# ขั้นตอนการอบแห้งและการลดการเกิดสีคล้ำที่เหมาะสม ในลำไยอบแห้งสีทอง

พัชรมณี อุณหพิพัฒพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2560

**ขั้นตอนการอบแห้งและการลดการเกิดสีคล้ำที่เหมาะสม**
**ในลำไยอบแห้งสีทอง**

พัชรมณี อุณหพิพัฒพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

**พิจารณาเห็นชอบโดย** **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรผกา อรรคนิตย์)
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัศวราชันย์)
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล)
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(รองศาสตราจารย์ปราณี วราสวัสดิ์)
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 2560

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก)
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 2560

**บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว** .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 21 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

**ชื่อเรื่อง** ขั้นตอนการอบแห้งและการลดการเกิดสีคล้ำที่เหมาะสมในลำไยอบแห้งสีทอง

**ชื่อผู้เขียน** นางสาวพัชรมณี อุณหพิพัฒพงศ์

**ชื่อปริญญา** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

**อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรผกา อรรคนิตย์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขั้นตอนการอบแห้งและการลดการเกิดสีคล้ำที่เหมาะสมในลำไยอบแห้งสีทอง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการลวกและความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียม-เมตาไบซัลไฟต์ของต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสด ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งและการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นจากการศึกษาอุณหภูมิในการลวก 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส และสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (KMS) ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 500 1000 และ 1500 ppm พบว่า การลวกเนื้อลำไยสดที่ 90 องศาเซลเซียสและแช่ในสารละลาย KMS ที่ 1000 ppm สามารถลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอล-ออกซิเดส (PPO) และค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (BI) ได้ดีที่สุดและเมื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งของเนื้อลำไย ทั้ง 2 ตัวอย่าง ได้แก่ เนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น โดยอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 18 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 390-750 นาที และ 420-930 นาที สำหรับเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นตามลำดับ และการอบแห้งที่อุณหภูมิแบบหลายขั้น ซึ่งใช้อุณหภูมิในการอบแห้งในช่วงแรกและช่วงที่สองเท่ากับ 80 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และกำหนดเวลาการอบแห้งของอุณหภูมิในช่วงแรก 3 ระดับ ได้แก่ 60 90 และ 120 นาทีโดยเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 480-615 นาที และ 570-675 นาที ตามลำดับ เมื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลองของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของเนื้อลำไยทั้ง 2 ตัวอย่างได้เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Newton และแบบจำลองของ Henderson and Pabis เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น และการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวจะมีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้ง

ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง พบว่า การอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 360 นาที และเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 450 นาที สามารถลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์PPOค่าBIและปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล (HMF) ได้ดีที่สุดและเมื่อนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื้อลำไยอบแห้งที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น มีแนวโน้มของค่า L* a* และ b* ลดลง แต่ค่า BI และปริมาณสารประกอบ HMF เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อลำไยแห้งที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ซึ่งการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสสามารถลดการเพิ่มขึ้นของค่า BI และปริมาณสารประกอบ HMF ในเนื้อลำไยอบแห้งได้มากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส

| | |
|---|---|
| Title | Optimal drying process and darkness value reduction in golden dried longan fruit |
| Author | Miss Patcharamanee Unhapipatpong |
| Degree | Master of Science in Food Science and Technology |
| Advisor Committee Chairperson | Assistant Professor Dr. Kornpaka Arkanit |

## ABSTRACT

The objective of this research was to determine the optimal drying process and darkness value reduction in golden dried longan fruit by investigating the effect of blanching temperature and concentration of potassium metabisulfite (KMS) solution on the physical and chemical properties of fresh peeled longan fruit, as well as studying the drying characteristics, mathematical models, and the effect of drying temperature and storage temperature on the quality changes in pretreated and untreated dried peeled longan fruit. Blanching temperature at 70, 80, or 90°C and concentration of KMS solution at 500, 1000, or 1500 ppm were studied. The result showed that blanching of fresh longan at 90°C and soaking in KMS solution at 1000 ppm were the optimal condition to decrease the polyphenol oxidase (PPO) activity and browning index (BI). Drying characteristics of pretreated and untreated dried peeled longan fruit with a final moisture content of 18% were further analyzed. For the single-stage drying, temperature was set at 60, 70, or 80°C and the drying time was 390-750 and 420-930 min for pretreated and untreated dried peeled longan fruit, respectively. For the multi-stage drying, temperature was set at 80°C for the first stage and at 70°C for the second stage. The drying time in the first stage was set at60, 90, or 120 min. Results indicated that the drying time was 480-615 and 570-675 min for pretreated and untreated dried peeled longan fruit, respectively. For the mathematical model, Page model was the best in describing the behavior of both dried peeled longan fruit when compared to Newton model and Henderson and Pabis model. Effective moisture diffusivity increased with the increasing drying temperature while the activation energy in single-stage drying waslower than in

