วย AFD

ในการศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแคงโมแบบ AFD ใน step 6 ทำการทดลองจากชิ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และชิ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C อย่างละ 18 ชิ้นต่อรอบการทำแห้งทำการทดลองจำนวน 2 ชั่วโมง โดยมีสถานะการทำแห้งและการเลือกแบบจำลองดังนี้

3.5.3.1 สถานะการทำแห้ง

สำหรับการทดลองใน step ที่ 6 ทำการอบชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ อุณหภูมิ -18°C และ -40°C สถานะละ 18 ชิ้น ลักษณะการวางตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 26 และทำการดึงตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง ครั้งละ 2 ชิ้น จำนวน 10 ครั้ง ได้แก่ ชั่วโมงที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 เพื่อนำไปถ่ายภาพ วิเคราะห์ค่าสี ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ระหว่างการทำแห้ง ในการทดลองนี้ทำแห้งจนค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ในแคงโมมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.6 ทำการทดลองจำนวน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการทำแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



- 18 °C

- 40 °C

ภาพที่ 26 การจัดเรียงตัวอย่างสำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งใน step 6 ของแคงโมอบแห้งด้วยเทคนิค AFD

3.5.3.2 การเลือกแบบจำลอง (Model Selection) สำหรับการทำแห้งขึ้นแดงโมโน step 6 ด้วยการทำแห้งแบบ AFD

การทำแห้งช่วงที่ 2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงของขึ้นแดงโมระหว่างการทำแห้งใน step 6 ถูกนำมาคำนวณปริมาณความชื้นฐานเปียก และความชื้นฐานแห้ง ในการศึกษา และทำนายพฤติกรรมการทำแห้งโดยมีมวลเริ่มต้นจากแต่งโมสดก่อนการทำแห้ง และมวลของแห้งในแต่งโมคำนวณจากความชื้นสุดท้ายหลังการทำแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่เข้ามาช่วยอธิบายและทำนายพฤติกรรมการทำแห้ง เช่นการทำแห้งแบบชั้นเดียว (thin-layer drying) เป็นแบบจำลองกึ่งทฤษฎี นิยมนำมาใช้ในการทำนายการทำแห้ง ผลการทำนายที่ได้มีความแม่นยำสูง สามารถบ่งชี้พฤติกรรมการทำแห้งที่สภาวะการทำแห้งต่างๆ ของวัสดุ ชีวภาพ ปริมาณความชื้นลดลงด้วยกลไกการแพร่ของน้ำ ตามกฎข้อที่สองของ Fick เป็นฟังก์ชันของการไล่ระดับความชื้น โดยปริมาณความชื้นถูกแปลงเป็นอัตราส่วนความชื้นแบบไม่ต่อเนื่อง (MR) ดังแสดงในสมการที่ 16

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

สมการที่ 16

โดยที่ M_e และ M_0 คือปริมาณความชื้นที่เวลา t , ปริมาณความชื้นสมดุลจากการทดลองนี้คือ ปริมาณความชื้นสุดท้าย และปริมาณความชื้นเริ่มต้น ในหน่วยกิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมของแห้ง ตามลำดับสำหรับการเลือกแบบจำลองในการทำแห้ง ที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองระหว่างการทำแห้งใน Step ที่ 6 พิจารณา 3 สมการที่นำมาใช้ในการทำนายได้แก่ Lewis (หรือ Newton), Page และ Modified Page ซึ่งนิยมใช้สำหรับการทำแห้งของผลไม้และผัก แสดงดังตารางที่ 8 โดยการทำแห้งในช่วงที่ 2 จะเริ่มหลังสิ้นสุด Step ที่ 5

ตารางที่ 8 สมการที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งขึ้นแดงโมโนใน Step การทำแห้งที่ 6

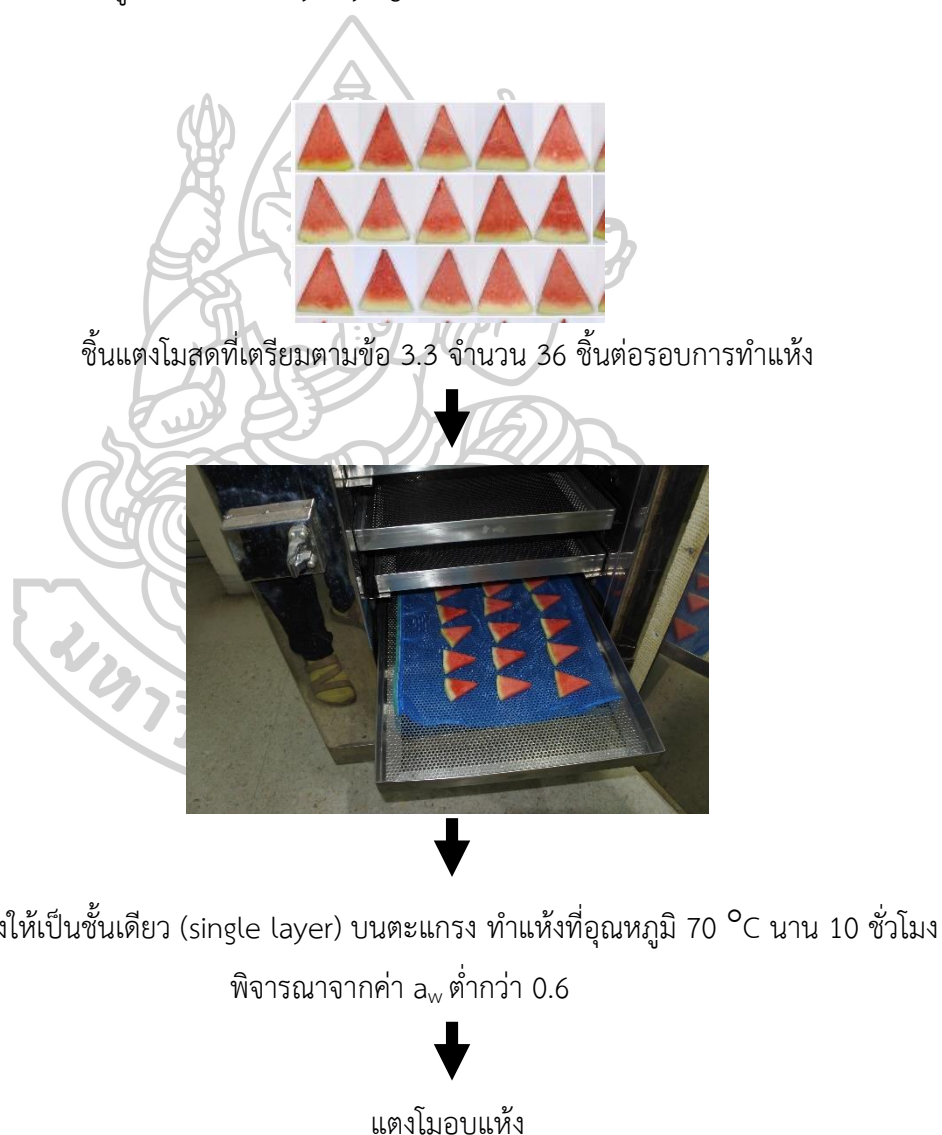
ลำดับที่	ชื่อ	สมการ	อ้างอิง
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	White และคณะ (1981)

3.6 การศึกษาวิธีการทำแห้งต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงโม

ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำการทดลอง ใช้แตงโมสด 2 รุ่น ในแต่ละรุ่นทำการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 3.3 นำไปทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray drying, TD) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Freezdrying, FD) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (Atmospheric freeze drying, AFD)

3.6.1 การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (TD)

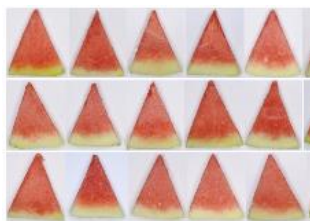
การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Tray drying) มีกระบวนการทำแห้งดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การทำแห้งแตงโมด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (TD) ที่อุณหภูมิ 70 °C

3.6.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ (FD)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Freezdrying, FD) มีกระบวนการทำแห้งดังแสดงในภาพที่ 28



ชั้นแตงโมสดที่เตรียมตามข้อ 3.3 จำนวน 36 ชั้นต่อรอบการทำแห้ง



แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C ด้วย air blast freezer นาน 1 ชั่วโมง



เรียงชั้นแตงโมแช่เยือกแข็งให้เป็นชั้นเดียว (single layer) บนถาด ทำแห้ง นาน 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ - 40 °C นาน 1 ชั่วโมง และ - 80 °C ภายใต้ความดัน 0.5 mBar ตลอดการทำแห้ง



แตงโมอบแห้ง

ภาพที่ 28 การทำแห้งแตงโมด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสุญญากาศ (FD)

3.6.3 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะบรรยากาศ (AFD)

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (Atmospheric freeze drying, AFD) มีกระบวนการทำแห้งดังแสดงในภาพที่ 29



ชั้นแตงโมสดที่เตรียมตามข้อ 3.3 จำนวน 36 ชั้นต่อรอบการทำแห้ง



แบ่งปรับสภาพชิ้นตัวอย่างด้วยการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18°C นาน 6 ชั่วโมง จำนวน 18 ชั้น และ -40°C นาน 1 ชั่วโมง จำนวน 18 ชั้น



เรียงให้เป็นชั้นเดียว (single layer) บนตะแกรง โดยแบ่งชั้นแตงโมแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C จำนวน 6 ชั้นต่อตะแกรง และชั้นแตงโมแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C จำนวน 6 ชั้นต่อตะแกรง จากนั้นปล่อยให้เครื่องทำงานตามโปรแกรมอัตโนมัติ (ตารางที่ 5) นาน 75 ชั่วโมง 36 นาที



แตงโมอบแห้ง

ภาพที่ 29 การทำแห้งแตงโมด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะบรรยากาศ (AFD)

จากนั้นนำแตงโมแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ถ่ายภาพ (ตามข้อ 3.4.2.1) ค่าสี (ตามข้อ 3.4.2.4) และคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น (ตามข้อ 3.4.3.1) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (ตามข้อ 3.4.3.2) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (ตามข้อ 3.4.3.7) สารต้านการเกิดออกซิเดชั่น (ตามข้อ 3.4.3.8) แครโทีนอยด์ทั้งหมด (ตามข้อ 3.4.3.9) และ ปริมาณไลโคปีน (ตามข้อ 3.4.3.10)

3.7 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรมทางสถิติ SPSS Statistics version 23 ทำการเปรียบเทียบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของแตงโมสดจำนวน 8 ชุดการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p = 0.05$) หาความแตกต่างของตัวอย่างสดในแต่ละชุดการทดลอง

คุณภาพด้านสี และค่าทางเคมีของแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง 2 วิธีและทำแห้งโดยเทคนิค AFD วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Paired-Samples T Test ก่อนเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของเทคนิคการแช่เยือกแข็ง และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p = 0.05$) ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของเทคนิคการทำแห้ง



บทที่ 4

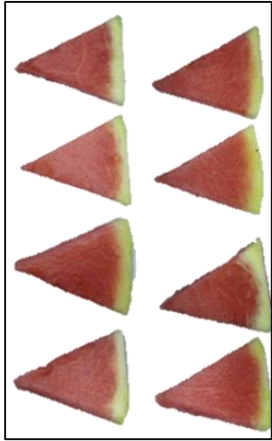
ผลการทดลอง

4.1 คุณภาพของแตงโมสด

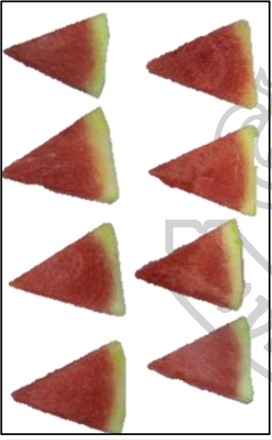
ผลแตงโมที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ย 3.551 ± 0.83 กิโลกรัมต่อผล ความยาวรอบผล อยู่ในช่วง 70.28 ± 0.53 เซนติเมตร ถึง 75.31 ± 0.64 เซนติเมตร และความกว้างรอบผลอยู่ในช่วง 65.11 ± 0.64 เซนติเมตร ถึง 70.22 ± 0.77 เซนติเมตร

ชิ้นแตงโมหลังการตัดแต่ง (ภาพที่ 30) มีน้ำหนักชิ้นตัวอย่าง 12.55 ถึง 17.52 กรัม คุณภาพด้านสี (ตารางที่ 9) ของชิ้นแตงโม บริเวณเนื้อสีแดงมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วง 29.34 ถึง 48.46 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) อยู่ในช่วง 19.44 ถึง 34.83 ค่ามุมของสี (Hue angle) อยู่ในช่วง 28.22 ถึง 35.18 แสดงถึงความเป็นสีแดง บริเวณเนื้อติดเปลือกมีค่า L^* อยู่ในช่วง 47.30 ถึง 69.15 ค่า a^* อยู่ในช่วง - 7.47 ถึง 1.13 และค่ามุมของสีอยู่ในช่วง 85.54 ถึง 103.79 แสดงถึงความเป็นสีเขียวเหลือง คุณภาพทางเคมีของแตงโม ทั้ง 8 รุ่นใกล้เคียงกัน มีปริมาณกรดต่ำ ปริมาณความชื้น และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids; TSS) ทั้ง 8 lot ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

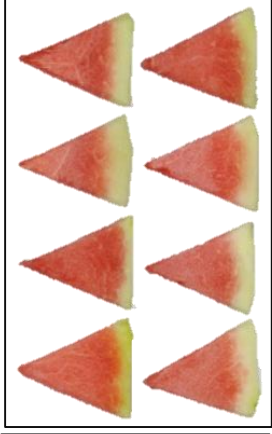




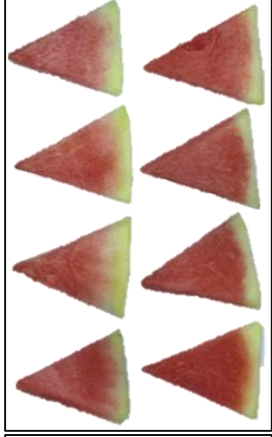
แต่งโมเดลที่ 1



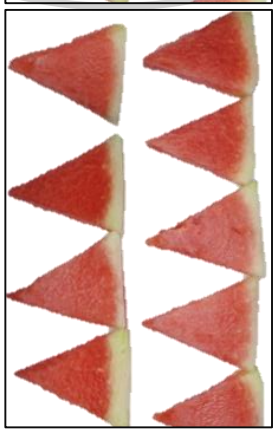
แต่งโมเดลที่ 2



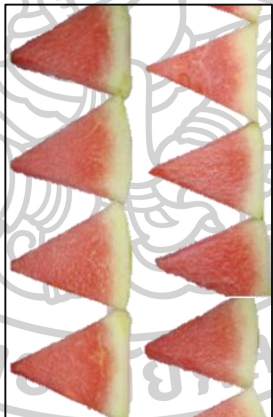
แต่งโมเดลที่ 3



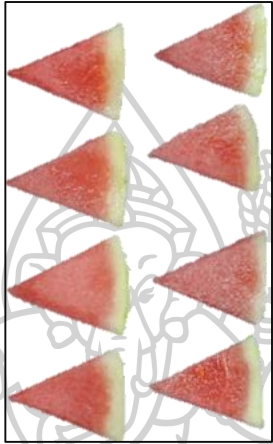
แต่งโมเดลที่ 4



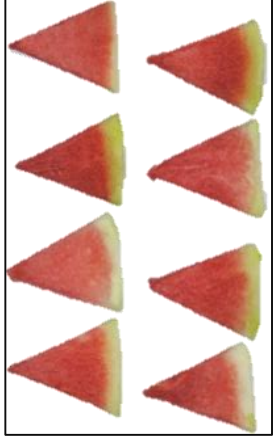
แต่งโมเดลที่ 5



แต่งโมเดลที่ 6



แต่งโมเดลที่ 7



แต่งโมเดลที่ 8

ภาพที่ 30 ลักษณะปรากฏของชิ้นแต่งโมเดลหลังการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้งทั้ง 8 รุ่น

ตารางที่ 9 คุณภาพด้านสีของชิ้นแต่งโมเสค

Properties	แต่งโมสรุ่นที่ 1 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 2 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 3 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 4 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 5 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 6 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 7 (n=36)	แต่งโมสรุ่นที่ 8 (n=36)
ค่าสีเนื้อแต่งโม								
L*	40.66 ± 4.17 ^{ab}	40.95 ± 2.69 ^a	39.69 ± 4.34 ^{abc}	38.09 ± 2.83 ^c	38.94 ± 2.74 ^{bc}	40.65 ± 4.07 ^{ab}	40.17 ± 3.43 ^{ab}	39.06 ± 3.48 ^{bc}
a*	23.85 ± 3.16 ^{bc}	24.83 ± 2.36 ^{bc}	27.01 ± 3.13 ^a	25.15 ± 2.99 ^b	24.79 ± 2.09 ^{bc}	27.25 ± 2.01 ^a	24.19 ± 2.48 ^{bc}	23.70 ± 2.66 ^c
b*	15.11 ± 1.99 ^b	13.86 ± 1.63 ^{cd}	16.52 ± 2.11 ^a	15.32 ± 2.25 ^b	14.64 ± 1.52 ^{bc}	16.36 ± 1.76 ^a	13.70 ± 1.47 ^{de}	12.93 ± 1.58 ^e
h (hue angle)	32.36 ± 1.09 ^a	29.13 ± 0.94 ^{de}	31.44 ± 1.48 ^b	31.27 ± 1.22 ^b	30.52 ± 0.95 ^c	30.92 ± 1.44 ^{bc}	29.52 ± 0.99 ^d	28.60 ± 0.96 ^e
Chroma	28.24 ± 3.70 ^{bcd}	28.44 ± 2.83 ^{bcd}	31.68 ± 3.70 ^a	29.45 ± 3.69 ^b	28.79 ± 2.54 ^{bc}	31.80 ± 2.56 ^a	27.80 ± 2.84 ^c	27.01 ± 3.06 ^d
ค่าสีเนื้อติดเบสสีอก								
L*	58.20 ± 2.63 ^d	59.54 ± 3.17 ^{cd}	62.75 ± 3.05 ^a	60.09 ± 4.04 ^c	58.06 ± 2.92 ^d	57.88 ± 3.27 ^d	61.78 ± 4.25 ^{ab}	60.21 ± 3.76 ^{bc}
a*	-0.19 ± 2.35 ^a	-2.66 ± 1.47 ^{bc}	-3.43 ± 2.09 ^c	-2.36 ± 1.56 ^b	-2.70 ± 1.44 ^{bc}	-3.32 ± 1.88 ^c	-2.31 ± 1.46 ^b	-2.54 ± 1.60 ^{bc}
b*	16.51 ± 2.76 ^d	17.79 ± 3.41 ^{cd}	23.49 ± 5.37 ^a	18.71 ± 3.52 ^c	19.10 ± 4.79 ^c	20.99 ± 4.88 ^b	17.11 ± 2.53 ^{cd}	18.04 ± 3.30 ^{cd}
h (hue angle)	89.60 ± 8.17 ^b	98.25 ± 3.43 ^a	97.68 ± 3.76 ^a	96.72 ± 3.59 ^a	97.73 ± 3.01 ^a	98.37 ± 3.66 ^a	97.53 ± 4.23 ^a	97.60 ± 3.79 ^a
Chroma	16.67 ± 2.77 ^d	18.03 ± 3.54 ^{cd}	23.78 ± 5.58 ^a	18.90 ± 3.66 ^c	19.32 ± 4.90 ^c	21.29 ± 5.08 ^b	17.32 ± 2.61 ^{cd}	18.26 ± 3.45 ^{cd}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบเป็นแถวเดียวกัน

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของแตงโมสดอยู่ในช่วง 8.0 ถึง 9.0 °Brix ซึ่งเป็นแตงโมที่มีคุณภาพดี มีระดับความสุกเหมาะต่อการบริโภค (มชก, 2555) ปริมาณความชื้นฐานเปียก (% wb) และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ของแตงโม 8 lot มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 10) น้ำส่วนมากในแตงโมเป็นน้ำอิสระ ซึ่งเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆส่งผลให้เกิดการเน่าเสียง่าย เช่น เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ การเปลี่ยนสี การปลดปล่อยน้ำในเนื้อเยื่อของชิ้นแตงโม (juice leakage) การสูญเสียเนื้อสัมผัส และการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Mendoza และคณะ, 2019) ค่าความเป็นกรด - ด่าง อยู่ในช่วง 5.40 - 5.72 แสดงถึงความเป็นกรดอ่อน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมีค่า 8.2 - 8.8 °Brix โดยน้ำตาลที่พบมากในแตงโมคือน้ำตาลฟรุกโตส ซูโครส และน้ำตาลกลูโคส โดยพบปริมาณน้ำตาลซูโครส และกลูโคสประมาณ 20 ถึง 40% ในขณะที่น้ำตาลฟรุกโตสมีปริมาณ 30 - 50% ของน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณกรดทั้งหมด (%Acidity) มีค่า 0.012 - 0.013 ซึ่งกรดหลักที่พบมากในแตงโมคือ กรดมาลิก (Muhammad และคณะ, 2020)



ตารางที่ 10 คุณภาพทางเคมีของชิ้นแฉงโมเสด

Properties	แฉงโมรุ่มที่ 1	แฉงโมรุ่มที่ 2	แฉงโมรุ่มที่ 3	แฉงโมรุ่มที่ 4	แฉงโมรุ่มที่ 5	แฉงโมรุ่มที่ 6	แฉงโมรุ่มที่ 7	แฉงโมรุ่มที่ 8
ปริมาณความชื้น (% w.b.) ^{ns}	93.27 ± 1.11	92.71 ± 0.48	92.60 ± 0.72	93.37 ± 0.29	92.71 ± 0.23	93.32 ± 0.70	93.69 ± 0.21	92.95 ± 0.08
ค่าอเทอร์แอคตีวิตี้	0.9849 ± 0.00 ^{bc}	0.9879 ± 0.00 ^b	0.9929 ± 0.00 ^a	0.9881 ± 0.00 ^b	0.9795 ± 0.00 ^d	0.9823 ± 0.00 ^{cd}	0.9920 ± 0.00 ^a	0.9930 ± 0.00 ^a
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (^o Brix) ^{ns}	8.27 ± 0.13	8.36 ± 0.27	8.26 ± 0.13	8.26 ± 0.13	8.22 ± 0.25	8.38 ± 0.09	8.31 ± 0.20	8.31 ± 0.24
ค่ากรด - ต่าง	5.29 ± 0.24 ^d	5.09 ± 0.13 ^f	5.28 ± 0.02 ^d	5.22 ± 0.06 ^e	5.67 ± 0.04 ^a	5.43 ± 0.03 ^c	5.63 ± 0.04 ^b	5.62 ± 0.04 ^b
ปริมาณกรดทั้งหมด (%Acidity)	0.015 ± 0.00 ^{cd}	0.015 ± 0.00 ^{cd}	0.013 ± 0.00 ^{cd}	0.013 ± 0.00 ^{cd}	0.016 ± 0.00 ^c	0.012 ± 0.00 ^d	0.07 ± 0.00 ^b	0.17 ± 0.01 ^a

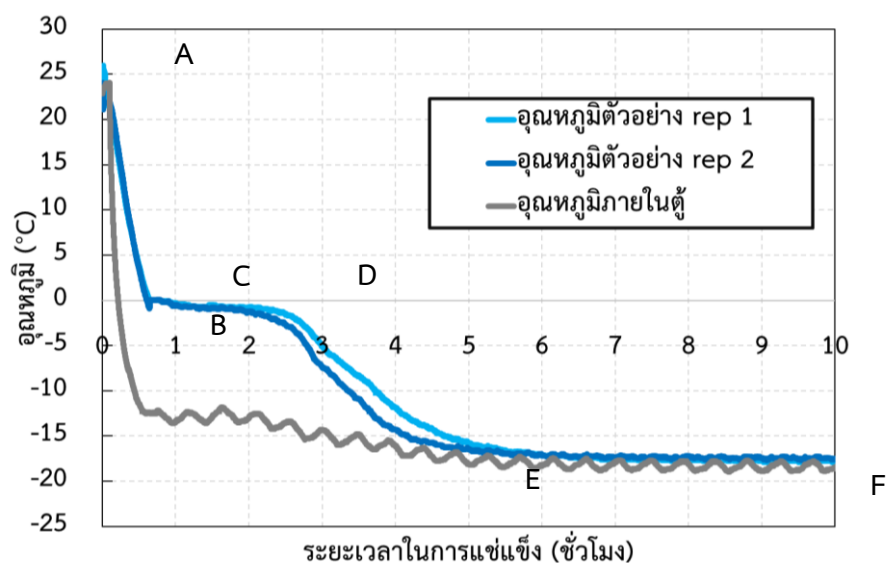
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

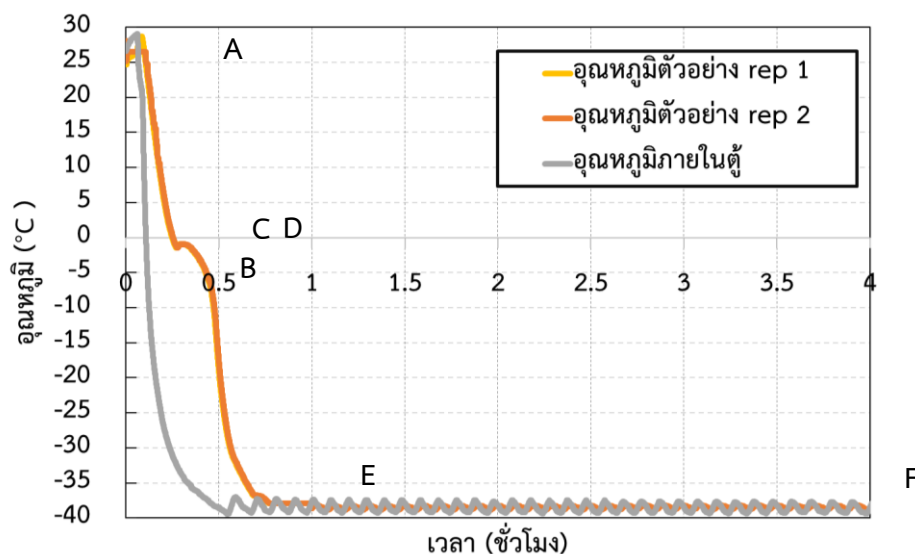
4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็ง

จากการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 สภาวะพบว่าปริมาณน้ำในชิ้นแต่งโมวิเคราะห์จากปริมาณความชื้น (% wb) และของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของแต่งโมทั้ง 8 lot ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึก และปริมาณผลึกน้ำแข็งระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง จากกราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งพบว่า อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่ 1 ของการแช่เยือกแข็งทั้ง -18°C และ -40°C จากภาพที่ 31 พบว่าการแช่เยือกแข็งที่ -18°C อุณหภูมิตัวอย่างแสดงในเส้นสีฟ้า และสีน้ำเงินค่อยๆลดลง โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้อุณหภูมิจากกลางชิ้นแต่งโมมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกายในตู้แช่เยือกแข็ง ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่ -40°C (ภาพที่ 32) ใช้เวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิจากกลางชิ้นแต่งโมมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกายในตู้แช่เยือกแข็ง

อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งนี้จึงนำมาเป็นพารามิเตอร์ในการจำแนกเป็นการแช่เยือกแข็งออกเป็น 2 แบบคือ การแช่เยือกแข็งแบบช้า และการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Yanat และคณะ, 2018)



ภาพที่ 31 กราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็ง ที่ -18°C



ภาพที่ 32 กราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิตั้งการแช่เยือกแข็ง ที่ -40°C

จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 แบบ แบ่งได้เป็น 4 ช่วง ช่วงที่ 1 (A - B) ของการแช่เยือกแข็งแสดงให้เห็นการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เกิดจากการคายความร้อนของชิ้นแ่งโมจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของชิ้นแ่งโมและอุณหภูมิภายในตู้แช่เยือกแข็ง ในช่วงนี้อุณหภูมิลดต่ำลงแต่ยังไม่มีการเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง เนื่องจากอุณหภูมียังลดลงไม่มากพอจะเกิดนิวเคลียส ช่วงที่ 2 (B - C) จากกราฟจะสังเกตเห็นว่ากราฟลดลงไปต่ำกว่า 0°C และขึ้นมาในช่วงเวลาสั้นๆ เรียกจุดนี้ว่าจุดซูเปอร์คูลิ่ง (super cooling) หรือการทำให้เย็นยิ่งยวด โดยผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นระหว่างที่เกิด super cooling ในช่วงนี้ความร้อนจะถูกกำจัดออกในรูปของความร้อนแฝง (Charoenrein และ Harnkarnsujarit, 2017) ทำให้น้ำเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นสามารถเรียกช่วงที่ 1 และ 2 ว่าการ Precooling ในช่วงที่ 3 (C - D) การแช่เยือกแข็งที่ -18°C กราฟค่อนข้างคงที่เนื่องจากอุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ส่งผลให้นิวเคลียสของน้ำเริ่มก่อตัวได้ช้าเพราะต้องใช้เวลามากในการก่อตัวเป็นนิวเคลียส จากการนำความร้อนของอากาศในการแช่เยือกแข็งที่ -18°C มีน้อย ในกระบวนการจึงส่งผลให้เกิดการโตของผลึกมากกว่าการเกิดนิวเคลียสใหม่ เพราะใช้พลังงานต่ำกว่าผลึกน้ำแข็งที่ได้จึงมีขนาดใหญ่

ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่ -40°C ใช้เวลาสั้นมากในการเปลี่ยนสถานะ (Phase transition) โดยน้ำในชิ้นแ่งโมจะกลายเป็นน้ำแข็งทั่วทั้งชิ้นแ่งโม เกิดนิวเคลียสปริมาณมากเนื่องจากชิ้นแ่งโมสามารถคายความร้อนออกจากตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วจากอากาศเย็นที่พัดระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง เมื่อน้ำในชิ้นแ่งโมเริ่มจับตัวเป็นผลึกน้ำแข็งความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในชิ้นแ่งโมจะเพิ่มสูงขึ้น ช่วงที่ 4 (D-E) กราฟมีลักษณะลดลงอีกครั้งเนื่องจาก

สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำที่ยึดติดกับโครงสร้างของสารละลายเหล่านี้ ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการกำจัดความร้อนแฝงเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง กราฟในช่วงนี้จึงมีลักษณะลดต่ำลง เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมากพอ น้ำในชั้นแช่แข็งทั้งหมดจะกลายเป็น ผลึกน้ำแข็งสมบูรณ์ โดยจุด E เป็นจุดที่ของเหลวในชั้นแช่แข็งกลายเป็นของแข็งแบบสมบูรณ์ (Tan และคณะ, 2021)

จากการทดลองพบว่า การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C ใช้เวลานานกว่าการแช่เยือกแข็งที่ อุณหภูมิ -40°C ที่ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็ง 1 ชั่วโมง เนื่องจาก Airblast Freezer เป็น เครื่องมือที่ใช้ลมเย็นพัดด้วยอัตราเร็วและแรงเป็นตัวกลางหมุนเวียนในระบบ ทำหน้าที่พาความร้อน ออกจากชั้นแช่แข็งได้รวดเร็วซึ่งต่างจากการแช่เยือกแข็งที่ -18°C ภายในตู้แช่แข็ง ซึ่งมีการหมุนเวียน ของอากาศน้อยมาก ส่งผลต่ออัตราการพาความร้อนที่น้อย (Prakobsang และ Pornchalermpong, 2018)

ภาพที่ 33 แสดงให้เห็นลักษณะของชั้นแช่แข็งโมหลังผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน อัตราการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งในชั้นแช่แข็ง พบว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C ลักษณะของขนาดผลึกน้ำแข็งที่ปกคลุมบริเวณผิวหน้าชั้นแช่แข็งมีความละเอียดมากกว่า เมื่อ มองด้วยตาสังเกตุเห็นเป็นผลึกสีขาวขนาดเล็ก กระจายตัวทั่วทั้งชั้นเกิดการกระเจิงของแสง มากกว่าชั้นแช่แข็งโมแช่เยือกแข็งจึงมองเห็นเป็นสีแดงอ่อน แต่ชั้นแช่แข็งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ อุณหภูมิ -18°C พบว่าชั้นแช่แข็งโมมีสีแดงเข้มกว่า เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ แช่เยือกแข็งมีขนาดใหญ่ เพราะโครงสร้างของชั้นแช่แข็งโมถูกทำลายจากการโตของผลึกน้ำแข็งระหว่าง กระบวนการแช่เยือกแข็ง การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกอย่างช้าๆทำให้โครงสร้างเนื้อเยื่อถูกทำลาย โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าชั้นแช่แข็งโม รงควัตถุสีแดงจึงสามารถออกมานอกเซลล์ส่งผลให้สีของชั้นแช่แข็งโม ที่อุณหภูมิ -18°C มีสีแดงเข้มกว่าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณของไลโคปีน (Rayman Ergün และคณะ, 2020)



การแช่เยือกแข็งที่ -18°C

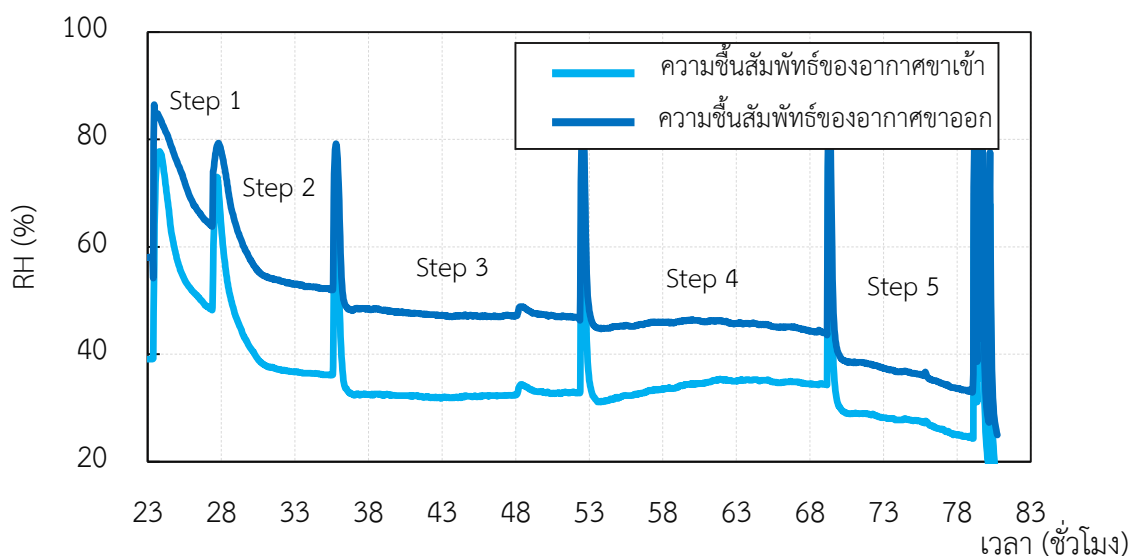
การแช่เยือกแข็งที่ -40°C

ภาพที่ 33 ลักษณะชั้นแช่แข็งโมหลังการแช่เยือกแข็ง

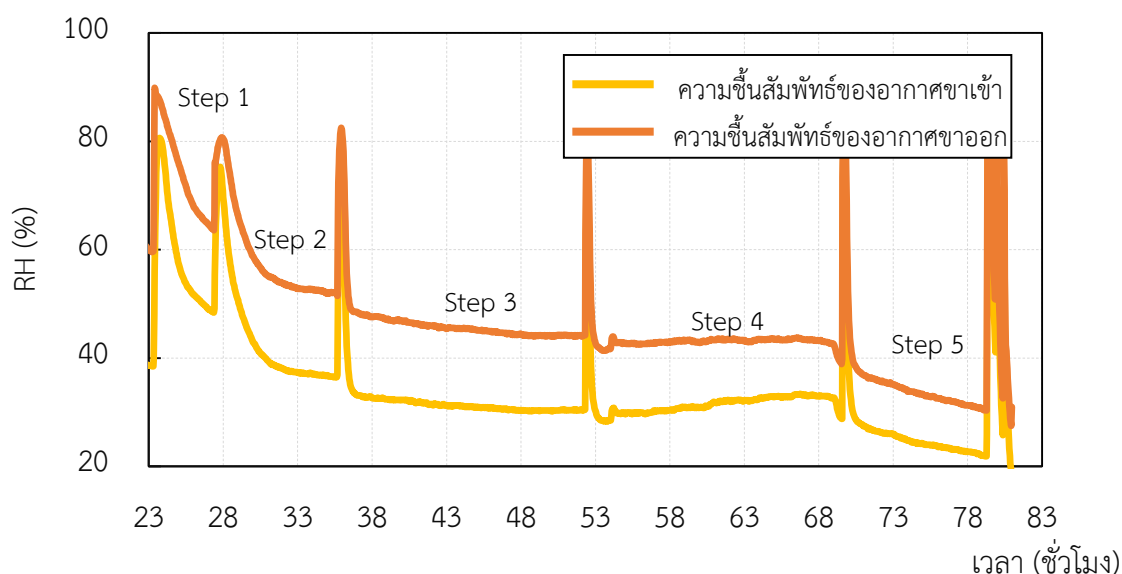
4.3 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแคงโมใน step 1 - 5 ด้วย AFD

4.3.1 จลนพลศาสตร์การทำแห้งขึ้นแคงโมใน step ที่ 1 – 5 ด้วยการทำแห้งแบบ AFD

การทำ modelling ทางอ้อม จากข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าห้องทำแห้ง และอากาศหลังออกจากห้องทำแห้งใน Step ที่ 1-5 ของขึ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ และขึ้นแคงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากห้องทำแห้งมากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าห้องทำแห้งในทุกการทดลอง ดังแสดงภาพที่ 34 และภาพที่ 35 แสดงให้เห็นความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นในอากาศเนื่องจากอากาศเย็นแห้งที่พัดผ่านผิวน้ำขึ้นแคงโมเกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างน้ำแข็งบริเวณผิวน้ำขึ้นแคงโมและอากาศที่พัดผ่านขึ้นแคงโม จากความแตกต่างของความดันไอของน้ำ



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทำแห้งแคงโมใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$

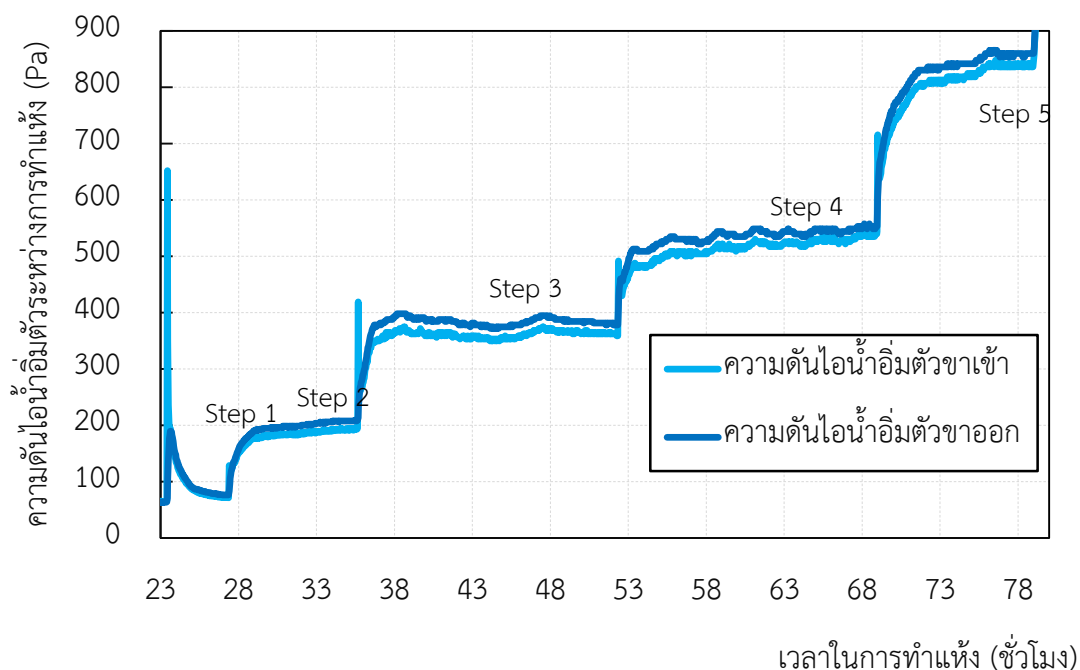


ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทำแห้งแ่งโมโนใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากข้อมูลข้างต้นสามารถคำนวณหามวลของน้ำในอากาศที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการการเคลื่อนที่ของก๊าซ จากความดันไอของน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยน้ำที่เกินมาจะเป็นน้ำที่มาจากชั้นแ่งโม เมื่อพิจารณา ค่าความดันไอของน้ำในอากาศขาเข้าและอากาศขาออกโดยใช้สมการของ Goff และ Gratch พบว่าความดันไอของน้ำในอากาศขาออกมีปริมาณมากกว่าอากาศขาเข้า เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการทำแห้งพบว่าใน step ที่ 1 ถึง 4 อุณหภูมิในการทำแห้งมีค่าเป็นลบ จากกราฟ triple point ของน้ำ (ภาพที่ 13) พบว่าที่อุณหภูมิต่ำน้ำจะอยู่ในสถานะของแข็ง ณ สภาวะความดันบรรยากาศ น้ำแข็งสามารถระเหิดได้ในอัตราการระเหิดที่ช้า สังเกตได้จากการเกิดควันสีขาวรอบก้อนน้ำแข็ง (Murphy และคณะ, 2005) ดังนั้นใน step ที่ 1 - 4 ของการทำแห้งแบบ AFD น้ำออกจากชั้นแ่งโมด้วยการระเหิด โดยอาศัยความดันไอของน้ำที่ต่างกันระหว่างน้ำแข็งที่อยู่บริเวณผิวหน้าแ่งโม กับอากาศรอบชั้นแ่งโม (Nakagawa และคณะ, 2021)

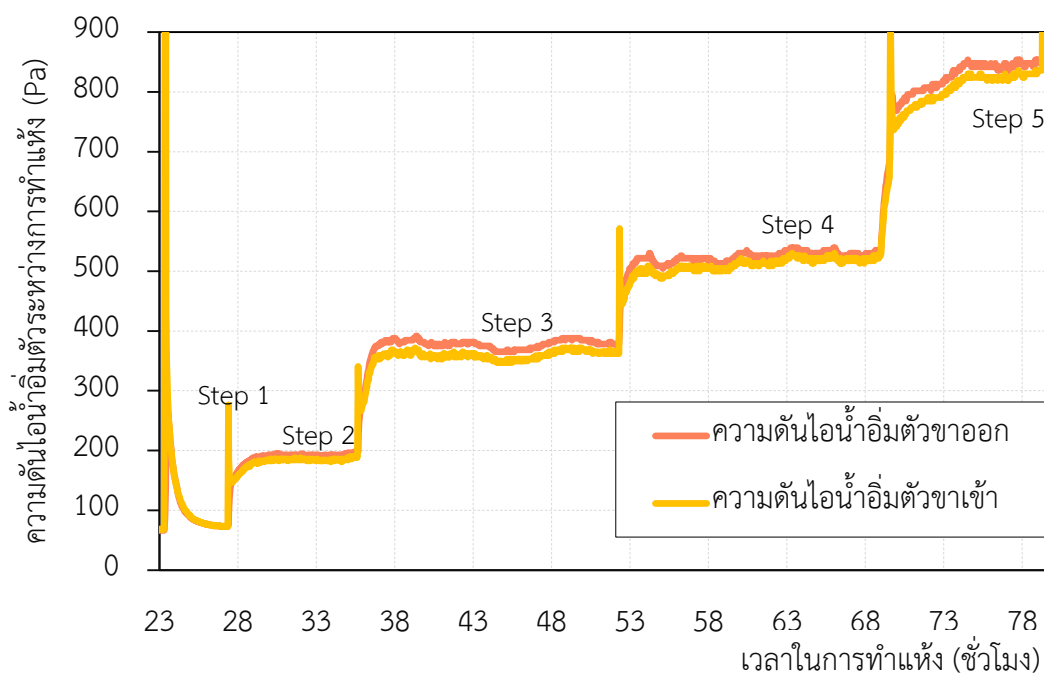
ในขณะที่ step ที่ 5 อุณหภูมิในการทำแห้งคือ $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ การสูญเสียน้ำจึงเกิดจากกระบวนการระเหยหรือการกลายเป็นไอ โดยอาศัยการถ่ายเทมวลจากผิวแ่งโมที่มีความชื้นสูงไปยังอากาศเย็นที่มีความชื้นต่ำกว่า การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าการทำแห้งใน step ที่ 1 - 5 เป็นไปตามสมมุติฐานสังเกตได้จากกราฟเส้นสีน้ำเงิน คือความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศขาออก

มีค่ามากกว่าความดันไอน้ำอิมตัวของอากาศขาเข้า แสดงให้เห็นว่ามีน้ำเพิ่มขึ้นในระบบทุก step การทำแห้ง (ภาพที่ 36)



ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C

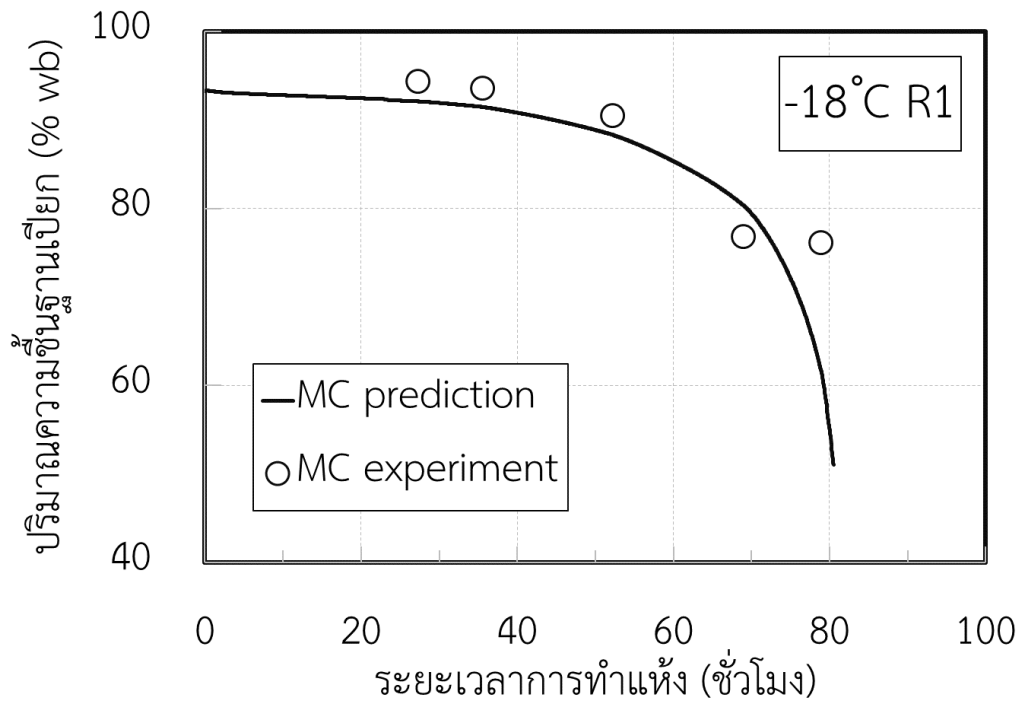
ในขณะที่ขึ้นเตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C พบว่า การทำแห้งใน step ที่ 1 ชั่วโมงที่ 24 ถึงชั่วโมงที่ 27 ความดันไอน้ำอิมตัวของอากาศขาออกมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำอิมตัวของอากาศขาเข้าในช่วงเวลาสั้นๆ (ภาพที่ 37) เนื่องจากอุณหภูมิของขึ้นเตงโมมีค่าติดลบมากจากกระบวนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศภายใน chamber ในการทำแห้งมีอุณหภูมิ -24°C จึงส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การตกผลึกกลับ (desublimation) จากไอในอากาศขาเข้าโดยการเกิด desublimation จากน้ำในสถานะก๊าซในอากาศเป็นน้ำแข็งเกาะบริเวณขึ้นเตงโม สังเกตได้จากขึ้นเตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C หลังจากผ่านการทำแห้งใน step ที่ 1 ยังพบเกล็ดน้ำแข็งสีขาวปกคลุมทั่วผิวหน้าขึ้นเตงโม (Moran และ Shapiro, 1992)



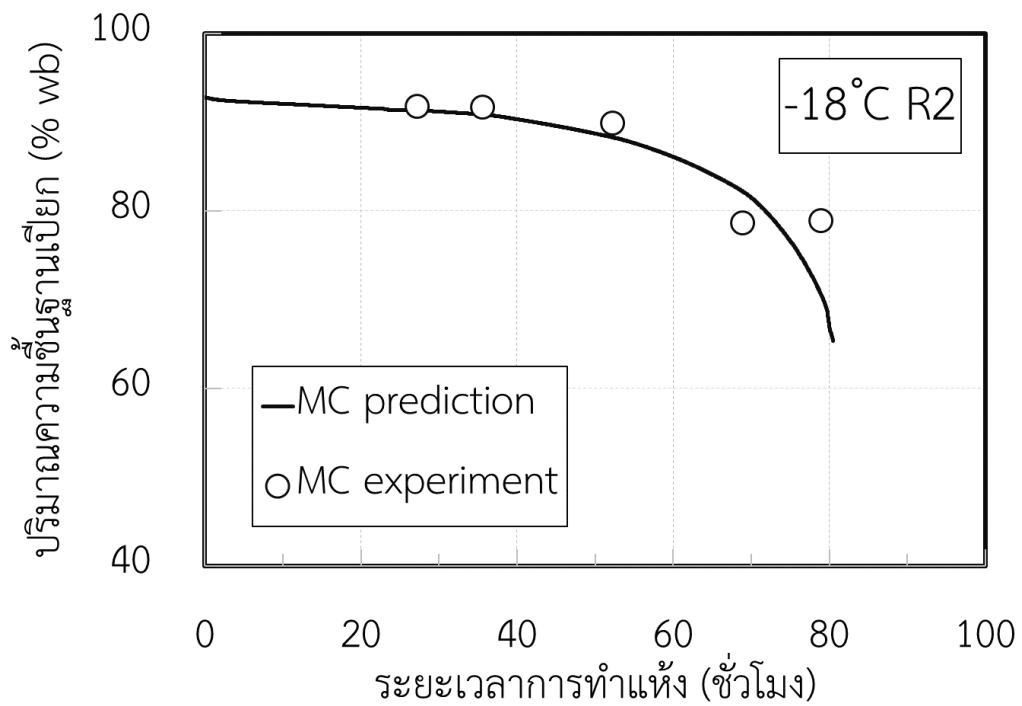
ภาพที่ 37 การเปลี่ยนแปลงความดันไอของน้ำระหว่างการทำแห้งแ่งโมใน step 1 - 5 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

แต่การเกิด desublimation ไม่ส่งผลต่อการทำแห้งใน step ที่ 1 เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น การทำแห้งใน step ที่ 2 ถึง 5 เป็นไปตามสมมุติฐานที่คาดไว้สังเกตจากกราฟความดันไอน้ำอิ่มตัว พบว่าความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศขาออกมีค่ามากกว่าความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศขาเข้า แสดงให้เห็นว่ามีน้ำเพิ่มขึ้นในระบบ ซึ่งมาจากชั้นแ่งโม

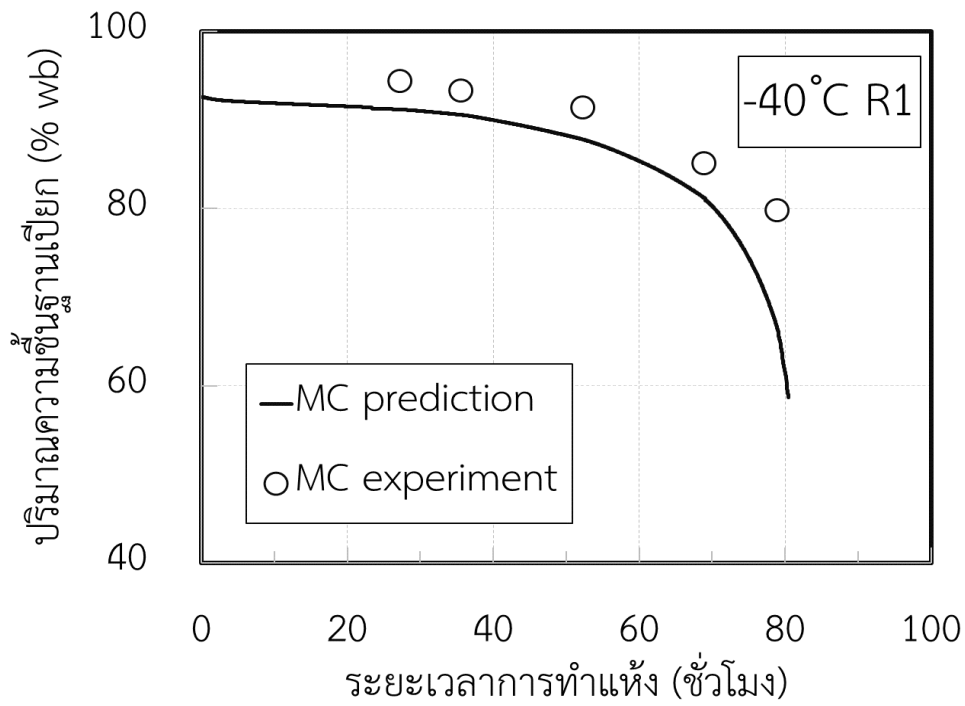
ปริมาณน้ำของชั้นแ่งโมที่สูญเสียระหว่างการทำแห้งในแต่ละ step การทำแห้ง เกิดจากการถ่ายเทมวลระหว่างชั้นแ่งโมและอากาศที่ไหลผ่าน มีค่าเท่ากับน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศที่ออกจากระบบการทำแห้ง ดังนั้นปริมาณน้ำดังกล่าวจะเท่ากับน้ำของชั้นแ่งโมที่ลดลง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาความชื้นที่หายไปของชั้นแ่งโมได้ เมื่อเปรียบเพื่อเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณความชื้นที่ลดลง พบว่าความชื้นของชั้นแ่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใน step 1 - 3 ลดลงอย่างช้าๆ แต่ใน step ที่ 4 ปริมาณความชื้นของชั้นแ่งโมระหว่างการทำแห้งมีการลดลงอย่างมากจากการหดตัวของชั้นแ่งโมดังแสดงในภาพที่ 38 และ 39 ข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8216 และ 0.8877 และความชื้นของชั้นแ่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใน step 1 - 5 ลดลงอย่างช้าๆ ดังแสดงในภาพที่ 40 และ 41 โดยข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9921 และ 0.9991 ซึ่งมีทิศทางไปในแนวเดียวกันกับเส้นที่ได้จากการทำนาย



