

การทำนายปริมาณน้ำอิสระแบบไม่ทำลายในสับประรดอบแห้งโดยใช้การ
วิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด
Nondestructive prediction of water activity in
dehydrated pineapples using near infrared spectroscopy



ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

การทำนายปริมาณน้ำอิสระแบบไม่ทำลายในสับปะรดอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์
การดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด
Nondestructive prediction water activity in dehydrated
pineapples using near infrared spectroscopy

จัดทำโดย

วิสสุตา ชันทนิเทศน์ รหัสนักศึกษา 59080181

ศิริรัตน์ มณีคะ รหัสนักศึกษา 59080197

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

.....
(รศ.ดร. สนธิสุข อีระชัยชยติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

...../...../.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

The objective of this research is to propose the calibration model for predicting water activity of dehydrated pineapples using near infrared spectroscopy at wavelengths 953-1720 nm with spectra data set and chemical reference of dehydrated pineapples. 191 samples were scanned by near infrared spectroscopy type hyperspectral imaging. After measuring, the spectra and water activity were analyzed. Original spectra were used for developing the calibration model using partial least square regression (PLSR). In this analysis, root mean square error of prediction and correlation coefficients in the prediction set were used for accuracy evaluation. As a results, showed that the best predictive performance with the smallest RMSEP (0.0051) and highest R_p (0.7545). Therefore, near infrared spectroscopy can be used to determine water activity of dehydrated pineapples, nondestructively.

Keywords: dehydrated pineapple, water activity, nondestructive, near infrared spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาพิเศษเล่มนี้จะไม่สามารสำเร็จจุล่งไปด้วยดีได้ หากไม่ได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ช่วยชี้แนะแนวทางตั้งแต่การค้นคว้าหาข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลตลอดการดำเนินงาน รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยของการจัดทำ ปัญหาพิเศษเล่มนี้ นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในส่วน of เครื่องมือและอุปกรณ์ จนปัญหาพิเศษเล่มนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจตลอดการทำปัญหาพิเศษและขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ให้คำแนะนำในการทำปัญหาพิเศษในครั้งนี้ด้วยเช่นกัน

วิสสุตา ชันทนิเทศน์

ศิริรัตน์ มณีคะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สับปะรด	3
2.2 การทำแห้ง (dehydration)	4
2.3 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration)	9
2.4 การผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง	16
2.5 water activity	21
2.6 Near infrared spectroscopy (NIRS)	27
2.7 วิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	34
3.1 วัสดุดิบและสารเคมี	34
3.2 อุปกรณ์	34
3.3 โปรแกรม	34
3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	37
4.1 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองทาง NIR spectroscopy และค่าของสมบัติทางเคมี	37
4.2 การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์	38
4.3 ลักษณะการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป	38
4.4 การสร้างโมเดลด้วยการวิเคราะห์แบบ PLS regression	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	51
ภาคผนวก ค	53
ภาคผนวก ง	57
ประวัติผู้เขียน	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity โดยทั่วไปที่ใช้กับชนิดจุลินทรีย์ ต่างๆในการสกัดกั้น และตัวอย่างชนิดของอาหาร	23
2.2	ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity เชื้อจุลินทรีย์กับอาหาร	24
2.3	แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า RPD	32
2.4	แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า R	32
4.1	ข้อมูลทางสถิติของค่าทางเคมีของตัวอย่าง	38
4.2	แสดงการปรับแต่งข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์	41
4.3	ผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายทั้งหมด	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ไอโซเทอมปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารทำแห้งด้วยการระเหิด	6
2.2	แผนภาพแสดงอิทธิพลของ aw ต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร	7
2.3	กราฟอัตราการทำแห้ง	8
2.4	การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิสในผักและผลไม้	10
2.5	การเคลื่อนที่ของสารละลายในช่องว่างระหว่างเซลล์โดยกลไก HDM	12
2.6	ปรากฏการณ์ electroporation หรือ pore formation	13
2.7	การแปรรูปผักและผลไม้โดยการแช่เย็น	17
4.1	ตัวอย่างสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป	37
4.2	สเปกตรัมเบื้องต้น (original spectra)	39
4.3	(a) แสดงสเปกตรัมดิบของตัวอย่าง 127 ชิ้น, (b) แสดงสเปกตรัม ของตัวอย่าง 127 ชิ้นที่ปรับแต่งด้วย smoothing	40
4.4	แสดงกระจายตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริง เปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม calibration set	43
4.5	แสดงกระจายตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริง เปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม prediction set	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบคุณภาพหรือองค์ประกอบของผลไม้อบแห้งโดยทั่วไปในปัจจุบันนี้ยังมีวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายสูง อาจจะทำให้สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เวลาในการตรวจสอบนานมาก ซึ่งในตอนนี้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการ โดยในปัจจุบันมีการเสนอวิธีการที่รวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการทำลาย ทั้งยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเรียกว่าเทคนิค near infrared spectroscopy (NIRS)

เทคนิค near infrared spectroscopy (NIRS) เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้คุณสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 780 – 2500 นาโนเมตร ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง และดูดกลืนรังสีไว ซึ่งปริมาณการดูดกลืนแสงจะเป็นไปตามกฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต (Beer – Lambert' law) คือความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นและความหนาของตัวอย่างนั้น พลังงานของคลื่นแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะถูกดูดกลืนไปโดยองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างนั้น โมเลกุลที่มีการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง NIR จะมีอะตอมของไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบ (Osborne et al., 1993)

จากความจำเป็นในการตรวจสอบข้างต้นซึ่งต้องได้ผลการตรวจวัดที่มีความแม่นยำในเวลาอันรวดเร็ว จึงได้มีการนำเทคนิค near infrared spectroscopy (NIRS) มาใช้ในการหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้อบแห้ง นอกจากจะใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ก็ยังต้องใช้ความรู้ทางสถิติมาร่วมในการประมวลผลข้อมูล ซึ่งน่าจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่จะเข้ามาทดแทนการใช้อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์หลายๆอย่าง ทั้งในส่วนของงานวิจัยและในเชิงธุรกิจต่อไปในอนาคต (ณรงค์พันธุ์ และคณะ, 2549)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงพลังงานย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared spectroscopy) ของสับปะรดอบแห้งกับปริมาณน้ำอิสระ

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการทำนายปริมาณน้ำอิสระแบบไม่ทำลายในสับปะรดอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared spectroscopy)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถทำนายปริมาณน้ำอิสระในสับปะรดอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดได้

1.3.2 สามารถวิเคราะห์การดูดกลืนแสงพลังงานย่านใกล้อินฟราเรดได้

1.3.3 สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับตัวอย่างในลักษณะอื่นๆได้

1.3.4 สามารถนำเทคนิค NIR spectroscopy นี้ไปใช้เทียบเท่ากับการวิเคราะห์ทางเคมีแบบดั้งเดิมได้โดยจะลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความรวดเร็วในการวิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สับปะรด

สับปะรด (Pineapple) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ananas comosus* (L.) Merr เป็นพืชในวงศ์ BROMELIACEAE ชื่ออื่นๆ คือ ขนนทอง, เนาะชะ, เนาะ, บอนัด, มะชะนัด, มะนัด, ม้าเนื้อ, ย่านนัด, ยานัด ลิงทอง, สับปะรดลาย, และหมากเก็ง สับปะรดเป็นไม้ล้มลุก สูง 50 - 125 เซนติเมตร ใบเดี่ยวเกิดจากราก เรียงเวียนเป็นกระจุก รูปแถบ กว้าง 1.5 - 6 เซนติเมตร ยาว 50 - 150 เซนติเมตร ขอบใบโค้งขึ้น มีหนามแหลม เนื้อใบหนา มีความแข็ง มีเส้นใย ท้องใบมีเกล็ดสีขาว ปลายยอดใบประดับสีแดงเหลืองหรือเขียว กลีบเลี้ยงเชื่อมติดกัน ปลายแยกเป็นแฉกรูปไข่แกมสามเหลี่ยม กลีบดอกรูปแถบแกมขอบขนาน ปลายแหลม โคนกลีบสีขาว ปลายกลีบสีม่วงหรือแกมชมพู ยาว 16 - 26 มิลลิเมตร ผลรวมรูปกระสวย กว้าง อวบน้ำ เปลือกแข็ง สีเหลืองหรือเกือบแดง กว้าง 3 - 15 เซนติเมตร ยาว 3 - 30 เซนติเมตร มักไม่ติดเมล็ด สับปะรดที่นิยมปลูกในประเทศไทยมีอยู่ประมาณ 3 กลุ่มคือ Cayenne (พันธุ์ปัตตาเวีย หรือที่เรียกว่าสับปะรดศรีราชา และพันธุ์นางแล), Queen (พันธุ์ภูเก็ต) และ Spanish (พันธุ์อินทร์ชิตและพันธุ์ขาว) ผลของสับปะรดมีสรรพคุณในการขับเหงื่อ ห้ามเลือด แก้ทางปัสสาวะ ขับพยาธิ ฆ่าพยาธิ แก้โลหิตระดู บำรุงโลหิต แก้น้ำ แก้วระดูขาว เป็นยาระบาย แก้ท้องอืด ทำให้แห้ง ช่วยย่อยอาหาร แก้ปัสสาวะพิการ (ปัสสาวะขัด) ขับปัสสาวะ กัดเสมหะในลำคอ แก้เสมหะ แก้เสมหะเหนียว ขับเสมหะ แก้ไอ ระงับการอักเสบและบวม ทำให้แผลหายเร็ว สับปะรด 100 กรัม จะให้พลังงานประมาณ 50 กิโลแคลอรี สารสำคัญที่พบในสับปะรดคือสารในกลุ่ม Phytoestrogens Isoflavones, Lignans Phenolics, กรดซิตริก, กรดมาลิก วิตามินต่างๆ รวมทั้งเอนไซม์บรอมีเลน การรับประทานสับปะรดหลังมื้ออาหารจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยอาหาร ซึ่งการรับประทานสับปะรดอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อยภายในปาก ริมฝีปาก และลิ้นได้ และแม้ว่าในขณะนี้ จะยังไม่มีรายงานความเป็นพิษจากการใช้ในรูปแบบของอาหาร แต่ไม่ควรรับประทานในขณะท้องว่าง เนื่องจากสับปะรดมีความเป็นกรดและมีเอนไซม์บรอมีเลน หากรับประทานขณะท้องว่างจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารได้ สำหรับผู้ที่แพ้พืชในตระกูลเดียวกับสับปะรดควรหลีกเลี่ยงการรับประทาน (กฤติยา, 2561)

2.2 การทำแห้ง (dehydration)

วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการทำแห้งคือเพื่อเก็บรักษา ถนอมผลิตภัณฑ์ และยืดอายุการเก็บ โดยการลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ จนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรือปฏิกิริยาอื่นๆได้ นอกจากนี้การลดปริมาณความชื้นยังมีผลต่อการเก็บรักษากลิ่น รส และคุณค่าทางอาหาร วัตถุประสงค์อีกประการหนึ่งคือการลดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยในการขนส่งและการเก็บรักษาองค์ประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวัตถุประสงค์สุดท้ายของการทำแห้งคือเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ซึ่งสะดวกต่อการใช้ของผู้บริโภค

ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ด้วยวิธีการทำแห้งจำเป็นต้องคำนึงถึงรูปร่างโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การกำจัดความชื้นเกิดขึ้นในลักษณะที่ทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด โดยผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จากกระบวนการทำแห้ง สามารถมีคุณภาพใกล้เคียงกับสภาพเริ่มต้นหลังการเติมน้ำ (rehydration) แล้วกระบวนการทำแห้งนี้จะต้องมีการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เหมาะสมภายในผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผักผลไม้แห้งมีคุณภาพเป็นไปตามต้องการ ดังนั้นในการออกแบบกระบวนการดังกล่าว จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์การถ่ายความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ คุณภาพที่เหมาะสม และประสิทธิภาพสูงสุดจะกระทำได้โดยการวิเคราะห์และเข้าใจกระบวนการนี้เท่านั้น

การกำจัดความชื้นเพื่อให้ได้อาหารแห้ง ส่วนใหญ่จะทำให้แห้งด้วยความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนเพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ การออกแบบระบบดังกล่าวจะเป็นไปไม่ได้หากปราศจากความเข้าใจอย่างลึกซึ้ง เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอย่างซับซ้อนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำแห้ง ซึ่งนอกจากจะได้ความเข้าใจที่จะก่อให้เกิดวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพแล้ว ยังได้กระบวนการที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม กระบวนการอบแห้งจะกระทำร่วมกับหน่วยปฏิบัติการอื่นๆ ในตอนแรกการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของความร้อนจากตัวให้ความร้อนไปยังจุดที่การระเหยเกิดขึ้น หลังจากการระเหยไอที่เกิดขึ้นจะต้องส่งไปยังตัวกลางที่ล้อมรอบผ่านโครงสร้างอาหาร กระบวนการนี้จะเป็นการไหลของของไหล (fluid flow) ดังนั้นในบางกรณีของเหลวอาจจะส่งผ่านโครงสร้างระหว่างกระบวนการอบแห้ง กระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารในลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนและแตกต่างกัน

เครื่องอบแห้งในปัจจุบันจะประดิษฐ์ขึ้นมาใช้กับผลิตภัณฑ์เฉพาะชนิดหนึ่ง และการออกแบบเครื่องเหล่านี้จะใช้หลักทฤษฎีนี้้อย่างน้อย นอกจากนั้นการถ่ายเทความร้อนและมวลยังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทำแห้งอย่างเท่าเทียมกัน ซึ่งก่อให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้นในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) ช่วยในการวิเคราะห์ระบบการอบแห้ง (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)

2.2.1 หลักการพื้นฐานของการทำแห้ง

สิ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารคือน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อก้าวถึงคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำที่ยึดเกาะในอาหาร มีน้ำอยู่ 3 ประเภทคือ (1) โมเลกุลน้ำที่ยึดกับออนิกกรุป ได้แก่ กลุ่มคาร์บอกซิลและอะมิโน (2) โมเลกุลน้ำยึดกับกลุ่มไฮดรอกซิลและอะไมด์ (amide) ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ (3) น้ำอิสระพบในช่องว่างอินเตอร์ทิเชียล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(interstitial pores) ซึ่งแรงคาพิลลารีและองค์ประกอบที่ละลายอยู่ทำให้ความดันไอลดลงในระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้น ระดับความยากง่ายของการกำจัดน้ำออกไปจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าน้ำนั้นอยู่ในกลุ่มใด ซึ่งชนิดของน้ำที่กล่าวมาแล้วนั้น ระดับความยากในการกำจัดความชื้นออกไปจะลดลงตามลำดับ และโอกาสที่น้ำจะถูกกำจัดออกไปเป็นปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นตามลำดับ หมายความว่าน้ำอิสระจะระเหยและกำจัดออกไปในตอนแรก จากนั้นจะเป็นโมเลกุลที่ยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน และสุดท้ายจะเป็นน้ำที่ยึดด้วยพันธะไอออนิก จากข้อมูลนี้พอสรุปได้ว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกำจัดความชื้นจากน้ำแต่ละชนิดที่กล่าวมาอาจจะใช้ปริมาณพลังงานที่แตกต่างกันในการกำจัดออกไป เนื่องจากความต้องการพลังงานในการกำจัดความชื้นแตกต่างกัน ขึ้นกับผลิตภัณฑ์และชนิดของน้ำ ดังนั้นการออกแบบเครื่องทำแห้งจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ ประสิทธิภาพของเครื่องที่ออกแบบขึ้นกับว่าสามารถกำจัดความชื้นตามที่ต้องการได้หรือไม่ นอกจากนี้กลไกที่แตกต่างกันของน้ำที่ยึดกับของแข็งยังมีผลต่อลักษณะเฉพาะของคุณภาพอาหารระหว่างการเก็บอีกด้วย (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)

2.2.1.1 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water Activity)

ปริมาณความชื้นสมดุลของสารนิยามว่าเป็นปริมาณความชื้นที่มีอยู่เมื่อสารมีความดันไอสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการอบแห้งจะเป็นปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัตราส่วนของความดันไอสมดุลต่อความดันไออิ่มตัวจะเรียกว่า ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล หรือ water activity (a_w) และค่านี้จะสอดคล้องกับค่าปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์นั้น

ขนาดของปริมาณความชื้นสมดุลจะขึ้นกับโครงสร้างของอาหาร และลักษณะที่น้ำยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ ในอาหารจะมีโมเลกุลของน้ำดูดซับอยู่บนผนังด้านในของ porous capillaries น้ำที่ดูดซับอยู่นี้อาจอยู่ในรูปของชั้นโมเลกุลเดี่ยวเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลต่ำ หรืออยู่ในรูปโมเลกุลหลายชั้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีกราฟไอโซเทอมเป็นรูปเลขสอง (2) หรือรูปตัวเอส (S) ขึ้นกับชนิดของน้ำที่ยึดเกาะในผลิตภัณฑ์นี้ ดังภาพที่ 2.1 เป็นกราฟไอโซเทอมของอาหารแห้งซึ่งได้จากการระเหิด (freeze-bried feed) ซึ่งแสดงผลของ hysteresis ระหว่างกราฟไอโซเทอมที่ดูดซับ (adsorption) และทำให้แห้ง (desorption) โดย hysteresis เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ย้อนกลับ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับความชื้น