multi-stage drying. The effect of drying temperature on the quality changes in dried peeled longan fruit was also determined. Drying of pretreated peeled longan fruit at 80°C for 120 min followed by 70°C for 360 min as well as drying of untreated peeled longan fruit at 80°C for 120 min followed by 70°C for 450 min were the optimal condition to decrease PPO activity, BI value and hydroxymethylfurfural (HMF) content. The tendency of decreasing L* a* and b* values but increasing BI value and HMF content in untreated dried peeled longan fruit were observed during storage at 35, 45, and 55°C when compared to pretreated dried peeled longan fruit. BI value and HMF contentwas lower during storage at 35°C than at 45 and 55°C.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรผกา อรรคนิตย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา พร้อมแนะนำแนวทางในการค้นคว้าและแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัศวราชันย์ รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล และ รองศาสตราจารย์ปราณี วราสวัสดิ์ กรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำความรู้พร้อมทั้งคำแนะนำ และตรวจสอบข้อบกพร่องในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชายจอมดวง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้กำลังใจในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารและสาขาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาความช่วยเหลือ และกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

พัชรมณี อุณหพิพัฒพงศ์

กรกฎาคม 2560

# สารบัญ

หน้า

# สารบัญตาราง

# สารบัญภาพ

# สารบัญภาพผนวก

# บทที่ 1
# บทนำ

## ความสำคัญของปัญหา

ลำไย *(Euphoria longan, Lank.* วงศ์ *Sapedadceae)* เป็นไม้ผลทางเศรษฐกิจด้านการส่งออกที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งพบว่าในปี 2559 มีปริมาณการส่งออกลำไยสดสูงถึง 415.9 ตัน คิดเป็นมูลค่า 11,616.4 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) จึงทำให้รัฐบาลให้การสนับสนุนและส่งเสริมตั้งแต่กระบวนการปลูก กระบวนการผลิต จนถึงกระบวนการส่งออก แต่เนื่องจากลำไยสดมีอายุการเก็บรักษาสั้น จึงได้มีการยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าการส่งออกของลำไย โดยนำเทคโนโลยีการแปรรูปต่างๆ มาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากลำไยเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากลำไยสด ได้แก่ ลำไยกระป๋อง ลำไยแช่แข็ง และลำไยอบแห้ง เป็นต้นผลิตภัณฑ์ลำไยแปรรูปที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ ลำไยอบแห้ง โดยพบว่ามีปริมาณการส่งออกถึง 125.5 ตัน คิดเป็นมูลค่า 8,439.6 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)

ลำไยอบแห้ง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ลำไยอบแห้งแบบทั้งผลพร้อมเปลือก และลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ (เนื้อลำไยอบแห้งสีทอง) โดยการอบแห้งเนื้อลำไยสีทองนั้นจะนำเนื้อลำไยสดมาผ่านกระบวนการแช่ในสารละลายก่อนการอบแห้ง เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล และทำให้เนื้อลำไยอบแห้งที่ได้มีสีทอง โดยสารละลายที่นิยมใช้ คือ สารประกอบซัลไฟต์ เช่น โซเดียมหรือโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ แต่เนื่องจากกลุ่มสารประกอบซัลไฟต์เป็นสารก่อให้เกิดภูมิแพ้ และหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในผลิตภัณฑ์เกินมาตรฐานที่กำหนด ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค แต่ถ้าหากใช้ในปริมาณที่น้อยเกินไป อาจมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดสีคล้ำขึ้นซึ่งมีผลต่อการเลือกซื้อของผู้บริโภคและนอกจากการใช้สารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเนื้อลำไยแล้วยังพบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถลดการเกิดสีคล้ำ และลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารได้

ดังนั้น งานวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาขั้นตอนการอบแห้ง ตั้งแต่การเตรียมขั้นต้นโดยการใช้ความร้อนร่วมกับการใช้สารเคมีและการอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อลดการเกิดสีคล้ำและอันตรายจากการใช้สารเคมีในเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเนื้อลำไย
2. เพื่อศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของลำไยอบแห้งสีทอง

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งลำไยสีทองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอุตสาหกรรม
2. เพื่อให้ได้ลำไยอบแห้งสีทองที่มีคุณภาพและไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