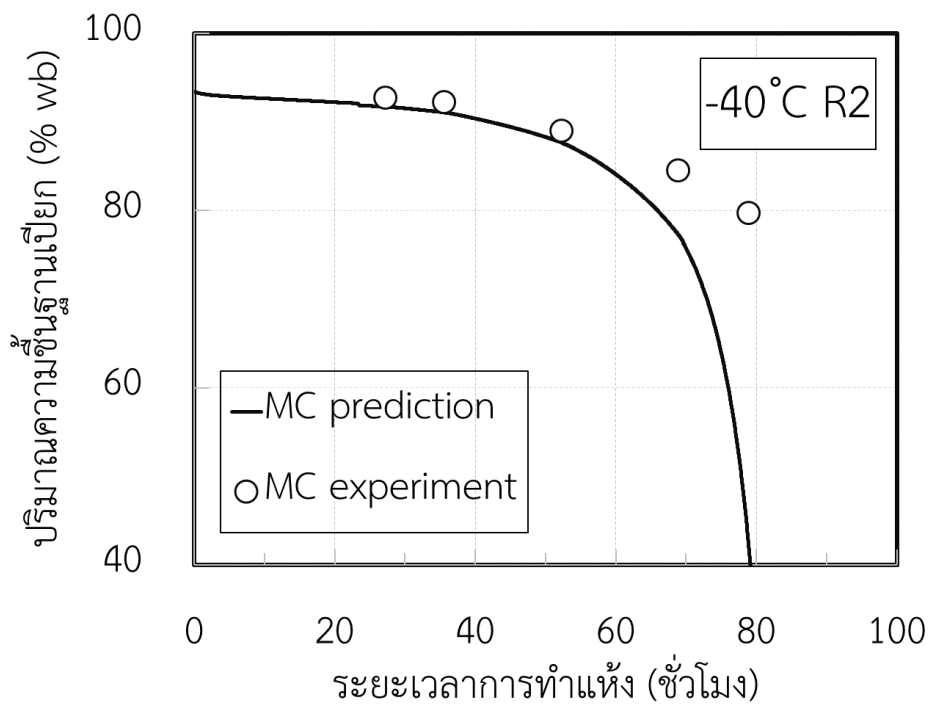
ภาพที่ 38 ความชื้นของซินแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 1



ภาพที่ 39 ความชื้นของซินแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 2



ภาพที่ 40 ความชื้นของซินแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 1



ภาพที่ 41 ความชื้นของซินแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C Step 1 - 5 การทดลองที่ 2

จากการหาพฤติกรรมการทำแห้งแบบ AFD ทางอ้อมพบว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำแนวคิดข้างต้นมาใช้ในการทำนายความชื้นของแต่งโมระหว่างการทำแห้ง ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในแต่ละ step การทำแห้งแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในแต่ละ step การทำแห้ง

Step ทำแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	การแช่เยือก แข็งที่ - 18°C	ปริมาณน้ำที่ สูญเสีย (กรัม)	การแช่เยือก แข็งที่ - 40°C	ปริมาณน้ำที่ สูญเสีย (กรัม)
1	-24	240	sublimate	0.012±0.00 ^c	sublimate	0.015±0.01 ^c
2	-16.5	500	sublimate	0.025±0.01 ^c	sublimate	0.030±0.00 ^c
3	-8.7	1000	sublimate	0.110±0.01 ^{ab}	sublimate	0.105±0.01 ^b
4	-4.5	1000	sublimate	0.125±0.01 ^a	sublimate	0.125±0.01 ^a
5	1.6	600	evaporation	0.90±0.00 ^b	evaporation	0.095±0.01 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C พบว่าใน step ที่ 3 และ 4 มีปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในระบบการทำแห้งมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทำแห้งใน step อื่นๆ เนื่องจากกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในชั้นแต่งโม โครงสร้างของเนื้อเยื่อแต่งโมถูกทำลายมากจึงสามารถเกิดการสูญเสียน้ำระหว่างการทำแห้งได้ง่ายกว่า ในขณะที่ชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C เกิดการสูญเสียน้ำใน step ที่ 4 มากที่สุด แต่เมื่อเทียบการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 แบบ พบว่าในแต่ละ step การทำแห้งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C ใน step ที่ 1 ถึง 5 มีปริมาณน้ำเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในระบบเท่ากับ 0.37 ± 0.03 กรัม และชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C ใน step ที่ 1 ถึง 5 มีปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในระบบเฉลี่ยเท่ากับ 0.37 ± 0.02 กรัม ตามลำดับ

4.3.2 คุณภาพขึ้นแดงโม่ระหว่างการทำแห้งใน Step 1 – 5 ด้วยการทำแห้งแบบ AFD

จากการทดลองพบว่าขึ้นแดงโม่หลังการทำแห้งใน step ที่ 1 มีลักษณะแข็ง พบเกิดน้ำแข็งปกคลุมบริเวณผิวหน้าของขึ้นแดงโม่ เมื่อหั่นขึ้นแดงโม่พบว่าน้ำภายในขึ้นแดงโม่ยังมีผลึกเป็นน้ำแข็งขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C มีเกล็ดน้ำแข็งขนาดเล็กและละเอียดกว่าเมื่อเทียบกับ การแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C เนื่องจากมีอัตราการแช่เยือกแข็งเร็ว ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดความร้อนภายในโม่เลกุลของน้ำ มีปริมาณการเกิดนิวเคลียสซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกน้ำแข็งมาก ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดน้ำแข็งขนาดเล็กกระจายทั่วบริเวณพื้นผิวของขึ้นแดงโม่ แต่ไม่พบเกิดน้ำแข็งดังกล่าวในขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C (Tan และคณะ, 2021)

ขึ้นแดงโม่หลังการทำแห้งใน step ที่ 2 และ 3 มีลักษณะแข็ง มีความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น เมื่อหั่นขึ้นแดงโม่พบว่าบริเวณผิวของขึ้นแดงโม่มีลักษณะเหนียวเล็กน้อย เนื่องจากเนื้อเยื่อเริ่มหดตัว บริเวณผิวหน้าของขึ้นแดงโม่จากการสูญเสียน้ำอิสระระหว่างการทำแห้ง พบว่าการหดตัวนี้เกิดขึ้นทั้งบริเวณเนื้อสีแดงและเนื้อติดเปลือก ภายนอกขึ้นแดงโม่ไม่พบเกิดน้ำแข็งปกคลุมบริเวณผิวหน้า แต่เมื่อหั่นขึ้นแดงโม่พบว่าภายในขึ้นแดงโม่ยังมีผลึกน้ำแข็งอยู่

หลังการทำแห้งใน step ที่ 4 โครงสร้างขึ้นแดงโม่มีลักษณะยุบตัวอย่างเห็นได้ชัด เนื้อสีแดงมีลักษณะนิ่ม มีน้ำเชื่อมเหนียวเหนอะทั่วบริเวณเนื้อสีแดง ไม่พบเกิดน้ำแข็งปกคลุมบริเวณผิวหน้าของขึ้นแดงโม่ แต่เมื่อหั่นภายในพบว่าน้ำภายในขึ้นแดงโม่มีผลึกน้ำแข็งบริเวณเนื้อติดเปลือกเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ขึ้นแดงโม่หลังการทำแห้งใน step ที่ 5 ขึ้นแดงโม่มีลักษณะนิ่มมากขึ้น ความเหนียวเหนอะเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่พบเกิดน้ำแข็งปกคลุมบริเวณผิวหน้าหรือภายในขึ้นแดงโม่ ขึ้นแดงโม่แห้งมีการหดตัวทั้งบริเวณเนื้อสีแดง และเนื้อติดเปลือกอย่างมาก











เมื่อเปรียบเทียบขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ต่างกัน พบว่าขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C มีลักษณะหดตัวและมีความเหนอะ (ตารางที่ 12) มากกว่าขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C (ตารางที่ 13) เนื่องจากระหว่างการทำแห้งเกิดการสูญเสียน้ำจากกระบวนการระเหย เมื่อช่องว่างในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ร่วมกับความเข้มข้นของน้ำตาลในขึ้นแดงโม่ที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารต่างๆในขึ้นแดงโม่ช้าลง สารละลายน้ำตาลจึงค่อยๆเกาะตัวและเชื่อมให้โครงสร้างยึดติดกันจนโครงสร้างของขึ้นแดงโม่เคลื่อนที่เข้ามาหากัน จนเกิดการหดตัว (Rahimi และคณะ, 2014)

โครงสร้างที่มีรูปพรุนขนาดใหญ่จะหดตัวรุนแรงกว่าโครงสร้างที่มีรูปพรุนขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C มีลักษณะหดตัวมากเพราะผลึกของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งมีขนาดใหญ่ โครงสร้างจึงถูกทำลายจากการโตของผลึกน้ำแข็ง และสารละลายน้ำตาลมีความเข้มข้นสูงกว่าขึ้นแดงโม่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C เมื่อ











ปริมาณน้ำลดลงระหว่างการทำแห้งจึงส่งผลให้ให้เกิดการหดตัวที่รุนแรงสังเกตได้จากความเหนอะที่มากกว่า (Phupaichitkun, 2008)

นอกจากนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจากอิทธิพลของ Glass transition temperature, T_g ร่วมด้วย พบว่าเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g จะส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง จากของแข็งเปลี่ยนไปมีลักษณะนิ่มคล้ายยาง เพื่อให้ง่ายต่อการแพร่ของน้ำภายในชิ้นอาหารระหว่างการทำแห้ง การเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งแบบ AFD ได้ (Nakagawa และคณะ, 2020) แต่ก็มีน้ำตาลฟรุกโตส และไฟเบอร์เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่า T_g ของน้ำตาลฟรุกโตสมีค่าเท่ากับ $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่จะมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงเมื่อมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น (Chuntranuluck และคณะ, 2007)

ตารางที่ 12 ลักษณะปรากฏของชิ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระหว่างการทำแห้งแบบ AFD ใน step 1 - 5

Step การทำแห้ง	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2
Step ที่ 1		
Step ที่ 2		
Step ที่ 3		
Step ที่ 4		
Step ที่ 5		

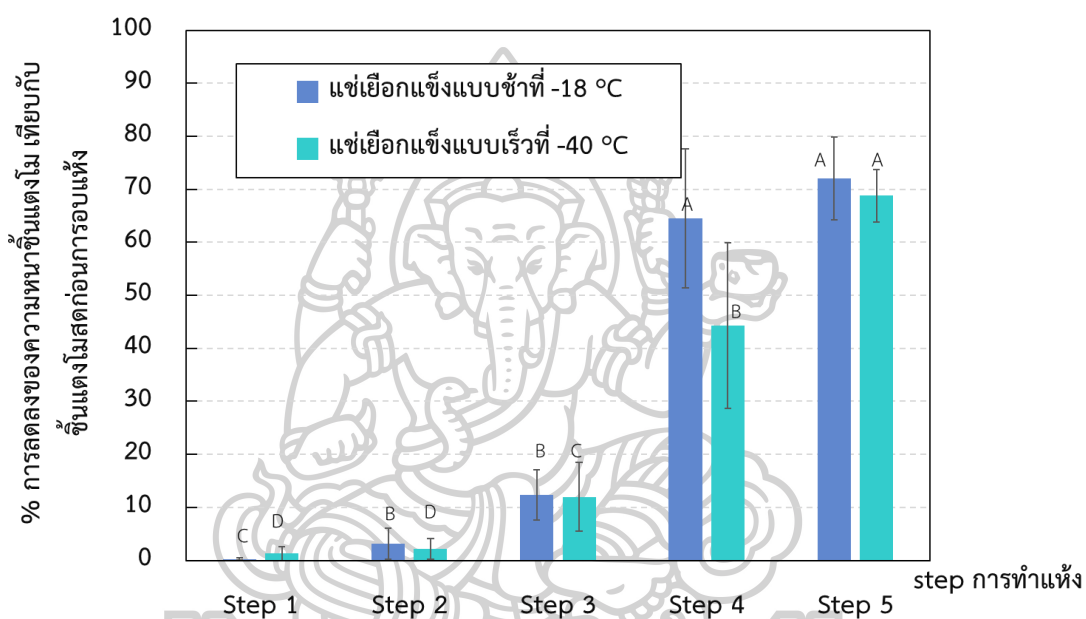
ตารางที่ 13 ลักษณะปรากฏของชิ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40 °C ระหว่างการทำแห้งแบบ AFD ใน step 1 – 5

Step การทำแห้ง	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2
Step ที่ 1		
Step ที่ 2		
Step ที่ 3		
Step ที่ 4		
Step ที่ 5		

สอดคล้องกับการลดลงของความหนาชิ้นแตงโม หลังการทำแห้งในแต่ละ step เทียบกับความหนาของชิ้นแตงโมสดก่อนการทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นแตงโมหลังการทำแห้งในแต่ละ step เทียบกับน้ำหนักชิ้นแตงโมสดก่อนการทำแห้ง (ภาพที่ 42 และ ภาพที่ 43) พบว่าชิ้นแตงโมอบแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 °C มีความหนาลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักของชิ้นแตงโมที่มีปริมาณความชื้นลดลงระหว่างการทำแห้ง เมื่อเกิดการสูญเสียน้ำความหนาของชิ้นแตงโมจะลดลง

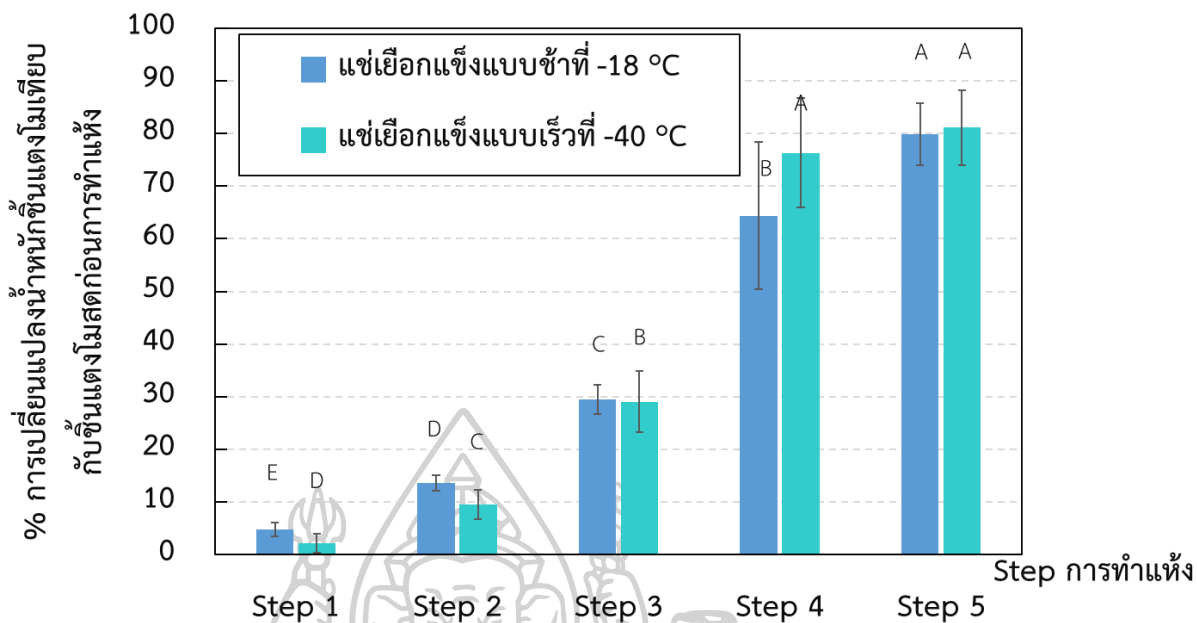
เมื่อเปรียบเทียบการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 แบบพบว่า การลดลงของความหนาและการลดลงของน้ำหนักชิ้นแตงโมใน step ที่ 1, 2, 3, และ 5 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ในขณะที่ step ที่ 4 การแช่เยือกแข็งที่ต่างกันส่งผลต่อการลดลงของความหนา และการลดลงของน้ำหนักขึ้นแฉงโมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ สร้างความเสียหายต่อโครงสร้างของอาหาร เช่น ทำให้เนื้อเยื่ออ่อนตัวลง ส่งผลให้การสูญเสียน้ำเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการกักเก็บน้ำของโครงสร้างเซลล์จึงลดลง จากการเกิดปฏิกิริยา depolymerization ของผนังเซลล์ และการแตกของเซลล์จากการเกิดออสโมซิสระหว่างเซลล์ และสารละลายในอาหารที่มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น (Li และคณะ, 2018)



ภาพที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %การลดลงของความหนาขึ้นแฉงโม เทียบกับขึ้นแฉงโมสดก่อนการอบแห้งต่อ ลำดับการทำแห้งที่ 1-5

จากอิทธิพลของอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการทำแห้งพบว่า ขึ้นแฉงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการเปลี่ยนแปลงของ%การลดลงของความหนาขึ้นแฉงโมมากที่สุด เช่นเดียวกับขึ้นแฉงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %การลดลงของน้ำหนักขึ้นแช่แอมโมเนีย เทียบกับขึ้นแช่แอมโมเนีย ก่อนการอบแห้ง ต่อ ลำดับการทำแห้งที่ 1-5

จากกราฟใน step การทำแห้งที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความหนา สอดคล้องกับการลดลงของความชื้นระหว่างการทำแห้ง

Phupaichitkun (2008) พบว่าเมื่ออบแห้งแต่ละส่วนของลำไย บริเวณเนื้อลำไยมีน้ำและ น้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก จึงเกิดการหดตัวรุนแรงมากกว่าบริเวณอื่น (strong shrinkage) เมื่อ ความชื้นลดลง ปริมาตรในโครงสร้างของเนื้อลำไยจะลดลงจากการเชื่อมกันของน้ำตาลที่มีความ เข้มข้นสูงขึ้นจากการสูญเสียน้ำ ส่งผลให้ปริมาตรในการแพรร่ หรือการถ่ายเทความร้อนลดลง และเนื้อ ลำไยมีลักษณะเหนียวเหนอะมากขึ้น จึงสามารถนำความเหนียวเหนอะที่เกิดบริเวณผิวหน้าขึ้นแช่แอม โมเนียเป็นปัจจัยบ่งชี้การเกิดการหดตัวบริเวณเนื้อสีแดงของแช่แอมโมเนียได้

นอกจากนี้การหดตัวของขึ้นแช่แอมโมเนีย อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่างการทำแห้ง เนื่องจากการทำแห้งใน step ที่ 4 และ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งคือ -4.5 °C และ 1.6 °C ตามลำดับ เมื่อน้ำในขึ้นแช่แอมโมเนียลดลงทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในแช่แอมโมเนียสูงขึ้น ส่งผลให้จุด เยือกแข็งของสารละลายน้ำตาลเข้มข้นมีค่าต่ำลง จึงเกิดการละลายของน้ำที่ยึดติดกับโครงสร้างของ น้ำตาลส่งผลให้น้ำไม่อยู่ในสถานะของแข็งแม้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งจะต่ำกว่า 0 °C (Kaur และ คณะ, 2018) ส่งผลให้ขึ้นแช่แอมโมเนียใน step ที่ 4 มีการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด และการเปลี่ยนสภาพจาก

สภาวะคล้ายแก้วเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะคล้ายยาง ซึ่งในสภาวะคล้ายยางมีความเสถียรมากกว่าเพื่อให้
ง่ายต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำระหว่างการทำแห้ง (Grujić และ Savanović, 2019)

ความเหนียวที่เกิดขึ้นในชั้นแต่งโมมีความหนืดสูง ส่งผลต่อความคล่องตัวของโมเลกุล ซึ่งการ
เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นเป็นหลัก โดยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น
น้ำตาลหรือกรด ที่พบได้ในแต่งโม เมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้นไปอาจทำให้โมเลกุลเกิดการรวมตัว และตก
ผลึกซ้ำ ทำให้มีลักษณะเหนียวเหนอะมากขึ้น ทำให้ชั้นแต่งโมมีลักษณะนุ่มเหนียว

Nakagawa และคณะ (2020) พบว่าแอปเปิลมีค่า T_g เท่ากับ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ การทำแห้งเกิดขึ้นที่
อุณหภูมิ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่า T_g จึงส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่าง รูพรุนที่เกิดขึ้นและปริมาณของแข็งที่
ละลายได้ในน้ำเช่น น้ำตาล และกรดในแอปเปิล มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อนได้แก่
การหดตัว และการซ้อนทับของเนื้อเยื่อของแอปเปิลที่ผ่านการทำแห้งแบบ AFD

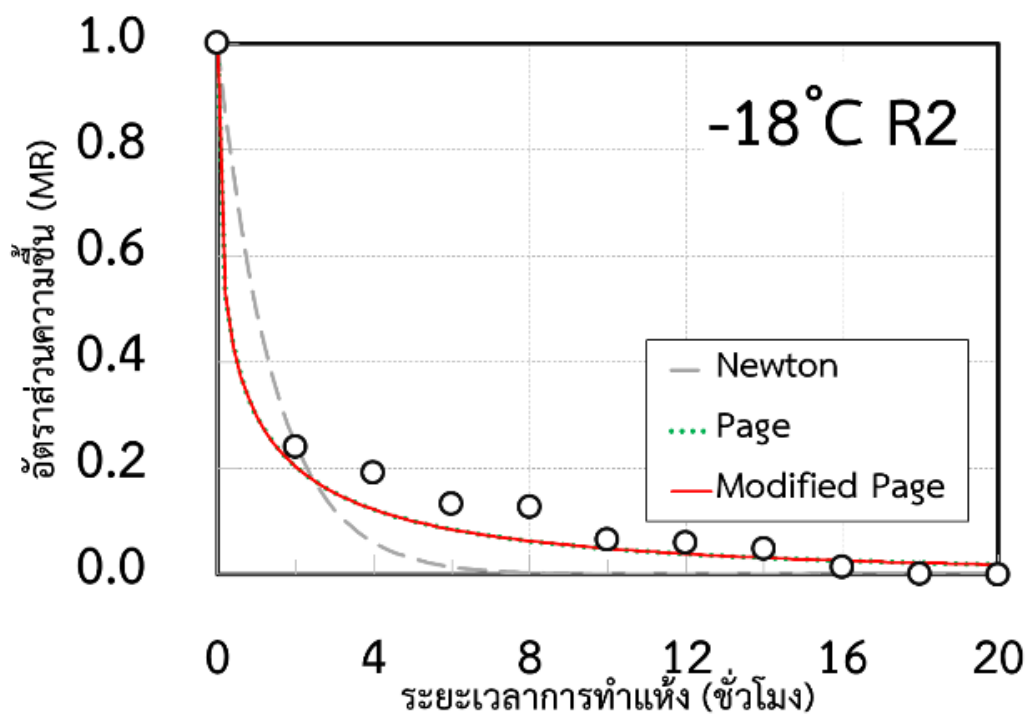
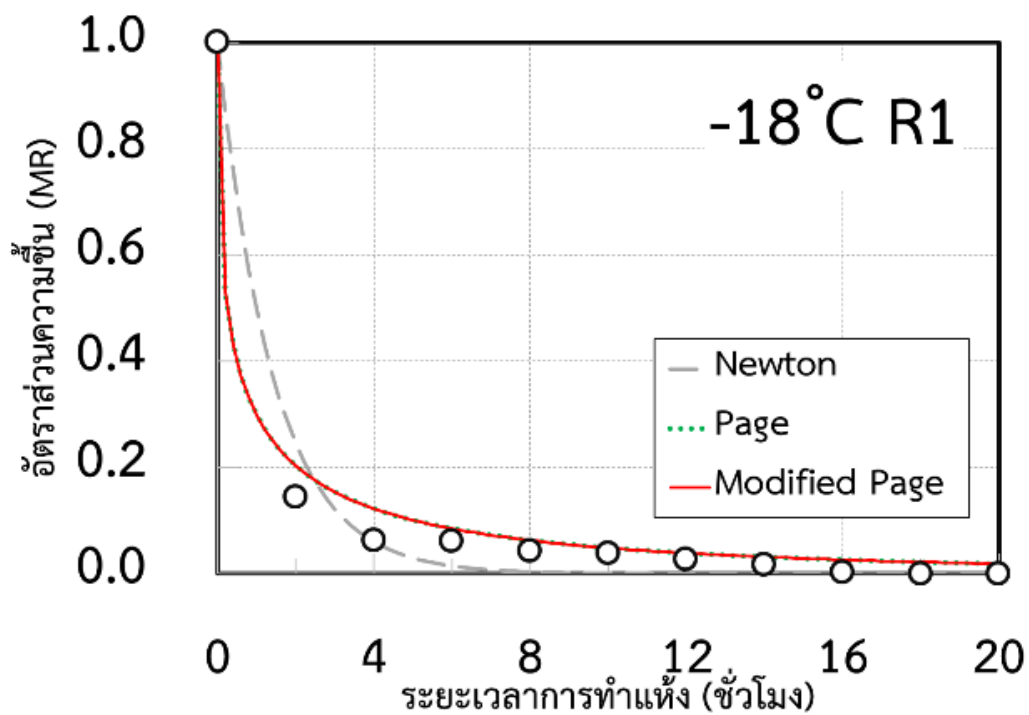
4.4 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแต่งโมใน step 1 - 5 ด้วย AFD

4.4.1 จลนพลศาสตร์การทำแห้งชั้นแต่งโม step 6 ด้วยการทำแห้งแบบ AFD

จากผลการทดลองพบว่าชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของการทำ
แห้งใน step ที่ 6 มีปริมาณความชื้นค่อยๆลดลงตามเวลาในการทำแห้ง โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่
สามารถอธิบายการทำแห้งชั้นแต่งโมได้ดีที่สุดได้แก่ สมการของ Page และ Modified Page เมื่อ
พิจารณาค่า R^2 (ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายหรือตัวแปรอิสระ และตัวแปรตอบสนอง) พบว่า
มีค่าสูง และค่า RMSE (ค่าความแปรปรวน) มีค่าต่ำ