สมการที่อธิบายไอโซเทอมสมดุลได้จากสมการ Langmuir สมการนี้มีสมมติฐานว่าอัตราส่วนของจำนวนโมเลกุลที่ดูดซับไว้ต่อความแตกต่างระหว่างจำนวนสูงสุด และจำนวนจริงเป็นสัดส่วนกับความดันไอ ดังนั้นสมการของ Langmuir เขียนได้ว่า

$$W_e = \frac{(W_e)_{\max} bp}{1 + bp} \quad (2.1)$$

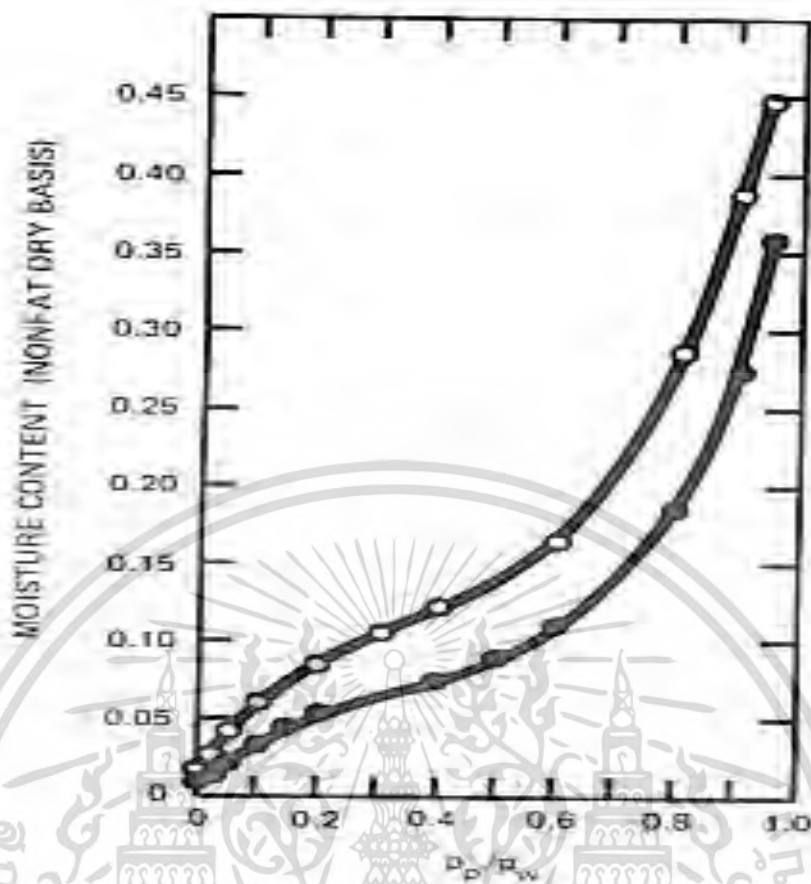
เมื่อ W_e = ปริมาณความชื้นสมดุล (ฐานแห้ง) (kg น้ำ / kg ของแข็งแห้ง)

$(W_e)_{\max}$ = ปริมาณความชื้นสมดุลสูงสุด (ฐานแห้ง) (kg น้ำ / kg ของแข็งแห้ง)

b = สัมประสิทธิ์การดูดซับ

p = ความดันไอ (kPa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

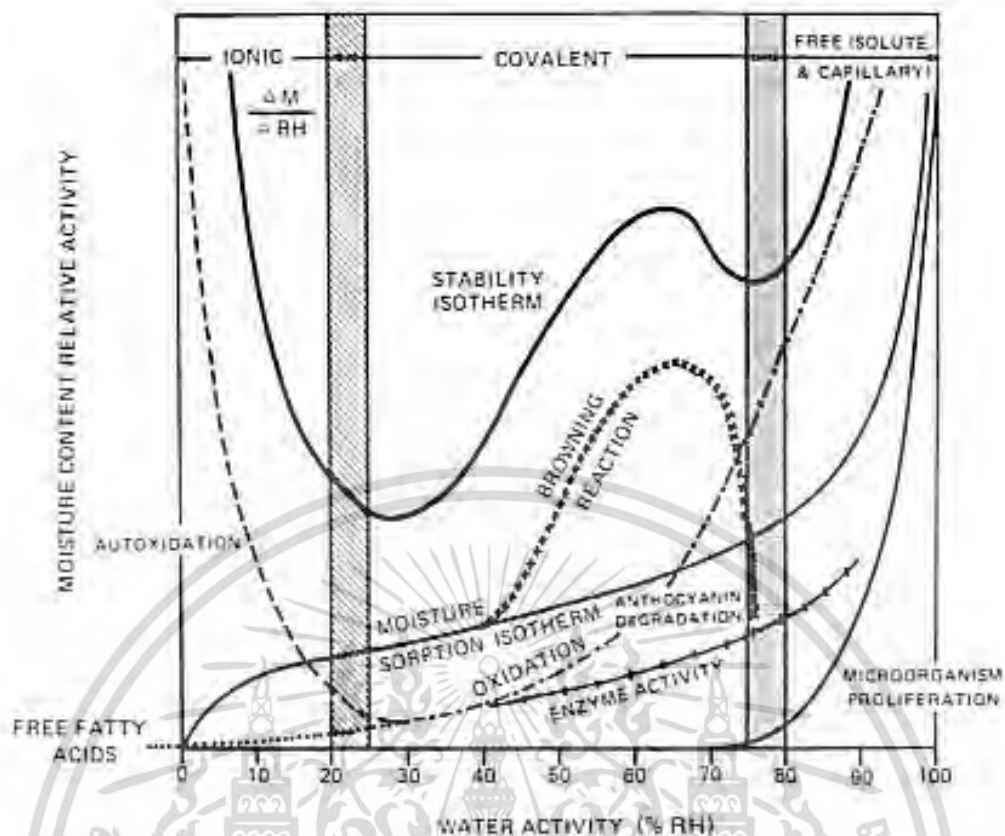


ภาพที่ 2.1 ไอโซเทอมปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารทำแห้งด้วยการระเหิด
ที่มา: ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย (2014)

ในเรื่องของอาหารแห้งจำเป็นต้องเน้นการวัดปริมาณความชื้นสมดุลอย่างมาก เนื่องจากค่า a_w มีความสำคัญต่อการเก็บอาหาร จากการศึกษาวิจัยยังพบว่าปฏิกิริยาหลายอย่างและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นภายในช่วงของค่า a_w ที่แน่นอนช่วงหนึ่ง ดังภาพที่ 2.2 เป็นแผนภาพแสดงอิทธิพลของ a_w ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เอนไซม์ และจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นชนิดที่น้ำยึดเกาะอยู่ที่กล่าวมาแล้ว คือ ค่า a_w ระหว่าง 0 ถึง 25 เป็นช่วงที่น้ำยึดด้วยอออนิก रूप เช่น NH_4^+ ยึดกับโปรตีน และ COO^- ยึดกับโปรตีน ในช่วง a_w ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 เกิดจากโมเลกุลน้ำยึดด้วยพันธะโคเวเลนต์ เช่น OH ในโปรตีนและพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง เพกทิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส และค่า a_w จาก 0.75 ถึง 1.0 จะมีชั้นของน้ำอยู่หลายชั้นบนโปรตีนและพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังมีน้ำความดันไอต่ำ เนื่องจากมีปริมาณตัวถูกละลายอยู่ เช่น น้ำตาลและกรดอะมิโนอิสระ

นอกจากค่า a_w จะบอกถึงความคงตัวระหว่างการเก็บของผลิตภัณฑ์ต่อปฏิกิริยาการเสื่อมเสียต่างๆ เราสามารถคาดได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะให้ปริมาณความชื้นสมดุลที่ต่ำลง และมีผลให้ความแตกต่างความชื้นสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นมากขึ้น (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 แผนภาพแสดงอิทธิพลของ a_w ต่ออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร
ที่มา: ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย (2014)

2.2.1.2 การแพร่กระจายของความชื้น (moisture diffusion)

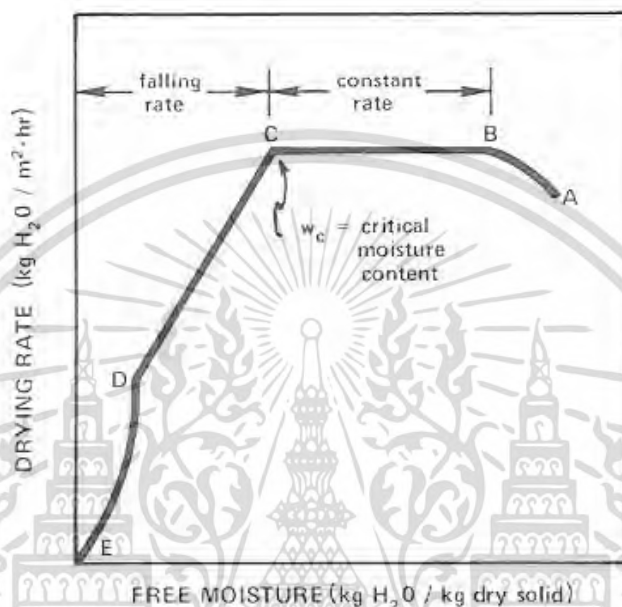
ปริมาณความชื้นที่กำจัดออกไปจากอาหารเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของเหลวหรือไอน้ำ (water vapor) ผ่านโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของความชื้นจะเกิดขึ้นหลังจากการระเหยน้ำเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งภายในผลิตภัณฑ์ และอัตราการแพร่กระจายประมาณได้จากกลไกที่ใช้ อธิบายการแพร่ของโมเลกุลแมสฟลักซ์ (mass flux) ของการเคลื่อนที่ ความชื้นจะขึ้นกับความแตกต่างของความดันไอ รวมทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอน้ำในอากาศ ระยะทางของการเคลื่อนที่ และอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนจำเป็นต้องใช้การระเหยความชื้น ดังนั้นกระบวนการนี้จึงมีการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมกัน

การกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ จะขึ้นกับการถ่ายเทมวล โดยการพาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แม้ว่ากระบวนการส่งถ่ายนี้จะไม่ได้จำกัดด้วยเวลา (rate-limiting) ก็ยังจำเป็นต้องพิจารณาความสำคัญในการรักษาสภาวะขอบเขตที่เหมาะสมของการขนถ่ายความชื้นด้วยเช่นกัน (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)

2.2.1.3 กราฟอัตราการแห้ง (drying-rate curves)

การระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไป จะมีอัตราการแห้งเป็นช่วงต่างๆ ดังภาพที่ 2.3 ความชื้นที่ระเหยไปในช่วงแรก (AB) จะเกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากการทำแห้งในช่วงแรกแล้ว ปริมาณความชื้นจะลดลงในอัตราที่คงที่ (BC) และที่อุณหภูมิคงที่ การทำแห้งในช่วงนี้จะเกิดขึ้นโดยผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ โดยปกติแล้วช่วงการทำแห้งที่อัตราการคงที่นี้จะจบลงที่ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) และจะตามด้วยช่วงอัตราการทำแห้งที่ลดลง (CD) ความชื้นวิกฤตินี้จะสังเกตได้ง่าย เพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการทำแห้งอย่างกะทันหัน (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)



ภาพที่ 2.3 กราฟอัตราการทำแห้ง
ที่มา: ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย (2014)

2.2.2.4 การถ่ายเทความร้อนและมวล (heat and mass transfer)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร จะมีการถ่ายเทความร้อนและเกิดมวลขึ้นพร้อมกัน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์และเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์ และผิวน้ำบางจุดภายในผลิตภัณฑ์ ขณะที่ให้ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่ง ซึ่งเพียงพอต่อการทำให้น้ำระเหย ไอที่เกิดขึ้นจะส่งออกจากผิวน้ำภายในผลิตภัณฑ์ไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ ความแตกต่างที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของไอความชื้น คือความดันไอที่ผิวน้ำเปรียบเทียบกับความดันไอของอากาศที่ผิวผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์จะเกิดในระดับโมเลกุล โดยที่การถ่ายความร้อนจะถูกจำกัดด้วยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโครงสร้างผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทมวล เป็นสัดส่วนกับการแพร่โมเลกุลของไอน้ำในอากาศ

ที่ผิวของผลิตภัณฑ์การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และควบคุมด้วยกระบวนการพา การขนถ่ายไอจากผิวผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศและการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผิวผลิตภัณฑ์ขึ้นกับความดันไอที่มีอยู่และความแตกต่างของอุณหภูมิตามลำดับ

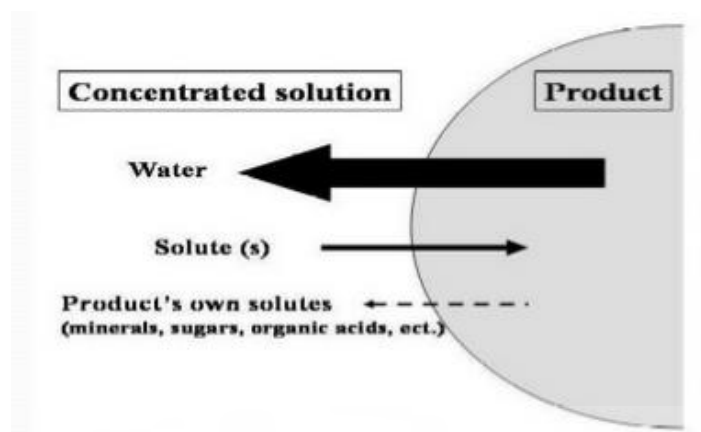
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอัตราการอบแห้งเป็นสัดส่วนกับกระบวนการที่ช้าที่สุดของทั้งสี่กระบวนการจึงจำเป็นต้องพิจารณาทุกกระบวนการ ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์จะเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา (rate-limiting) (ผศ.ดร. เจริญ เจริญชัย, 2014)

2.3 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration)

การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration) เป็นการแปรรูปอาหารที่สามารถลดปริมาณน้ำในอาหารลงได้ โดยส่วนใหญ่มักดำเนินการกับผักผลไม้ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำมาก ทำได้โดยการแช่ผักผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งเรียกว่าสารละลายออสโมติก เช่น สารละลายน้ำตาล สารละลายเกลือ และสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลและเกลือ เป็นต้น การออสโมติกสามารถลดปริมาณน้ำในวัตถุดิบลงได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูง เป็นวิธีลดปริมาณน้ำในผักผลไม้ที่ไม่รุนแรง จึงไม่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพไปจากของสดมากนัก มีการใช้ชื่อเรียกอื่นแทนการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก ได้แก่ กระบวนการดึงน้ำออกและการจุ่มแช่ (dewatering and impregnation soaking process, DIS process) (Raoult-Wack, 1994) หรือวิธีการแช่อิมที่คนไทยคุ้นเคยกันนั่นเอง ในการออสโมติกมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายประการซึ่งมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมติก (mass transfer during the osmotic dehydration process) การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายน้ำบางส่วนออกจากเนื้อเยื่ออาหารซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกเกิดเป็นแรงขับ (driving force) ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกในลักษณะสวนทางกัน ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membrane) สำหรับผักผลไม้ผนังเซลล์สามารถยืดขยายตัวได้ เมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นภายในเซลล์เยื่อหุ้มเซลล์จะทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้มากกว่าตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมติก ได้แก่ 1) น้ำภายในเซลล์ของผักผลไม้จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก 2) ตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก เช่น น้ำตาลหรือเกลือ จะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ผักผลไม้ และ 3) สารบางอย่างที่มีอยู่ในเซลล์ผักผลไม้ตามธรรมชาติ เช่น กรดอินทรีย์และเกลือแร่ จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก ทั้งนี้การถ่ายโอนมวลสารหลักที่เกิดขึ้นคือการเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเซลล์ของผักผลไม้ที่เกิดสวนทางกับการเคลื่อนย้ายของตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารนี้จะเกิดขึ้นจนเข้าสู่สมดุลของสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ ส่วนการเคลื่อนย้ายของสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเซลล์ผักผลไม้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกจะทำให้ปริมาณน้ำในผักผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้น้ำหนักสุทธิลดลงได้ รวมถึงทำให้ค่า water activity (a_w) ของผักผลไม้ลดลงด้วย (Torreeggiani, 1993; Raoult-Wack, 1994) การถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการออสโมติกดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิสในผักและผลไม้
ที่มา: Raoult-Wack (1994)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักและผลไม้ จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปถึงปัจจัยที่มีผลกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักและผลไม้ที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

2.3.1. ลักษณะของผักผลไม้

2.3.1.1 ชนิด พันธุ์ และความสุก

องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบผักผลไม้และลักษณะทางกายภาพ เช่น ความเป็นรู การเรียงตัวและโครงสร้างของเซลล์ ลักษณะเส้นใยและผิว สัดส่วนของโปรโตพลาสต์ต่อเพคตินที่ละลายได้ ช่องว่างภายในเซลล์ และการยึดติดกันของเซลล์ เป็นต้น มีความแตกต่างกันเมื่อชนิด พันธุ์ และความสุกแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ผักผลไม้กับสารละลายออสโมติก และมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการออสโมซิสและความสามารถในการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิส (Wichamanee, 2013)

Kowalska and Lenart (2001) นำแอปเปิล พักทองและแครอทมาออสโมซิสในสภาวะเดียวกัน พบว่าพักทองมีการถ่ายเทมวลน้ำสูงแต่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำ จึงเป็นผลให้พักทองมีน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุด ส่วนแอปเปิลมีการถ่ายเทมวลน้ำสูง แต่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งสูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของแอปเปิลมีความเป็นรูพรุนสูง ทำให้น้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นแอปเปิลได้ง่ายที่สุด จึงทำให้แอปเปิลมีน้ำหนักที่ลดลงสุทธิน้อยที่สุด

Garcia et al. (2010) พบว่าการออสโมซิสโดยใช้มะละกอดิบทำให้มีปริมาณน้ำหนักที่ลดลงและปริมาณน้ำที่สูญเสียมากกว่ามะละกอสุก เนื่องจากมะละกอดิบมีลักษณะความเป็นรูพรุนในเซลล์มากกว่ามะละกอสุก จึงยอมให้น้ำที่อยู่ในเซลล์ถ่ายเทออกจากช่องว่างในเซลล์ได้มากกว่า (Wichamanee, 2013)

2.3.1.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหาร

มีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ระหว่างการถ่ายโอนมวลสารขณะออสโมซิส ซึ่งเป็นผลจากระยะการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผักผลไม้ การเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติก และยังมีผลต่อสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติก ถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น รูปร่างเป็นวงแหวนและขนาดชิ้นเล็ก น้ำจะมีโอกาสแพร่ออกมาได้มากกว่าการมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย เช่น รูปร่างเป็นแฉกและขนาดชิ้นใหญ่ (Wichamanee, 2013)

Sablani and Rahman (2003) พบว่าการหั่นมะม่วงเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า (ขนาด 2 เซนติเมตร) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือการหั่นเป็นแท่งรูปสามเหลี่ยม (ยาว 5.5 เซนติเมตร และขนาดสามเหลี่ยม $2.0 \times 2.0 \times 1.5$ เซนติเมตร) และหั่นเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ($3.5 \times 1.8 \times 1.0$ เซนติเมตร) ตามลำดับ โดยการมีผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมากกว่า

Yuenyonputtakal (2006) พบว่า การหั่นเนื้อลูกพลับเป็นแฉกกลม ซึ่ง มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมาก มีปริมาณน้ำหนักที่ลดลง ปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า (Wichamanee, 2013)