# บทที่ 2
# ตรวจสอบเอกสาร

## ลำไย

ลำไย (longan) จัดเป็นพืชในตระกูล Sapindaceaeมีชื่อทางวิทยาศาสตร์หลายชื่อ ได้แก่ *Euphoria longana Lam* หรือ *Euphoria longan Strend* หรือ *NepheliumlonganaCamb* หรือ *DimocarouslonganaLour* (พาวิน, 2543) ลำไยเป็นไม้ผลเขตร้อนและกึ่งร้อน ซึ่งมีการสันนิษฐานว่ามีถิ่นกำเนิดอยู่ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อาทิ จีน พม่า เวียดนาม และไทย ซึ่งพื้นที่ที่มีการปลูกลำไยมากที่สุดในประเทศไทย คือ จังหวัดลำพูน และเชียงใหม่ โดยทั่วไปลำไยมีลักษณะผลค่อนข้างกลม เปลือกสีน้ำตาลปนเหลืองหรือเขียว สำหรับผลสุกจะมีเปลือกสีเหลืองหรือสีน้ำตาลแดง ผิวเปลือกมีลักษณะเรียบหรือมีตุ่มแบนๆ เนื้อลำไยจะมีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายวุ้น หรือมีสีชมพูเรื่อ นอกจากนี้เนื้อลำไยอาจมีลักษณะ แฉะ แห้ง กรอบ ฉ่ำน้ำ เหนียว อ่อนนุ่ม มีกลิ่นหอมและรสหวานแตกต่างไปตามสายพันธุ์ (จำเนียร, 2546) สำหรับความหวานของลำไยสดมีค่าอยู่ในช่วง 16-25 องศาบริกซ์ (Menzel and Waite, 2005) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.7-6.9 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่พบในเนื้อลำไยสดได้แก่ น้ำตาลซึ่งพบมาก 3 ชนิด คือ กลูโคส ฟรุกโทส และซูโครส (Paull and Chen, 1987; LiandLi, 1999) กรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดกลูโคนิค กรดมาลิค และกรดซิตริก เป็นต้น กรดอะมิโนที่สำคัญ เช่น อะลานีนกรดกลูตามิคไกลซีน ลูซีนกรดแอสพาร์ติกอาร์จินีนเมตไทโอนีน และวาลีนเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวิตามินสำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ วิตามินบี2และ วิตามินซีซึ่งจะพบมากในลำไยสด และยังประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิคที่สำคัญ 3 ชนิด คือ กรดแกลลิค กรดเอลลาจิค และกรดโคริลาจิน ซึ่งปริมาณที่พบจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริเวณที่พบและสายพันธุ์ของลำไย (Soong andBarlow, 2004)

### 1. พันธุ์ลำไยที่นิยมใช้ในการอบแห้ง

ทรงสิริ และคณะ (2539) ได้กล่าวถึงพันธุ์ลำไยที่นำมาทำการอบแห้ง ดังนี้

1.1 พันธุ์ดอ หรืออีดอ เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกและมีความสำคัญในเชิงการค้ามากที่สุด เนื่องจากดูแลง่ายทนต่อโรคให้ผลผลิตสม่ำเสมอ ผลผลิตโดยประมาณพบว่ามีปริมาณร้อยละ 80 ของผลผลิตทั้งประเทศ (กรมการค้าภายใน, 2539) ลักษณะผลค่อนข้างใหญ่ เปลือกหนาสีน้ำตาล มีลักษณะเป็นกระหรือเป็นตาห่างสีน้ำตาลเข้ม รูปร่างผลแป้น เนื้อลำไยมีสีขาวขุ่นค่อนข้างเหนียว

มีน้ำน้อยและมีรสหวาน เมล็ดเล็ก ใบมีลักษณะเป็นคลื่น โดยทั่วไปลำไยพันธุ์อีดอจะเริ่มสุกพร้อมเก็บเกี่ยวช่วงปลายเดือนมิถุนายน

1.2 พันธุ์แห้วหรืออีแห้ว ที่ผิวของเปลือกมีสีคล้ำ ผิวขรุขระ เปลือกหนา เนื้อลำไยมีรสหวานจัด เมล็ดกลมแบน ใบมีขนาดใหญ่ปานกลางโคนใบเรียวปลายใบทู่ มีสีเขียวเป็นมันน้อย โดยทั่วไปจะให้ผลผลิตปีเว้นปี เริ่มสุกพร้อมเก็บเกี่ยวในช่วงปลายเดือนสิงหาคมถึงต้นเดือนกันยายน

1.3 พันธุ์สีชมพูหรือพันธุ์อีออน มีลักษณะโดยทั่วไปคือ ผิวเปลือกหนาเรียบ สีน้ำตาลแดง ผลเบี้ยวเล็กน้อย เนื้อลำไยสีมีขาวออกสีชมพูใสๆเนื้อนิ่มและกรอบร่อน มีน้ำน้อย เมล็ดมีขนาดเล็ก เบี้ยวแบน ใบสีเขียวจางเป็นมันค่อนข้างหนาแผ่นใบเรียบแต่ปลายใบบิดเล็กน้อย โดยทั่วไปการติดผลไม่สม่ำเสมอ มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวในช่วงปลายเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม

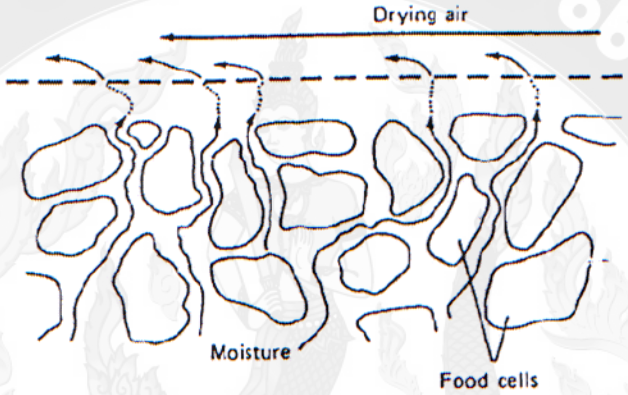
1.4 พันธุ์เบี้ยวเขียวหรือพันธุ์อีเบี้ยว โดยทั่วไปผลของลำไยจะมีลักษณะเบี้ยวเด่นชัดกว่าลำไยพันธุ์อื่นสีเปลือกค่อนข้างเขียว ผิวเปลือกเรียบ เนื้อลำไยสีขาวครีมเนื้อหนา กรอบร่อน มีน้ำน้อย รสหวานจัด และมีกลิ่นหอมเมล็ดเบี้ยวค่อนข้างแบน ใบยาวกว่าพันธุ์อื่น ลักษณะคล้ายใบมะม่วง มีสีเขียวเข้ม โดยทั่วไปจะติดผลเว้นปีและมีช่วงเก็บเกี่ยวกลางเดือนสิงหาคมถึงต้นกันยายน

จากการศึกษาพบว่าสายพันธุ์ที่นิยมนำมาอบแห้งมากที่สุด คือ ดอหรืออีดอ รองมาคือ เบี้ยวเขียวหรืออีเบี้ยว และ แห้วหรืออีแห้ว (วิไล, 2541; ดำรง, 2541; ทองวัน, 2541) เนื่องจากพันธุ์อีดอเมื่อนำมาอบแห้งแล้ว จะให้ลักษณะเปลือกที่มีสีเหลืองทอง น้ำหนักดี และไม่แตกง่าย (ไมตรี และวิจิตร, 2547; รัตนาและคณะ, 2541) ส่วนพันธุ์เบี้ยวเขียวได้รับความนิยมเนื่องจากมีเปลือกบาง (วิไล, 2541) แต่พันธุ์แห้วจะให้ลักษณะของสีเปลือกที่ ค่อนข้างคล้ำเมื่อนำไปอบ (ทองวัน, 2541) จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนัก

## ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นกระบวนการที่นำมาใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ให้ยาวนานขึ้น โดยการลดความชื้นในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งมีผลในการช่วยชะลอการเสื่อมเสียอันเกิดจากจุลินทรีย์ รวมถึงช่วยในการยับยั้งปฏิกิริยาจากทำงานของเอนไซม์ และช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ การอบแห้งโดยทั่วไปมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง เพื่อทำให้ความชื้นระเหยออกไปจากวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ (สมชาติ, 2540) ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อนจะมีอยู่ 2 วิธี คือ การเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบ (capillary force) ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ภายในมีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่มีความต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ โดยจะเกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ เนื่องจากผลของแรงตึงผิว (surface force) ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของความชื้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะหยุดลงเมื่อน้ำในทางแคบๆ นั้นเกิดการขาดตอนลง (ภาพที่ 1)

และอีกวิธี คือ การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ผ่านเซลล์ของวัสดุ ซึ่งจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ ความชื้นจะแพร่ผ่านเซลล์ จึงทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้ช้ากว่าวิธีแรก จะเห็นได้ว่าไอน้ำที่อยู่ภายในวัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่ เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (partial pressure of vapor) ที่เกิดจากความแตกต่างกันระหว่างไอน้ำที่อยู่ภายในวัสดุกับอากาศร้อน ซึ่งเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศ การถ่ายเทมวลของน้ำจากวัสดุชื้นไปยังอากาศจะหยุดลง




**ภาพที่ 1** การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารในระหว่างการอบแห้ง

ที่มา: Fellows (2000)