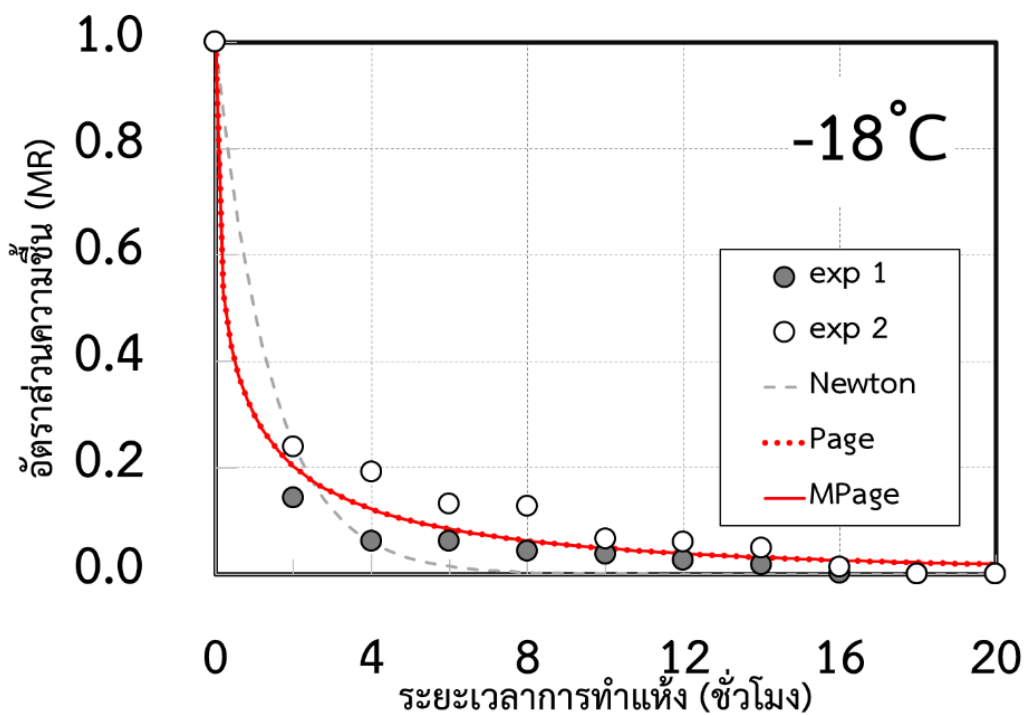
จากการทดลองเมื่อเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับสมการการทำแห้งแบบชั้นเดียวพบว่า
มีทิศทางการลดลงใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย ดังนั้นสมการของ Page และ Modified
Page จึงเป็นสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการทำแห้ง (Inprasit และ Sangsuwan, 2017)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และระยะเวลาในการทำแห้งในแต่ละ
ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 44 ถึงภาพที่ 47

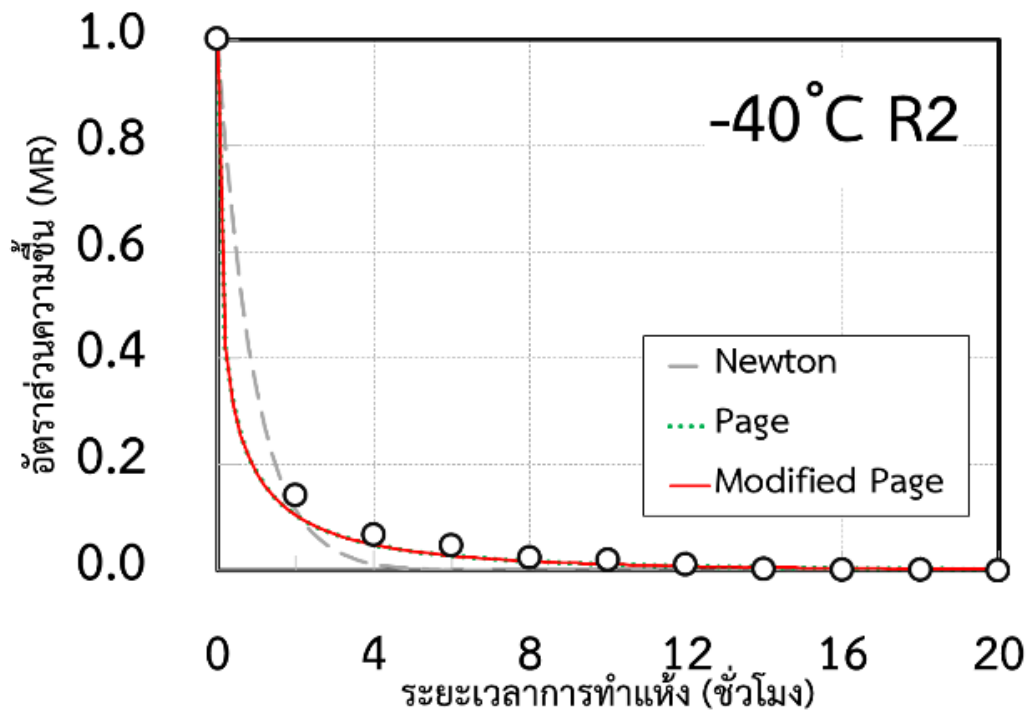
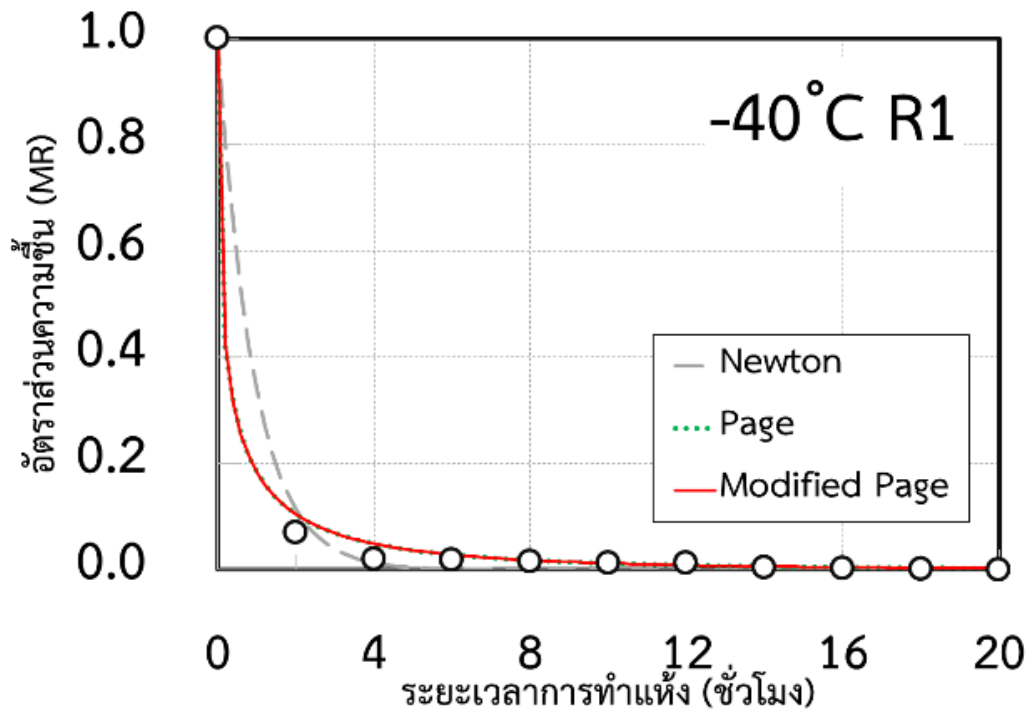


ภาพที่ 44 อัตราส่วนความชื้นของชิ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page การทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2

จากการทดลองขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C ทั้ง 2 การทดลองพบว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าเข้าใกล้สมการของ Page และ Modified Page มากที่สุดเมื่อเทียบจากทั้ง 3 สมการ

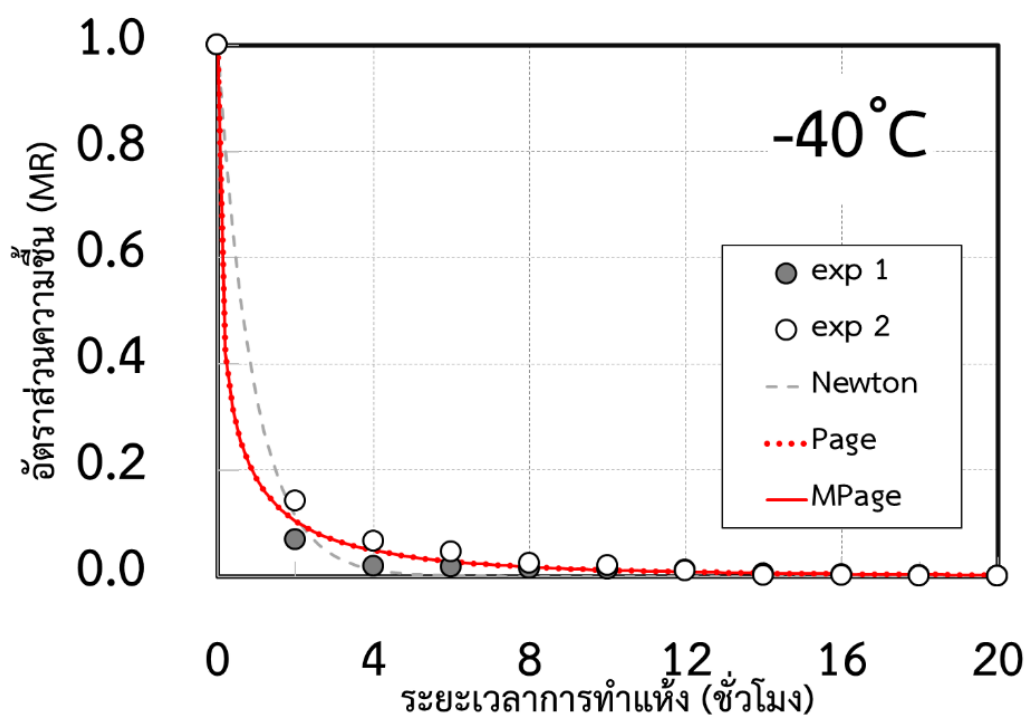


ภาพที่ 45 อัตราส่วนความขึ้นของขึ้นแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page จาก 2 การทดลอง



ภาพที่ 46 อัตราส่วนความชื้นของซินแดงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page การทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2

ชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C ทั้ง 2 การทดลองแสดงผลการทดลองในทิศทางเดียวกับชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C โดยพบว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าเข้าใกล้สมการของ Page และ Modified Page มากที่สุดเมื่อเทียบจากทั้ง 3 สมการ



ภาพที่ 47 อัตราส่วนความชื้นของชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ใน step ที่ 6 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ Newton, Page และ Modified Page จาก 2 การทดลอง

การเลือกใช้สมการในการอธิบายการทำแห้งใน step 6 พิจารณาจากสมการที่มีค่า R^2 สูงเมื่อเทียบกับสมการอื่น และค่า RMSE ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทำแห้งแอมโมเนียในลำดับการทำแห้งที่ 6

โมเดล	การปรับสภาพ	พารามิเตอร์	R^2	RMSE
Newton	- 18 °C	k=0.7019	0.9996	0.2704
	- 40 °C	k=1.086	0.9998	0.0978
Page	- 18 °C	k=1.2094 n=0.3975	0.9998	0.1564
	- 40 °C	k=1.6930 n=0.4156	0.9999	0.0663
Modified Page	- 18 °C	k=1.6100 n=0.3900	0.9999	0.0301
	- 40 °C	k=3.5513 n=0.4131	0.9999	0.0148

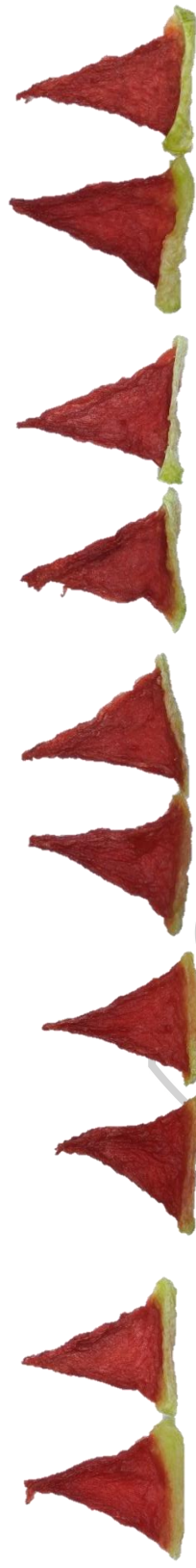
จากสมการค่า k คือค่าอัตราการแห้ง พบว่าค่า k ของการทำแห้งขึ้นแอมโมเนียที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C มีค่ามากกว่าขึ้นแอมโมเนียที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C แสดงให้เห็นว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C ส่งผลต่ออัตราการแห้งมากกว่า หรือทำแห้งเร็วกว่าเมื่อเทียบกับขึ้นแอมโมเนียที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C เมื่อนิยามค่า n เป็นความแตกต่างอันเนื่องมาจากโครงสร้างหรือวัตถุดิบตั้งต้น พบว่าค่า n ที่ได้จากขึ้นแอมโมเนียที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C และขึ้นแอมโมเนียที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ในการทดลองมีใกล้เคียงกัน ดังนั้นอิทธิพลในการทำแห้งมาจากการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้ง โดยมีแนวโน้มเดียวกันทั้งสมการของ Page และ Modified Page (Inyang และคณะ, 2018)

4.4.2 คุณภาพชิ้นแช่แข็งโมระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 6 ด้วยการทำแห้งแบบ AFD

การทำแห้งใน step ที่ 6 จากการทดลองพบว่าการทำแห้งเกิดจากการระเหยกลายเป็นไอ โดยการแพร่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหาร ที่อุณหภูมิ 7.2 °C โดยอาศัยอากาศเย็นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความชื้นจากชิ้นอาหาร และถูกพัดออกโดยพัดลมในระบบ เข้าสู่กระบวนการกำจัดน้ำด้วย condenser และหมุนวนเข้าสู่ตัวปรับอุณหภูมิเพื่อให้มีอุณหภูมิต่ำไหลเวียนอย่างนี้ตลอดกระบวนการทำแห้ง

ชิ้นแช่แข็งโมสด lot ที่ 7 และ 8 มีค่า L^* , a^* และ b^* ทั้งบริเวณเนื้อสีแดงและเนื้อติดเปลือกไม่ต่างกันทางสถิติ เมื่อนำมาศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำแห้งใน step ที่ 6 พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของชิ้นแช่แข็งโมทั้งบริเวณเนื้อติดเปลือก และเนื้อสีแดง เมื่อวิเคราะห์ค่า L^* , a^* และ b^* ในแต่ละชั่วโมงการเก็บตัวอย่าง พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 15 และตารางที่ 16

เมื่อเปรียบเทียบการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 สภาวะพบว่าค่าสีบริเวณเนื้อแช่แข็งโมสีแดง ได้แก่ ค่า L^* , a^* และ b^* มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการแช่เยือกแบบช้าที่อุณหภูมิ -18 °C มีสีเข้มกว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C เนื่องจากเนื้อเยื่อบริเวณเนื้อสีแดงมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก เซลลูโลสในเนื้อเยื่อมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณเนื้อติดเปลือก ระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งโดยเฉพาะที่การแช่เยือกแข็งที่ -18 °C พบว่าโอกาสที่เซลล์จะถูกทำลายมีมาก ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกที่พบมากในแช่แข็งโมหลุดออกมาภายนอกเซลล์ เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับโมโนฟีนอล ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น ชิ้นแช่แข็งโมจึงมีสีที่เข้มกว่า (Prakobsang และ Pornchalermpong, 2018) ลักษณะปรากฏของชิ้นแช่แข็งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18 °C และ -40 °C ระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 6 แสดงดังภาพที่ 48 และภาพที่



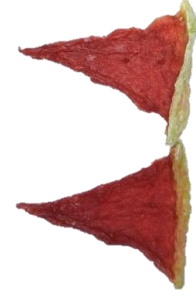
Step 6 ชั่วโมงที่ 2

Step 6 ชั่วโมงที่ 4

Step 6 ชั่วโมงที่ 6

Step 6 ชั่วโมงที่ 8

Step 6 ชั่วโมงที่ 10



Step 6 ชั่วโมงที่ 12

Step 6 ชั่วโมงที่ 14

Step 6 ชั่วโมงที่ 16

Step 6 ชั่วโมงที่ 18

Step 6 ชั่วโมงที่ 20

ภาพที่ 48 ลักษณะชิ้นแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18 °C ระหว่างการทำแห้ง Step 6 โดย AFD

ตารางที่ 15 คุณภาพด้านสีของชิ้นแต่งโม้มที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C ระหว่างการทำแห้งใน step 6

	Step 6 ชั่วโมงที่ 2	Step 6 ชั่วโมงที่ 4	Step 6 ชั่วโมงที่ 6	Step 6 ชั่วโมงที่ 8	Step 6 ชั่วโมงที่ 10	Step 6 ชั่วโมงที่ 12	Step 6 ชั่วโมงที่ 14	Step 6 ชั่วโมงที่ 16	Step 6 ชั่วโมงที่ 18	Step 6 ชั่วโมงที่ 20
เนื้อ										
L* ^{ns}	27.23 ± 3.25	25.48 ± 0.23	25.18 ± 0.79	25.29 ± 0.60	25.84 ± 1.37	24.42 ± 0.24	25.15 ± 0.50	25.37 ± 0.56	27.59 ± 5.66	25.76 ± 1.31
a* ^{ns}	19.85 ± 10.52	20.68 ± 0.52	14.28 ± 1.24	14.88 ± 0.56	15.17 ± 0.15	15.99 ± 0.80	15.38 ± 3.45	15.96 ± 0.36	20.99 ± 8.66	16.84 ± 0.43
b* ^{ns}	9.01 ± 6.20	11.89 ± 0.54	5.83 ± 1.13	6.08 ± 0.26	6.15 ± 0.36	5.54 ± 0.07	6.07 ± 1.33	6.56 ± 0.41	10.12 ± 6.19	6.92 ± 0.26
เปลือก										
L* ^{ns}	40.65 ± 12.75	33.31 ± 3.22	32.05 ± 0.63	33.53 ± 0.39	36.73 ± 4.13	33.42 ± 5.08	35.40 ± 3.10	31.82 ± 0.90	32.10 ± 2.49	33.70 ± 0.01
a* ^{ns}	-1.50 ± 0.09	0.59 ± 1.83	0.38 ± 1.45	-0.06 ± 0.50	-0.54 ± 1.19	0.00 ± 1.31	-0.27 ± 0.51	0.81 ± 2.26	0.01 ± 1.68	-0.10 ± 1.26
b* ^{ns}	15.04 ± 5.96	16.25 ± 2.53	10.17 ± 1.14	10.80 ± 0.27	12.07 ± 1.51	11.24 ± 1.28	11.96 ± 3.04	10.28 ± 0.38	12.79 ± 1.33	10.65 ± 1.26

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบในแถวแนวนอนเดียวกัน



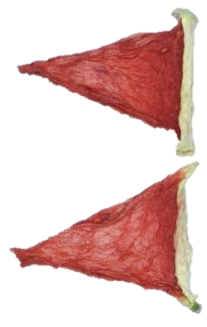
Step 6 ชั่วโมงที่ 2

Step 6 ชั่วโมงที่ 4

Step 6 ชั่วโมงที่ 6

Step 6 ชั่วโมงที่ 8

Step 6 ชั่วโมงที่ 10



Step 6 ชั่วโมงที่ 12

Step 6 ชั่วโมงที่ 14

Step 6 ชั่วโมงที่ 16

Step 6 ชั่วโมงที่ 18

Step 6 ชั่วโมงที่ 20

ภาพที่ 49 ลักษณะชิ้นแป้งผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C ระหว่างการทำแห้ง Step 6 โดย AFD

ตารางที่ 16 คุณภาพต้านสีของชิ้นแต่งโมเมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40 °C ระหว่างการทำแห้งใน step 6

	Step 6 ชั่วโมงที่ 2	Step 6 ชั่วโมงที่ 4	Step 6 ชั่วโมงที่ 6	Step 6 ชั่วโมงที่ 8	Step 6 ชั่วโมงที่ 10	Step 6 ชั่วโมงที่ 12	Step 6 ชั่วโมงที่ 14	Step 6 ชั่วโมงที่ 16	Step 6 ชั่วโมงที่ 18	Step 6 ชั่วโมงที่ 20
เนื้อ										
L* ^{ns}	33.37 ± 1.49	32.53 ± 2.62	29.98 ± 1.84	29.59 ± 3.01	30.23 ± 1.74	29.80 ± 1.41	29.55 ± 0.82	29.46 ± 3.21	29.12 ± 0.20	30.83 ± 5.39
a* ^{ns}	25.06 ± 8.82	27.19 ± 8.30	20.20 ± 1.29	26.81 ± 8.11	19.69 ± 1.71	20.74 ± 1.34	19.98 ± 0.55	19.14 ± 0.49	19.89 ± 0.54	24.94 ± 7.37
b* ^{ns}	12.38 ± 4.76	12.71 ± 3.29	9.48 ± 0.13	13.36 ± 5.78	9.70 ± 1.31	9.75 ± 0.76	9.32 ± 0.35	9.06 ± 0.71	9.39 ± 0.60	13.54 ± 5.74
เปลือก										
L* ^{ns}	47.52 ± 8.59	47.19 ± 10.44	39.20 ± 6.49	44.46 ± 11.38	37.96 ± 4.76	36.88 ± 5.76	38.20 ± 1.95	37.50 ± 2.63	36.86 ± 2.67	44.45 ± 10.56
a* ^{ns}	-1.69 ± 0.33	-1.29 ± 1.23	0.50 ± 0.22	-0.17 ± 2.75	0.08 ± 0.97	-0.10 ± 0.53	0.23 ± 1.95	-0.99 ± 0.60	-0.63 ± 3.08	0.59 ± 2.49
b* ^{ns}	14.81 ± 4.52	15.14 ± 5.91	10.57 ± 1.69	14.78 ± 4.98	9.81 ± 2.45	10.42 ± 0.85	10.08 ± 0.88	10.65 ± 0.32	11.13 ± 2.57	13.19 ± 5.80

^{ns} หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบในแถวแนวนอนเดียวกัน

แต่เมื่อพิจารณาการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันพบว่าชิ้นแต่งโมเมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C ระหว่างการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 6 มีค่าต่างจากชิ้นแต่งโมเมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C เมื่อค่า L* a* และ b* ของชิ้นแต่งโมเมสดทั้ง 2 ขั้นตอนการทดลองไม่ต่างกันทางสถิติ โดยค่าสีของชิ้นแต่งโมระหว่างการทำแห้งแสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 คุณภาพต้านสีของชิ้นแต่งไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ -40°C ระหว่างการทำแห้งใน step ที่ 6

	เนื้อแต่งไม้สีแดง			เนื้อตีเบร็อก		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
2h	SFAFD 27.23 ± 3.21 ^a	19.85 ± 8.82 ^a	9.01 ± 5.31 ^a	40.65 ± 10.59 ^{ns}	-1.50 ± 1.40 ^{ns}	15.04 ± 4.89 ^{ns}
	QFAFD 33.37 ± 2.49 ^A	25.06 ± 7.21 ^A	12.38 ± 3.89 ^A	47.52 ± 8.07 ^{ns}	-1.69 ± 0.80 ^{ns}	14.81 ± 3.98 ^{ns}
4h ^{ns}	SFAFD 30.48 ± 1.09	25.68 ± 0.57	11.89 ± 0.57	43.31 ± 4.97	0.59 ± 2.92	16.25 ± 3.25
	QFAFD 32.53 ± 2.52	27.19 ± 6.82	12.71 ± 2.81	47.19 ± 8.84	-1.29 ± 1.35	15.14 ± 4.85
6h	SFAFD 25.18 ± 1.03 ^b	14.28 ± 1.19 ^b	5.83 ± 0.10 ^b	32.05 ± 1.14 ^{ns}	0.38 ± 1.85 ^{ns}	10.17 ± 1.05 ^{ns}
	QFAFD 29.98 ± 3.27 ^B	20.20 ± 1.45 ^B	9.48 ± 1.13 ^B	39.20 ± 7.08 ^{ns}	0.50 ± 1.10 ^{ns}	10.57 ± 1.83 ^{ns}
8h ^{ns}	SFAFD 26.05 ± 2.00	15.46 ± 2.79	6.27 ± 1.66	35.36 ± 2.56	-0.74 ± 0.71	12.14 ± 1.91
	QFAFD 29.59 ± 3.18	26.81 ± 6.66	13.36 ± 4.73	44.46 ± 9.35	-0.17 ± 2.32	14.78 ± 4.16
10h	SFAFD 25.84 ± 2.05 ^c	15.17 ± 1.03 ^c	6.15 ± 0.61 ^c	36.73 ± 3.41 ^{ns}	-0.54 ± 1.37 ^{ns}	12.07 ± 1.52 ^c
	QFAFD 30.23 ± 2.05 ^C	19.69 ± 1.76 ^C	9.70 ± 1.22 ^C	37.96 ± 3.98 ^{ns}	0.08 ± 2.07 ^{ns}	9.81 ± 2.19 ^C
12h	SFAFD 24.42 ± 1.16 ^d	13.99 ± 2.73 ^d	5.54 ± 1.45 ^d	33.42 ± 6.70 ^{ns}	0.00 ± 2.02 ^{ns}	11.24 ± 2.69 ^{ns}
	QFAFD 29.80 ± 1.47 ^D	20.74 ± 1.16 ^D	9.75 ± 0.66 ^D	36.88 ± 5.59 ^{ns}	-0.10 ± 1.52 ^{ns}	10.42 ± 1.05 ^{ns}
14h	SFAFD 25.15 ± 1.59 ^e	15.38 ± 3.34 ^e	6.07 ± 1.49 ^e	35.40 ± 4.79 ^{ns}	-0.27 ± 1.01 ^{ns}	11.96 ± 3.81 ^{ns}
	QFAFD 29.55 ± 1.05 ^E	19.98 ± 0.64 ^E	9.32 ± 0.44 ^E	35.86 ± 2.09 ^{ns}	0.23 ± 1.77 ^{ns}	10.08 ± 2.15 ^{ns}
16h	SFAFD 25.37 ± 1.12 ^{ns}	15.96 ± 0.10 ^f	6.56 ± 0.79 ^f	31.82 ± 2.45 ^f	0.81 ± 2.10 ^{ns}	10.28 ± 2.28 ^{ns}
	QFAFD 29.46 ± 2.85 ^{ns}	19.14 ± 0.85 ^F	9.06 ± 0.73 ^F	37.50 ± 2.21 ^F	-0.99 ± 0.70 ^{ns}	10.65 ± 0.52 ^{ns}
18h ^{ns}	SFAFD 27.59 ± 4.82	20.99 ± 7.12	10.12 ± 5.11	32.10 ± 15.10	0.01 ± 1.97	12.79 ± 3.82
	QFAFD 29.12 ± 1.27	19.89 ± 1.16	9.39 ± 0.77	36.86 ± 3.04	-0.63 ± 1.99	11.13 ± 2.84
20h	SFAFD 25.76 ± 1.83 ^s	16.84 ± 2.18 ^{ns}	6.92 ± 1.14 ^{ns}	33.70 ± 6.19 ^{ns}	-0.10 ± 2.67 ^{ns}	10.65 ± 2.27 ^{ns}
	QFAFD 35.83 ± 4.92 ^G	24.94 ± 6.11 ^{ns}	13.54 ± 4.70 ^{ns}	44.45 ± 9.93 ^{ns}	0.59 ± 2.49 ^{ns}	13.19 ± 4.87 ^{ns}

4.5 ผลของวิธีการทำแห้งต่อลักษณะทางกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแตงโม

จากการทดลองพบว่าชิ้นแตงโมที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธี AFD มีลักษณะนุ่มเหนอะ พบน้ำเชื่อมบริเวณผิวสีแดงทั้งชิ้นแตงโมแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C และชิ้นแตงโมแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 40 °C