2.3.2. การเตรียมชิ้นต้น

2.3.2.1 การลวก

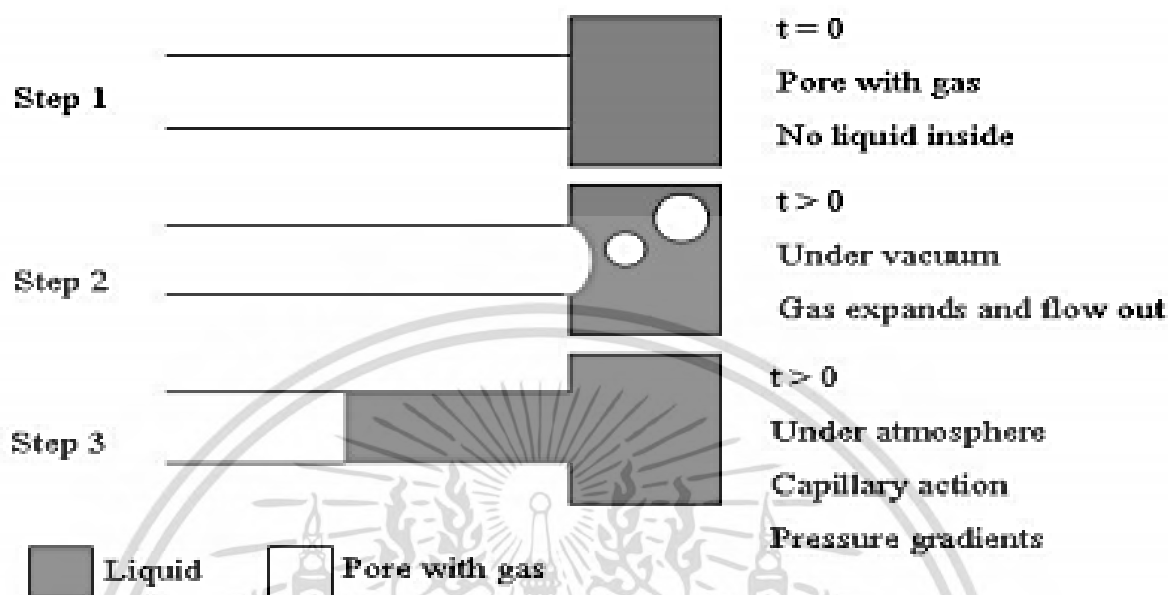
สามารถทำได้โดยลวกในน้ำร้อนหรือลวกโดยใช้ไอน้ำร้อน การลวกจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของผักผลไม้อ่อนตัวลง เพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ให้มากขึ้น เพิ่มโอกาสการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์และทำให้ตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้มากขึ้น โดยพบว่าการลวกให้ผลดีกับผักผลไม้ที่มีเนื้อแข็ง

Escobar et al. (2007) สรุปว่าการลวกแคโรทในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลซูโครสมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการลวกนานขึ้น โดยที่การลวกนาน 30 วินาที ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวกร้อยละ 90 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากการลวกทำให้เซลล์เนื้อเยื่อแคโรทถูกทำลายและเกิดการสูญเสียน้ำตาลกาแลคโตสและอะราบิโนส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเพกตินที่ผนังเซลล์แคโรท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ควบคุมขนาดช่องเปิดของเซลล์ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ลวก (Wichamanee, 2013)

2.3.2.2 การใช้สภาวะสุญญากาศ

ทำได้โดยการลดความดันอากาศลง จนทำให้เกิดสภาวะความดันสุญญากาศ ในภาชนะปิด เมื่อเริ่มต้นกระบวนการออสโมซิสเป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะปล่อยให้กลับคืนสู่ความดันบรรยากาศ เป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการแพร่ของน้ำจากเนื้อเยื่อของชิ้นผักผลไม้ไปสู่สารละลายออสโมติก โดยเกิดกลไก Hydrodynamic (HDM) การเคลื่อนที่ของสารละลายในช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เกิดขึ้น อธิบายดังภาพที่ 2.5 ในขั้นตอนที่ 1 เมื่อเริ่มแช่ชิ้นผักผลไม้ ($t = 0$) ที่สภาวะบรรยากาศ สารละลายภายนอกยังไม่มีเคลื่อนที่เข้ามาภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ ขั้นตอนที่ 2 เมื่อแช่ผักผลไม้ที่สภาวะสุญญากาศ ($t > 0$) ก๊าซที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์จะถูกดูดออกมาพร้อมกับการดูดอากาศ และขั้นตอนที่ 3 เมื่อหยุดการใช้สภาวะสุญญากาศและแช่ชิ้นผลไม้ต่อที่สภาวะบรรยากาศเป็นระยะเวลาหนึ่ง ($t > 0$) สารละลายแพร่ผ่านเข้ามาในช่องว่างระหว่างเซลล์ไม่ช้ากว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเข้ามาแทนที่ก๊าซที่ถูกดูดออกไป โดยการแพร่ผ่านรูขนาดเล็ก (Capillary action) และเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศ (Pressure gradients) (Chiralt & Fito, 2003)



ภาพที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของสารละลายในช่องว่างระหว่างเซลล์โดยกลไก HDM
ที่มา: Chiralt & Fito (2003)

ในขณะที่ให้ความดันสุญญากาศ ก๊าซที่อยู่ในโครงสร้างของชิ้นผักผลไม้จะถูกบีบอัดทำให้เกิดการแพร่และเคลื่อนที่ออกจากเนื้อเยื่อ เมื่อความดันกลับสู่ความดันบรรยากาศ สารละลายออสโมติกก็จะแพร่เข้ามาในเนื้อเยื่อของผักผลไม้แทน โดยก๊าซที่เหลือจากการถูกบีบอัดจะเป็นตัวนำสารละลายเข้าสู่เซลล์ทางช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้โอกาสการถ่ายโอนมวลสารต่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้น การใช้สภาวะสุญญากาศทำได้ 2 แนวทาง คือ การใช้สุญญากาศเป็นเวลาสั้นในช่วงแรกของการออสโมซิส (vacuum osmotic dehydration; VOD) เช่น ใช้สภาวะสุญญากาศ 20 นาที แล้วออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ ส่วนอีกแนวทางหนึ่งคือการใช้สุญญากาศแบบเป็นจังหวะ (pulse vacuum osmotic dehydration; PVOD) เป็นการใช้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลาสั้นในช่วงแรก แล้วกลับสู่สภาวะบรรยากาศเวลาสั้น แล้วใช้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลาสั้นอีกครั้งก่อนออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ เช่น ใช้สภาวะสุญญากาศ 10 นาที แล้วกลับสู่สภาวะบรรยากาศ 10 นาที และให้สภาวะสุญญากาศอีกครั้งนาน 10 นาที แล้วจึงออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ การใช้สภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสารและช่วยรักษาคุณภาพบางประการได้

Tapia et al. (1999) เปรียบเทียบการออสโมซิสที่สภาวะบรรยากาศกับสภาวะ VOD ที่ความดัน 60 มิลลิบาร์ พบว่า สภาวะ VOD สามารถช่วยลดปริมาณความชื้นของมะละกอ

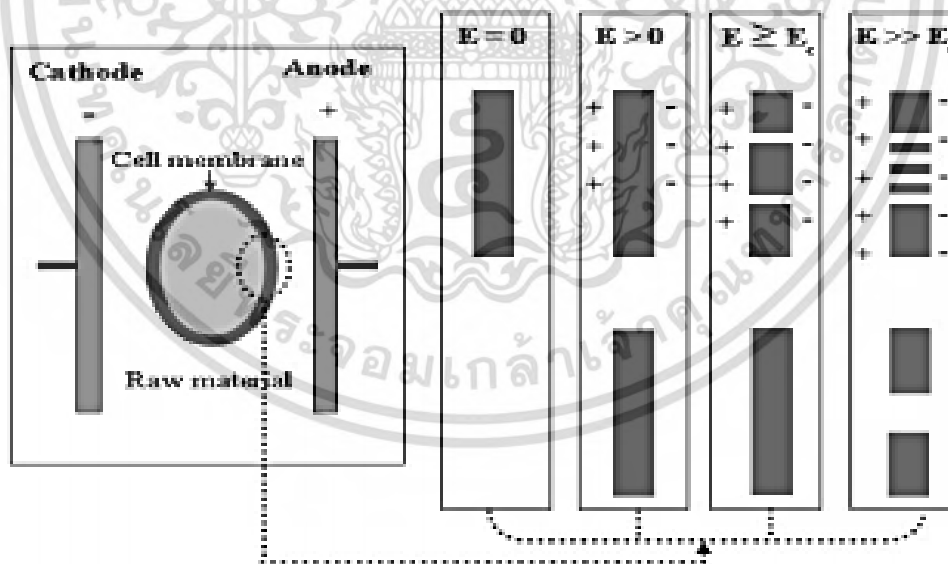
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เร็วกว่าการใช้สภาวะบรรยากาศ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่น รสดีใกล้เคียงกับวัตถุดิบเริ่มต้น

Chafer et al. (2003) พบว่าชิ้นลูกแพร์ มีอัตราการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สภาวะ PVOD เป็นจังหวะนาน 5 นาที ที่ความดัน 50 มิลลิบาร์ และทำให้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการลวกและตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น (Wichamane, 2013)

2.3.2.3 การใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ (pulsed electric fields; PEF)

ดำเนินการโดยให้สนามไฟฟ้า (E) ผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหาร จนเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อมีการสะสมประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์จนทำให้มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตที่จะทำให้เกิดการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ (E_c) ซึ่งจะใช้เวลาสั้นมากและทำให้เกิดปรากฏการณ์ electroporation หรือ pore formation ซึ่งอธิบายดังภาพที่ 2.6 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ irreversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง 14 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตอย่างมาก ($E \gg E_c$) จนทำให้เกิดการทำลายที่เยื่อหุ้มเซลล์อย่างถาวร เกิดเป็นรูขนาดใหญ่ นำมาประยุกต์ใช้ในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อการถนอมอาหารได้ และ reversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์จากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตเพียงเล็กน้อย ($E \geq E_c$) เพื่อให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูขนาดเล็ก ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลสารเข้าออกผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เท่านั้น เซลล์ไม่ถูกทำลายมาก ประยุกต์ใช้กับการเตรียมชิ้นต้นก่อนการตั้งน้ำออกแบบออสโมซิสได้ (Von et al., 2006)



ภาพที่ 2.6 ปรากฏการณ์ electroporation หรือ pore formation

ที่มา: Mertens & Knorr (1992)

เมื่อใช้ PEF มักตรวจวัดค่าดัชนีการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ (Z_p) ซึ่งใช้ประเมินการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยเปรียบเทียบกับเยื่อหุ้มเซลล์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเซลล์ทางไฟฟ้า Z_p มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย 0 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และ 1 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการแตกอย่างสมบูรณ์ (Wichamanee, 2013)

Rastogi et al. (1999) พบว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 0-1.7 kV/cm ทำให้ค่า Z_p ของชิ้นแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 - 0.82 มีผลให้จำนวนและ ขนาดของรูที่เยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้น และเพิ่มสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากขึ้น แครอทจึงมีการสูญเสียน้ำมากกว่า และเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มกว่าแครอทที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น

นอกจากนี้ปัจจัยด้านลักษณะของวัตถุดิบก็มีส่วนสำคัญต่อการทำลาย เยื่อหุ้มเซลล์ด้วย Ade-Omowaye et al. (2002) พบว่าพริกหยวกที่เอาเปลือกออกมีค่า Z_p มากกว่า ตัวอย่างที่ยังมีเปลือกอยู่ เนื่องจากเปลือกของพริกหยวกจะเพิ่มความต้านทานต่อสนามไฟฟ้า ทำให้ การแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง (Wichamanee, 2013)

2.3.2.4 การใช้คลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงเกินความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน (มากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์) เป็นคลื่นที่ส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ด้วยการถ่ายโอนพลังงานกล ของอนุภาค จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ ในการเคลื่อนที่ของคลื่นนี้จะเกิด ปรากฏการณ์cavitation effect ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องมาจากฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่น ที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวนด์เป็นระยะ และเกิดการแตกเปลี่ยนแปลงแก๊สระหว่างกัน หากนำมาประยุกต์ใช้ ในการเตรียมชิ้นต้นก่อนการออสโมซิสผักผลไม้จะช่วยให้ น้ำที่ยึดติดกับเนื้อเยื่อผักผลไม้ สามารถแพร่ออกมาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศดังกล่าวมีผลทำให้เกิดรูขนาดเล็กขึ้นในชิ้นผักผลไม้ได้ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสให้สารละลายออสโมติกสัมผัสกับเนื้อเยื่อได้มากขึ้น จึงมีโอกา สเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้นนั่นเอง (Wichamanee, 2013)

Fernandes et al (2009) การเตรียมชิ้นต้นทำได้โดยนำชิ้นผักผลไม้แช่ในน้ำหรือ สารละลายออสโมติก ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก กรณีผลไม้ที่มีลักษณะ เนื้อไม่แข็งนัก เช่น เมล่อน สับปะรด สามารถใช้เวลาสั้นประมาณ 10-30 นาที แล้วจึงนำชิ้นผักผลไม้ ไปออสโมซิสต่อในสภาวะปกติ จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิก มีส่วนช่วยให้เนื้อเยื่อผักผลไม้มีลักษณะเป็นรูขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และเกิดช่องว่างภายในเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้ เซลล์มีการยึดติดกันน้อยลง มีโอกาสสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ได้มากขึ้น และส่งผลดีเมื่อนำตัวอย่าง หลังการออสโมซิสไปทำแห้งแบบลมร้อนต่อ พบว่ามีส่วนช่วยให้การแพร่ออกของน้ำง่ายขึ้นและใช้เวลา ในการทำแห้งลดลงได้ (Fernandes et al., 2009; Fernandes et al., 2008)

2.3.3. ลักษณะของสารละลายออสโมติก

2.3.3.1 ชนิดของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกที่นิยมใช้ คือ น้ำเชื่อมจากน้ำตาล อย่างไรก็ตาม ชนิดของน้ำตาลมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการถ่ายโอนมวลสาร อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marani et al. (2007) พบว่า การใช้น้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารละลายฟรุคโตส สามารถเร่งการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นกีวีได้ดี โดยมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารละลายซูโครส เนื่องจาก การใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้เกิดแรงดันออสโมติกต่ำ ทำให้มีการสูญเสียน้ำและทำให้ของแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในการใช้สารละลายออสโมติกก็มีความพยายามที่จะใช้สารละลายผสม ซึ่งเป็น การเพิ่มแรงขับในการถ่ายโอนมวลสาร นิยมเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ปริมาณเล็กน้อยลงไป ใน สารละลายออสโมติกด้วย ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มแรงขับแล้วยังช่วยลดค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ด้วย การใช้น้ำคั้นจากผลไม้มาเตรียมเป็นสารละลายออสโมติกก็สามารถ ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการออสโมซิสได้ เนื่องจากสามารถเกิดการถ่ายเท สารธรรมชาติที่มีในน้ำคั้นเหล่านั้นกลับคืนมาในผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้อาจเติมสารอื่นลงไปด้วย เช่น เติมน้ำตาลเพื่อช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงรูปไว้ เมื่อสัมผัสไม่แข็งกระด้าง เป็นต้น (Wichamanee, 2013)

2.3.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

ในการออสโมซิสต้องใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้น ภายในชิ้นผักผลไม้ เพื่อให้เกิดความแตกต่างของแรงดัน เกิดเป็นแรงขับให้มีการถ่ายโอนมวลสาร ระดับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกจึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำ และตัวถูกละลาย โดยมีแนวโน้มคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกส่งผลให้ อัตราการถ่ายโอนมวลสารของน้ำและตัวถูกละลายมีค่าเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย มีค่า a_w ต่ำลง อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายออสโมติกที่เข้มข้นมากเกินไปก็สามารถทำให้เกิด การถ่ายโอนมวลสารลดลงได้ เนื่องจากหากสารละลายมีความเข้มข้นมากก็มีความหนืดมาก และอาจเกิดชั้นบางๆที่ผิวของชิ้นวัตถุดิบ ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลาย ระหว่างการออสโมซิสได้ (Sankat, et al., 1996)

2.3.4. อุณหภูมิและเวลา

การออสโมซิสเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างบางส่วนของผักผลไม้ เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป คือ เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลงจึงทำให้การแพร่ผ่านของน้ำและตัวถูกละลาย เป็นไปได้ง่ายกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ และในกรณีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อม การเพิ่มอุณหภูมิ ในการออสโมซิส มีผลทำให้ความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำตาลสะดวกขึ้น เป็นผลให้อัตราการออสโมซิสสูงขึ้นด้วย โดย Flink (1979) กล่าวว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผล ต่ออัตราการดึงน้ำออกจากผักผลไม้ที่ชัดเจนมาก โดยอัตราการดึงน้ำออกจะสูงมากเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ในการออสโมซิส อย่างไรก็ตามสำหรับการออสโมซิสผักผลไม้ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะจำกัด เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของผักผลไม้ถูกทำลายไป ส่งผลให้ การดึงน้ำออกเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เช่น กรณีสับปะรด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ทำให้สารเพคตินซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของสับปะรดเกิดการละลาย มีผลทำให้ การแพร่ของน้ำตาลซูโครสและน้ำซาลง และพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส การแพร่ของน้ำตาลซูโครสเกือบจะคงที่ (Rahman & Lamb, 1990) การใช้เวลาในการแช่ผักผลไม้ใน สารละลายออสโมติกนาน มีโอกาสให้วัตถุดิบสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมากขึ้น น้ำในวัตถุดิบ สามารถแพร่ออกมาในอัตราสูงโดยเฉพาะในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