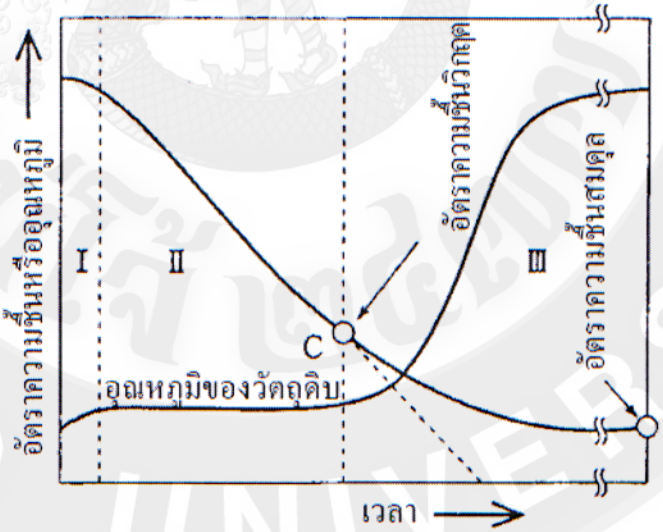
ซึ่งกลไกการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารในระหว่างการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง (ภาพที่ 2) ได้แก่

1. ช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง เป็นช่วงที่ความชื้นเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวของวัสดุ และเกิดการระเหยที่บริเวณผิวของวัสดุเมื่อวัสดุได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุและอุณหภูมิของลมร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุมีค่าแตกต่างกันมาก ทำให้ความชื้นที่อยู่บริเวณผิววัสดุเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วจนกว่าอุณหภูมิที่บริเวณผิวของวัสดุอบแห้งจะเกิดความสมดุลทางความร้อน

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน ความร้อนของวัสดุที่ได้รับในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยของความชื้นออกจากตัววัสดุ การถ่ายเทความร้อน และมวลระหว่างวัสดุและอากาศจะมีลักษณะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคืออุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม (สมชาติ, 2540) ซึ่งความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุ โดย

การนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ และวัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังอากาศร้อน โดยมีผลต่างของอุณหภูมิและผลต่างของความดันไอที่ผิวของวัสดุและอากาศร้อนเป็นตัวผลักดัน ซึ่งอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาโดยการถ่ายเทมวลเกิดจากการแพร่เนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและที่อากาศรอบนอก

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อวัสดุมีความชื้นลดลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ (ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก ; first falling rate) การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้นแต่ยังเกิดขึ้นภายในเนื้อของวัสดุอีกด้วย โดยความชื้นจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยอัตราการระเหยจะถูกควบคุมโดยความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุในขณะนั้น ที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก (สมชาติ, 2540) และต่อมาเมื่อปริมาณความชื้นลดต่ำลงเรื่อยๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนและมวลจะมากขึ้นจนในที่สุดปริมาณน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุที่อยู่ในรูปน้ำอิสระจะลดลงจนถึงค่าๆหนึ่ง ที่ทำให้ความดันไอภายในวัสดุเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่หาได้ ณ จุดนี้คือจุดที่เรียกว่า “ความชื้นสมดุล” ซึ่งจะไม่มีการลดลงของปริมาณความชื้นอีก ณ สภาวะนั้น (ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง ; second falling rate)




**ภาพที่ 2** อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา

ที่มา: เรียวโช (2525)

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุเกษตร ที่มีความชื้นสูงและผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้านำวัสดุมาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขคงที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ โดยอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้คือ ช่วงที่ 1 ในช่วงที่ 2 อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น อัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate) และในช่วงที่ 3 ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป การถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้น ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ซึ่งปริมาณความร้อนของวัสดุที่ได้รับนอกจากจะลดลงแล้ว ความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วยในช่วงนี้การอบแห้งจะเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate) และการอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ส่วนค่าของความชื้นที่จุดต่อระหว่างช่วงที่ 2 และ 3 เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content)

แต่การอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารแบบขั้นเดียว มักพบปัญหาการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและองค์ประกอบที่สำคัญของอาหารเช่นการหดตัวการสูญเสียสารหอมระเหยสีและคุณค่าทางโภชนาการดังนั้นการอบแห้งแบบผสมผสาน (hybrid drying) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาแก้ไขข้อบกพร่องของการอบแห้งแบบขั้นเดียวเช่นการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนอาจจะใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้การเปลี่ยนอุณหภูมิของการอบแห้งในแต่ละขั้นตอนการเปลี่ยนความดันหรือการนำวิธีการอบแห้งแบบต่างๆมาใช้ร่วมกันเพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิดทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น (ชาลีดา, 2555)

Kudra and Mujumdar (2009) ได้แบ่งการอบแห้งแบบผสมผสานออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่