คุณภาพด้านสีของชิ้นแตงโมแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C มีสีเข้มกว่าชิ้นแตงโมแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C สืบเนื่องจากค่า L^* ที่น้อย เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C เป็นการแช่แข็งแบบช้า ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างเซลล์ โดยเฉพาะเนื้อเยื่อของแตงโมมีความอ่อนไหวง่าย ส่งผลให้รังควัตถุให้สีถูกปลดปล่อยออกมาได้มากกว่า เกิดการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างไลโคปีนส่งผลต่อคุณภาพด้านสี นอกจากนี้ยังเมื่อเนื้อแตงโมโดนความเย็นจะมีลักษณะฉ่ำ ชุ่มน้ำ เกิดการแพร่ของสารประกอบฟีนอลิกนำไปสู่การสูญเสียคุณภาพด้านสีที่ง่ายขึ้น (Erturk Çandir และคณะ, 2021)

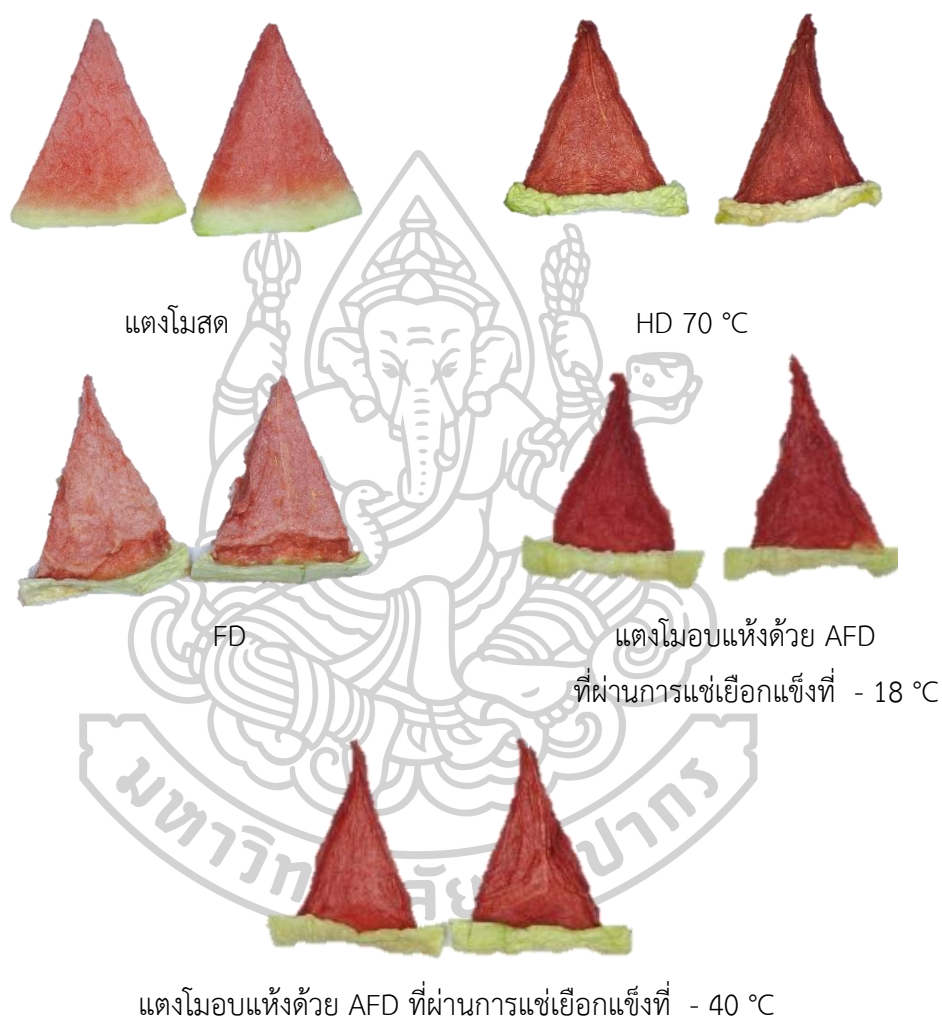
เช่นเดียวกับ Reyes และคณะ (2011) ได้ศึกษาเพิ่มเติมในแอปเปิล ทำแห้งแบบ AFD เทียบกับ FD เปรียบเทียบการปรับสภาพด้วยการแช่เยือกแข็ง 2 วิธี ได้แก่ แช่ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C นาน 15 ชั่วโมง แทนการแช่แข็งแบบช้า และการจุ่มตัวอย่างลงใน liquid nitrogen นาน 15 นาที แทนการแช่แข็งแบบเร็ว พบว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาบราวน์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เมื่อโครงสร้างมีช่องว่างมากจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้มากเพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลโดยตรงกับค่าความสว่าง

บริเวณเนื้อติดเปลือก และสีแดงของชิ้นแตงโมมีการหดตัวของเนื้อเยื่ออย่างเห็นได้ชัดระหว่างกระบวนการทำแห้ง จากการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทำแห้ง เมื่อเกิดช่องว่างของอากาศเนื้อเยื่อของชิ้นแตงโมจะถูกดึงเข้าหากัน จากความเครียดในโครงสร้างเซลล์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และลดขนาดลง

Reyes และคณะ (2010) เปรียบเทียบการปรับสภาพด้วยการแช่เยือกแข็ง 2 วิธี ประกอบด้วย การแช่ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ - 18 °C นาน 15 ชั่วโมง แทนการแช่เยือกแข็งแบบช้า และการจุ่มตัวอย่างลงใน liquid nitrogen นาน 5 นาที แทนการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และทำแห้งด้วยวิธี AFD พบว่าการหดตัวในแครอทเกิดจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ สภาวะการทำแห้งแบบ AFD เป็นการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศ การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นแบบช้าๆมีการไล่ระดับของอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้างในแครอท อีกหนึ่งปัจจัยคือในช่วงเริ่มต้นของการทำให้แห้งความชื้นของแครอทสูงกว่า 65% อุณหภูมิในการทำแห้งแครอทคือ - 18 °C แต่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแครอทควรต่ำกว่า - 20 °C จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากสถานะคล้ายแก้ว

เป็นสถานะคล้ายยาง ทำให้เกิดการยุบตัวของเมทริกซ์ที่เป็นของแข็ง ดังนั้นการแช่เยือกแข็งจึงส่งผลต่อการหดตัวของแครอทอย่างมาก

จากการทดลองลักษณะชิ้นแตงโมก่อนการทำแห้ง และแตงโมแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ลักษณะปรากฏของแตงโมอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

การทำแห้งแตงโมด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (HD) ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 ชั่วโมงพบว่า บริเวณเนื้อสีแดง และเนื้อสีขาวติดเปลือกมีลักษณะแข็งกรอบ รสชาติหวาน บริเวณเนื้อสีแดงมีลักษณะคล้ายขึ้น บริเวณเนื้อสีขาวติดเปลือกมีสีน้ำตาลเป็นบางจุด เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและการสูญเสียปริมาณไลโคปีนจากความร้อน (Oberoi และคณะ, 2015)

นอกจากนี้ยังเกิดการสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยา Maillard ที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความเป็นสีน้ำตาลเกิดขึ้น (Diamante และคณะ, 2010)

Oberoi และคณะ (2017) ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งแฉงโมที่อุณหภูมิ 50 – 70 °C พบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่า L^* และค่า a^* ในขณะที่ค่า b^* เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างไลโคปีน โดยพบว่าอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียไลโคปีน และเกิดการสูญเสียได้ในเวลา 5 - 60 นาที

ทำแห้งด้วยแบบ FD พบว่าขึ้นแฉงโมแห้งมีลักษณะแห้ง กรอบทั้งบริเวณเนื้อสีขาวติดเปลือก และเนื้อสีแดง มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงขึ้นแฉงโมสดมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ มีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำ บริเวณเนื้อสีขาวติดเปลือกมีความแข็งมากกว่าบริเวณเนื้อสีแดงเล็กน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของโครงสร้างที่ต่างกัน ขึ้นแฉงโมแห้งแตกหักง่าย มีรสชาติหวาน บริเวณผิวหน้าของขึ้นแฉงโมแห้งมีลักษณะเป็นรูพรุนจากฟองอากาศที่เกิดจากการดันตัวของน้ำแข็งระหว่างการระเหิดเพื่อกำจัดน้ำออกจากชิ้นตัวอย่าง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพด้านสีของขึ้นแฉงโม โดยเฉพาะค่าความสว่าง พบว่า L^* มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะมีพื้นที่ในการกระเจิงแสงมาก เมื่อรูพรุนมีจำนวนมากขึ้นพื้นที่สำหรับการเกิดออกซิเดชันของไลโคปีนจึงมีมากขึ้นตามไปด้วยทั้งนี้ ปริมาณไลโคปีนจึงส่งผลต่อคุณภาพของสีแฉงโมแห้ง เช่นเดียวกับ Guiné และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง ต่อคุณภาพเนื้อสัมผัส และสีของ พักทอง และพริกไทยเขียว พบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้ความเข้มของสีลดลงระหว่างการทำให้แห้งเทียบกับตัวอย่างสด โดยการเพิ่มขึ้นของ L^* และการเปลี่ยนแปลงของ a^* และ b^* ตามการเพิ่มขึ้นของอากาศในชิ้นพักทองแห้งซึ่งส่งผลต่อการกระเจิงของแสงทำให้มีค่า L^* เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Nazmi และคณะ (2017) พบว่าการทำแห้งมะม่วงด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ เพิ่มค่า L^* ในมะม่วงแห้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอากาศในชิ้นมะม่วงต่างจากการทำแห้งด้วยวิธีอื่นที่มีการใช้ความร้อนสูงในกระบวนการทำแห้ง โดยคุณภาพด้านสีของแฉงโมอบแห้งแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 คุณภาพด้านสีของแป้งโมบแห้งจากการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

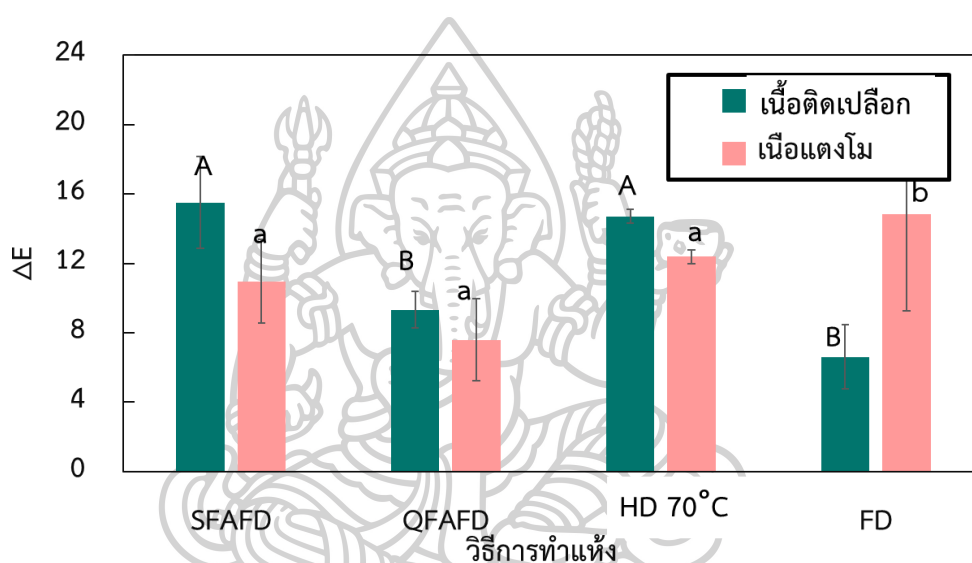
ค่าสีเปลือก	แป้งโมบสด			
	HD 70°C	FD	SFAFD	QFAFD
L*	59.89 ± 0.76	46.14 ± 0.84 ^b	65.71 ± 2.93 ^a	45.33 ± 2.58 ^b
a*	-2.27 ± 0.11	0.01 ± 0.69 ^a	-0.06 ± 0.39 ^a	-1.16 ± 0.58 ^a
b*	16.43 ± 0.29	21.08 ± 0.46 ^a	16.99 ± 2.47 ^b	21.26 ± 1.21 ^a
h (hue angle)	96.94 ± 0.48	89.97 ± 1.85 ^b	89.86 ± 1.06 ^b	93.17 ± 1.72 ^b
Chroma	16.63 ± 0.30	21.15 ± 0.53 ^{ab}	17.06 ± 2.47 ^b	21.38 ± 1.20 ^a
ค่าสีเนื้อ				
L*	39.55 ± 1.53	47.62 ± 1.11 ^b	53.45 ± 3.43 ^a	29.02 ± 0.96 ^d
a*	24.32 ± 0.49	30.96 ± 0.11 ^a	24.57 ± 1.20 ^b	24.79 ± 0.38 ^b
b*	13.74 ± 0.66	20.37 ± 0.83 ^a	18.85 ± 2.06 ^{ab}	10.73 ± 0.65 ^c
h (hue angle)	29.42 ± 0.70	33.49 ± 1.02 ^{ab}	37.41 ± 4.84 ^a	23.35 ± 0.95 ^c
Chroma	27.94 ± 0.75	37.09 ± 0.54 ^{ac}	31.09 ± 0.28 ^b	27.02 ± 0.60 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$)

SFAFD คือแป้งโมบแห้งด้วย AFD ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 18 °C

QFAFD คือแป้งโมบแห้งด้วย AFD ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ - 40 °C

ΔE คือหน่วยชี้วัดมาตรฐานค่าความต่างหรือผิดเพี้ยนของสีโดยในการทดลองนี้เทียบจากชั้นแต่งโมสก่อนการทำแห้ง บ่งบอกค่าความแตกต่างระหว่างจุดสีสองจุดที่กำหนดไว้ในปริภูมิสี พบว่าบริเวณเนื้อสีแดงการทำแห้งด้วย AFD สำหรับชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ แสดงถึงความต่างของเนื้อแต่งโมสีแดงของชั้นแต่งโมแห่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแต่งโมสดเนื่องจากโครงสร้างหลังการแช่เยือกแข็งรูพรุนมีขนาดเล็กจำนวนมาก โครงสร้างเซลล์ถูกทำลายน้อยจึงรักษาคุณภาพด้านสีไว้ได้ดี (Ceballos และคณะ, 2012) ในขณะที่บริเวณเนื้อติดเปลือกพบว่าการทำแห้งด้วยวิธี FD มีค่าน้อยที่สุดดังแสดงในภาพที่ 51

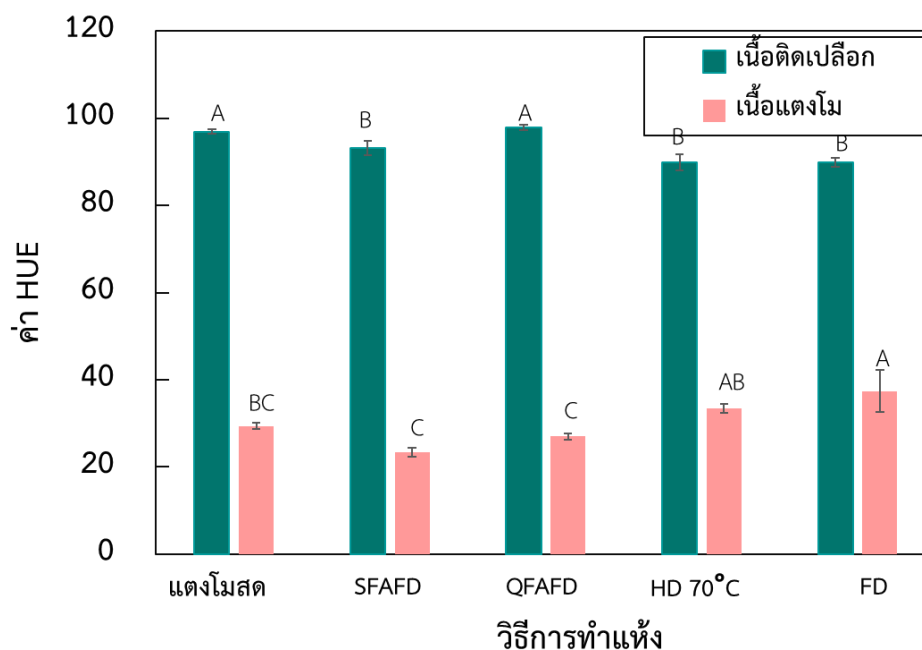


ภาพที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE และวิธีการในการทำแห้ง โดย SFAFD คือ แต่งโมอบแห้งด้วย AFD ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C และ QFAFD คือแต่งโมอบแห้งด้วย AFD ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C

เมื่อพิจารณาค่า HUE หรือค่าเฉดสีจากแต่งโมที่ทำแห้งด้วยวิธีต่างกัน (ภาพที่ 52) พบว่าบริเวณเนื้อแต่งโมสีแดงมีค่าอยู่ในช่วง 23.35 ± 0.95 ถึง 33.49 ± 1.02 การทำแห้งด้วยวิธี FD และ HD ที่ 70°C ไม่ต่างกันทางสถิติ และการทำแห้งด้วยวิธี HD ที่ 70°C มีเฉดสีใกล้เคียงกับแต่งโมสด เมื่อเทียบค่า HUE ของแต่งโมแห้งพบว่าการทำแห้งด้วยวิธี FD และวิธี HD ที่ 70°C ไม่ต่างกัน และเมื่อเทียบการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันในการทำแห้งด้วยวิธี AFD พบว่าไม่มีผลต่อค่า HUE ของแต่งโมแห้งเนื่องจากไม่มีความต่างกันทางสถิติ

ส่วนบริเวณเนื้อติดเปลือกแต่งโมการทำแห้งด้วยวิธี AFD ของแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C มีค่า HUE ไม่แตกต่างจากแต่งโมสดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อเทียบระหว่างวิธีการ

ทำแห้งพบว่าการทำแห้งด้วยวิธี AFD ของแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -18°C , วิธี HD ที่ 70°C และวิธี FD ไม่ต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ วิธี AFD ของแตงโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ -40°C มีค่ามากที่สุด



ภาพที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า HUE และวิธีการในการทำแห้ง

การทำแห้งด้วยวิธี AFD โดยแช่เยือกแข็งที่ -40°C เป็นวิธีที่เหมาะสมในการรักษาคุณภาพด้านสีของแตงโม Carrion และคณะ (2018) ได้ศึกษาการทำแห้งเห็ดด้วยวิธี AFD เทียบกับ FD พบว่าการทำแห้งด้วย AFD สามารถรักษาสีของเห็ดไว้ได้ใกล้เคียงของสดมากที่สุด เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยเทคนิค AFD ร่วมกับอัลตราโซนิก และ FD เช่นเดียวกับ Xu และคณะ (2015) เทียบการทำแห้งด้วยวิธี AFD และ FD พบว่าค่า Hue angle ที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ค่าสีของกระเทียมสไลด์ในตัวอย่างแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วย AFD มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธี FD

ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ของแตงโมอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 19 พบว่า การทำแห้งแบบ AFD และการทำแห้งแบบ HD ที่อุณหภูมิ 70°C มีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ไม่ต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่การทำแห้งแบบ FD มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากการทำแห้งแบบ FD เป็นการกำจัดน้ำออกด้วยการระเห็ดส่งผลให้น้ำในโครงสร้างออกไปได้มาก จึงทำให้มีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ต่ำ

ตารางที่ 19 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของแตงโมอบแห้ง

ตัวอย่าง	ระยะเวลาในการทำ แห้ง	ปริมาณความชื้น ฐานเปียก (% wb.)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ a_w
แตงโมสด		93.07 ± 0.07	0.9876 ± 0.00
HD 70°C	10 ชั่วโมง	24.26 ± 0.20 ^{ab}	0.5001 ± 0.04 ^a
FD	48 ชั่วโมง	20.83 ± 0.14 ^b	0.2337 ± 0.00 ^b
SFAFD	75 ชั่วโมง 36 นาที	30.59 ± 0.68 ^a	0.5739 ± 0.00 ^a
QFAFD	75 ชั่วโมง 36 นาที	30.51 ± 0.86 ^a	0.5368 ± 0.00 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

นอกจากนี้อิทธิพลของวิธีการทำแห้งยังส่งผลต่อคุณภาพทางเคมีของแตงโมอบแห้ง เช่น สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในแตงโม เช่น ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด รวมถึงสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วย โดยแตงโมแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆแสดงในตารางที่ 20

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณไลโคปีนของแตงโมอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี AFD ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C และ FD มีปริมาณสูงซึ่งไม่ต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ TD ที่ 70 °C มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิ การทำแห้งด้วยวิธี TD ที่ 70 °C มีอุณหภูมิสูงระหว่างการทำแห้งมีออกซิเจนและความร้อน ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของไลโคปีนนำไปสู่การสลายตัวของไลโคปีนในแตงโมอบแห้ง (Shi และคณะ, 2002)

การทำแห้งแบบ FD เป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำในสภาวะสุญญากาศ แต่ในระบบการทำแห้งมีการสัมผัสกับแสง จึงเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวของไลโคปีนบริเวณผิวหนังของแตงโมได้ แต่ยังสามารถรักษาไลโคปีนภายในชิ้นไว้ได้จึงทำให้มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับแตงโมสด

การทำแห้งแบบ AFD นอกจากเป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำแล้ว การเกิดการหดตัวของชิ้นแตงโมระหว่างการทำแห้ง ส่งผลให้สารละลายน้ำตาลมีความเข้มข้นสูงซึ่งเกิดเป็นลักษณะคล้ายน้ำเชื่อมเคลือบบริเวณผิวหนังชิ้นแตงโมทำให้การสัมผัสของไลโคปีนในตัวอย่างกับออกซิเจนในอากาศลดลงแต่มีค่าไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยวิธี FD ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เช่นเดียวกับปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด แต่การทำแห้งแบบ AFD ใช้เวลานานซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวได้เมื่อเทียบกับแสงโคม

Demiray และคณะ(2013) ได้สรุปว่าเวลาการอบแห้งที่นาน ส่งผลต่อการสลายตัวของไลโคปีน เบต้าแคโรทีน และกรดแอสคอร์บิกในมะเขือเทศระหว่างการทำแห้ง

ตรงข้ามกับสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน และสารประกอบกลุ่มฟีนอลิก พบว่าการทำแห้งด้วย TD ที่ 70 °C มีค่าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งน้อย และไม่มีการสูญเสียระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง ระหว่างการทำแห้งความร้อนสามารถทำลายเซลล์เนื้อเยื่อให้มีความอ่อนตัว สารเหล่านี้ที่อยู่ในเซลล์พืชจึงออกมาได้มากกว่า

เช่นเดียวกับ Reyes และคณะ (2011) กล่าวเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน สารประกอบฟีนอลิก และกรดแอสคอร์บิก ในแอปเปิ้ลแห้งที่ผ่านการทำแห้งที่ต่างกันโดยพบว่า การทำแห้งด้วย AFD ส่งผลต่อการลดลงของสารประกอบฟีนอลิก และกรดแอสคอร์บิก อย่างมากเมื่อเทียบกับ FD เช่นเดียวกับสารที่มีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมีปริมาณลดลงเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่น การหดตัว และปริมาณรูพรุนของชิ้นตัวอย่างที่เกิดจากการแช่เยือกแข็งส่งผลให้สารเหล่านี้หลุดจากโครงสร้างเซลล์ และสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) เกิดการย่อยสลายสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกรวมถึงความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ส่งผลให้สารเหล่านี้มีปริมาณลดลง (Norshahida และคณะ, 2011)

การปรับสภาพด้วยการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อคุณภาพทางเคมีของแตงโมอบแห้ง (ตารางที่ 19) แสดงให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์ที่สำคัญ เช่น ไลโคปีน รวมถึงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในชิ้นแตงโมแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่ามากกว่า รวมถึงความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระด้วย แต่ไม่ต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แตงโมอบแห้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีปริมาณน้อยกว่าเล็กน้อยเนื่องมาจากขนาดของผลึกที่มีขนาดใหญ่ เซลล์ของเนื้อเยื่อในชิ้นแตงโมก่อนการทำแห้งถูกทำลายมากกว่า ปริมาณสารที่สามารถละลายได้ในน้ำจึงเกิดการสูญเสียในระหว่างการทำแห้ง

ตารางที่ 20 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในแตงโมอบแห้ง

ตัวอย่าง	ระยะเวลาในการทำแห้ง	Lycopene (mg/1g dry matter)	Total carotenoid (mg/100g d.b)	TPC,Gallic acid (mg/1g dry matter)	DPPH,Trolox (mg/1g dry matter)	ABTS,Trolox (mg/1g dry matter)
แตงโมสด		2.33 ± 1.17	34.45±6.19	1.62±0.07	1.79±0.18	12.08±7.21
HD 70°C	10 ชั่วโมง	0.35 ± 0.29 ^c	19.98±6.08 ^c	1.36±0.23 ^a	1.39±0.06 ^a	8.11±1.38 ^a
FD	48 ชั่วโมง	1.15 ± 0.15 ^a	25.83±4.12 ^{bc}	0.95±0.01 ^b	0.86±0.07 ^b	5.62±0.52 ^b
SFAFD	75 ชั่วโมง 36 นาที	0.93 ± 0.07 ^{ab}	29.52±1.89 ^{ab}	0.81±0.30 ^b	0.65±0.14 ^c	5.15±0.89 ^b
QFAFD	75 ชั่วโมง 36 นาที	1.32 ± 0.06 ^a	31.90±2.47 ^a	0.93±0.27 ^b	0.75±0.11 ^{bc}	5.90±1.65 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแถว หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ (p < 0.05)

ไลโคปีนสามารถสลายได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี แสง และออกซิเจน โดยการทำให้แห้งด้วย AFD ใช้เวลานาน จึงมีโอกาสน้ำออกซิเจนนานกว่าการทำให้แห้งด้วยวิธีอื่นเกิดการเสื่อมสลายระหว่างการทำแห้งได้

Rayman Ergün และคณะ (2020) ได้ศึกษา ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของ มะเขือเทศเชอร์รี่ พบว่าการแช่แข็งแบบเร็วส่งผลดีกว่าการแช่แข็งแบบช้า โดยใช้ ค่าสี ปริมาณไลโคปีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพ ทั้งนี้เนื่องมาจากการแช่แข็งแบบช้าส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่สารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำจึงหายไปจากการทำให้แห้งได้มากกว่า อีกทั้งเมื่อโครงสร้างเซลล์ถูกทำลายมาก สารประกอบกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่สลายได้ง่าย เมื่อโดนออกซิเจน จึงมีปริมาณลดลง จากการคำนวณร้อยละการสูญหายของไลโคปีนจากการทำให้แห้งด้วยวิธีต่างๆดังแสดงในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ร้อยละการคงอยู่และร้อยละการหายไปของปริมาณไลโคปีนที่พบในแตงโมอบแห้ง

วิธีการทำให้แห้ง	% การคงเหลือเทียบกับตัวอย่างสด	% การหายไปเทียบกับตัวอย่างสด
HD 70°C	15.16282562	84.837
SFAFD	40.01635174	59.984
QFAFD	56.84569918	43.154
FD	49.31530036	50.685

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การแช่เยือกแข็งไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทำแห้งแบบ AFD ใน step ที่ 1, 2, 3 และ 5 แต่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C มีผลใน step ที่ 4 โดยความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C มีผลต่อการทำแห้งใน step ที่ 6 โดยความชื้นจะลดลงเร็วกว่าชั้นแต่งโมที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C ในการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C ส่งผลต่อการหดตัว และคุณภาพด้านสี ของชั้นแต่งโมอบแห้งมากกว่าการแช่เยือกแข็งที่ -40°C ในการทำแห้งแบบ AFD โดยเฉพาะค่า L^*

วิธีการทำแห้งแบบ AFD สามารถรักษาปริมาณไลโคปีนได้ไม่ต่างจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในสภาวะสุญญากาศ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมากเมื่อทำแห้งแบบ AFD เนื่องจากอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการทำแห้ง



รายการอ้างอิง

- Arocho, Y. D., Bellmer, D., Maness, N., McGlynn, W., & Rayas-Duarte, P. (2012). Watermelon Pomace Composition and the Effect of Drying and Storage on Lycopene Content and Color. *Journal of Food Quality*, 35(5), 331-340. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2012.00455.x>
- Bantle, M., Kolsaker, K., & Eikevik, T. M. (2011). Modification of the Weibull Distribution for Modeling Atmospheric Freeze-Drying of Food. *Drying Technology*, 29(10), 1161-1169. doi:10.1080/07373937.2011.574242
- Barba, A. I. O., Hurtado, M. C., Mata, M. C. S., Ruiz, V. F., & Tejada, M. L. S. d. (2006). Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β -carotene in vegetables. *Food Chemistry*, 95(2), 328-336. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.028>
- Barroca, M. J., Guiné, R. P. F., Pinto, A., Gonçalves, F. M., & Ferreira, D. M. S. (2006). Chemical and Microbiological Characterization of Portuguese Varieties of Pears. *Food and Bioproducts Processing*, 84(2), 109-113. doi:<https://doi.org/10.1205/fbp.05200>
- Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., & Dutta, S. (2019). Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 234-243. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.015>
- Buonsanti, M., & Pontari, A. (2008). *Interaction of Microstructure in Biological Tissue*.
- Carrión, C., Mulet, A., García-Pérez, J. V., & Cárcel, J. A. (2018). Ultrasonically assisted atmospheric freeze-drying of button mushroom. Drying kinetics and product quality. *Drying Technology*, 36(15), 1814-1823. doi:10.1080/07373937.2017.1417870
- Ceballos, A. M., Giraldo, G. I., & Orrego, C. E. (2012). Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 360-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.010>
- Charoenrein, S., & Harnkarnsujarit, N. (2017). Food Freezing and Non-Equilibrium States. In (pp. 39-62).
- Chuntranuluck, S., & Cheepjumpen, C. (2007). *Effect of inulin as an ingredient in hard*

candy. Bangkok.