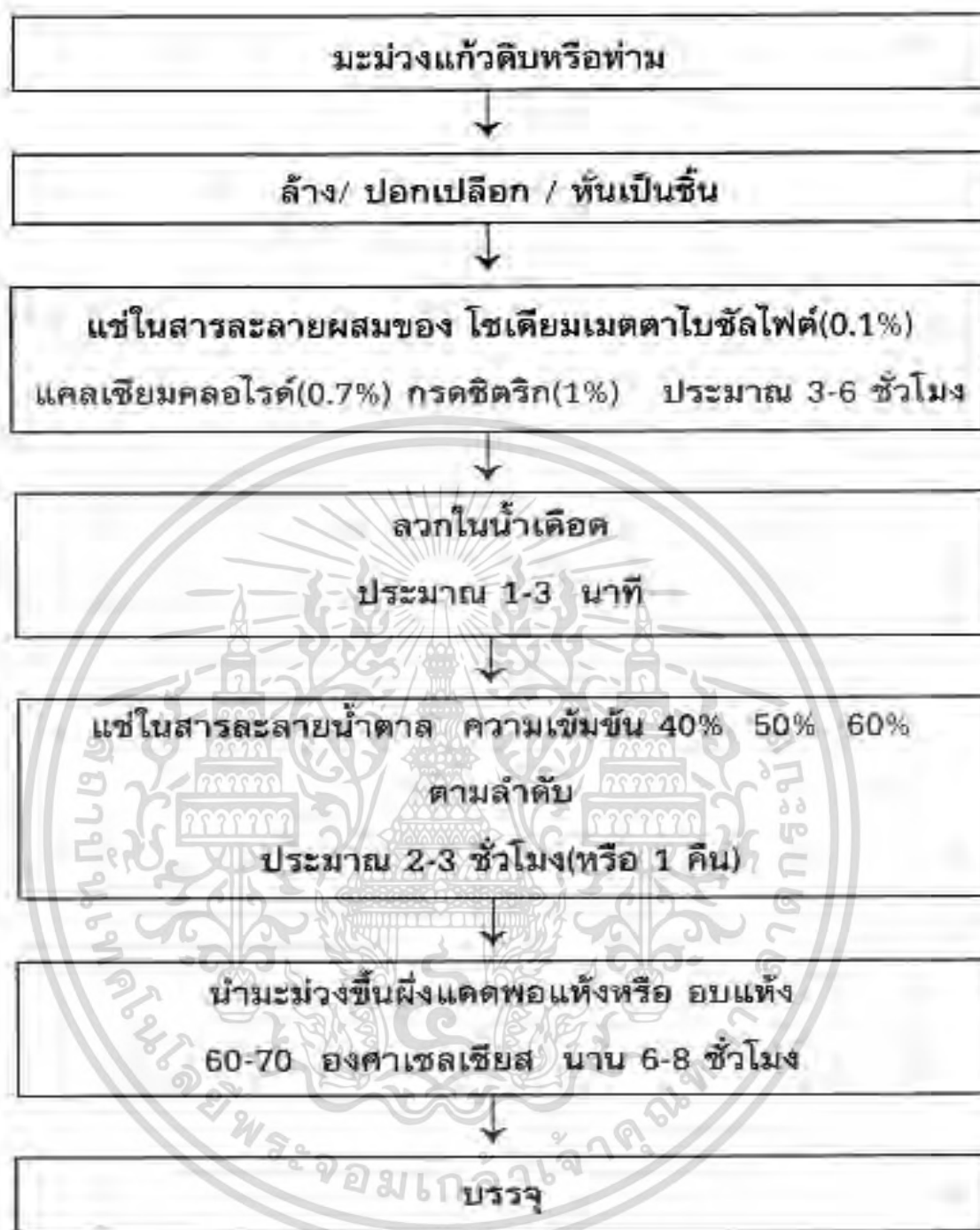
น้ำจะแพร่ออกมาในอัตราที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกของการออสโมซิสเกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างเซลล์ผักผลไม้กับสารละลายออสโมติกมาก ทำให้เกิดแรงขับสูงเกิดการถ่ายโอนมวลมากและรวดเร็ว เมื่อเวลาในการออสโมซิสนานขึ้นจะเกิดการสะสมของน้ำที่แพร่ออกจากผักผลไม้มากขึ้น สารละลายออสโมติกจึงมีความเข้มข้นลดลงกว่าช่วงแรก จึงทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าน้อยลง มีผลให้เกิดแรงขับที่จะถ่ายโอนมวลน้อยและช้าลง (Dermesonlouoglou et al., 2007; Kowalska & Lenart, 2001)

2.3.5. ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักผลไม้ เช่น การคนหรือกวนสารละลายออสโมติก ในขณะที่เกิดการออสโมซิส ความเข้มข้นบริเวณรอบๆชิ้นอาหารจะลดลง เนื่องจากน้ำภายในชิ้นอาหารแพร่ออกมาสู่สารละลายออสโมติก จึงมีผลให้ประสิทธิภาพการออสโมซิสลดลงไปด้วย การคนหรือกวนเป็นการทำให้สารละลายออสโมติกมีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้เกิดการกระจายความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นได้ โดยทำให้สารละลายที่เข้มข้นกว่าไหลมาแทนที่สารละลายที่เจือจาง ทำให้ประสิทธิภาพการออสโมซิสสูงขึ้นด้วย อัตราส่วนระหว่างสารละลายออสโมติกกับผักผลไม้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออสโมซิส โดยถ้าอัตราส่วนนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำแพร่ออกเร็วขึ้น (Wichamane, 2013)

2.4 การผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

กระบวนการแปรรูปผักและผลไม้โดยการแช่อิ่มมีข้อดีอยู่หลายประการ โดยหลักการของวิธีนี้จะสามารถลดหรือจำกัดปริมาณน้ำในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ พร้อมกับทำให้มีน้ำตาลแทรกซึมเข้าไปในเนื้อผลไม้ในระดับที่พอเหมาะ ดังนั้นจึงสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรสชาติตามความต้องการของผู้ผลิตหรือผู้บริโภค สามารถบริโภคได้ทันที คงสีสันทัน และลักษณะของผลไม้ชนิดนั้นไว้ได้ดี อีกทั้งสามารถเก็บรักษาได้นานประมาณ 3-6 เดือน โดยไม่เกิดการเสื่อมเสีย หากต้องการเก็บให้ได้นานมากขึ้น สามารถทำได้โดยนำไปผ่านกระบวนการทำแห้ง ซึ่งจะสามารถเก็บให้ได้นานมากกว่า 1 ปี ถือเป็นข้อดีที่แตกต่างจากวิธีการอื่น การแปรรูปผักและผลไม้โดยการแช่อิ่มมีขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (จินตนา, 2546)



รูปที่ 2.7 การแปรรูปผักและผลไม้โดยการแช่อิ่ม
ที่มา: จินตนา ศรีฟูย (2546)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเตรียมผลไม้

การเลือกผลไม้ที่จะนำมาแช่อิ่มควรเป็นผลไม้ที่มีเนื้อแน่นไม่ดิบหรือสุกจนเกินไป เพราะถ้าดิบจนเกินไปจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีไม่สวย แต่ถ้าสุกมากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเละ ในขั้นตอนนี้ควรมีวิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ และควรมีการรักษาเนื้อสัมผัสของผักผลไม้ให้คงรูปไม่เปลี่ยนแปลง

วิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทำได้โดยการนำชิ้นผลไม้แช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ (Sodium metabisulfite) หรือโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ (Potassium metabisulfite) ความเข้มข้นประมาณ 2,000 พีพีเอ็ม (ppm.) หรือ 0.2 % ซึ่งจะแตกตัวให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) ในปริมาณที่สามารถช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และสามารถช่วยในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้เพียงพอ โดยมีปริมาณที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 50-100 พีพีเอ็ม แต่ถ้ามีการใช้ในปริมาณที่สูงเกินไปจะไปทำลายวิตามินบีในผลิตภัณฑ์บางส่วน อีกทั้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีซีดและมึนกลืนที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งในปริมาณนี้จะไม่เกินกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมผลไม้แห่งในประเทศไทย (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) กำหนดไว้ ซึ่งระบุว่าปริมาณสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ไม่เกิน 1,000 พีพีเอ็ม

วิธีการรักษาเนื้อสัมผัสของผักผลไม้ให้คงรูปไม่เปลี่ยนแปลง ทำได้โดยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) หรืออาจแช่ในน้ำปูนใส เนื่องจากในสารละลายดังกล่าวมีแคลเซียมไอออน ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารเพคตินิกแอซิด (Pectinic acid) ที่อยู่ในโครงสร้างของเซลล์เป็นแคลเซียมเพคเตท (Calcium pectate) ทำให้ผลไม้แช่อิ่มคงรูปอยู่ได้และมีความกรอบ มีเนื้อสัมผัสแน่น

เทคนิควิธีการและระยะเวลาของการแช่สารละลายเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการรักษาเนื้อสัมผัสของผักผลไม้ให้คงรูปนั้น จะแตกต่างกันไปตามขนาดและชนิดของผักผลไม้ จึงจะสามารถป้องกันได้อย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น ชิ้นมะละกอที่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1-2 % และสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 0.2-0.3 % นาน 2 สัปดาห์ จะทำให้ชิ้นมะละกอเมื่อผ่านกระบวนการแช่อิ่มมีเนื้อสัมผัสแข็งแรง คงรูป ไม่หดยาว (สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน, 2530) หรือชิ้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.7 % และสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 0.2-0.3 % ใช้เวลานาน 6 ชั่วโมง จะทำให้มะม่วงมีความแน่นเนื้อสูง และสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้ (ภัทรพร ยูราชิต, 2541)

2. การแช่ในสารละลายเกลือ

ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวฝาดมาก เช่น กระท้อน มะยม มะม่วง ควรนำมาแช่น้ำเกลือที่ความเข้มข้น 10-20% จะช่วยลดความฝาดเปรี้ยว และทำให้มีรสชาติดีขึ้น รวมถึงช่วยทำให้ผลไม้มีความแน่น ไม่หดยาวเมื่อผ่านการแช่อิ่ม แต่มีผลเสียคืออาจทำให้เกิดรสเค็ม (จินตนา, 2546)

3. การลวกน้ำร้อน

ควรมีการลวกหรือนึ่งผักผลไม้ก่อนนำไปแช่น้ำเชื่อม การลวกผักผลไม้ทำให้เนื้อผักผลไม้อ่อนตัวลง ทำให้น้ำเชื่อมสามารถซึมเข้าไปในเซลล์ได้ง่าย ช่วยลดปริมาณการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสหลังการคั้นรูป นอกจากนี้การลวกยังช่วยในการทำลายเอนไซม์ที่ทำให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนสี หรือทำให้เกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์แช่อิ่มได้ การลวกไม่ควรใช้เวลาสั้นหรือนานเกินไป ซึ่งจะทำให้เนื้อผักผลไม้เละ ควรใช้เวลาในการลวกที่เหมาะสม ซึ่งจะเร็วช้าแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับชนิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผักผลไม้ การลวกผักผลไม้ทำได้โดยลวกในน้ำร้อนอุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส นาน 2-3 นาที หรือโดยการนึ่งด้วยไอน้ำ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ตัวอย่างเช่น สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน (2530) รายงานว่า สำหรับขึ้นมะละกอใช้เวลาในการลวกเพียงแค่ 15-30 นาที ก็เพียงพอที่จะสามารถยับยั้งเอนไซม์ได้ หากมีการลวกนานเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าการไม่ลวก (จินตนา, 2546)

4. การแช่ในสารละลายน้ำตาล

การแช่ผลไม้ในสารละลายน้ำตาลเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการแช่ผลไม้ มีวัตถุประสงค์เพื่อดึงเอาน้ำออกจากผักผลไม้ให้มีปริมาณลดลง และเพิ่มปริมาณน้ำตาล พบว่าการสูญเสียน้ำในขั้นตอนนี้จะทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงไป 40-50% ในผลิตภัณฑ์แช่อิ่มควรมีน้ำตาลสูงมากกว่า 65 องศาบริกซ์ จึงจะสามารถเก็บได้นาน เทคนิคการแช่ในสารละลายน้ำตาลมี 2 วิธีคือ

การแช่อิ่มแบบเร็ว สามารถทำได้โดยแช่ผักผลไม้ในน้ำเชื่อมอย่างเข้มข้นประมาณ 30-40% ที่อุณหภูมิสูง จนกระทั่งน้ำเชื่อมมีความเข้มข้น 60-70% แล้วผึ่งแดดให้แห้ง ถ้าอุณหภูมิของน้ำเชื่อมสูงขึ้น จะช่วยทำให้น้ำซึมออกจากเซลล์และน้ำตาลแพร่เข้าไปในเซลล์ได้เร็วขึ้น การแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงๆ มักจะมีปัญหาของการตกผลึกของน้ำตาลได้ แต่สามารถป้องกันปัญหานี้ได้ โดยการเติมกรดซิตริกความเข้มข้นประมาณ 0.1% วิธีนี้ใช้เวลาสั้น ทำให้ผักผลไม้หดตัวมากจนมีลักษณะเหี่ยวแบน มีรสหวานไม่สม่ำเสมอ มีสีน้ำตาลเข้ม มีเนื้อสัมผัสเหนียวและแข็งเพราะน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นสูง

การแช่อิ่มแบบช้า สามารถทำได้โดยแช่ผักผลไม้ในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 30-40% นาน 24 ชั่วโมง แล้วปรับความเข้มข้นน้ำเชื่อมให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอีก 10 % ทุกๆ 24 ชั่วโมง ทำซ้ำเช่นนี้ไปเป็นเวลา 6-7 วัน จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำเชื่อมไม่น้อยกว่า 65% เมื่อผักผลไม้ อิ่มตัวด้วยน้ำตาลแล้ว ให้นำขึ้นผักผลไม้ไปผึ่งแดดหรืออบแห้ง ซึ่งวิธีนี้จะใช้เวลานาน จึงพัฒนากระบวนการผลิตผักผลไม้แช่อิ่มให้มีเวลาสั้นลง โดยที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งภัทรพร ยูราจิต (2541) รายงานว่าสามารถลดเวลาการแช่อิ่มให้เหลือเพียง 1-2 ชั่วโมงเท่านั้น วิธีนี้จะได้ผลิตภัณฑ์แช่อิ่มที่ดีกว่าวิธีแรก โดยผลไม้คงรูปไม่หดตัวมาก มีความหวานสม่ำเสมอ สีไม่คล้ำ แต่ข้อเสียคือต้องใช้เวลาในการแช่นาน ซึ่งอาจจะทำให้สารละลายน้ำตาลเกิดกลิ่นหมักหรือเน่าเสีย ซึ่งเกิดจากการหมักของจุลินทรีย์ ดังนั้นควรมีการควบคุมการผลิตให้ดี เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่อิ่ม (จินตนา, 2546)

5. การล้างคราบน้ำตาล

นำขึ้นผักผลไม้ที่ผ่านการแช่อิ่มแล้วไปล้างในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วเอาขึ้นทันทีเพื่อล้างน้ำตาลที่เคลือบผิวออก แล้วผึ่งบนตระแกรงให้แห้ง แต่สำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทซึ่งต้องการให้มีผลึกน้ำตาลเคลือบที่ผิว สามารถทำได้โดยต้มขึ้นผักผลไม้ในน้ำเชื่อมเข้มข้น 20 % นาน 5 นาที แล้วผึ่งหรืออบให้แห้ง น้ำเชื่อมเข้มข้นที่อยู่ภายในเนื้อผลไม้จะซึมออกมาอยู่ที่ผิวของผักผลไม้ เมื่อแห้งจะกลายเป็นผลึกน้ำตาลเคลือบที่ผิวต่างๆ (จินตนา, 2546)

6. การอบแห้ง

ผลไม้แช่อิ่มที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลนั้น สามารถดึงเอาน้ำออกไปได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ซึ่งมีความชื้นเหลืออยู่มากกว่า 30% และมี water activity (a_w) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.60-0.85 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นปานกลาง (intermediate product) จึงไม่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์นี้ได้นาน ดังนั้นหากต้องการเก็บไว้นานขึ้นจะต้องนำไปอบแห้ง เพื่อให้มีความชื้นต่ำอยู่ในระดับอาหารแห้ง หรือต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความชื้นอยู่ในช่วง 15-30% และมีค่า water activity ต่ำกว่า 0.60 การอบแห้งทำได้โดยอบแห้งในตู้อบแห้ง ซึ่งจะใช้เวลาานานแตกต่างกันตามชนิดของผลิตภัณฑ์ และเพื่อป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงสี อันเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล ซึ่งไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์หรือเกิดจากปฏิกิริยาคาราเมลไรเซชัน (Caramelization) จึงควรอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส สำหรับผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่ม ภัทรพร ยูราชิต (2541) แนะนำว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเหลือประมาณ 19.39 % และมีค่า water activity เป็น 0.60 ซึ่งจะสามารถเก็บรักษาได้นาน และจะนานยิ่งขึ้นเมื่อเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท อากาศและความชื้นเข้าไม่ได้ (จินตนา, 2546)

2.4.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสารละลายออสโมติกและคุณภาพของชิ้นผลไม้แช่อิ่ม

ผลไม้ที่ผ่านการแช่อิ่มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง รสชาติ และเนื้อสัมผัส เนื่องจากได้รับอิทธิพลมาจากชนิดของตัวถูกละลาย ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก การให้ความร้อนแก่สารละลาย การปรับกรดในสารละลายออสโมติก อุณหภูมิของสารละลายออสโมติก และระยะเวลาในการแช่ (Ahmed และคณะ, 2016; Chiralt และ Talens, 2005) ชนิดของตัวถูกละลายที่นิยมใช้ในการแช่อิ่ม ได้แก่ น้ำตาลทราย ฟรุคโตส กลูโคส กลีเซอริน ซอร์บิทอล ฟรุคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ และเกลือ เป็นต้น (Chavan และ Amarowicz, 2012; Torres และคณะ, 2015)

Matusek และคณะ (2008) ทำการศึกษาเปรียบเทียบตัวถูกละลายระหว่างฟรุคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์และน้ำตาลซูโครสในการแช่อิ่มแอปเปิล พบว่าที่การใช้น้ำตาลซูโครสมีปริมาณของแข็งที่ได้รับสูงกว่าการใช้ฟรุคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ระดับความหวานและระยะเวลาเท่ากัน เนื่องจากฟรุคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุล 3-9 โมเลกุล มีขนาดใหญ่กว่าน้ำตาลซูโครสที่เป็นไดแซ็กคาไรด์ ส่งผลให้เกิดการแพร่ที่ช้ากว่าน้ำตาลซูโครส

Ditudompo และ Pittarate (2007) ได้ทำการศึกษาการแช่มะเขือเทศในสารละลายออสโมติกจากมอลทิทอลและสารละลายออสโมติกจากซอร์บิทอลที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ พบว่า การใช้มอลทิทอลทำให้มะเขือเทศมีปริมาณการสูญเสียน้ำมากที่สุด และมะเขือเทศที่แช่ในสารละลายออสโมติกจากซอร์บิทอลมีปริมาณของแข็งที่ได้รับเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากซอร์บิทอลมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยทำให้เกิดการแพร่ได้ดี มีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นในชิ้นมะเขือเทศได้มาก ดังนั้น การเลือกใช้ตัวน้ำตาลหรือสารให้ความหวานชนิดต่างๆ จะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ และรสชาติของผลไม้แช่อิ่ม

ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกส่งผลต่อกระบวนการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการแช่อิ่ม จากการศึกษาของ Mundada และคณะ (2010) พบว่าการถ่ายโอนมวลของทับทิมที่แช่ในสารละลายออสโมติกที่ระดับความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 40 50 และ 60 องศาบริกซ์นั้น ทับทิมที่แช่ในสารละลายออสโมติกที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ มีการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่ได้รับสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทับทิมที่แช่ในสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้น 40 และ 50 องศาบริกซ์ เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างชิ้นผลไม้ และสารละลายออสโมติกส่งผลให้ผลไม้ที่ถูกแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเกิดการแพร่ได้มากกว่า สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นต่ำ ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่สูงอาจทำให้เกิดปัญหาเรื่องความหนืดของสารละลาย ทำให้ตัวถูกละลายหรือน้ำตาลเกิดการเคลื่อนที่ได้ช้าและไปเคลือบบริเวณผิวหน้าของผลไม้ ทำให้ไม่เกิดการถ่ายโอนมวล (Corrêa และคณะ, 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Escobar และคณะ (2007) ทำการศึกษาอิทธิพลของการลวกแครอทต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 10 20 และ 30 วินาที และเปรียบเทียบกับแครอทที่ไม่ผ่านการลวก พบว่าแครอทที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลสูงกว่าสภาวะอื่นๆ เนื่องจากการลวกทำให้เซลล์เนื้อเยื่อถูกทำลายและเกิดการสูญเสียน้ำตาล (กาแลคโตสและอาราบีโนส) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเพคตินที่ผนังเซลล์ ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงสามารถถ่ายเทมวลได้มากขึ้น ดังนั้น การให้ความร้อนแก่ชิ้นผลไม้ทำให้เนื้อเยื่อฝักและผลไม้อ่อนตัวตัวลง ส่งผลดีเพิ่มความสามารถในการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์และทำให้ตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้มากขึ้น (จินตนา, 2546)

2.5 Water Activity

แอกทิวิตีของน้ำ หรือวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity) เขียนย่อว่า a_w เป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2553)

ในอาหารมีน้ำอยู่ 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นที่ยึดติดแน่นกับโมเลกุลของอาหาร เรียกว่า bound water จุลินทรีย์ใช้น้ำส่วนนี้ได้ค่อนข้างยาก อีกส่วนหนึ่งคือน้ำอิสระที่อยู่บริเวรรอบๆอาหาร เป็นน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆที่เกิดขึ้นในอาหารและการเจริญของจุลินทรีย์ เรียกว่า available water หรือ free water (ตรีรัตน์, 2533)

ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี คือ อัตราส่วนของความดันไอของสารตัวอย่างกับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิเดียวกัน เขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.2)$$

ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 และจากนิยามของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (% relative humidity, %RH) สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\%RH = \frac{P(H_2O)}{P_0} \times 100 \quad (2.3)$$

เพราะฉะนั้นค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของ

$$a_w = \frac{P(H_2O)}{P_0} \quad (2.4)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าคล้ายกันมาก ดังนั้นถ้าทราบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ก็สามารถหาค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของอากาศได้ดังนี้

$$a_w = \frac{\%ERH}{100} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การแบ่งประเภทของอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตามค่า pH และค่า water activity (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 144 (พ.ศ.2535)

อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทจำแนกตามค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าแอกติวิตีของน้ำ (water activity, a_w) ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.5.1.1 อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (low acid food) คือ อาหารที่มีค่าความเป็น กรด-ด่างมากกว่า 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85 (พิมพ์เพ็ญและนิรียา, 2553)

2.5.1.2 อาหารที่ปรับสภาพกรด (acidified food) คือ อาหารที่ตามธรรมชาติของผลิตภัณฑ์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 4.5 แต่ในการผลิตมีการปรับสภาพกรดของอาหาร โดยการลวก หรือแช่ขึ้นอาหารในสารละลายกรด หรือเติมกรด หรือเติมอาหารที่มีความเป็นกรด จนทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่เกินค่า pH 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85 (พิมพ์เพ็ญและนิรียา, 2553)

2.5.1.3 อาหารที่มีความเป็นกรด (acid food) คือ อาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่เกิน 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85 (พิมพ์เพ็ญและนิรียา, 2553)

2.5.2 ประเภทของอาหารแบ่งตามค่า water activity

2.5.2.1 อาหารสด (fresh food) เป็นอาหารที่เน่าเสียง่าย (perishable food) ที่มีค่า water activity มากกว่า 0.85 เช่น เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ อาหารทะเล เป็นต้น

2.5.2.2 อาหารกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) หมายถึง อาหารที่มีค่า water activity ระหว่าง 0.6-0.85 เช่น นมข้นหวาน ผลไม้แช่อิ่ม กุ้งปรุงรส เป็นต้น

2.5.2.3 อาหารแห้ง (dried food) หมายถึงอาหารที่มีค่า water activity น้อยกว่า 0.6 เช่น นมผง ผักผลไม้อบแห้ง กุ้งแห้ง น้ำผลไม้ผง เก๊กฮวยผงขงติ่ม กระชายผงขงติ่ม หมูหยอง เป็นต้น (พิมพ์เพ็ญและนิรียา, 2553)

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity โดยทั่วไปที่ใช้กับชนิดจุลินทรีย์ต่างๆ
ในการสกัดกั้นและตัวอย่างชนิดของอาหาร

water activity	ตัวอย่างอาหาร
0.950	ผลไม้ ผัก เนื้อ ทั้งสด และชนิดกระป๋อง
0.910	แยม น้ำผลไม้เข้มข้นที่มีซูโครส 55% (w/w) หรือ 12% NaCl
0.870	เนยแข็งแห้ง มากาρίน อาหารที่มีซูโครส 65% (w/w) หรือ 15% NaCl
0.800	น้ำผลไม้เข้มข้น ช็อคโกแลตไซรัป เมเปิลไซรัป ผลไม้ไซรัป ข้าว แป้ง เค้กผลไม้
0.750	แยม มามาเลด
0.650	เยลลี่ โมลาส น้ำตาลดิบ ผลไม้แห้งบางชนิด นัท
0.600	ผลไม้แห้งที่มีความชื้น 15-20% ลูกอมบางชนิด คาราเมล น้ำผึ้ง
0.500	เส้นก๋วยเตี๋ยว สปาเก็ตตี้ที่มีความชื้นประมาณ 12%
0.300	คุกกี้ แครกเกอร์ ที่มีความชื้น 3-5%
0.030	นมผงที่มีความชื้น 2-3% ผักแห้งที่มีความชื้น ประมาณ 5% คอร์นเฟลค คุกกี้ และแครกเกอร์บางชนิด

ที่มา: สุพจน์ ตุงศเรวงศ์ (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity เชื้อจุลินทรีย์กับอาหาร

water activity	Micro organisms generally inhibited by a_w at this point	Examples of food within this Range of water activity
0.950	Pseudomonas, Escherichia Proteus, Shigella, Klebsiella Bacillus, Clostridium Perfringens, some yeast	Highly perishable foods (fresh and canned fruits, vegetables, meat, fish) and Milk, cooked sausages and breads, foods containing up to 40% (w/w) sucrose or 7% NaCl...
0.910	Salmonella, Vibrio parahaemolyticus, C.botulinum Serratia, Lactobacillus Pediococcus, some molds Rhodotorula, Pichia	Some cheese (Cheddar, Swiss, Muenster Provolone), cured meat (ham), some fruit juice concentrates, foods containing 55% (w/w) sucrose or 12% NaCl...
0.870	Many yeasts (Candida Torulopsis, Hansenula) Micrococcus.	Fermented sausage (salami), sponge cakes dry cheese, margarine, foods containing 65% (w/w) sucrose (saturated) or 15% NaCl...
0.800	Most molds (mycotoxigenic Penicillia), Staphylococcus aureus, most Saccharomyces (baillii) spp., Debaryomyces.	Most fruit juice concentrates, sweetened condensed milk, chocolate syrup, maple and fruit syrups, flour, rice, pulses containing 15-17% moisture, fruit cake, country style ham, fondants, high-sugar cakes...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity เชื้อจุลินทรีย์กับอาหาร (ต่อ)

water activity	Micro organisms generally inhibited by a_w at this point	Examples of food within this Range of water activity
0.750	Most halophilic bacteria mycotoxigenic aspergilla.	Jam, marmalade, marzipan, glazed fruits, some marshmallows...
0.650	Xerophilic molds (aspergillus chevalieri, A.Candidus, Wallermia sebi), Saccharomyces bisporus	Rolled oats containing-10% moisture, grained nougats, fudge marshmallows, jelly molasses, raw cane sugar some dried fruits, nuts
0.600	Osmophilic yeasts (Saccharomyces rouxii), few molds (Aspergillus echinulatus Monascus bisporus)	Dried fruits containing 15-20% moisture some toffees and caramels, haneey...
0.500	No microbial proliferation	Noodles, spaghetti, etc. containing 12% moisture, spices containing-10% moisture...
0.300		Cookies, crackers, bread crusts, etc. containing 3-5% moisture...
0.030		Whole milk powder containing 2-3% moisture, dried vegetables containing -5% moisture, corn flakes containing-5% moisture dehydrated soups, some cookies and crackers...

ที่มา: สุพจน์ ตุงคเศรวงค์ (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ที่พบมากคือปฏิกิริยาของเอนไซม์การเกิดสารสีน้ำตาลและปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าอาหารที่มีวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำกว่า 0.3 ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดจากเอนไซม์จะเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย และเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของอาหารเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงช่วงที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุด คือค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ตั้งแต่ 0.6 ถึง 0.8 แต่ถ้าอาหารมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เพิ่มขึ้นอีก อัตราการเกิดสีน้ำตาลจะลดลงตามลำดับ สำหรับผลที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันจะแตกต่างจากปฏิกิริยาอื่น กล่าวคืออาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำมากๆ ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้ดี และเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงช่วงที่วอเตอร์แอกติวิตี้มีค่าตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.5 หรือในช่วงอาหาร IMF ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาหารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป แต่อัตราการเกิดมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกัน (ตรีรัตน์, 2533)

2.5.3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหาร

วอเตอร์แอกติวิตี้มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร ทั้งคุณลักษณะเนื้อสัมผัส สี และคุณค่าทางโภชนาการ โดยทั่วไปการลดปริมาณน้ำในอาหารมักเป็นผลทำให้อาหารมีลักษณะแห้งและกรอบ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น อัตราส่วนของโปรตีนต่อไขมัน หรือชนิดของโปรตีนอีกด้วย สำหรับอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำมาก มักมีลักษณะกรอบ เปราะ และแตกหักได้ง่าย ไม่เหมาะในการขนส่ง จึงได้มีการพัฒนาการผลิตอาหารให้มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำ แต่มีลักษณะนุ่ม และชุ่มฉ่ำ โดยการเติมสารบางชนิดลงในอาหาร เช่น กลีเซอรอล (glycerol) เป็นต้น ผลของวอเตอร์แอกติวิตี้ที่มีต่อสีของอาหารที่สำคัญคือการเกิดสารสีน้ำตาล ซึ่งได้กล่าวแล้ว นอกนั้นมีรายงานอยู่เพียงเล็กน้อย เช่น มีผลต่อการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ของผัก เป็นต้น สำหรับผลของวอเตอร์แอกติวิตี้ที่มีต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับวิตามินซี พบว่าอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำๆ วิตามินซีจะอยู่ในสภาพที่คงตัวดี อัตราการสลายตัวของวิตามินซีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อวอเตอร์แอกติวิตี้เพิ่มขึ้น และการเกิดสารสีน้ำตาลของอาหารในช่วงที่วอเตอร์แอกติวิตี้ที่ต่างๆนั้นก็มีส่วนทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารนั้นลดลง (ตรีรัตน์, 2533)

2.5.3.3. การเปลี่ยนแปลงทางจุลชีววิทยา

โดยที่วอเตอร์แอกติวิตี้มีหน้าที่ควบคุมการเจริญและการอยู่รอดของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหาร ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บ และเป็นตัวชี้ถึงความปลอดภัยในการบริโภคอาหารนั้น โดยทั่วไปจุลินทรีย์สามารถเจริญได้ดีที่สุดในอาหารที่มีระดับวอเตอร์แอกติวิตี้ที่พอเหมาะซึ่งอยู่ในช่วง 0.995 ถึง 0.980 เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ลดลงจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารจะลดลงตามไปด้วย ถึงแม้ว่าแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับอาหารเจริญได้ดีที่วอเตอร์แอกติวิตี้สูงกว่า 0.9 แต่ก็ยังมีจุลินทรีย์บางชนิดที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมอาหารที่สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่ค่อนข้างต่ำ เช่น halophilic bacteria osmophilic yeast และ xerophilic mold เป็นต้น (ตรีรัตน์, 2533)

2.6 Near infrared spectroscopy (NIRS)

เทคโนโลยี NIR (near infrared) คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ด้านการวัดการดูดกลืนแสงช่วงใกล้อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 700-2500 นาโนเมตร ของโมเลกุลที่ต่างกันมาใช้ร่วมกับการวิเคราะห์หลายตัวแปร และการคำนวณทางสถิติเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและควบคุมหรือประกันคุณภาพมาตรฐานของสินค้า (พัทรียา, 2553) สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนในโมเลกุลของตัวอย่าง ใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน C-H ในไฮโดรเจนกับไฮโดรเจน N-H และออกซิเจนกับไฮโดรเจน O-H โดยเกิดการยืด-หดหรือบิด-งอ ในรูปแบบต่างๆ แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน ซึ่งสะท้อนหรือส่องผ่านออกมา โดยสามารถตรวจวัดด้วย detector แล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ทั้งนี้เทคนิค near infrared spectroscopy (NIRS) มีข้อจำกัดที่สามารถตรวจวัดได้เฉพาะโมเลกุลของสารอินทรีย์เท่านั้น เพราะโลหะ เช่น เงินหรือตะกั่ว และสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่สามารถดูดกลืนรังสีในช่วง NIR ได้ เนื่องจาก NIR ไม่ได้เป็นระบบ stand-alone ดังนั้นการสอบเทียบส่วนประกอบหรือตัวแปรต่างๆ รวมทั้งการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐานอยู่เป็นประจำจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการสอบเทียบยังคงให้ความน่าเชื่อถืออยู่ และจะต้องทำการปรับปรุงการสอบเทียบให้ทันสมัยอยู่เสมอ ถึงแม้ว่าวิธีการทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติจะเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลสำคัญของสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับ แต่ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลของสเปกตรัมและองค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆ

หลักการทำงานของเครื่อง near infrared spectrometer (NIRS) อาศัยการดูดกลืนพลังงานแสงในแต่ละความยาวคลื่นของสารแต่ละชนิด ซึ่งมีการดูดกลืนพลังงานแสงที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นเครื่อง NIRS ส่วนใหญ่จำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงความยาวนั้นส่องเข้าไปยังตัวอย่าง และวัดค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (reflectance type) หรือวัดความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (transmittance type) กระบวนการนี้ที่ละความยาวคลื่นและนำค่าความเข้มแสงที่ได้มาเขียนกราฟ โดยให้แกนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์ การแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นนี้ เรียกว่า โมโนโครเมเตอร์(monochromator) องค์ประกอบของเครื่อง NIRS ประกอบด้วย ต้นกำเนิดแสง (light source) อุปกรณ์แยกแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่น (monochromator) ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) ตัวรับแสง (detector or sensor) และคอมพิวเตอร์ (วิชัย, 2552) การทำงานของเครื่อง NIRS ประกอบด้วยระบบ digital dispersive grating คือ แสงจากแหล่งให้พลังงานแสงจะถูกกระจายและควบคุมด้วยระบบโมโนโครมาเตอร์ให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการส่งผ่านไปยังตัวอย่าง และวัดปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด แล้วแปลงเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผลตามลำดับ ในส่วนของโปรแกรมการทำงานจะบันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ เรียกว่า สเปกตรัม (spectrum) แล้วนำมาจับคู่ (matching) กับค่าการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทราบจากห้องปฏิบัติการ

near infrared Spectroscopy (NIRS) เป็น secondary method คือเป็นเครื่องที่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น primary method เป็นตัวอ้างอิง โดยตัวอย่างใดๆต้องถูกนำไปวิเคราะห์ทางเคมีและนำไปสแกนด้วยเครื่อง NIRS ได้สเปกตรัม นำผลที่ได้มากรอกข้อมูลและสร้างสมการการวิเคราะห์โดยที่เทคโนโลยีของ NIRS (near infrared spectroscopy) สามารถทำนายค่าทางเคมีได้อย่างรวดเร็ว 10-20 วินาทีต่อตัวอย่าง ให้ผลเที่ยงตรงและแม่นยำ วิเคราะห์ได้หลายค่าในการวัดเพียงครั้งเดียว (multiple components per measurement) ประหยัดเวลา ลดต้นทุนการใช้สารเคมี ลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว ลดมลพิษต่อสุขภาพของเจ้าหน้าที่และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ข้อดีของ NIRS คือต้องการการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อยหรือไม่ต้องทำ และให้ข้อมูลตามเวลาจริง นอกจากนี้ NIRS ยังแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์แบบอื่น โดยสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง ไม่ใช้สารเคมีหรือทิ้งสารตกค้าง สามารถตรวจวัดองค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆได้พร้อมๆกัน ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ตู้ดูดควัน ความแม่นยำของ NIRS นั้นขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุม (พรรณทิพย์, 2551)

2.6.1 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมของตัวอย่างได้แก่ ความชื้นและขนาดอนุภาค (particle size) เนื่องจากสภาพกระเจิงแสงและความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัด สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรดเป็นสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันอยู่ (overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง โดยวิธีที่นิยมใช้มีดังนี้

2.6.1.1 วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพิกที่มีฐานกว้าง เนื่องจากการซ้อนทับกันของพิก และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัมที่เกิดการกระเจิงแสง เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทางซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ สาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชันภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย (William and Norris, 2001)

- first derivative เป็นการหาความชันของสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นหรือการเลื่อนตัวของสเปกตรัมแกน Y

- second derivative เป็นการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้จะมีรูปแบบที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น การหาการเปลี่ยนแปลงของความชันสามารถแยกจุดยอดที่ซ้อนกันอยู่จะได้สเปกตรัมมีจุดยอดที่เป็นบวกในด้านซ้ายและด้านขวา จุดยอดตรงกลางจะอยู่ตรงข้ามที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น