1. การผสมผสานลักษณะการถ่ายเทความร้อนหลายๆ ประเภทเข้าด้วยกัน (combined modes of heat transfer) โดยแบ่งเป็นลักษณะต่างๆ เช่น การพาความร้อนร่วมกับการนำความร้อน (convection and conduction)การพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี เช่น คลื่นไมโครเวฟ / รังสีอินฟราเรด / คลื่นวิทยุ (convection and microwave / Infrared radiation /radio-frequency) การถ่ายเทความร้อนหลายแบบเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน (simultaneous) การถ่ายเทความร้อนหลายแบบเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน (sequential) การทำแห้งแบบต่อเนื่อง (continuous) และการทำแห้งเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องมีการหยุดพัก (intermittent) เป็นต้น

2. การอบแห้งแบบหลายขั้น (multistage dryers) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

2.1 แต่ละขั้นใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกัน (each stage same dryer type)

2.2 แต่ละขั้นใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิดร่วมกันในขั้นตอนเดียว (each stage a different dryer)

2.3 ใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันในแต่ละขั้นตอน (different drying technologies per stage)

3. การอบแห้งร่วมกับกระบวนการอื่นๆ (multiprocessing dryers) เช่น อบแห้งร่วมกับการทำเย็นอบแห้งร่วมกับการขึ้นรูปเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นอบแห้งร่วมกับการเคลือบ และอบแห้งร่วมกับการกรอง

พรพิมล และสิริมา (2550) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนต่อคุณภาพของใบมะกรูดและตะไคร้ โดยศึกษาสภาวะในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูดและตะไคร้กำหนดให้การอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียสและการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 60/55 70/65 และ 80/75 องศาเซลเซียส สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูดคือการอบแห้งแบบสองขั้นตอนโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีตามด้วย 75 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสทางด้านสีลักษณะปรากฏและความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยสำหรับตะไคร้คือการอบแห้งแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 70 นาทีตามด้วย 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสทางด้านสีลักษณะปรากฏและความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก

Jino and Assawarachan (2015) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียสและแบบหลายขั้นต่ออัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสตามด้วย 50 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสตามด้วย 50 องศาเซลเซียส โดยพบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นมีอัตราการอบแห้งและความคงตัวของสีสูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว ซึ่งสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีตามด้วย 50 องศาเซลเซียส 730 นาที

สุภวรรณ และคณะ (2556) ได้ศึกษาแนวทางการอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งชงดื่มและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกด้วยการแผ่รังสีใต้แดงและในส่วนสุดท้ายการทดสอบทางประสาทสัมผัสและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้โดยศึกษาอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-70 องศาเซลเซียส กำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 500-1,500 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบกได้ดีที่สุดและการอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง

1,500 วัตต์ อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (30 นาที) และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated)นอกจากนี้ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใบบัวบกแห้งในรูปของชาชงดื่มโดยการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่าอุณหภูมิอบแห้งและกำลังรังสีอินฟราเรดมีผลต่อคุณลักษณะด้านสีกลิ่นรสชาติและรูปลักษณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังนั้น จึงถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและใช้ในการศึกษาผลกระทบของการปัจจัยด้านต่างๆ ในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริงเนื่องจากมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ สามารถแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎีและสมการเอมพิริคัลมีรายละเอียดต่างๆ (สุเนตร และ ฤทธิชัย, 2554) ดังนี้ ได้

### 1. สมการทางทฤษฎี (Theoretical equation)

กลไกการอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลงโดยมีกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญคือกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศร้อนทำให้น้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยกลายเป็นไอและกระบวนการเคลื่อนย้ายของน้ำในผลิตภัณฑ์มาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์หลังจากนั้นน้ำที่ผิวก็จะกลายเป็นไอระเหยออกสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วไปจะพบว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลวที่เป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นอัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนความเข้มข้นของความชื้นซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ความชื้นที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อสองของ Fick ซึ่งมีรูปแบบสมการ คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\nabla^2 X \qquad (1.1)$$

เมื่อ $\nabla^2$ คือ Laplace สำหรับเฟสของแข็งที่เคลื่อนที่ของความชื้นในทิศทางหนึ่งมิติตามทิศทาง X มีค่า

$$\nabla^2 = \frac{1}{X^s}\frac{\partial}{\partial x}\left(x^s \frac{\partial}{\partial x}\right) \qquad (1.2)$$

ในกรณีที่วัสดุมีรูปทรงเป็นทรงกลม เช่น ลิ้นจี่ ลำไย จะมีค่าสัมประสิทธิ์ s เท่ากับ 2 ซึ่งเมื่อกำหนดภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต (Crank, 1995) จะได้คำตอบของสมการ (1.2) ดังนี้

$$\frac{M-M_{eq}}{M_0-M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}exp\left(-n^2\pi^2\frac{D_{eff}t}{r_0^2}\right) \quad (1.3)$$

มีจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุดและเทอมท้ายๆจะมีค่าลดลงเรื่อยๆดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆออกไปได้โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก (n = 1) ซึ่งคำตอบที่ได้อาจจะไม่ผิดไปมากนักโดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งมีค่ามากจึงสามารถเขียนสมการใหม่สำหรับวัสดุทรงกลมได้ดังนี้

$$\frac{M-M_{eq}}{M_0-M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2}exp\left(-\pi^2\frac{D_{eff}t}{r_0^2}\right) \quad (1.4)$$

เมื่อ n คือ ลำดับที่ของฟังก์ชั่น (1, 2, 3, .....)