- Claussen, I. C., Strømme, I., Egelandsdal, B., & Strætkevåg, K. O. (2007). Effects of Drying Methods on Functionality of a Native Potato Protein Concentrate. *Drying Technology*, 25(6), 1091-1098. doi:10.1080/07373930701396444
- Demiray, E., Tulek, Y., & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT - Food Science and Technology*, 50(1), 172-176. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.001
- Diamante, L., Durand, M., Savage, G., & Vanhanen, L. (2010). Effect of temperature on the drying characteristics, colour and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits. *International Food Research Journal*, 17, 441-451.
- Duan, X., Ding, L., Ren, G.-y., Liu, L.-l., & Kong, Q.-z. (2013). The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition. *Food and Bioprocess Processing*, 91(4), 534-538. doi:10.1016/j.fbp.2013.06.005
- Duan, X., Liu, W. C., Ren, G. Y., & Yang, X. (2017). Effects of different drying methods on the physical characteristics and flavor of dried hawthorns (*Crataegus* spp.). *Drying Technology*, 35(11), 1412-1421. doi:10.1080/07373937.2017.1325898
- Duan Xu, L. W., Ren Guangyue*, Yang Xiaotong, Liu Yunhong. (2015). Atmospheric freeze drying of garlic slices based on freezing point depression. doi:10.3965/j.ijabe.20150804.1933
- Edwards, A. J., Vinyard, B. T., Wiley, E. R., Brown, E. D., Collins, J. K., Perkins-Veazie, P., . . . Clevidence, B. A. (2003). Consumption of Watermelon Juice Increases Plasma Concentrations of Lycopene and β -Carotene in Humans. *The Journal of Nutrition*, 133(4), 1043-1050. doi:10.1093/jn/133.4.1043
- Erturk or Çandır, E., Özdemir, A., Yetisir, H., Aras, V., Aslan, Ö., Baltaer, Ö., & ÜNLÜ, M. (2021). Effects of Chilling Injury, Physical and Biochemical Changes on Grafted Watermelons Stored at Low Temperature. *Horticultural Studies*, 71-84. doi:10.16882/hortis.951086
- Grujić, R., & Savanović, D. THERMAL ANALYSIS OF FOOD PRODUCTS USING DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC). *CONTEMPORARY MATERIALS*, 10(2).
- Guiné, R., & Barroca, M. (2012). Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioprocess Processing -*

FOOD BIOPROD PROCESS, 90. doi:10.1016/j.fbp.2011.01.003

- Heber, D., & Lu, Q.-Y. (2002). Overview of Mechanisms of Action of Lycopene. *Experimental biology and medicine (Maywood, N.J.)*, 227, 920-923. doi:10.1177/153537020222701013
- Ho, L. H., Pang, W. P., Tan, T.-C., & Mustafa, K. A. (2018). Effects of drying conditions on the physicochemical and functional properties of red- and yellow-fleshed watermelon rinds flour. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9, 898. doi:10.4314/jfas.v9i2s.58
- Ho, L. H., Suhaimi, M., Ishamri, I., & Mustafa, A. (2016). Effect of Different Drying Conditions on Proximate Compositions of Red-and Yellow-Fleshed Watermelon Rind Powders. *Journal of Agrobiotechnology*, 7, 1-12.
- Horie, A., Kobayashi, T., & Nakagawa, K. (2018). *Modeling of atmospheric freeze-drying for sliced fruit*.
- Imen Tlili a, b., Chafik Hdider b, Marcello Salvatore Lenucci c,* , Riadh Ilahy a,b, Hager Jebari b, Giuseppe Dalessandro c. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activities during fruit ripening of watermelon cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis* 24 (2011) 923–928. doi:10.1016/j.jfca.2011.03.016
- Imen Tlili , C. H., Marcello Salvatore Lenucci ,Ilahy Riadh ,Hager Jebari , Giuseppe Dalessandro (2011). Bioactive compounds and antioxidant activities of different watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Mansfeld) cultivars as affected by fruit sampling area. *Journal of Food Composition and Analysis* 24 (2011) 307–314. doi:10.1016/j.jfca.2010.06.005
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques— Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08, 27-48.
- Jia, R., Katano, T., Yoshimoto, Y., Gao, Y., Watanabe, Y., Nakazawa, N., . . . Okazaki, E. (2018). Sweet potato starch with low pasting temperature to improve the gelling quality of surimi gels after freezing. *Food Hydrocolloids*, 81, 467-473. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.024
- Jiang, S. T., & Lee, T. C. (2005). Freezing seafood and seafood products: Principles and applications. In (pp. 695-729).
- Johnson, D. P., Guildner, L. A., & Jones, F. E. (1975). *Vapor pressure of water at its triple*

point. France: Editions Europeennes Thermiques et Industries.

- Kaur, G., Kaur, P., & Kaur, A. (2018). Physico-chemical properties, bioactive compounds and color parameters of coriander puree: effect of pretreatments and freezing. *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), 3473-3484. doi:10.1007/s13197-018-3272-1
- Keskintepe, L., & Eroglu, A. (2015). Freeze-Drying of Mammalian Sperm. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*, 1257, 489-497. doi:10.1007/978-1-4939-2193-5_25
- Ketata, M., Desjardins, Y., & Ratti, C. (2013). Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 202-212. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.035
- Khoo, H.-E., Prasad, K. N., Kong, K.-W., Jiang, Y., & Ismail, A. (2011). Carotenoids and their isomers: color pigments in fruits and vegetables. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 16(2), 1710-1738. doi:10.3390/molecules16021710
- Kono, S., Kon, M., Araki, T., & Sagara, Y. (2017). Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet. *Journal of Food Engineering*, 214, 158-165. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.023
- Lee Hoon, H., Mazaitul Akma, S., Ishamri, I., & Kamarul 'Ain, M. (2016). Effect of Different Drying Conditions on Proximate Compositions of Red- and Yellow-Fleshed Watermelon Rind Powders. *Journal of Agrobiotechnology*, 7(0). Retrieved from <https://journal.unisza.edu.my/agrobiotechnology/index.php/agrobiotechnology/article/view/100>
- Li, D., Zhu, Z., & Sun, D.-W. (2018). Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 46-55. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019
- Liu, C., Zhang, H., Dai, Z., Liu, X., Liu, Y., Deng, X., . . . Xu, J. (2012). Volatile chemical and carotenoid profiles in watermelons [*Citrullus vulgaris* (Thunb.) Schrad (Cucurbitaceae)] with different flesh colors. *Food Science and Biotechnology*,

- 21(2), 531-541. doi:10.1007/s10068-012-0068-3
- Liu, Y., He, C., & Song, H. (2018). Comparison of fresh watermelon juice aroma characteristics of five varieties based on gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry. *Food Research International*, 107, 119-129. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.022
- Maoto, M., Beswa, D., & Jideani, A. (2019). Watermelon as a potential fruit snack. *International Journal of Food Properties*, 22, 355-370. doi:10.1080/10942912.2019.1584212
- Mawilai, P., Chaloeichitratham, N., & Pornchaloempong, P. (2019). Processing feasibility and qualities of freeze dried mango powder for SME scale. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 301, 012059. doi:10.1088/1755-1315/301/1/012059
- Mendoza-Enano, M. L., Stanley, R., & Frank, D. (2019). Linking consumer sensory acceptability to volatile composition for improved shelf-life: A case study of fresh-cut watermelon (*Citrullus lanatus*). *Postharvest Biology and Technology*, 154, 137-147. doi:https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.018
- Ming, F., Chen, L., Li, D., & Du, C. (2020). Investigation into Freezing Point Depression in Soil Caused by NaCl Solution. *Water*, 12(8), 2232. Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4441/12/8/2232
- Moran, M., & Shapiro, H. (1992). Fundamentals of engineering thermodynamics. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*, 18. doi:10.1080/03043799308928176
- Moreira, R., Figueiredo, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology - DRY TECHNOL*, 18, 279-294. doi:10.1080/07373930008917704
- Mushtaq, M., Sultana, B., Bhatti, H., & Asghar, M. (2014). RSM based optimized enzyme-assisted extraction of antioxidant phenolics from underutilized watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) rind. *Journal of Food Science and Technology - Mysore*, 1-9. doi:10.1007/s13197-014-1562-9
- Nakagawa, K., Horie, A., & Nakabayashi, M. (2020). Modeling atmospheric freeze-drying of

- food products operated above glass transition temperature. *Chemical Engineering Research and Design*, 163, 12-20.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.017>
- Nakilcioğlu-Taş, E., Coşan, G., & Ötleş, S. (2021). Optimization of process conditions to improve the quality properties of healthy watermelon snacks developed by hot-air drying. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 2146-2160. doi:10.1007/s11694-020-00808-3
- naveen kumar, P., P, E., S, A., & Kavimani, S. (2017). A Systematic Review on Lycopene and its Beneficial Effects”. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 10, 2113-2120. doi:10.13005/bpj/1335
- Nazmi İzli, İzli, G., & Taşkın, O. (2017). Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 37. doi:10.1590/1678-457x.28316
- Norshahida, M., Abdul Hamid, A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Dek, M., & Hairuddin, M. (2011). Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits. *International journal of molecular sciences*, 12, 4678-4692. doi:10.3390/ijms12074678
- Noshad, M., & Ghasemi, P. (2020). Influence of freezing pretreatments on kinetics of convective air-drying and quality of grapes. *Food Bioscience*, 38, 100763. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100763>
- Oko, O. (2013). Comparative Proximate Compositions of Watermelon *Citrullus Lanatus*, Squash *Cucurbita Pepo*’l and Rambutan *Nephelium Lappaceum*. *International Journal of Science and Technology*.
- Olayinka, U., & Etejere, E. O. (2018). Proximate and chemical compositions of watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum and Nakai cv red and cucumber (*Cucumis sativus* L. cv Pipino). *International Food Research Journal*, 25, 1060-1066.
- Penelope Perkins-Veazie, B. J. K. C., 1 Sam D Pair1 and Warren Roberts2. (2001). Lycopene content differs among red-fleshed watermelon cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. doi:10.1002/jsfa.880
- Perkins, P., & Davis, A. R. (2007). Ripening events in seeded watermelons. *HortScience*,

42.

- Petzold, G., & Aguilera, J. (2009). Ice Morphology: Fundamentals and Technological Applications in Foods. *Food Biophysics*, 4, 378-396. doi:10.1007/s11483-009-9136-5
- Prakobsang, S., & Pornchalermpong, P. (2018). Comparison of the effect of freezing on the quality of 'nam dokmai' mango fruit. *MATEC Web of Conferences*, 192, 03027. doi:10.1051/mateconf/201819203027
- Quian-Ulloa, R., & Stange, C. (2021). Carotenoid Biosynthesis and Plastid Development in Plants: The Role of Light. *International journal of molecular sciences*, 22(3), 1184. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/3/1184>
- Rahimi, J., Singh, A., Adewale, P., Adedeji, A., Ngadi, M., & Raghavan, V. (2014). *Effect of Carboxymethyl Cellulose Coating and Osmotic Dehydration on Freeze Drying Kinetics of Apple Slices FOODS-02-00170*.
- Reyes, A., Bubnovich, V., Bustos, R., Vásquez, M., Vega, R., & Scheuermann, E. (2010). Comparative Study of Different Process Conditions of Freeze Drying of 'Murtilla' Berry. *Drying Technology*, 28(12), 1416-1425. doi:10.1080/07373937.2010.482687
- Reyes, A., Mahn, A., & Huenulaf, P. (2011). Drying of Apple Slices in Atmospheric and Vacuum Freeze Dryer. *Drying Technology*, 29(9), 1076-1089. doi:10.1080/07373937.2011.568657
- Reyes, A., Vega, R. V., & Bruna, R. D. (2010). Effect of Operating Conditions in Atmospheric Freeze Drying of Carrot Particles in a Pulsed Fluidized Bed. *Drying Technology*, 28(10), 1185-1192. doi:10.1080/07373937.2010.482717
- Sharma, R., Kaur, D., Oberoi, D. P. S., & Sogi, D. S. (2008). Thermal Degradation Kinetics of Pigments and Visual Color in Watermelon Juice. *International Journal of Food Properties*, 11(2), 439-449. doi:10.1080/10942910701530826
- Shi, J., & Maguer, M. (2000). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical reviews in biotechnology*, 20, 293-334. doi:10.1080/07388550091144212
- Shi, J., & Maguer, M. L. (2000). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(1), 1-42. doi:10.1080/10408690091189275

- Shi, J., Maguer, M. L., Kakuda, Y., Liptay, A., & Niekamp, F. (1999). Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. *Food Research International*, 32(1), 15-21. doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00059-9)
- Shi, J., Wu, Y., Bryan, M., & Maguer, M. (2002). Oxidation and Isomerization of Lycopene under Thermal Treatment and Light Irradiation in Food Processing. *Nutraceutical and Food*, 7, 179-183. doi:10.3746/jfn.2002.7.2.179
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144. Retrieved from <http://www.ajevonline.org/content/16/3/144.abstract>
- Srivastava, S., & Srivastava, A. K. (2015). Lycopene; chemistry, biosynthesis, metabolism and degradation under various abiotic parameters. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 41-53. doi:10.1007/s13197-012-0918-2
- Tan, M., Mei, J., & Xie, J. (2021). The Formation and Control of Ice Crystal and Its Impact on the Quality of Frozen Aquatic Products: A Review. *Crystals*, 11(1), 68. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/1/68>
- Tatemoto, Y., Mibu, T., Yokoi, Y., & Hagimoto, A. (2015). Effect of freezing pretreatment on the drying characteristics and volume change of carrots immersed in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure1. *Journal of Food Engineering*, 173. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.11.006
- Tlili, I., Hdider, C., Lenucci, M. S., Ilahy, R., Jebari, H., & Dalessandro, G. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activities during fruit ripening of watermelon cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(7), 923-928. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.03.016>
- Tlili, I., Hdider, C., Lenucci, M. S., Riadh, I., Jebari, H., & Dalessandro, G. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activities of different watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Mansfeld) cultivars as affected by fruit sampling area. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(3), 307-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.06.005>
- Wong, A., Chernykh, O., & Figueroa, A. (2016). Chronic l-citrulline supplementation improves cardiac sympathovagal balance in obese postmenopausal women: A

preliminary report. *Autonomic Neuroscience*, 198, 50-53.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.06.005>

Xu, D., Wenchao, L., Guangyue, R., Xiaotong, Y., & Yunhong, L. (2015). Atmospheric freeze drying of garlic slices based on freezing point depression. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8, 133-139.

Yanat, M., & Baysal, T. (2018). Effect of freezing rate and storage time on quality parameters of strawberry frozen in modified and home type freezer. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, 13, 154-158. doi:10.31895/hcptbn.13.3-4.9



ภาคผนวก ก

สมการการทำแห้ง

-ความชื้นฐานเปียก

$$MC(w.b.) = \left(\frac{W_i - W_t}{W_i} \right) \times 100$$

เมื่อ $MC_{(w.b.)}$ หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานเปียกในหน่วยเปอร์เซ็นต์ W_i หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม) W_t หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

-ความชื้นฐานแห้ง

$$MC(d.b.) = \left(\frac{W_i}{W_i \times 100} \right) \times 100$$

เมื่อ $MC_{(d.b.)}$ หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานแห้ง M_i หมายถึง ความชื้นฐานเปียกที่เวลา t

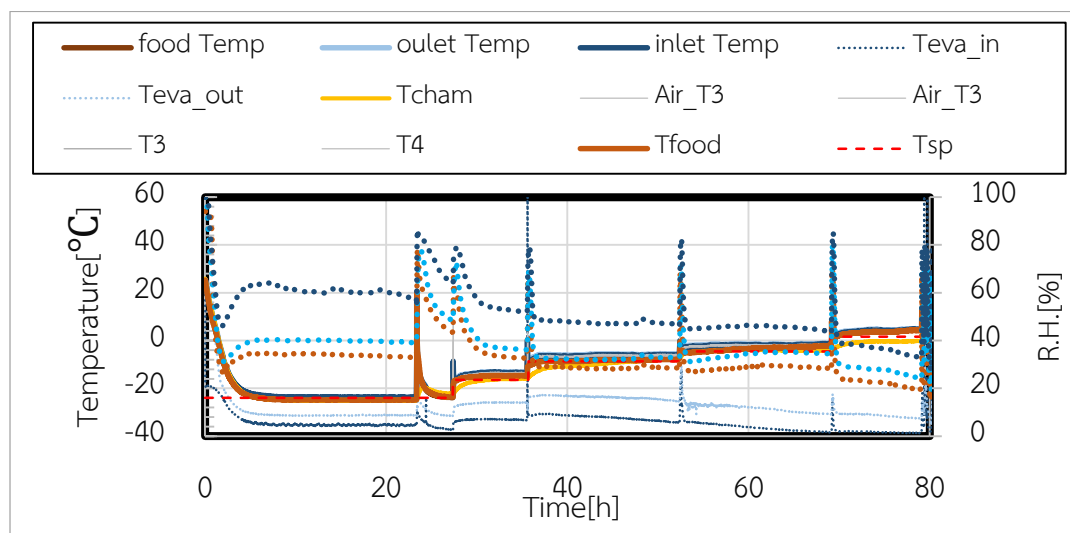
-การหาอัตราส่วนความชื้น

$$MR = \left(\frac{MC_t - MC_{eq}}{MC_0 - MC_{eq}} \right)$$

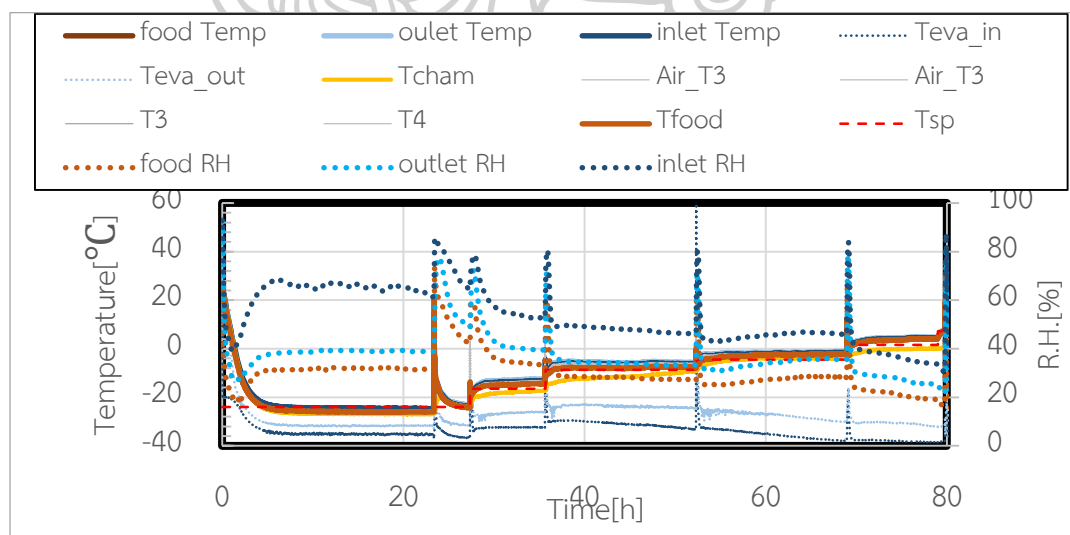
เมื่อ MR หมายถึง อัตราส่วนความชื้น MC_0 ความชื้นเริ่มต้น MC_{eq} ความชื้นที่สมดุล โดยอยู่บนสมมติฐานว่า ความชื้นเข้าสู่ค่าคงที่เป็นความชื้นสมดุล

ภาคผนวก ข

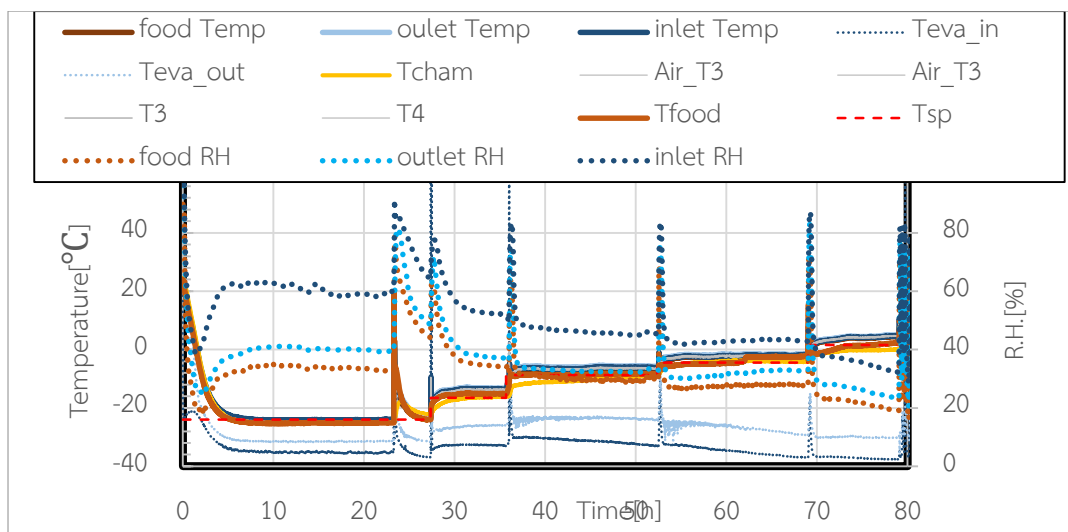
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทำแห้ง



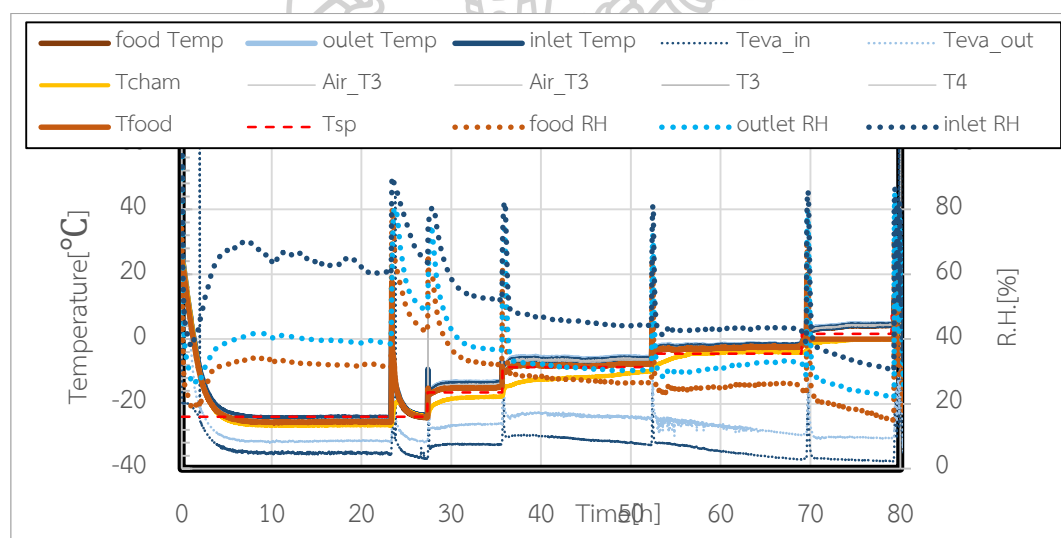
ภาพที่ 53 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 1



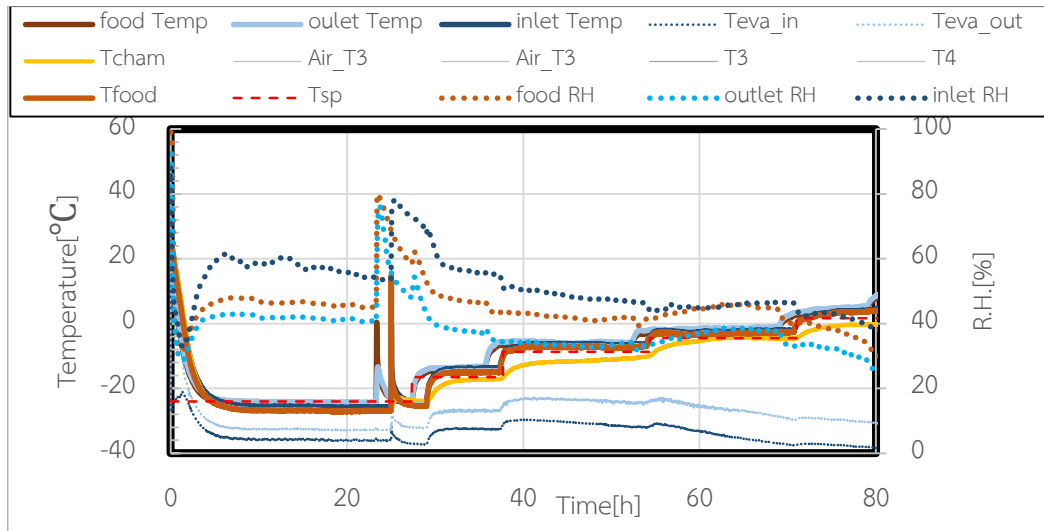
ภาพที่ 54 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 2