2.6.1.2 multiplicative scatter correction (MSC) เป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดแบบ diffuse reflectance และแบบ transmission มักเกิดการกระเจิงแสง ดังนั้นจึงได้มีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัมเพื่อลดการกระเจิงแสง (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.1.3 วิธี smoothing เป็นการหาค่าเฉลี่ยคลื่นโดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสง แต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วนำมาคำนวณซ้ำ จนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวน ต่อค่าการดูดกลืนแสง จะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิมแต่จะเรียบสมำเสมอมากกว่า (Siesler and et al, 2002)

2.6.2 วิธีการสร้างสมการ (calibration equation)

สมการ calibration ประกอบด้วยตัวแปร 2 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรอิสระ (X) และ ตัวแปรตาม (Y) การสร้างสมการ calibration แบ่งได้ 2 วิธีหลักคือ

2.6.2.1 wavelength selection เป็นการเลือกความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ ให้ความสัมพันธ์กับตัวแปรตามนั้น โดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ ดังนี้

- simple linear regression (SLR) เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วย ตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) เลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRS ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่นเพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง

- multiple linear regression (MLR) เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่นำตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวใช้ในการประมาณค่าตัวแปร เทคนิค MLR ทำให้สมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้ แต่การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือค่าการดูดกลืนแสง ที่แต่ละความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลทางเคมีต้องใช้เวลานาน ตัวอย่างที่นำมาทดสอบต้องมีจำนวนมาก เพื่อให้สร้างสมการที่ถูกต้องและแม่นยำ (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.2.2 full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัมมาสร้างโดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ 2 วิธีคือ principle component regression (PCR) และ partial least square regression (PLSR) ทั้งสองวิธีนี้ต้องใช้ในการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า Factor หรือองค์ประกอบ (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.3 วิธีการทดสอบสมการ (validation test)

เมื่อได้สมการ calibration แล้วจะต้องนำสมการที่ได้มาทวนสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด วิธีที่นิยมใช้ในเทคนิค NIRS มี 2 วิธีคือ

2.6.3.1 full cross validation เป็นการทดสอบภายใน (internal validation) มีวิธีทดสอบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตอนที่ 1 ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกไปจากกลุ่ม calibration แล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration แล้วนำมาประเมินค่าตัวอย่างที่ 1 ที่ตัดออกไปก่อนหน้า

- ตอนที่ 2 ตัดตัวอย่างที่ 2 ออกไปนำตัวอย่างที่ 1 กลับเข้าในกลุ่ม calibration รวมกับตัวอย่างที่เหลือเพื่อสร้างสมการ เมื่อได้สมการ calibration นำมาประเมินค่าตัวอย่างที่ 2 ซ้ำแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งประเมินค่าตัวอย่างครบทุกตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น การทดสอบภายในโดยการดูค่า root mean square error of cross validation (RMSECV) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (measured value or true value) ให้ค่าที่ยอมรับได้ (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.3.2 การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing) เป็นการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (external validation) มาประเมินค่าจากสมการ calibration ที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสเปกตรัมสภาวะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม calibration ข้อควรระวังคือตัวอย่างในกลุ่มใหม่จะต้องมีค่าที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่ม calibration การทดสอบลักษณะนี้มีวิธีการคือนำตัวอย่างกลุ่มใหม่มาวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ วิเคราะห์แบบ reference methods แทนด้วยข้อมูลชุด X และนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRS แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่า ในสมการ calibration แทนด้วยข้อมูลชุด Y นำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาพิจารณาเปรียบเทียบโดยมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ SEP (standard error of prediction) หรือ RMSEP (root mean square error of prediction) และ bias ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.4 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

2.6.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient: R) คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าทำนายที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์กับการแปลความหมายของค่า R และ R^2 (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.4.2 ผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (standard error of calibration: SEC) คือค่าที่บ่งบอกถึงสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.4.3 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (standard error of prediction: SEP) คือค่าที่บ่งบอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากเครื่อง NIRS มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าสมการที่สร้างมีความแม่นยำสูง (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.4.4 ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIRS (average of difference between actual value and NIR value: bias) คือค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของตัวแปรตาม และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ มีความต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.4.5 อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม validation set ต่อค่า SEP (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP : RPD) ค่าจากที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายถึงค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ทำนายได้จาก NIRS มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ได้จากวิเคราะห์จริง (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRS

2.6.5.1 ขนาดของอนุภาค เป็นแหล่งความผิดพลาดที่สำคัญ เพราะขนาดของตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบของสาร โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ดังนั้นค่าการดูดแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ขนาดของอนุภาคยังขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวอย่างอีกด้วย เพราะจะทำให้การวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน จึงควรใช้การเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันทุกครั้ง ที่ทำการวัด และควรให้มีขนาดใกล้เคียงกัน (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.5.2 อุณหภูมิ เป็นอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการวัดอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดองค์ประกอบทางเคมี (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

2.6.5.3 ความชื้น เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าองค์ประกอบทางเคมี ความชื้นอาจสูญเสียไปได้จากการเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง การสร้างสมการความสัมพันธ์ นำค่าสเปกตรัมและค่าวิเคราะห์ทางเคมีมาใช้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้น (partial least square) เพื่อประเมินคุณภาพอ้อยและน้ำตาลทรายโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ที่มีค่าสูงเข้าใกล้ 1 และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพ (root mean squared error of validation) ที่เป็นค่าแตกต่างเข้าใกล้ 0 (ชนิษฐาและคณะ, 2019)

ตารางที่ 2.3 แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า RPD

ค่า RPD	การคัดแยกกลุ่มตัวอย่าง (classification)	การประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณ
0.0-2.3	แย่มาก (very poor)	ไม่แนะนำให้ใช้ (not recommended)
2.4-3.0	ไม่ดีพอ (poor)	การแบ่งระดับปริมาณอย่างหยาบ (very rough screening)
3.1-4.9	ปานกลาง (fair)	การแบ่งระดับปริมาณ (screening)
5.0-6.4	ดี (good)	การควบคุมคุณภาพ (quality control)
6.5-8.0	ดีมาก (very good)	การควบคุมกระบวนการ (process control)
8.1 ขึ้นไป	ยอดเยี่ยม (excellent)	ทุกงาน (any application)

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม (2019)

ตารางที่ 2.4 แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า R

ค่า R	ความสามารถของสมการ calibration
± 0.5	ไม่ควรใช้ในการทำนาย (not usable)
$\pm 0.51-0.70$	ความสัมพันธ์ไม่ดีพอ (poor correlation)
$\pm 0.71-0.80$	การทำนายเพื่อการแบ่งระดับปริมาณอย่างหยาบ (rough screening)
$\pm 0.81-0.90$	การทำนายเพื่อแบ่งระดับปริมาณ หรือ ประมาณค่าเบื้องต้น (screening)
$\pm 0.91-0.95$	การทำนายเพื่องานวิจัย (research) และงานทั่วไป
$\pm 0.96-0.98$	การทำนายเพื่อการประกันคุณภาพ (quality assurance)
± 0.99 ขึ้นไป	ทุกงาน (any application)

หมายเหตุ: ค่า R คือ ค่าสหสัมพันธ์สหสมพันธ์

ค่า RPD คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่า RMSECV คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Daitaro (2017) ได้ทำการประมาณปริมาณค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระบนพื้นผิวของเนื้อมะพร้าวแห้ง โดยใช้เทคนิค NIRS โดยจะมีการเตรียมตัวอย่างให้มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 2-10 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินการวัดค่าจากพื้นผิวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะถูกตากแห้งไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบด้วย NIRS ปริมาณน้ำอิสระจะอยู่ที่ประมาณ 0.8 หลังจากผ่านไป 22-25 วัน ซึ่งผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงการประเมินศักยภาพของการตรวจสอบคุณภาพเนื้อด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย โดยใช้ NIR spectroscopy

2.7.2 Bumrungrat (2018) ได้ทำการวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ปริมาณความชื้น ปริมาณซูโครส ปริมาณกลูโคส และปริมาณฟรักโทสของมะละกออบแห้ง โดยใช้เทคนิค NIR spectroscopy ซึ่งแบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ the partial least squares regression (PLSR) the moving window partial least squares regression (MWPLSR) และ the searching combination moving window partial least squares regression (SCMWPLSR) โดยผลลัพธ์นั้นแสดงให้เห็นว่า CMWPLSR ให้ประสิทธิภาพมากกว่า PLSR และ MWPLSR

2.7.3 Özdemir (2018) ได้ใช้เทคนิค FT-NIR spectroscopy ในการหาปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ความหนาแน่น และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแอปเปิ้ลอบแห้ง ซึ่งสร้างสมการในการทำนายแบบของ the partial least squares regression (PLSR) พบว่าค่าทำนายของค่าความชื้น ($R^2 = 0.986$, RMSEP = 1.22%, RPD = 9.15) ค่า ปริมาณ น้ำ อิสระ ($R^2 = 0.987$, RMSEP = 0.016, RPD = 9.37) ค่า ความ หนา แน่น ($R^2 = 0.845$, RMSEP = 0.445, RPD = 2.55) และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($R^2 = 0.804$, RMSEP = 349 mg kg⁻¹, RPD = 2.27) โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นถือว่าประสบความสำเร็จและเป็นที่น่าพึงพอใจ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ

3.1.1.1 สับปรดอบแห้งสำเร็จรูป (dehydrated pineapples)

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง hyperspectral image (Specim FX17e, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland)

3.2.2 เครื่อง water activity meter (รุ่น 4TE, ยี่ห้อ Aqua lab)

3.2.3 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (รุ่น BP31005, ยี่ห้อ Sartorius)

3.2.4 น้ำ DI (deionized water)

3.2.5 ตลับพลาสติก

3.2.6 ถุงซีปล็อค

3.2.7 มีด

3.2.8 เขียง

3.3 โปรแกรม

3.3.1 โปรแกรม The Unscrambler® version 9.7

3.3.2 โปรแกรม Prediktera Evince 2.7.9

3.3.3 โปรแกรม Origin Lab

3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.4.1 การวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้

3.4.1.1 ก่อนทำการทดลองนำสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป เก็บที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส มาเตรียมโดยการคัดเลือกตามลักษณะรูปร่างที่สมบูรณ์ และชั่งน้ำหนักให้อยู่ในช่วง 3-6 กรัม

3.4.1.2 ในวันที่ทำการทดลองจะเตรียมตัวอย่างในการทำครั้งละ 20-30 ชิ้นในแต่ละวัน โดยจะมีการชั่งน้ำหนัก และเก็บในถุงซิปล็อคก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อป้องกันอากาศและการสัมผัส ซึ่งอาจจะมีผลต่อวัตถุดิบ

3.4.1.3 นำสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูปแต่ละชิ้นมาวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 935 ถึง 1720 นาโนเมตร โดยใช้โหมดการวัดแบบ reflectance และในขณะที่ทำการทดลองต้องรักษาสภาพแวดล้อมอุณหภูมิให้คงที่เหมือนเดิมทุกครั้งทำการทดลอง

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ

วัดค่า Water activity (a_w) ตามวิธีของ AOAC (1995) โดยใช้เครื่องวัด Water activity ยี่ห้อ Aqua lab รุ่น TE4 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3.4.3 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนายสมบัติทางเคมีกายภาพ

3.4.3.1 นำไฟล์ที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงมาหาสเปกตรัมเฉลี่ยของสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูปในแต่ละตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม Evinco ในการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ยจากนั้นบันทึกค่าเป็นไฟล์ .excel นำข้อมูลค่าสเปกตรัมที่ได้มาจัดเรียงคู่กับค่าทางเคมีของตัวอย่างชิ้นนั้นๆ จนครบตามจำนวน

3.4.3.2 จัดเตรียมข้อมูลใน excel เริ่มจากข้อมูลดิบเพื่อดู outlier โดยการพล็อตกราฟและทำแต่ละคอลัมน์ด้วยวิธีการหาค่า mean, max และ min ว่ามีค่าเกินจริงหรือไม่เพื่อจะทำการตัดออก เป็นการลด outlier ในข้อมูลดิบ

3.4.3.3 จัดเรียงข้อมูลจากมากไปน้อย กำหนดตัวแปรอิสระ(X) และตัวแปรตาม(Y) โดยให้สเปกตรัมเป็นตัวแปรอิสระ สมบัติทางเคมีเป็นตัวแปรตาม จากนั้นทำการแยกข้อมูลดิบเป็น calibration set คือข้อมูลกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการจะให้มีข้อมูลที่เป็นค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดอยู่ในชุดข้อมูลนี้ และส่วนข้อมูลที่เหลือจะอยู่ในชุด prediction set คือข้อมูลกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ แบ่งเป็น 70% และ 30% ตามลำดับ

3.4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม The Unscrambler

3.4.3.4.1 สร้างโมเดลโดยเลือกชุดข้อมูล calibration set ที่จัดเรียงเรียบร้อยแล้วไปเข้าโปรแกรม The Unscrambler เพื่อตัดข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนออกอีกรอบเป็นการปรับให้ข้อมูลไปในทิศทางเดียวกันหรือเกาะกลุ่มกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ต่อในการวิเคราะห์สร้างโมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.4.2 นำข้อมูลที่ได้ในกลุ่ม calibration set มาสร้างสมการด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเป็นเทคนิคที่ดีที่สุด และต้องมีการทำ pretreatment ก่อนเป็นการช่วยปรับสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ มีหลายวิธี คือ วิธี smoothing (Savitzky-Golay) 1st derivative, 2nd derivative, MSC และ SNV หลังจากนั้นจะใช้เทคนิค cross validation ในการเลือกจำนวนแพคเตอร์ที่เหมาะสม และจะต้องพิจารณาจากค่า Rcv ให้มีค่าสูงสุด และ RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด หลังจากนั้นจะได้ช่วงความยาวคลื่นที่ดีที่สุดในการใช้ทำนาย

3.4.3.4.3 หลังจากปรับ pretreatment ในชุด calibration set ได้แล้วนั้นจะได้โมเดลที่ดีที่สุด 1 โมเดล แล้วนำสมการนั้นไปใช้ทำนายในกลุ่ม prediction set เพื่อการประเมินความแม่นยำในการทำนายของสมการจะพิจารณาจากค่า correlation coefficient (R^2) และ RMSEP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองทาง NIR spectroscopy และค่าของสมบัติทางเคมี

4.1.1 ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยสเปกตรัม NIR ที่ได้จากตัวอย่างสับปะรดอบแห้ง 191 ชุด และสเปกตรัมทั้งหมดนั้นวัดจากช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1720 นาโนเมตร โดยตัวอย่าง 191 ข้อมูล แบ่งเป็น 2 ชุด คือ calibration set และ prediction set



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป

4.1.2 ค่าการวัด water activity (a_w) (AOAC, 1995)

เมื่อทำการสแกนด้วยเทคนิค NIR hyperspectral image แล้วนำสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป มาทำการตรวจวัดค่า water activity ด้วยเครื่อง water activity meter และสามารถบอกข้อมูลทางสถิติค่าทางเคมีของตัวอย่างได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางสถิติของค่าทางเคมีของตัวอย่าง

chemical value	item	calibration	prediction
	Number of sample	127	64
	Range	0.56-0.60	0.56-0.60
Water activity	Mean	0.587	0.587
	SD	0.007	0.007

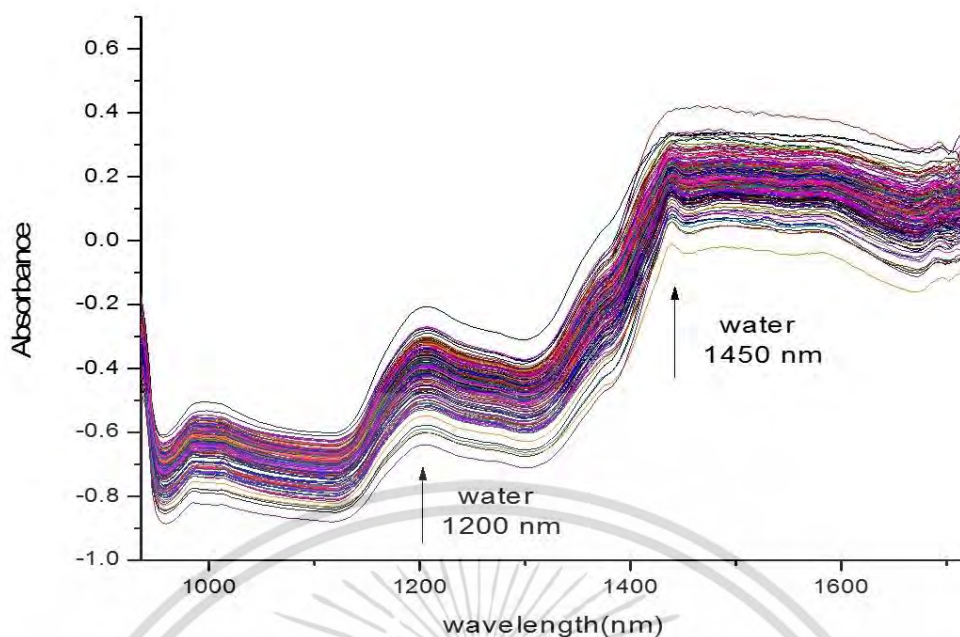
4.2 การเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

4.2.1 กำหนดตัวแปรอิสระ (independent variables) และตัวแปรตาม (dependent variables) โดยให้ตัวแปรอิสระเป็นข้อมูลการดูดกลืนแสง สำหรับตัวแปรตามจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งค่าที่ใช้คือค่า water activity

4.2.2 นำข้อมูลทั้งหมดไปเข้าโปรแกรม The Unscrambler เพื่อตัดข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนหลายๆออก เพื่อปรับให้ค่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจากข้อมูลดิบทั้งหมด 253 ข้อมูล จะถูกตัดออกใช้วิเคราะห์ได้ทั้งหมด 191 ข้อมูล

4.3 ลักษณะการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป

เมื่อทำการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป 191 ชิ้น ที่ความยาวคลื่น 935 ถึง 1720 nm. พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงนั้น เกิดพีคที่เด่นชัดขึ้นมา 2 จุด ที่ 1200 และ 1450 nm. เป็นพีคของน้ำ (Collrell , et al. 2011) ดังรูปที่ 4.2



ภาพที่4.2 สเปกตร้าเบื้องต้น (original spectra)