$\alpha_n$ คือ ส่งกลับค่าฟังก์ชั่นเบสเซลออเดอร์ศูนย์ตามลำดับที่ n ของฟังก์ชั่น

$D_{eff}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (มิลลิเมตร$^2$/นาที)

t คือ เวลาในอารอบแห้ง (นาที)

z คือ ความหนาวของวัสดุ (มิลลิเมตร)

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($D_{eff}$) และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ ($E_a$) โดยการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของอาร์รีเนียสดังสมการ

$$D_{eff} = D_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1.5)$$

เมื่อ $D_0$ คือ ค่าคงที่เทียบเท่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่อุณหภูมิอากาศสูงไม่มีขอบเขต (มิลลิเมตร$^2$/นาที)

$E_a$ คือ พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/กิโลกรัม)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูล/กิโลโมล)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

## 2. สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation)

สมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีถูกสร้างจากการกำหนดให้อัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุ และความชื้นสมดุลซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับกฎการเย็นตัวของ Newton ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = k(\overline{M}-M_{eq}) \quad (2.1)$$

$$\frac{d\overline{M}}{(\overline{M}-M_{eq})} = kdt \quad (2.2)$$

ภายใต้ภาวะเริ่มต้น M (0) = $M_{in}$ เมื่อทำการอินทริเกตสมการที่ 2.1 จะได้

$$\overline{MR} = \exp(-kt) \quad (2.3)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง, $h^{-1}$

ค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยมีข้อจำกัดภายในสภาวะอากาศและวัสดุที่ทำการทดลองเท่านั้นและสามารถใช้ได้ดีกับวัสดุอบแห้งเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้น

**3. สมการเอมพิริคัล (empirical equation)**

สมการเอมพิริคัลเป็นสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับเมล็ดพืชและผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ ซึ่งสามารถใช้ทำนายการอบแห้งได้ดีแต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการซึ่งจะต้องตรงกับสภาวะการทดลอง ซึ่งสมการเอมพิริคัลที่นำมาใช้ในการทำนายมีหลายรูปแบบดังตารางที่ 1 โดยรูปแบบของสมการที่นิยมใช้ได้แก่รูปแบบสมการของ Page ดังสมการที่ (3.1) และสมการของ Henderson and Pabis ดังสมการที่ (3.2)

3.1 รูปแบบของ Page มีรูปแบบสมการ คือ

$$\overline{MR} = \exp(-kt^{A}) \quad (3.1)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง(1/ชั่วโมง)

A คือ ค่าคงที่

T คือ เวลา (ชั่วโมง)

3.2 สมการของ Henderson and Pabis มีรูปแบบสมการ คือ

$$\overline{MR} = B\exp(-kt) \quad (3.2)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่

**ตารางที่ 1** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในรูปของแบบจำลองเอมพิริคัล

| Model name | Model equation | reference |
|---|---|---|
| Newton | $MR = \exp(-kt)$ | McMinn (2006); Assawarachan et al (2013) |
| Page | $MR = \exp(-kt^{n})$ | Janjai et al. (2011); อีลีหยัะ และคณะ (2555) |
| Henderson &Pabis | $MR = \mathrm{a}\exp(-kt)$ | Assawarachan and Noomhorm (2011); Kingly and Singh (2007) |

**ตารางที่ 1** (ต่อ)

| Model name | Model equation | reference |
|---|---|---|
| Modified Page | $MR = \exp(-(kt)^n)$ | Assawarachan and Noomhorm (2011); Pongtong et al (2011) |
| Midilli et al | $MR = a\exp(-kt^n) + bt$ | Limpaiboon (2011); เนาวนิตย์ และคณะ (2556) |
| Logarithmic | $MR = a\ \exp(-kt) + c$ | Evin (2012); ชลิดา และคณะ (2555) |

หมายเหตุ *k* คือ ค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือ ค่าดัชนีการอบแห้ง; *a,b* คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

นิรุธ (2553) ได้ศึกษาไคเนติกส์ของการอบแห้ง และสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเนื้อลำไย จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองของ Page สามารถทำนายการลดลงของความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยได้ดีที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเนื้อลำไยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ด เปลือกหุ้มเมล็ด เปลือก และขั้วของลำไยจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ จากการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบสลับอากาศร้อนโดยใช้เครื่องเผาไหม้ชีวะมวลเป็นแหล่งให้ความร้อน พบว่า ผลการคำนวณจากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการวัด จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งลำไยที่เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานต่างๆ ได้ต่อไป