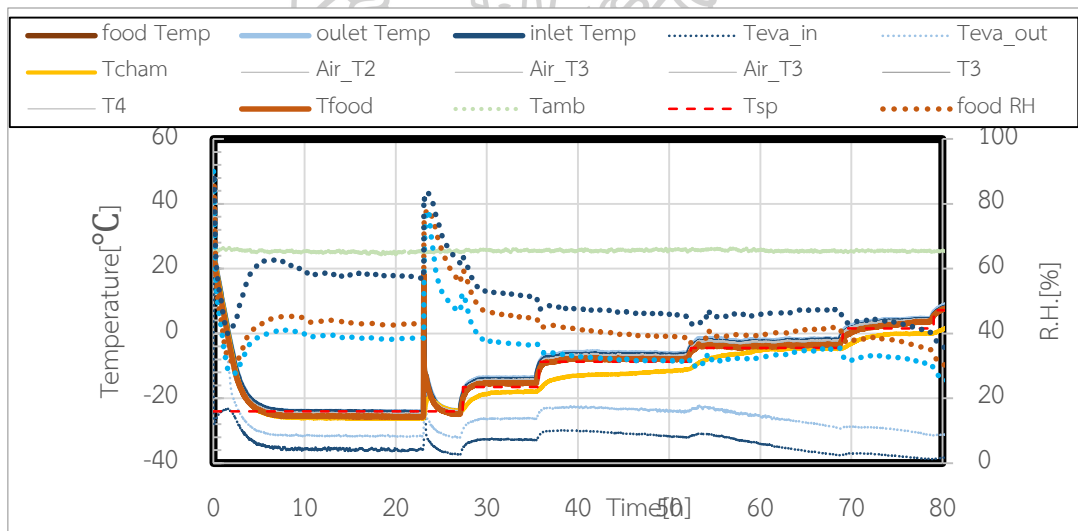
ภาพที่ 55 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งชิ้นเตงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงาน Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 1



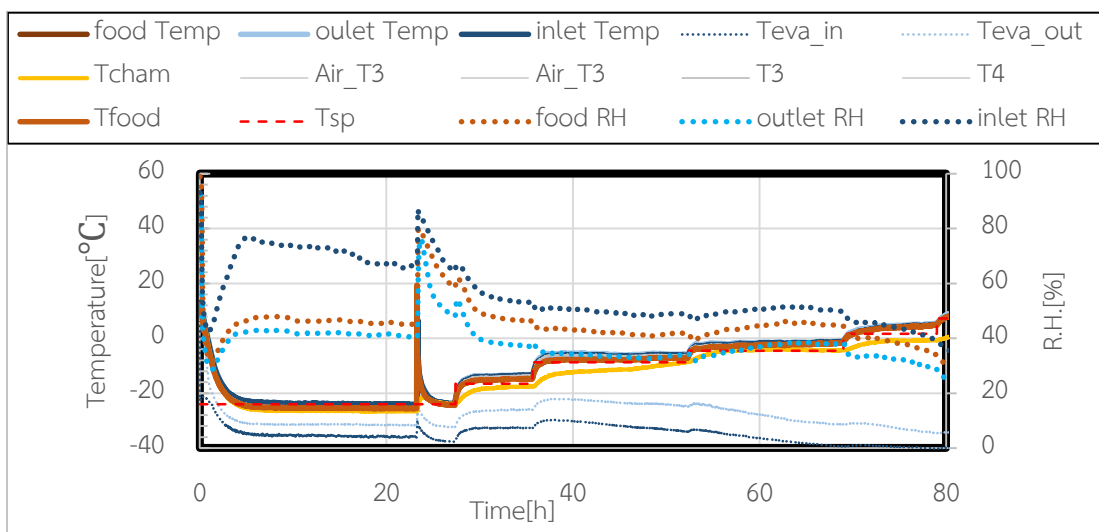
ภาพที่ 56 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งชิ้นเตงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงาน Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 2



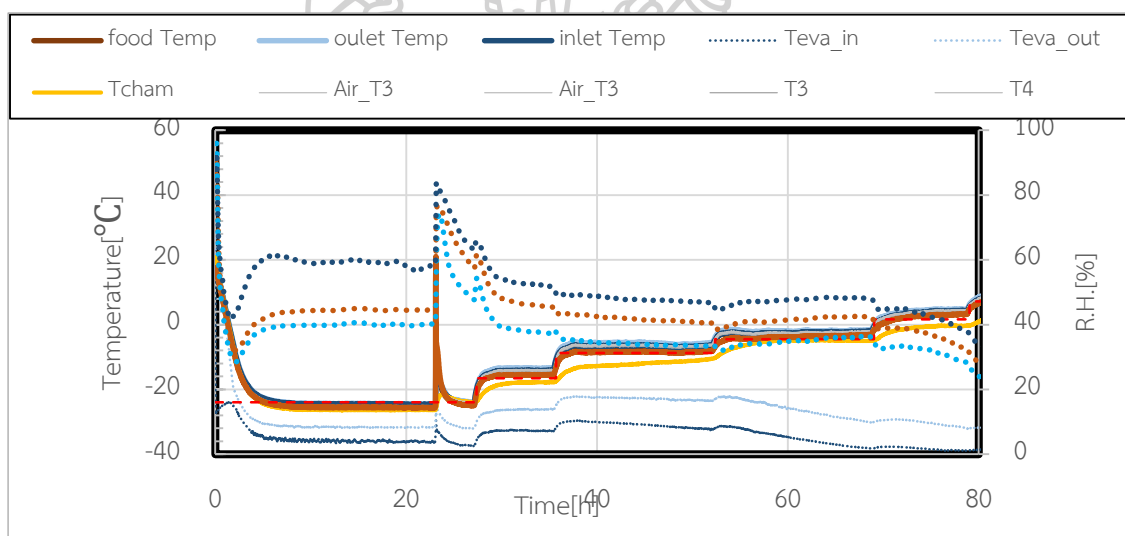
ภาพที่ 57 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานแห้ง Step 6 สำหรับครั้งที่ 1



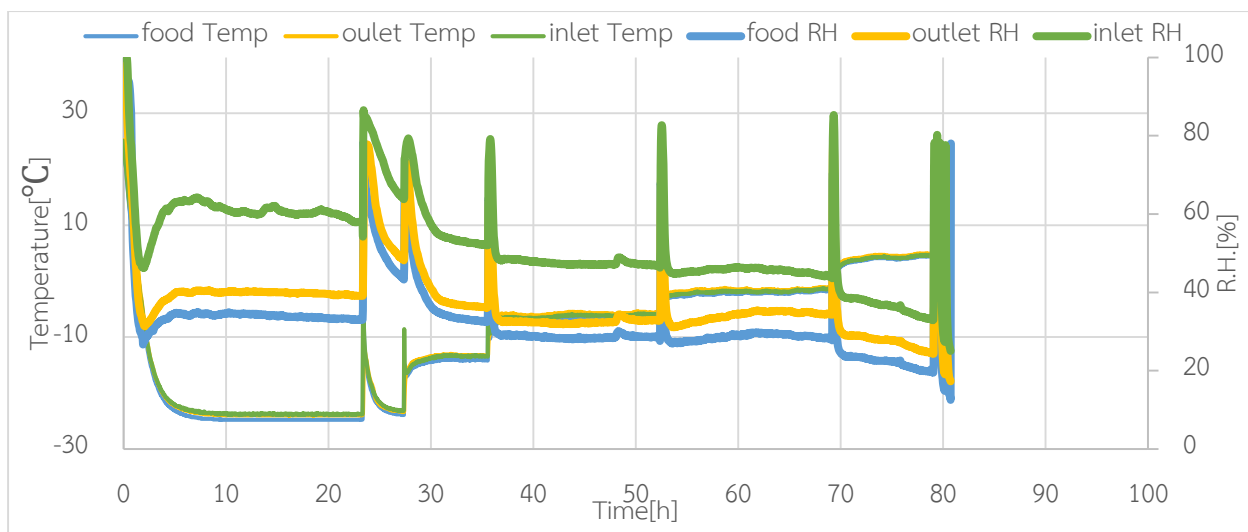
ภาพที่ 58 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโมที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำงานแห้ง Step สำหรับครั้งที่ 1



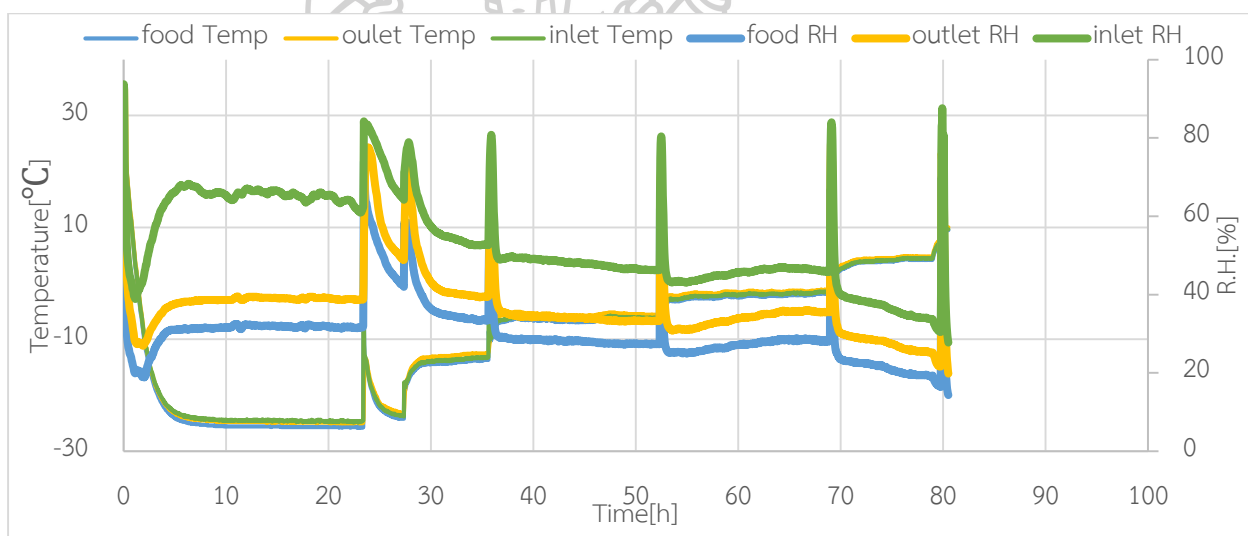
ภาพที่ 59 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งชิ้นเต็งโม้ที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C ระหว่างการศึกษาคุณภาพสำหรับครั้งที่ 1



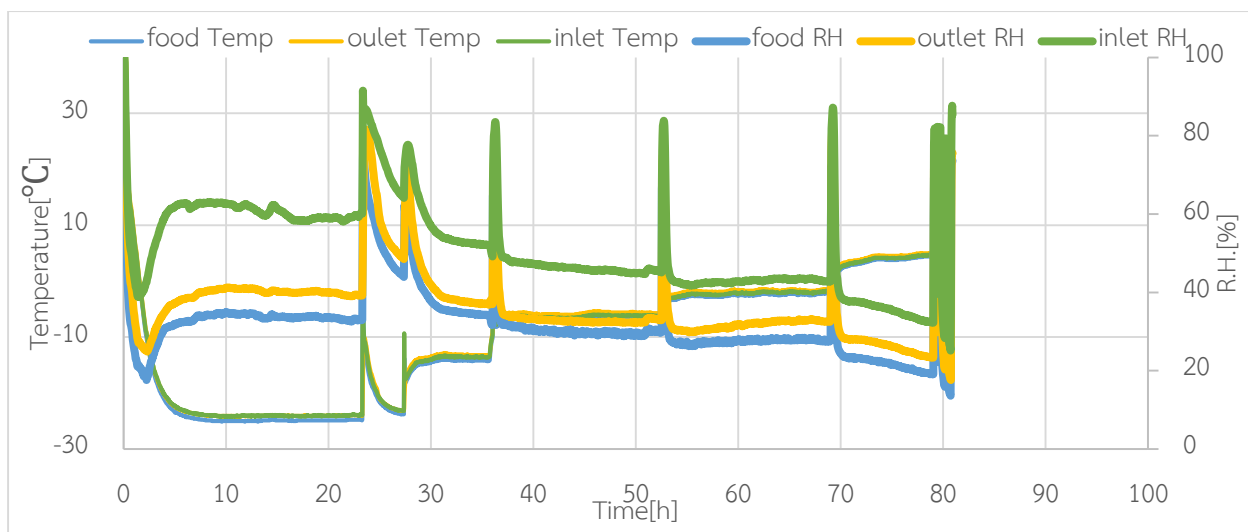
ภาพที่ 60 อุณหภูมิในระบบระหว่างการทำแห้งชิ้นเต็งโม้ที่ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C ระหว่างการศึกษาคุณภาพสำหรับครั้งที่ 2



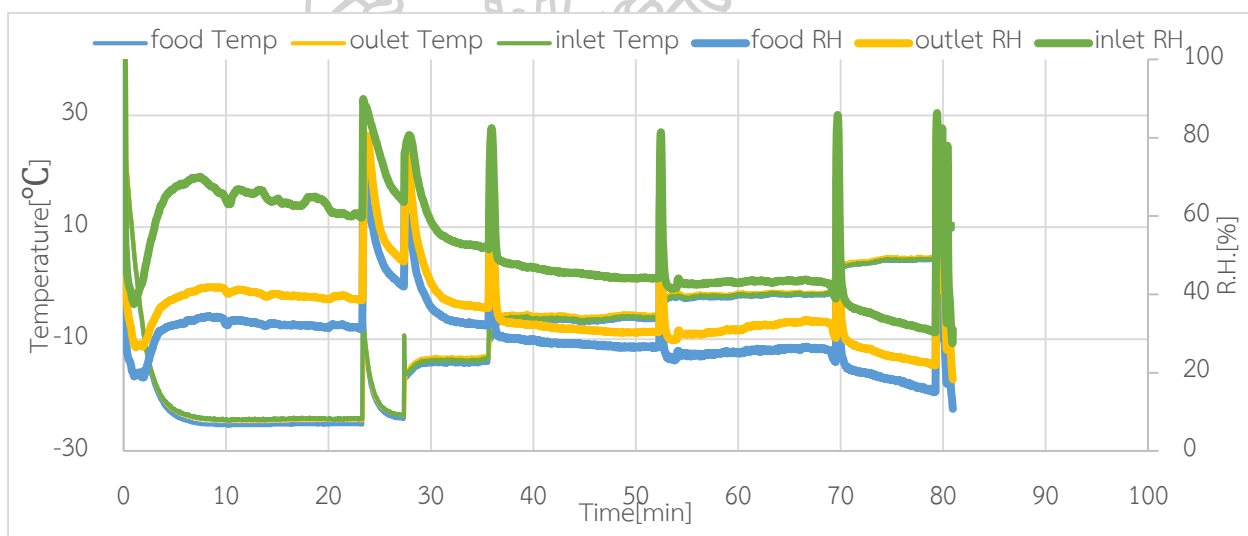
ภาพที่ 61 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 1



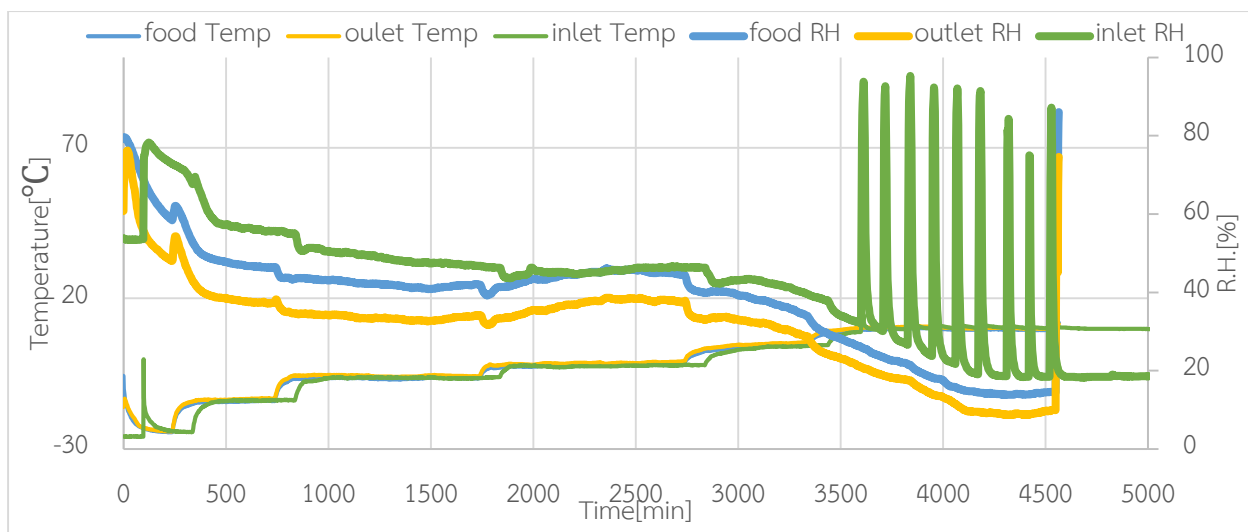
ภาพที่ 62 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 2



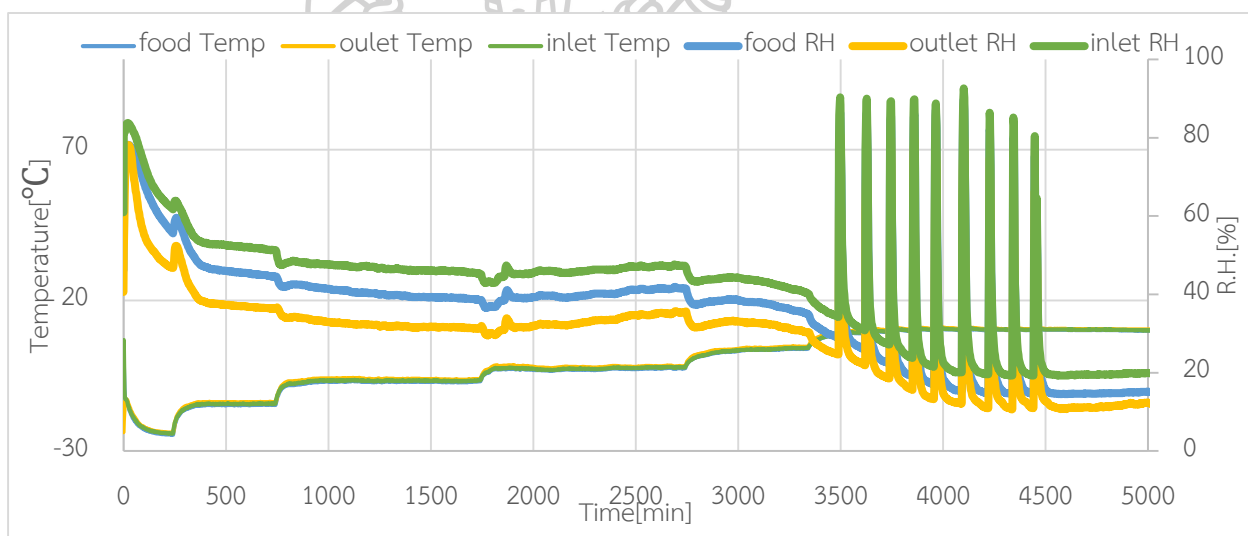
ภาพที่ 63 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ที่ผ่านการปรับสภาพที่ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 1



ภาพที่ 64 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ที่ผ่านการปรับสภาพที่ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 1-5 สำหรับครั้งที่ 2



ภาพที่ 65 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 6 สำหรับครั้งที่ 1



ภาพที่ 66 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระบบระหว่างการทำแห้งขึ้นแดงโม้ผ่านการปรับสภาพที่ -18°C และ -40°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง Step 6 สำหรับครั้งที่ 2

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมี

1.การวัดปริมาณความชื้นด้วยวิธี Hot air oven (AOAC, 2000)

1.1 การเตรียมตัวอย่าง

- สุ่มขึ้นเตงโม ในแต่ละชุดการทดลอง นำมาหั่นละเอียด จากนั้นเก็บ
- นำอลูมิเนียมแคนไปอบไล่ความชื้น ด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทอ้งไว้ในโถดูดความชื้น

1.2 วิธีวิเคราะห์

- ชั่งน้ำหนักอลูมิเนียมแคนที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกตัวเลขที่แน่นอน
- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เตรียมลงในอลูมิเนียมแคนที่เตรียมไว้ 3-4 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าตัวอย่างรวมกับอลูมิเนียมแคนด้วยตัวเลขที่แน่นอน
- นำไปอบโดยเปิดฝาอลูมิเนียมแคนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมง
- เมื่อครบเวลา ปิดฝาอลูมิเนียมแคน จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 10 นาที
- ชั่งน้ำหนักอลูมิเนียมแคนพร้อมตัวอย่างหลังอบด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน และคำนวณตามสมการด้านล่าง

1.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

$$MC(w.b.) = \left(\frac{W_i - W_t}{W_i} \right) \times 100$$

เมื่อ MC หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานเปียกในหน่วยเปอร์เซ็นต์

W_i หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_t หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

2. การวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด (Lycopene content)

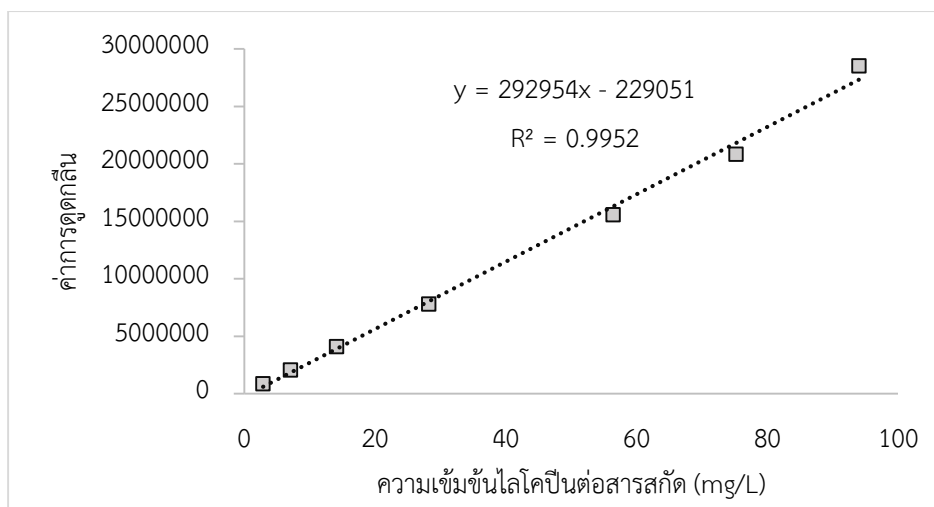
2.1 การเตรียมสารมาตรฐานไลโคปีน

ชั่งสารมาตรฐานไลโคปีน 0.00050 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง จากนั้นบดที่ก้นน้ำหนักรที่แน่นอนละลายใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร ด้วยเฮกเซนบริสุทธิ์ 99.99% เขย่าโดยเครื่องปั่นตกตะกอนสาร 15 วินาที ทำการเจือจางสารละลายไลโคปีน (Serial dilution) ตามความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ปริมาตรสารมาตรฐานไลโคปีน (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น	ความเข้มข้นแท้จริง	ปริมาตรสารละลายไลโคปีน (มิลลิลิตร)
100	94	5
80	75.2	4
60	56.4	3.75
30	28.2	2.5
15	14.1	2.5
7.5	7.05	2.5
3.75	2.86	2

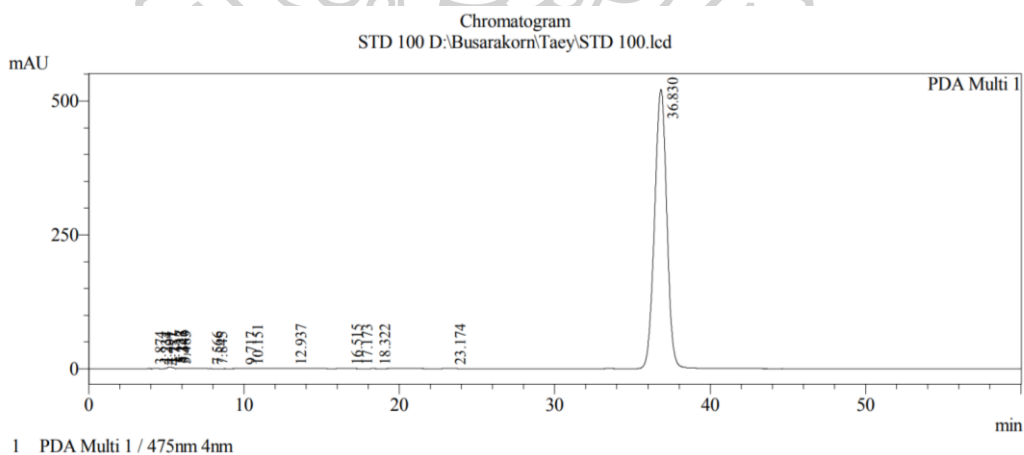
จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเฮกเซน 99.99% กรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมโครเมตรนำไปวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนต่อด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง วิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้นนำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างพื้นที่ใต้พีคกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไลโคปีน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ดังแสดงในภาพที่ 68



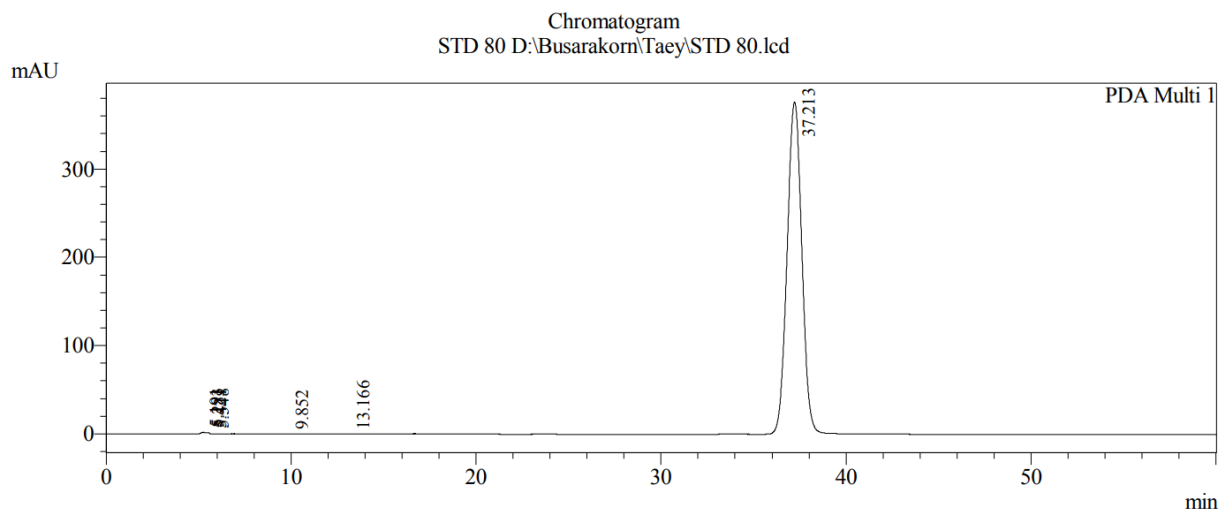
ภาพที่ 67 กราฟมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนทั้งหมด