4.4 การสร้างโมเดลด้วยการวิเคราะห์แบบ PLS regression

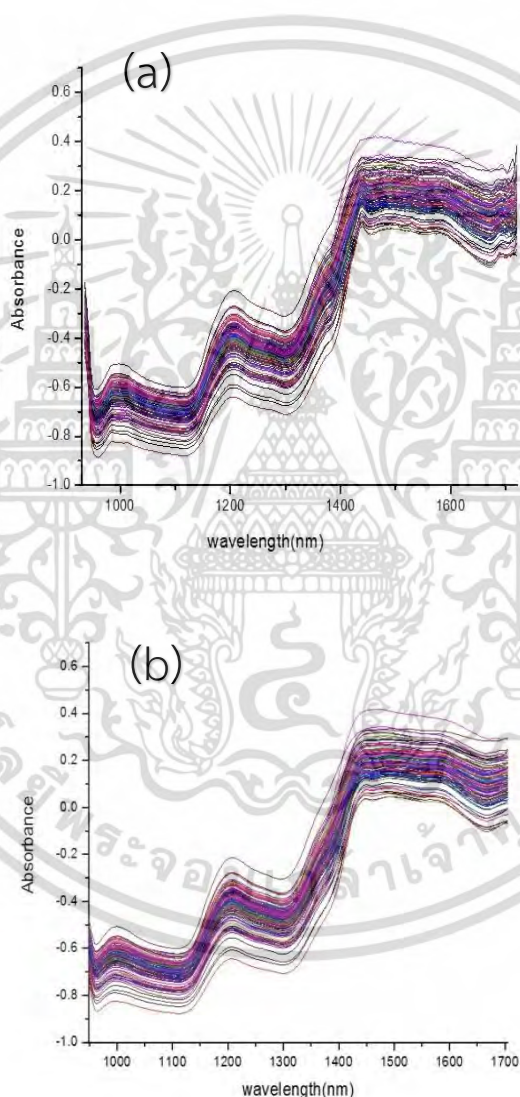
4.4.1 ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (calibration set) เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนาย

4.4.2. ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมา (validation set) คือขั้นตอนที่นำสมการมาตรฐานที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำ

4.4.3 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรดเป็นสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันอยู่ (overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อน โดยวิธีที่ใช้คือ smoothing (Savitzky-Golay) 1st derivative, 2nd derivative, MSC และ SNV ดังตารางที่ 4.2

4.4.4 วิธีการสร้างสมการ (calibration equation)

4.4.4.1 สมการ calibration ประกอบด้วยตัวแปร 2 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) การสร้างสมการ calibration จะใช้เทคนิคทางสถิติเข้ามาช่วยเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยสมการที่ได้ต้องพิจารณาจากทั้งจำนวนแฟคเตอร์ (F) ค่า RMSECV (root mean square error of cross validation) และค่า R_{cv} (correlation coefficient) โดยค่าที่เหมาะสมนั้นจะต้องมี RMSECV เป็นค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ ค่า R_{cv} จะต้องเข้าใกล้ 1 หรือมีค่าสูงที่สุด จากตารางที่ 4.2 ทำให้เราได้ทราบว่า โมเดลที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์ คือโมเดลที่มีการปรับแต่งด้วยวิธี smoothing พิจารณาจากค่า RMSECV และค่า R_{cv} เท่ากับ 0.005594 , 0.684157 ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด และ รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมดิบของตัวอย่าง 127 ชิ้น และแสดงสเปกตรัมของตัวอย่าง 127 ชิ้น ที่ปรับแต่งด้วย smoothing



รูปที่ 4.3 (a) แสดงสเปกตรัมดิบของตัวอย่าง 127 ชิ้น, (b) แสดงสเปกตรัมของตัวอย่าง 127 ชิ้นที่ปรับแต่งด้วย smoothing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการปรับแต่งข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

No.	pre-processing techniques	water activity		
		F	R _{cv}	RMSECV
1	original	3	0.6817	0.0056
2	smoothing	2	0.6841	0.0055
3	1 st derivative	7	0.6560	0.0057
4	2 nd derivative	11	0.6454	0.0058
5	MSC	1	0.6346	0.0059
6	SNV	1	0.6337	0.0059
7	Smoothing + 1 st derivative	2	0.6599	0.0057
8	Smoothing + 2 nd derivative	2	0.6623	0.0057
9	Smoothing + MSC	1	0.6386	0.0059
10	Smoothing + SNV	1	0.6325	0.0059

F = factors

R = correlation coefficients

RMSECV = root mean square error of cross-validation

smoothing = Savitzky-Golay smoothing

1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation

2nd derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation

MSC = multiplicative scatter correction

SNV = standard normal variate transformation

4.4.4.2 การทดสอบสมการ (validation test) เมื่อได้สมการ calibration แล้ว จะต้องนำสมการที่ได้มาทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำ มากน้อยเพียงใด โดยจะใช้วิธีการทดสอบการประเมิน (prediction testing) เป็นการทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (external validation) มาประเมินค่าจากสมการ calibration ที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่างการวัดสเปกตรัมสถานะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม calibration โดยมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ RMSEP (root mean square error of prediction) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายทั้งหมดดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายทั้งหมด

parameters	pre-treatment	calibration				prediction		
		F	N	R _c	RMSEC	N	R _p	RMSEP
Aw	smoothing	2	127	0.6977	0.0054	64	0.7454	0.0051

F = factors

N = samples

R = correlation coefficients

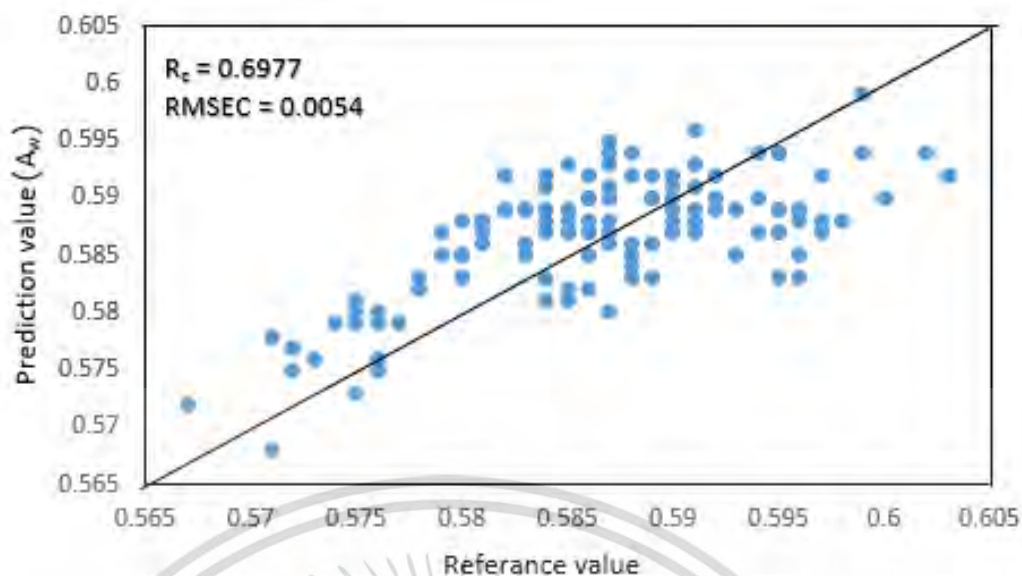
RMSEC = root mean square error of calibration

RMSEP = root mean square error of prediction

4.4.5 การเปรียบเทียบค่าอเตอร์แอกติวิตี้ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR hyperspectral imaging

จากรูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายด้วยเทคนิค NIR hyperspectral image ที่ความยาวคลื่น 935-1720 นาโนเมตร โดยใช้กลุ่มสร้างสมการ (calibration set) ของสับปะรดอบแห้งจำนวน 127 ชิ้น พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าสมการที่นำมาทำนายนั้นมีความแม่นยำพอสมควร และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients; R) เท่ากับ 0.6977 และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพ (root mean squared error of calibration; RMSEC) เท่ากับ 0.0054

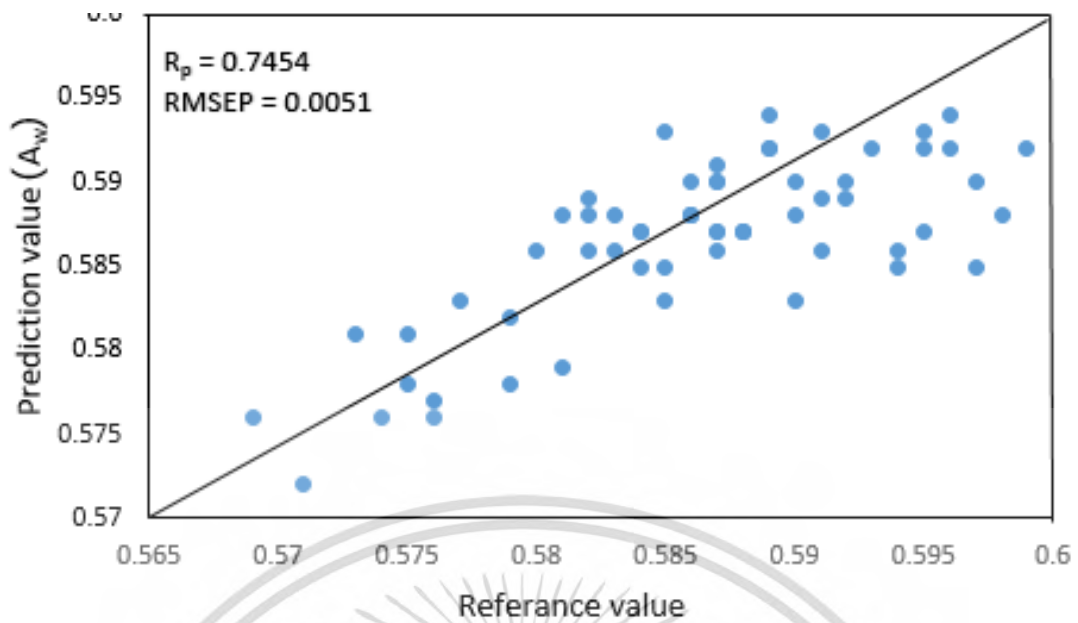
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกระจายตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม calibration set

จากรูปที่ 4.5 กราฟการกระจายตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายด้วยเทคนิค NIR hyperspectral image ที่ความยาวคลื่น 935-1720 นาโนเมตร จากชุดข้อมูลของ prediction set สับปะรดอบแห้ง จำนวน 64 ชิ้น พบว่าข้อมูลกระจายตัวอยู่ใกล้เส้นทแยงมุม บ่งบอกถึงการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของสับปะรดอบแห้งไปในทิศทางเดียวกัน สมการที่ทำนายนั้นมีความแม่นยำพอสมควร และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients; R_p) เท่ากับ 0.7454 และ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพ (root mean squared error of prediction; RMSEP) เท่ากับ 0.0051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกระจายตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม prediction set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาเทคนิคการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของสับปะรดอบแห้ง กับปริมาณน้ำอิสระจากตัวอย่าง 191 ชิ้น ทำให้ทราบว่าปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากการทดลอง อยู่ในช่วง 0.5673-0.6078 ช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 935-1720 นาโนเมตร และแสดงความสัมพันธ์สเปกตรัมทั้งหมดคล้ายกัน มีส่วนพิกอยู่ในช่วงบริเวณเดียวกัน แต่ที่แตกต่างกันคือ ในช่วงค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำมีค่าดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ต่ำกว่าช่วงที่ค่าปริมาณน้ำอิสระสูงที่จะมีค่าดูดกลืนแสงเริ่มต้นสูงกว่า

เมื่อทำการสร้างโมเดลจากข้อมูลการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของสับปะรดอบแห้ง เพื่อทำนายค่าทางเคมีพบว่าสามารถสร้างสมการจาก calibration set ด้วยการปรับแต่งสเปกตรัมที่ดีที่สุด ด้วยวิธี smoothing และทำการทวนสอบสมการเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการด้วยการพิจารณาจาก ค่าแฟคเตอร์ (F) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients; Rp) และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (root mean square error of prediction; RMSEP) แสดงผลลัพธ์ดังนี้ F เท่ากับ 2 Rp เท่ากับ 0.7454 และ RMSEP เท่ากับ 0.0051 ซึ่งความแม่นยำที่ได้เป็นความแม่นยำพอสมควร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการทดลอง เช่น อุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างทำการทดลอง จึงต้องรักษาให้อยู่ในอุณหภูมิที่คงที่เท่ากันทุกครั้งทำการทดลอง รวมถึงการเก็บตัวอย่าง ต้องไม่ให้สัมผัสกับอากาศหรือความชื้น เพราะอาจส่งผลกระทบต่อการวัดองค์ประกอบค่าทางเคมีได้อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (water activity meter) มีจำนวนจำกัด ทำให้ต้องใช้ร่วมกับงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้มีการเกิด error ระหว่างทำงานได้ ถ้าพบว่ามีสิ่งตกค้างจากงานวิจัยอื่นๆด้วย

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป

อาจจะต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่างหรือตัวแปรให้มากขึ้น เนื่องจากการทดลอง มีการเกิดการกระจาย หรือ error ได้ ทำให้ต้องตัดส่วน error ออกไป ซึ่งส่งผลทำให้จำนวนตัวอย่างในการสร้างโมเดลลดน้อยลงและไม่ครอบคลุม เมื่อนำโมเดลไปใช้กับตัวอย่างภายนอก อาจส่งผลให้เกิดความไม่แม่นยำขึ้นได้

บรรณานุกรม

กฤติยา ไชยนอก. 2561. สับปะรด : ผลไม้รักษาโรค. [ออนไลน์]. <https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/service-knowledge-article-info>. 12 พฤษภาคม 2563.

จินตนา ศรีสุข. 2546. การแปรรูปผักและผลไม้แช่แข็ง. [ออนไลน์]. <https://uac.kuu.ac.th>. 13 พฤษภาคม 2563.

เจ ริ ญ เจ ริ ญ ชัย . 2557. การทำแห้งอาหาร. [ออนไลน์]. https://ajarncharoen.files.wordpress.com/2014/08/09_dehydration.pdf. 11 พฤษภาคม 2563.

ตรีรัตน์ เขาวนทวิ. 2533. การพัฒนาเครื่องวอเตอร์แอคทีวิตีแบบตัวเลข. [ออนไลน์]. <https://cuir.car.chula.ac.th>. 14 พฤษภาคม 2563.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และดร.นิธิยา รัตนานพนธ์. 2558. Water activity. [ออนไลน์]. https://www.fisheries.go.th/quality/Water%20activity_58-04-22_final.pdf. 14 พฤษภาคม 2563.

วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล. 2556. ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. [ออนไลน์]. <https://science.buu.ac.th>. 11 พฤษภาคม 2563.

สุพจน์ ตุงกเศรษฐ์. 2013. ความสำคัญของการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอุตสาหกรรมอาหาร. [ออนไลน์]. http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn229A_p85-88.pdf. 5 กรกฎาคม 2563

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายภาคที่ 2. 2562. คู่มือการวิเคราะห์คุณภาพอ้อยด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (NIRS). [ออนไลน์]. <http://km.ocsb.go.th/Uploads/03102019>. 14 พฤษภาคม 2563.

AOAC. (1995). Official Methods of Analysis of AOAC International 16th ed. Arlington: AOAC. 15 May 2020.

Bumrungrat Rongtong, Thongchai Suwonsichon,a, Pitiporn Ritthiruangdej and Sumaporn Kasemsumran. 2018. Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452316X18302308>. 15 May 2020.

Collrell, C., Gou, P., Arnau, J., Comaposada, J. 2011. Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy. Food Chemistry. 129(2): 601-607. 16 May 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISHIKAWA, D., UENO, G. and FUJII, T. 2017. Estimation Method of Moisture Content at the Meat Surface During Drying Process by NIR Spectroscopy and Its Application for Monitoring of Water Activity. [Online]. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsfe/18/3/18_17493/_article/-char/en. 15 May 2020.

Ozdemira, S.I., Çelikk, B., Saritepeb, Y. and Aksoya, H. 2018. Rapid, simultaneous and non-destructive assessment of the moisture, water activity, firmness and SO₂ content of the intact sulphured-dried apricots using FT-NIRS and chemometrics. [Online]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29784389>. 15 May 2020.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



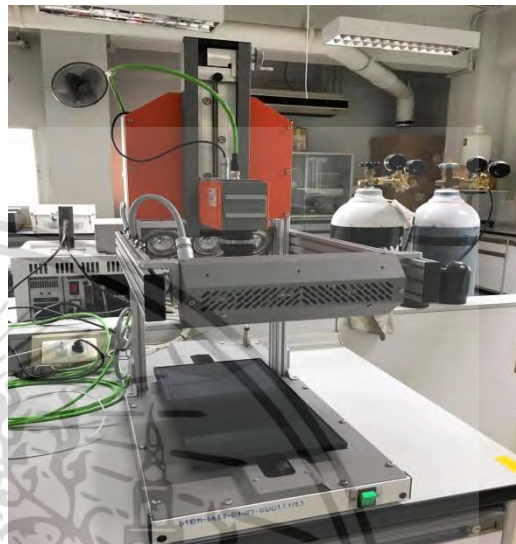
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วัสดุอุปกรณ์ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.1 สับปะรดอบแห้งสำเร็จรูป



ภาพที่ ก.2 NIR hyperspectral image



ภาพที่ ก.3 water activity meter (รุ่น 4TE, AQUA LAB)



ภาพที่ ก.4 น้ำ deionized water

และ ตลับพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



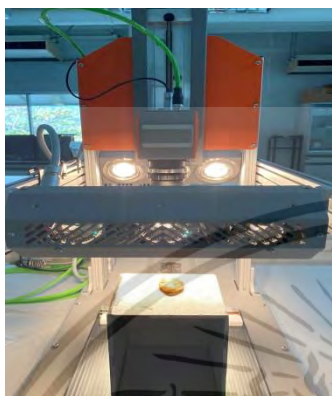
ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย

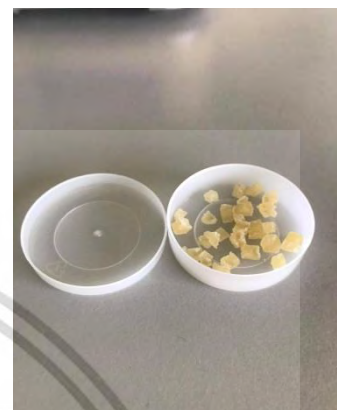
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย



ภาพที่ ข.1 สแกนสับปะรดอบแห้งด้วย
เครื่อง NIR hyperspectral image



ภาพที่ ข.2 หั่นสับปะรดอบแห้งใส่ภาชนะ
สำหรับวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้



ภาพที่ ข.3 ทำการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้
ด้วยเครื่อง water activity meter (4TE, Aqua lab)