2.2 วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี HPLC

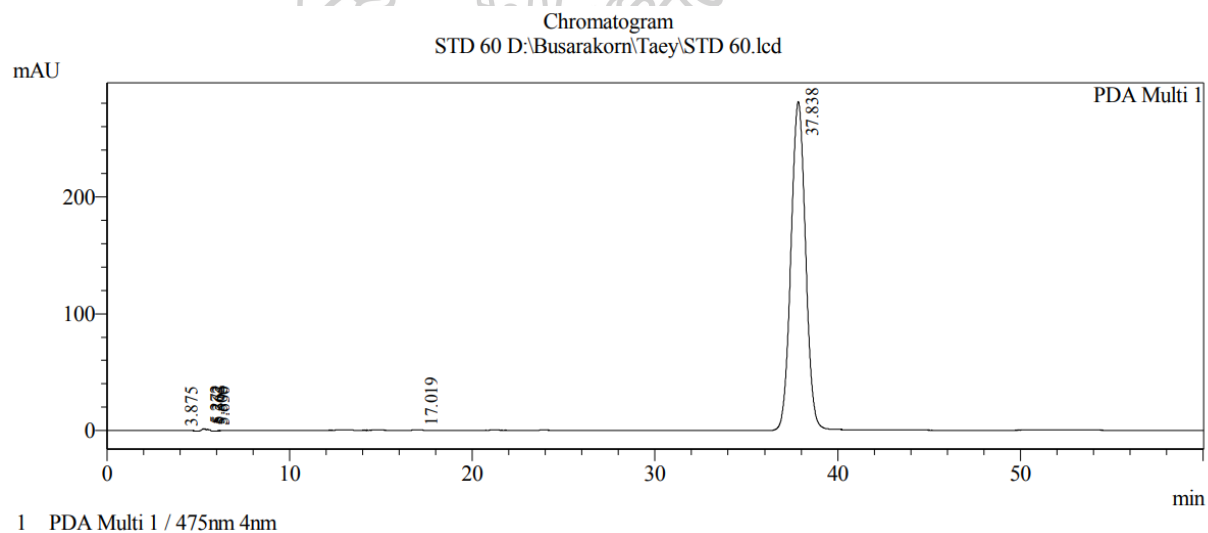
นำสารสกัดที่ได้ในข้อ 3.4.14.1 กรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนต่อด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง วิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของสารละลายเทียบกับสมการเส้นตรงกับกราฟสารมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) มีโครมาโตแกรม (Chromatogram) ที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนด้วย HPLC ดังแสดงในภาพที่ 69-75



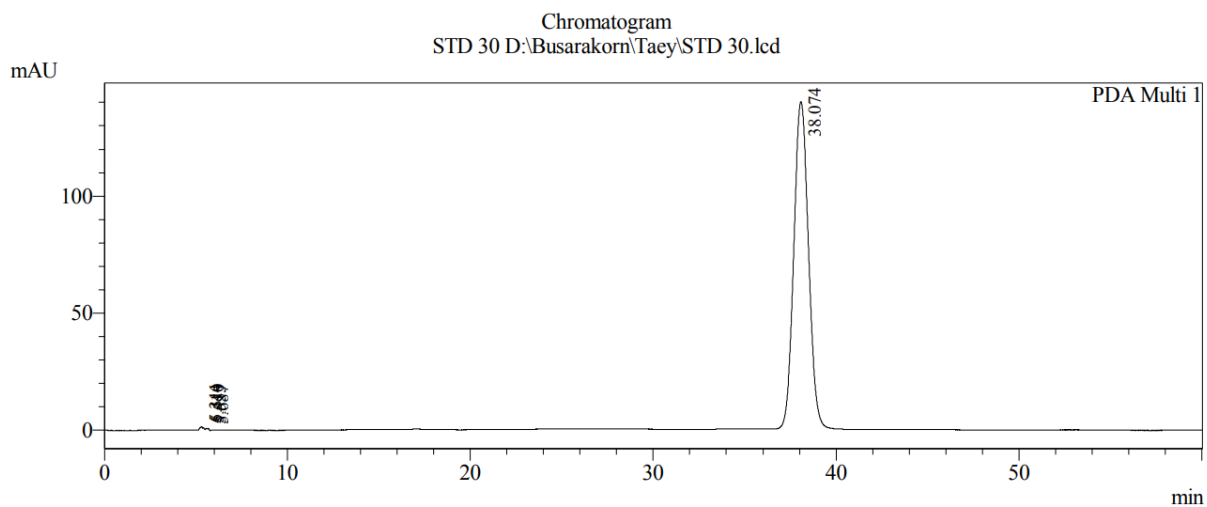
ภาพที่ 68 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 100 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC



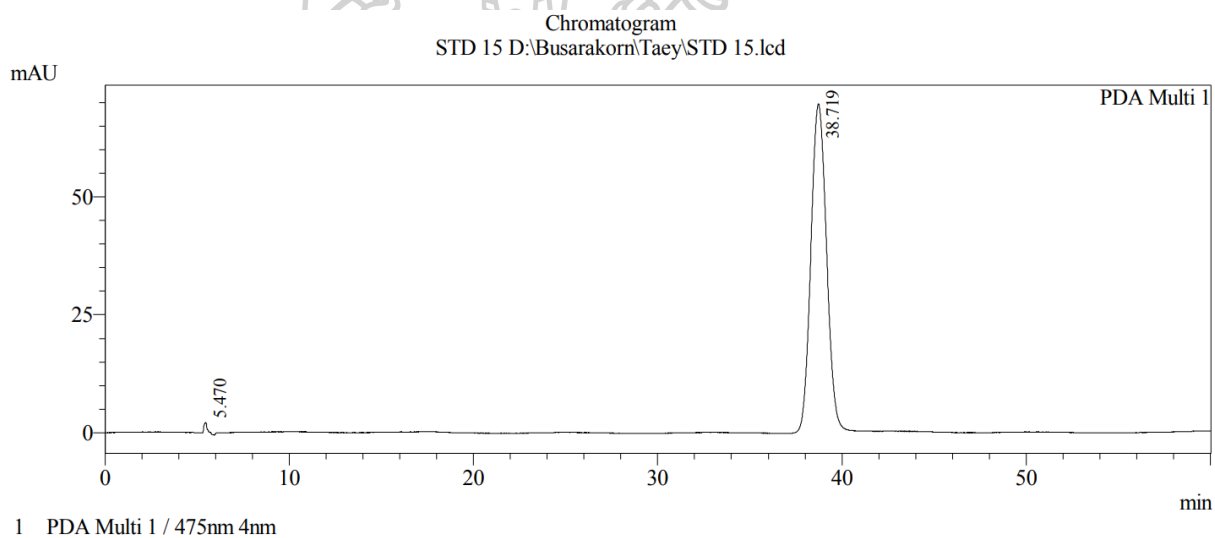
ภาพที่ 69 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 80 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC



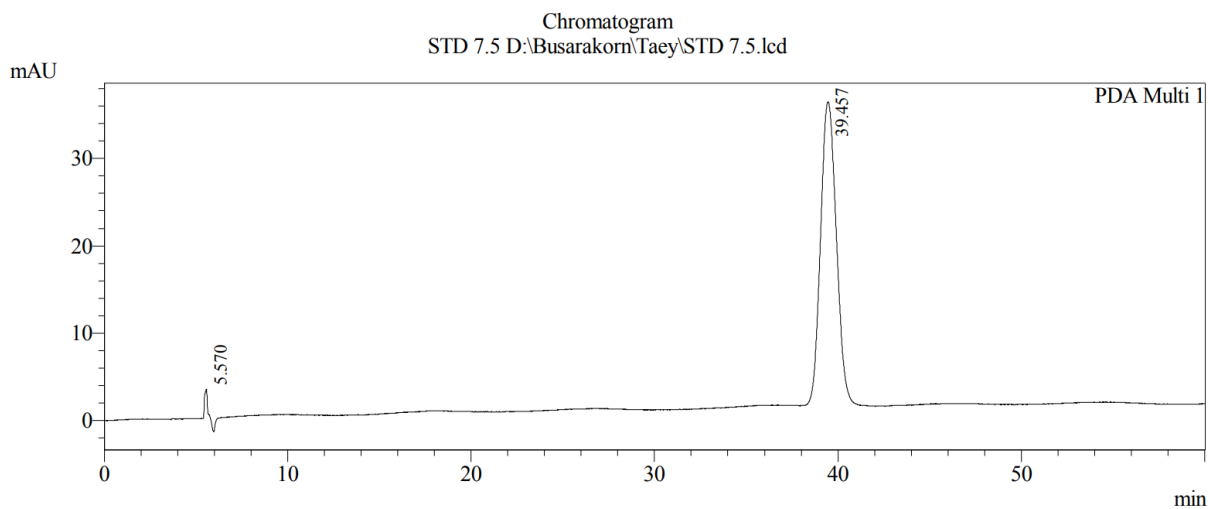
ภาพที่ 70 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 60 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC



ภาพที่ 71 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC

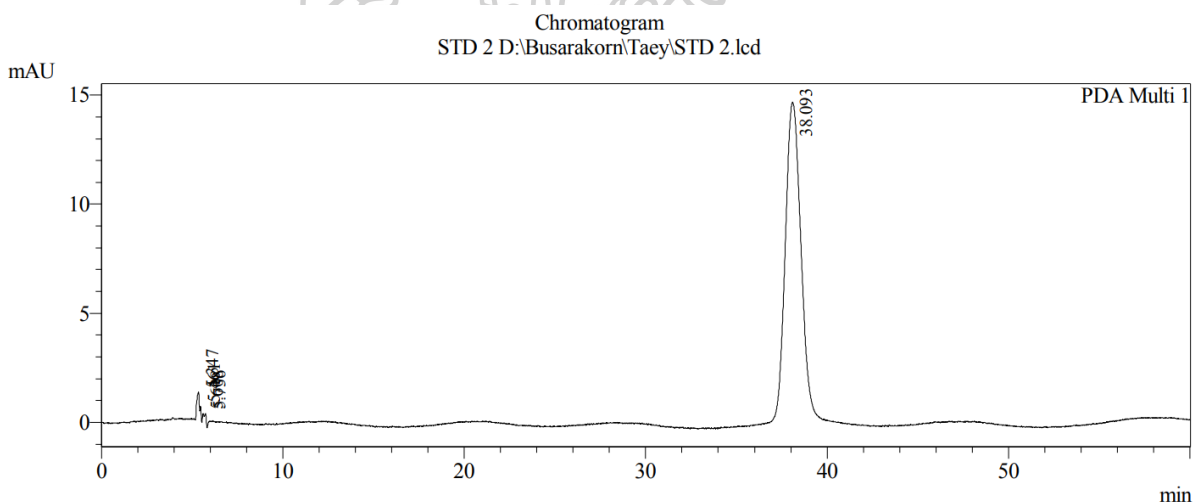


ภาพที่ 72 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 15 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC



1 PDA Multi 1 / 475nm 4nm

ภาพที่ 73 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 7.5 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC



1 PDA Multi 1 / 475nm 4nm

ภาพที่ 74 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐานไลโคปีนที่ความเข้มข้น 2 ppm ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC

2.3 การคำนวณไลโคปีนทั้งหมด

จากกราฟมาตรฐานไลโคปีนได้สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 292954x - 229051$$

y คือ พื้นที่ใต้กราฟ ที่ ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร

x คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ แทนความเข้มข้นของสารมาตรฐานไลโคปีนที่พบ

แทนค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ลงในสมการเส้นตรง ($Y = 7975025$) ลงในสมการจะได้

$$7975025 = 292954x - 229051$$

$$x = (7975025 + 229051)/292954$$

$$x = 28.00 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ตัวอย่างมีไลโคปีน 28.00 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้น ในสารสกัด 25 มิลลิลิตรพบกรดแกลลิก = $(28.00 \times 25)/1000 = 0.70$

มิลลิกรัม

คำนวณในหน่วยน้ำหนักสารแห้ง

สารแห้ง 0.21 กรัม พบไลโคปีน 0.70 มิลลิกรัม

ถ้าสารแห้ง 1.00 กรัม พบไลโคปีน $(1.00 \times 0.07)/0.21$ มิลลิกรัม

= 3.36 มิลลิกรัมไลโคปีนต่อ 1 กรัมสารแห้ง

3. การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content, TPC)

สารประกอบฟีนอลิก วิเคราะห์ด้วย a Folin - Ciocalteu assay ดัดแปลงจาก Singleton and Rossi (1965)

3.1 การสกัดตัวอย่าง

-ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการลดขนาดแล้วด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ในการสกัดใช้ตัวอย่างสด 3 กรัม ตัวอย่างแห้ง 1 กรัม บรรจุใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร

-7.1.2 เติมเมทานอลที่ความเข้มข้น 99.99% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 3 รอบในอัตราส่วน 10:10:5 มิลลิลิตร

-ปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นตักตะกอนสาร (Vortex Mixer) 15 วินาที จากนั้นนำเข้าเครื่อง อัลตราโซนิก 30 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส

-นำสารสกัดกรองผ่านแผ่นกรอง Whatman No. 4 ใส่ขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร

-บรรจุสารสกัดใส่ขวดสีชา และเก็บรักษาอุณหภูมิ -18°C ก่อนนำไปวิเคราะห์

3.2 การเตรียมสารละลาย

-Folin Ciocalteu's phenol reagent ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปิด Folin Ciocalteu's phenol reagent 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ผสมให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปใช้ โดยปกป้องไม่ให้สารละลาย สัมผัสกับแสงแดด

-7.5% (w/v) Na_2CO_3 solution ชั่ง Na_2CO_3 ซึ่งเป็นของแข็งสีขาว 7.5 กรัมด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งลงในปิเก็ตเจอร์ขนาด 25 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตรเพื่อละลาย Na_2CO_3 จากนั้นเท ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดพลาสติก

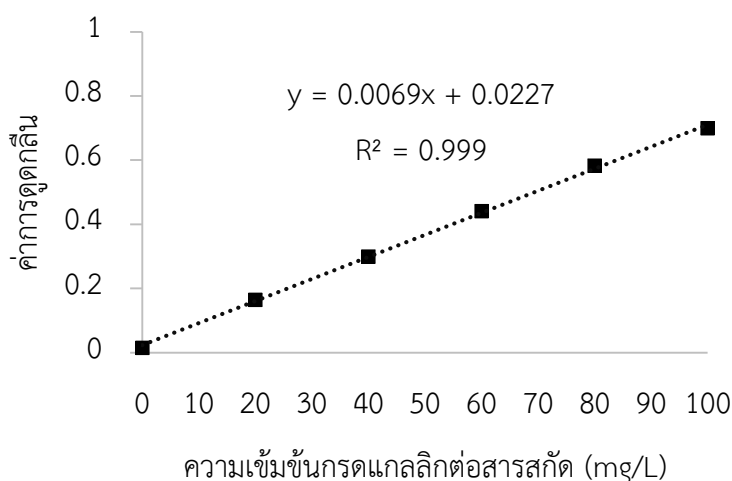
-สามารถฐานกรดแกลลิก ชั่งน้ำหนักสารมาตรฐานแกลลิกด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 0.1000 ± 0.0010 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอลที่มีความเข้มข้น 99.99% ปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (stock solution) จากนั้น เตรียมสารมาตรฐานกรดแกลลิกที่มีความเข้มข้นต่างๆลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับ ปริมาตรด้วยเมทานอล ดังแสดงในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ปริมาตรสารมาตรฐานแกลลิก (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้นที่	สารมาตรฐานแกลลิก (มิลลิลิตร)
0	0
20	0.2
40	0.4
60	0.6
80	0.8
100	1

3.3 กราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid standard curve)

นำสารมาตรฐานแกลลิกที่ความเข้มข้นละ 0.2 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชา เติมสารละลาย Folin Ciocalteu's phenol reagent ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมโดยใช้เครื่องปั่นตตะกอนสาร 15 วินาที และ ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เขย่าโดยเครื่องปั่นตตะกอนสาร 15 วินาที ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 76



ภาพที่ 75 กราฟมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่าง

สารสกัดที่ได้จากข้อ 1 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชา เติมสารละลาย Folin Ciocalteu's phenol reagent ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมโดยใช้เครื่องปั่นตกตะกอนสาร 15 วินาที และ ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เขย่าโดยเครื่องปั่นตกตะกอนสาร 15 วินาที ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนที่ตีควรมีค่า $0.2 > A > 0.8$ 7.5

3.5 การคำนวณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

จากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกได้สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 0.0069x + 0.0227$$

y คือ ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 765 nm

x คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ แทนความเข้มข้นของสารมาตรฐานกรดแกลลิกที่

พบ

แทนค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ลงในสมการเส้นตรง ($Y = 0.600$) ลงในสมการจะได้

$$0.600 = 0.0069x + 0.0227$$

$$x = (0.600 - 0.0227)/0.0069$$

$$x = 83.67 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ตัวอย่างมีกรดแกลลิก 83.67 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้น ในสารสกัด 25 มิลลิลิตรพบกรดแกลลิก $= (83.67 \times 25)/1000 = 2.09$ มิลลิกรัม

คำนวณในหน่วยน้ำหนักสารแห้ง

สารแห้ง 8.5 กรัม พบกรดแกลลิก 2.09 มิลลิกรัม

ถ้าสารแห้ง 1.00 กรัม พบกรดแกลลิก $(1.00 \times 2.09)/8.5$ มิลลิกรัม

$= 0.25$ มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมสารแห้ง

4. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH-assay

ดัดแปลงจาก (Brand –Williams และคณะ, 1994)

4.1 การสกัดตัวอย่าง

ใช้สารสกัดจากข้อ 3.1

4.2 การเตรียมสารละลาย

- 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 6×10^{-5} M ชั่งสาร DPPH 0.0118 กรัมด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ลงในปิ๊กเกอร์ เพื่อควบคุมไม่ให้สัมผัสแสง ละลายด้วยเมทานอล 99.99% คนให้ DPPH ละลาย ขั้นตอนนี้ต้องระวังเนื่องจาก DPPH มีความเข้มข้นมาก จึงต้องค่อยๆ เติมสารละลายเมทานอล และเทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรโดยเก็บให้พ้นจากแสง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ 517 nm ค่าที่ได้ควรมีค่า ≥ 0.8

- สารมาตรฐานโทรลอกซ์ ที่ความเข้มข้น 250 ppm โดยชั่งสารมาตรฐานโทรลอกซ์ 0.0250 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

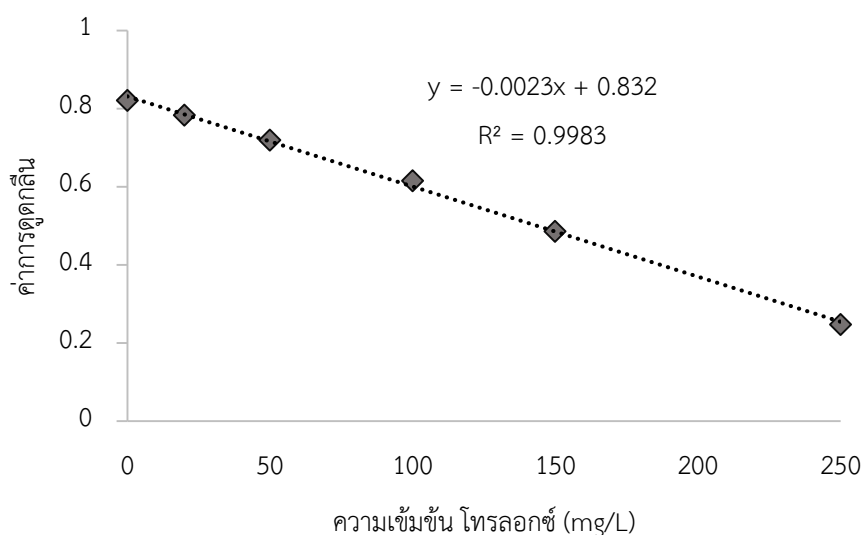
4.3 กราฟมาตรฐานสารมาตรฐานโทรลอกซ์สำหรับวิเคราะห์ DPPH-assay

แบ่งสารละลายมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ได้จาก ข้อ 4.2 ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เพื่อให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 24 ปีเปิดสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง โดยควบคุมกระบวนการให้พ้นจากแสง เติมสารละลาย DPPH ในข้อ 4.2 ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นตกตะกอนสาร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่น 517 nm มีเมทานอลเป็น สารตั้งต้น (blank)

ตารางที่ 24 ปริมาตรสารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้นที่	สารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร)
0	0
20	0.8
50	2.0
100	4.0
150	6.0
250	10.0

และกราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชั่น (DPPH-assay) แสดงในภาพที่ 77



ภาพที่ 76 กราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชั่น (DPPH-assay)

4.4 การวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชัน (DPPH-assay) ในตัวอย่าง

สารสกัดข้อ 3.1 ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง โดยคลุม ครอบวนการให้พ้นจากแสง เติมสารละลาย DPPH ในข้อ 4.2 ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ด้วยเครื่องปั่นตตะกอนสาร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่น 517 nm มีเมทานอลเป็น สารตั้งต้น (blank) ค่าที่ได้การดูดกลืนควรอยู่ในช่วง $0.2 > A < 0.8$

4.5 การคำนวณ DPPH

จากกราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ได้สมการเส้นตรงคือ

$$Y = 0.0023x + 0.832$$

y คือ ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 517 nm

x คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ แทนความเข้มข้นของสารมาตรฐานกรดแกลลิกที่

พบ

แทนค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ลงในสมการเส้นตรง ($Y = 0.600$) ลงในสมการจะได้

$$0.600 = 0.0023x + 0.832$$

$$x = (0.600 + 0.832) / 0.600$$

$$x = 2.38 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ตัวอย่างมีกรดแกลลิก 2.38 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้น ในสารสกัด 25 มิลลิลิตรพบกรดแกลลิก $= (2.38 \times 25) / 1000 = 0.060$ มิลลิกรัม

คำนวณในหน่วยน้ำหนักสารแห้ง

สารแห้ง 8.5 กรัม พบกรดแกลลิก 0.060 มิลลิกรัม

ถ้าสารแห้ง 1.00 กรัม พบกรดแกลลิก $(1.00 \times 0.060) / 8.5$ มิลลิกรัม

$= 0.007$ มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมสารแห้ง

5. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี (ABTS-assay)

5.1 การสกัดตัวอย่าง

ใช้สารสกัดจากข้อ 3.1

5.2 การเตรียมสารละลาย

-2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline--6-sulphonic acid) (ABTS) ความเข้มข้น 7M ชั่งสาร ABTS ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หนัก 0.0192 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ละลาย และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากนั้นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตรควบคุมให้พ้นจากแสง

- สารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 2.6 mM ชั่งสารโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.7028 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร

- working solution นำสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 5 มิลลิลิตร และ ABTS 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร บ่มในตู้เย็นและเก็บให้พ้นแสงเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง นำสารที่บ่มแล้วมา 9 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมนีออนอล 300 มิลลิลิตร ผลให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ 734 นาโนเมตร ค่าต้องอยู่ในช่วง 1.100 ± 0.02 หากไม่ได้ให้ เติม ABTS^o ที่ละลายแล้วนำไปวัดค่าซ้ำจนกว่าจะได้ค่าที่กำหนด

- สารมาตรฐานโทรลอกซ์ ที่ความเข้มข้น 250 ppm โดยชั่งสารมาตรฐานโทรลอกซ์ 0.0250 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

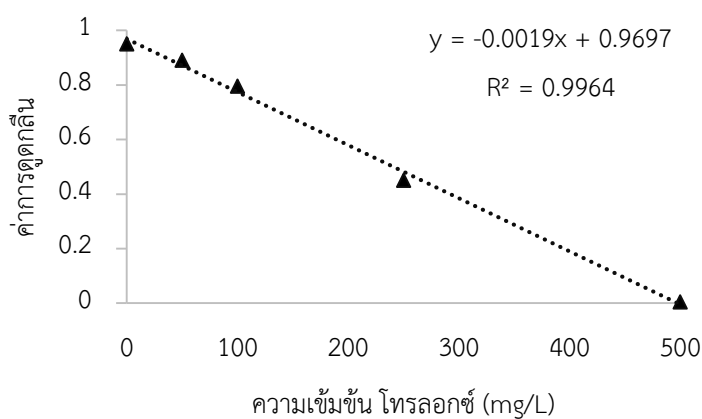
5.3 กราฟมาตรฐานสารมาตรฐานโทรลอกซ์สำหรับวิเคราะห์ ABTS-assay

แบ่งสารละลายมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ได้จาก ข้อ 5.2 ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เพื่อให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 25 นำสารมาตรฐานที่ได้ ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง ABTS (working solution) ปริมาตร 2850 ไมโครลิตร โดยควบคุมกระบวนการให้พ้นจากแสง ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นตักตะกอนสาร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่น 734 nm มีเมทานอลเป็น สารตั้งต้น (blank)

ตารางที่ 25 ปริมาตรสารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร) ที่ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น	สารมาตรฐานโทรลอกซ์ (มิลลิลิตร)
0	0
50	0.5
100	1.0
250	2.5
500	5.0
750	7.5
1000	10

และกราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชั่น (ABTS-assay) แสดงในภาพที่ 78



ภาพที่ 77 กราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆในการวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชั่น (ABTS-assay)

5.4 การวิเคราะห์สารต้านออกซิเดชัน (DPPH-assay) ในตัวอย่าง

นำสารสกัดในข้อ 5.1 ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง ABTS (working solution) ปริมาตร 2850 ไมโครลิตร โดยควบคุมกระบวนการให้พ้นจากแสง ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นตตะกอนสาร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 120 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่น 734 nm มีเมทานอลเป็น สารตั้งต้น (blank) ค่าที่ได้การดูดกลืนควรอยู่ในช่วง $0.2 > A < 0.8$

5.5 การคำนวณ ABTS

จากกราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ได้สมการเส้นตรงคือ

$$Y = -0.0019x + 0.9697$$

y คือ ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 734 nm

x คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ แทนความเข้มข้นของสารมาตรฐานกรดแกลลิกที่พบ

แทนค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ลงในสมการเส้นตรง ($Y = 0.600$) ลงในสมการจะได้

$$0.600 = -0.0019x + 0.9697$$

$$x = (0.600 - 0.9697) / -0.0019$$

$$x = 194.58 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ตัวอย่างมีกรดแกลลิก 194.58 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1000 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้น ในสารสกัด 25 มิลลิลิตรพบกรดแกลลิก = $(194.58 \times 25) / 1000 = 4.86$ มิลลิกรัม

คำนวณในหน่วยน้ำหนักสารแห้ง

สารแห้ง 8.5 กรัม พบกรดแกลลิก 4.86 มิลลิกรัม

ถ้าสารแห้ง 1.00 กรัม พบกรดแกลลิก $(1.00 \times 4.86) / 8.5$ มิลลิกรัม

= 0.57 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมสารแห้ง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววันชนก ไกรงาม
วัน เดือน ปี เกิด	05 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	ปริญญาบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	50/13 ม.14 ต.โพรงมะเดื่อ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	Wanchanok Kaingam Pramote Khuwijitjaru, Kyuya Nakagawa, Koichi Nishimura, Maya Nakabayashi, Toshiko Yasunobu, and Busarakorn Mahayothee. 2021. EFFECT OF DRYING METHODS ON THE QUALITY AND LYCOPENE CONTENT OF DRIED WATERMELON. The 2nd International Conference on Engineering and Industrial Technology 2021