ภาพที่ ข.4 อ่านค่า
และ บันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

วิธีการแปลงไฟล์ข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์

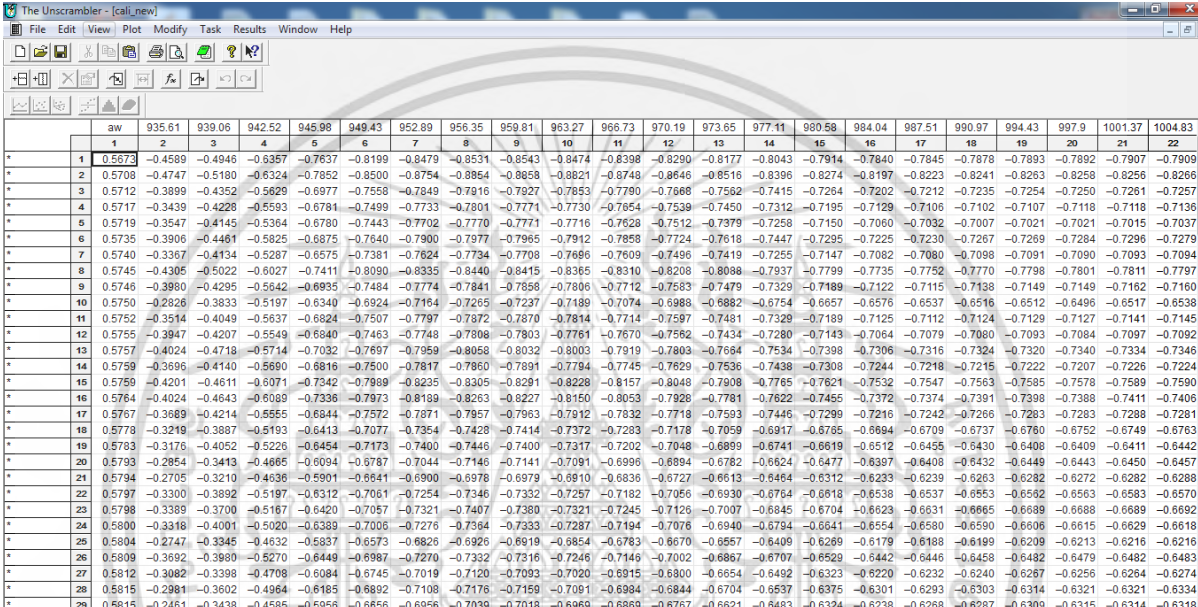
โปรแกรม The unscrambler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

วิธีการแปลงไฟล์ข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์

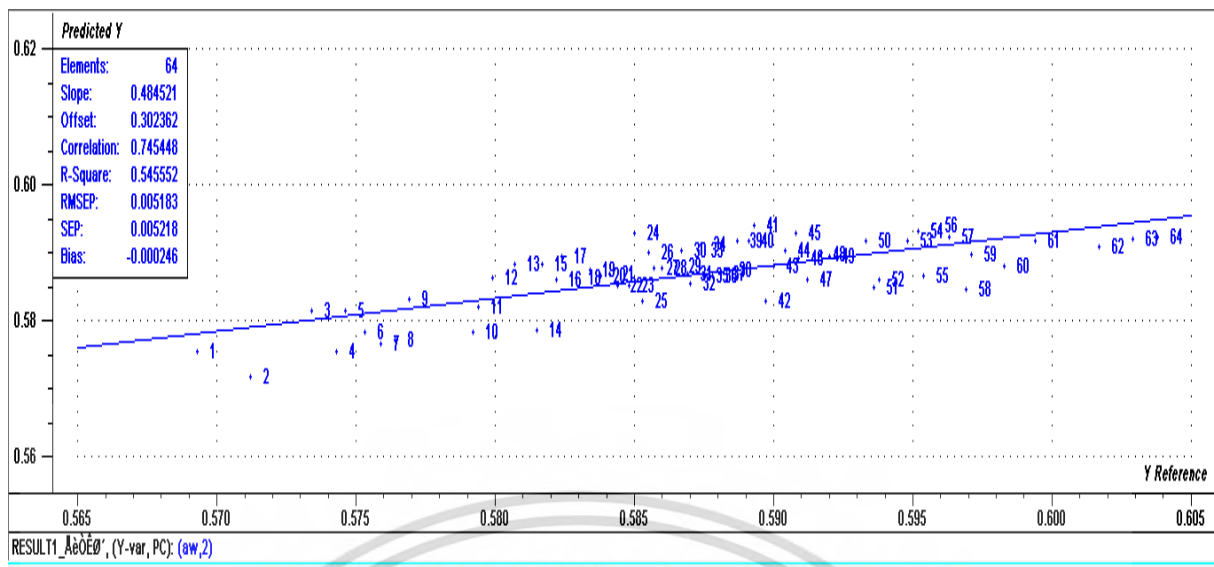
โปรแกรม The unscrambler



	sw	935.61	939.06	942.52	945.98	949.43	952.89	956.35	959.81	963.27	966.73	970.19	973.65	977.11	980.58	984.04	987.51	990.97	994.43	997.9	1001.37	1004.83
1	0.5673	-0.4589	-0.4946	-0.6357	-0.7637	-0.8199	-0.8479	-0.8531	-0.8543	-0.8474	-0.8398	-0.8290	-0.8177	-0.8043	-0.7914	-0.7840	-0.7845	-0.7878	-0.7893	-0.7892	-0.7907	-0.7909
2	0.5708	-0.4747	-0.5180	-0.6324	-0.7852	-0.8500	-0.8754	-0.8854	-0.8858	-0.8821	-0.8748	-0.8646	-0.8516	-0.8396	-0.8274	-0.8197	-0.8223	-0.8241	-0.8263	-0.8258	-0.8256	-0.8266
3	0.5712	-0.3899	-0.4352	-0.5629	-0.6977	-0.7558	-0.7849	-0.7916	-0.7827	-0.7853	-0.7790	-0.7668	-0.7562	-0.7415	-0.7264	-0.7202	-0.7212	-0.7235	-0.7254	-0.7250	-0.7261	-0.7257
4	0.5717	-0.3439	-0.4228	-0.5593	-0.6781	-0.7499	-0.7733	-0.7801	-0.7774	-0.7730	-0.7654	-0.7539	-0.7450	-0.7312	-0.7195	-0.7129	-0.7106	-0.7102	-0.7107	-0.7118	-0.7118	-0.7136
5	0.5719	-0.3547	-0.4145	-0.5364	-0.6780	-0.7443	-0.7702	-0.7770	-0.7771	-0.7716	-0.7628	-0.7512	-0.7379	-0.7258	-0.7150	-0.7060	-0.7032	-0.7007	-0.7021	-0.7021	-0.7015	-0.7037
6	0.5735	-0.3906	-0.4461	-0.5825	-0.6875	-0.7640	-0.7900	-0.7977	-0.7965	-0.7912	-0.7858	-0.7724	-0.7618	-0.7447	-0.7295	-0.7225	-0.7230	-0.7257	-0.7269	-0.7284	-0.7296	-0.7279
7	0.5740	-0.3367	-0.4134	-0.5287	-0.6575	-0.7381	-0.7624	-0.7734	-0.7708	-0.7696	-0.7609	-0.7496	-0.7419	-0.7255	-0.7147	-0.7082	-0.7080	-0.7098	-0.7091	-0.7090	-0.7093	-0.7094
8	0.5745	-0.4305	-0.5022	-0.6027	-0.7411	-0.8090	-0.8335	-0.8440	-0.8415	-0.8365	-0.8310	-0.8208	-0.8088	-0.7937	-0.7799	-0.7735	-0.7752	-0.7770	-0.7798	-0.7801	-0.7811	-0.7797
9	0.5746	-0.3980	-0.4295	-0.5642	-0.6935	-0.7484	-0.7774	-0.7841	-0.7858	-0.7806	-0.7712	-0.7583	-0.7479	-0.7329	-0.7189	-0.7122	-0.7115	-0.7138	-0.7149	-0.7149	-0.7162	-0.7160
10	0.5750	-0.2826	-0.3833	-0.5197	-0.6340	-0.6924	-0.7164	-0.7265	-0.7237	-0.7189	-0.7074	-0.6988	-0.6882	-0.6754	-0.6657	-0.6576	-0.6537	-0.6516	-0.6512	-0.6496	-0.6517	-0.6538
11	0.5752	-0.3514	-0.4049	-0.5637	-0.6824	-0.7507	-0.7797	-0.7872	-0.7870	-0.7814	-0.7714	-0.7597	-0.7481	-0.7329	-0.7189	-0.7125	-0.7112	-0.7124	-0.7129	-0.7127	-0.7141	-0.7145
12	0.5755	-0.3947	-0.4207	-0.5549	-0.6840	-0.7463	-0.7748	-0.7808	-0.7803	-0.7761	-0.7670	-0.7562	-0.7434	-0.7280	-0.7143	-0.7064	-0.7079	-0.7080	-0.7093	-0.7084	-0.7097	-0.7092
13	0.5757	-0.4024	-0.4718	-0.5714	-0.7032	-0.7697	-0.7959	-0.8058	-0.8032	-0.8003	-0.7919	-0.7803	-0.7684	-0.7534	-0.7398	-0.7306	-0.7316	-0.7324	-0.7320	-0.7340	-0.7334	-0.7346
14	0.5759	-0.3696	-0.4140	-0.5690	-0.6816	-0.7500	-0.7817	-0.7860	-0.7891	-0.7794	-0.7745	-0.7629	-0.7536	-0.7438	-0.7308	-0.7244	-0.7248	-0.7215	-0.7222	-0.7207	-0.7226	-0.7244
15	0.5769	-0.4201	-0.4611	-0.6071	-0.7342	-0.7989	-0.8235	-0.8305	-0.8291	-0.8228	-0.8157	-0.8048	-0.7908	-0.7765	-0.7621	-0.7532	-0.7547	-0.7563	-0.7585	-0.7578	-0.7589	-0.7590
16	0.5764	-0.4024	-0.4643	-0.6089	-0.7336	-0.7973	-0.8189	-0.8263	-0.8227	-0.8150	-0.8053	-0.7928	-0.7781	-0.7622	-0.7465	-0.7372	-0.7374	-0.7391	-0.7398	-0.7388	-0.7411	-0.7406
17	0.5767	-0.3689	-0.4214	-0.5555	-0.6844	-0.7572	-0.7871	-0.7957	-0.7963	-0.7912	-0.7832	-0.7718	-0.7593	-0.7446	-0.7299	-0.7216	-0.7242	-0.7266	-0.7283	-0.7288	-0.7281	-0.7281
18	0.5778	-0.3219	-0.3887	-0.5193	-0.6413	-0.7077	-0.7354	-0.7428	-0.7414	-0.7372	-0.7283	-0.7178	-0.7059	-0.6917	-0.6765	-0.6694	-0.6709	-0.6737	-0.6760	-0.6752	-0.6749	-0.6763
19	0.5783	-0.3176	-0.4052	-0.5226	-0.6454	-0.7173	-0.7400	-0.7446	-0.7400	-0.7317	-0.7202	-0.7048	-0.6899	-0.6741	-0.6619	-0.6512	-0.6455	-0.6430	-0.6408	-0.6409	-0.6411	-0.6442
20	0.5793	-0.2854	-0.3413	-0.4665	-0.6094	-0.6787	-0.7044	-0.7146	-0.7141	-0.7091	-0.6996	-0.6894	-0.6782	-0.6624	-0.6477	-0.6397	-0.6408	-0.6432	-0.6449	-0.6443	-0.6450	-0.6457
21	0.5794	-0.2705	-0.3210	-0.4636	-0.5901	-0.6641	-0.6900	-0.6978	-0.6979	-0.6910	-0.6836	-0.6727	-0.6613	-0.6464	-0.6312	-0.6233	-0.6239	-0.6263	-0.6272	-0.6282	-0.6288	-0.6288
22	0.5797	-0.3300	-0.3892	-0.5197	-0.6312	-0.7061	-0.7254	-0.7346	-0.7332	-0.7257	-0.7182	-0.7056	-0.6930	-0.6764	-0.6618	-0.6538	-0.6537	-0.6553	-0.6562	-0.6563	-0.6583	-0.6570
23	0.5798	-0.3389	-0.3700	-0.5167	-0.6420	-0.7057	-0.7321	-0.7407	-0.7380	-0.7321	-0.7245	-0.7126	-0.7007	-0.6845	-0.6704	-0.6623	-0.6631	-0.6665	-0.6689	-0.6688	-0.6689	-0.6692
24	0.5800	-0.3318	-0.4001	-0.5020	-0.6389	-0.7006	-0.7276	-0.7364	-0.7333	-0.7287	-0.7194	-0.7076	-0.6940	-0.6794	-0.6641	-0.6554	-0.6580	-0.6590	-0.6606	-0.6615	-0.6629	-0.6618
25	0.5804	-0.2747	-0.3345	-0.4632	-0.5837	-0.6573	-0.6826	-0.6926	-0.6919	-0.6854	-0.6783	-0.6670	-0.6557	-0.6409	-0.6269	-0.6179	-0.6188	-0.6199	-0.6209	-0.6213	-0.6216	-0.6216
26	0.5809	-0.3692	-0.3980	-0.5270	-0.6449	-0.6987	-0.7270	-0.7332	-0.7316	-0.7246	-0.7146	-0.7002	-0.6867	-0.6707	-0.6529	-0.6442	-0.6446	-0.6458	-0.6482	-0.6479	-0.6482	-0.6483
27	0.5812	-0.3082	-0.3398	-0.4708	-0.6084	-0.6745	-0.7019	-0.7120	-0.7093	-0.7020	-0.6915	-0.6800	-0.6654	-0.6492	-0.6323	-0.6220	-0.6232	-0.6240	-0.6267	-0.6256	-0.6264	-0.6274
28	0.5815	-0.2981	-0.3602	-0.4964	-0.6185	-0.6892	-0.7108	-0.7176	-0.7159	-0.7091	-0.6984	-0.6844	-0.6704	-0.6537	-0.6375	-0.6301	-0.6293	-0.6303	-0.6314	-0.6321	-0.6321	-0.6334
29	0.5815	-0.2461	-0.3438	-0.4585	-0.5956	-0.6656	-0.6956	-0.7039	-0.7018	-0.6969	-0.6869	-0.6767	-0.6621	-0.6483	-0.6324	-0.6238	-0.6268	-0.6287	-0.6309	-0.6315	-0.6314	-0.6318

ภาพที่ ค.1 นำข้อมูลการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดที่ได้จากเครื่องมือวัด ใส่ในโปรแกรม The Unscrambler และกำหนดตัวแปร X, Y สำหรับ calibration set และทำเช่นเดียวกันกับ prediction set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค.4 ทำการทดสอบโมเดลด้วย prediction set ได้ผลวิเคราะห์ ทางสถิติ ในกลุ่ม prediction set
ค่า $R = \text{correlation} = 0.745$, $\text{RMSEP} = 0.005183$ และ $\text{Factor} = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวัดคุณภาพทางเคมีของสับปะรดอบแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวัดคุณภาพทางเคมีของสับปะรดอบแห้ง

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลดิบทั้งหมดของการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

No.	a_w	No.	a_w	No.	a_w	No.	a_w
1	0.5673	21	0.5759	41	0.5815	61	0.5839
2	0.5693	22	0.5759	42	0.5815	62	0.5841
3	0.5708	23	0.5764	43	0.5815	63	0.5841
4	0.5712	24	0.5764	44	0.5817	64	0.5842
5	0.5712	25	0.5767	45	0.5819	65	0.5844
6	0.5717	26	0.5769	46	0.5820	66	0.5844
7	0.5719	27	0.5778	47	0.5822	67	0.5846
8	0.5734	28	0.5783	48	0.5822	68	0.5848
9	0.5735	29	0.5792	49	0.5824	69	0.5849
10	0.5740	30	0.5793	50	0.5824	70	0.5850
11	0.5743	31	0.5794	51	0.5826	71	0.5850
12	0.5745	32	0.5794	52	0.5829	72	0.5852
13	0.5746	33	0.5797	53	0.5829	73	0.5853
14	0.5746	34	0.5798	54	0.5829	74	0.5853
15	0.5750	35	0.5799	55	0.5830	75	0.5854
16	0.5752	36	0.5800	56	0.5834	76	0.5854
17	0.5753	37	0.5804	57	0.5835	77	0.5855
18	0.5755	38	0.5807	58	0.5837	78	0.5855
19	0.5757	39	0.5809	59	0.5838	79	0.5856
20	0.5759	40	0.5812	60	0.5838	80	0.5857

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลดิบทั้งหมดของการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (ต่อ)

No.	a_w	No.	a_w	No.	a_w	No.	a_w
-----	-------	-----	-------	-----	-------	-----	-------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

81	0.5858	101	0.5874	121	0.5892	141	0.5913
82	0.5859	102	0.5874	122	0.5893	142	0.5915
83	0.5860	103	0.5875	123	0.5895	143	0.5917
84	0.5861	104	0.5875	124	0.5897	144	0.5919
85	0.5862	105	0.5875	125	0.5897	145	0.5919
86	0.5865	106	0.5876	126	0.5898	146	0.5920
87	0.5865	107	0.5878	127	0.5898	147	0.5923
88	0.5865	108	0.5878	128	0.5900	148	0.5932
89	0.5867	109	0.5880	129	0.5901	149	0.5933
90	0.5867	110	0.5881	130	0.5901	150	0.5934
91	0.5868	111	0.5881	131	0.5904	151	0.5936
92	0.5869	112	0.5882	132	0.5904	152	0.5936
93	0.5870	113	0.5883	133	0.5907	153	0.5937
94	0.5870	114	0.5884	134	0.5908	154	0.5938
95	0.5870	115	0.5885	135	0.5908	155	0.5938
96	0.5871	116	0.5887	136	0.5909	156	0.5945
97	0.5872	117	0.5888	137	0.5909	157	0.5947
98	0.5873	118	0.5890	138	0.5910	158	0.5948
99	0.5873	119	0.5891	139	0.5910	159	0.5952
100	0.5873	120	0.5891	140	0.5912	160	0.5952

ตารางที่ ง.1 แสดงข้อมูลดิบทั้งหมดของการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (ต่อ)

No.	a_w	No.	a_w
-----	-------	-----	-------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประวัติการศึกษา - ระดับชั้นมัธยมปีที่ 1 ถึง 6 โรงเรียน บดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 4
- ระดับปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาวศิริรัตน์ มณีคะ

วัน เดือน ปีเกิด 29 มกราคม 2540

- ประวัติการศึกษา - ระดับชั้นมัธยมปีที่ 1 ถึง 6 โรงเรียนมัธยมวัดหนองจอก
- ระดับปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้