ชลิดา และคณะ (2555) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงของใบบัวบกระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสและพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกระหว่างการอบแห้ง พบว่า ปริมาณความชื้นและสารประกอบฟีนอลิกมีค่าลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งมากขึ้นและสมการ Logarithmic มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกด้วยลมร้อนและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองที่ทุกอุณหภูมิอบแห้ง

## กระบวนการผลิตลำไยอบแห้ง

ลำไยที่นำมาแปรรูปเป็นลำไยอบแห้งส่วนใหญ่จะเป็นลำไยร่วง เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าลำไยช่อ ซึ่งสายพันธุ์ที่นิยมนำไปอบแห้ง คือ สายพันธุ์อีดอ เนื่องจากเมื่ออบแล้วผิวเปลือกจะมีสีเหลืองทอง น้ำหนักดีไม่แตกง่ายให้ร้อยละผลผลิตสูงกว่าสายพันธุ์อื่น และลำไยที่มีขนาดผลใหญ่จะได้น้ำหนักเนื้อที่ดีกว่า เสียต้นทุนต่อกิโลกรัมในส่วนของค่าจ้างคว้านถูกกว่าและจำหน่ายได้ราคาสูงกว่าลำไยที่มีขนาดผลเล็ก กระบวนการแปรรูปลำไยอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ลำไยอบแห้งทั้งผลพร้อมเปลือกและลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ โดยงานวิจัยในครั้งนี้ต้องการศึกษาลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ

**1. การอบแห้งลำไยเฉพาะเนื้อ (เนื้อลำไยอบแห้งสีทอง)** (ไมตรี และ วิจิตร, 2547)

เป็นการอบแห้งลำไยเฉพาะเนื้อเป็นการอบแห้งเฉพาะเนื้อลำไยสด โดยทั่วไปนิยมอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นที่แข็งแรงไม่มีลมร้อนรั่วไหลวัสดุภายในตู้อบและตะแกรงรับเนื้อลำไยต้องไม่เป็นสนิมพัดลมต้องสามารถกระจายความร้อนภายในตู้อบอย่างสม่ำเสมอทุกชั้นอุปกรณ์กำเนิดลมร้อนมีทั้งใช้ไฟฟ้าและแก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิควรอยู่ภายในตู้อบใกล้ทางออกของลมร้อน

1.1 ขั้นตอนการอบแห้งผลลำไย

1.1.1 การเตรียมลำไยก่อนการอบแห้ง ควรคัดขนาดผลของลำไยที่ต้องการอบให้มีขนาดเท่ากัน ลำไยควรมีเนื้อหนาสีขาวใสไม่เน่า นำลำไยสดมาคว้านเอาเม็ดและแกะเปลือกออก ด้วยตุ๊ดตู่ อย่าให้หัวสีน้ำตาลเหลือติดกับเนื้อลำไยและล้างน้ำให้สะอาดนำเนื้อลำไยมาแช่ในสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ หรือสารละลายอื่นๆ เพื่อให้เนื้อลำไยมีสีเหลืองทองไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและป้องกันการเกิดราหลังการอบแห้งลำเลียงเนื้อลำไยเข้าเครื่องอบ โดยจัดเรียงผลลำไยบนตะแกรงวางให้เป็นชั้นเดียวผึ่งให้แห้งหมาดหรือใช้พัดลมเป่าก่อนเข้าเครื่องอบ

1.1.2 การอบผลลำไย: ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 - 70 องศาเซลเซียส จนเนื้อลำไยมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 ซึ่งผลลำไย 1 กิโลกรัมได้เนื้อลำไย 681 กรัมอบแห้งเหลือเนื้อลำไยแห้ง 100 กรัมคิดเป็นสัดส่วนผลลำไยต่อลำไยแห้งประมาณ 10/1 โดยน้ำหนักใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 12 - 15 ชั่วโมงติดต่อกัน ซึ่งการอบแห้งไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้เนื้อลำไยมีสีเข้มหรือดำเครื่องอบแห้งที่มีการกระจายความร้อนไม่ทั่วถึงจะต้องหมั่นพลิกสลับถาดเพื่อให้เนื้อลำไยมีความแห้งใกล้เคียงกัน ถ้าเป็นเครื่องอบแห้งที่ไม่มีพัดลมเป่าควรอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 16 - 20 ชั่วโมงติดต่อกัน เมื่ออบแห้งครบตามเวลากำหนดตรวจสอบความแห้งโดยการสัมผัสไม่เหนียวติดมือแล้วจึงลำเลียงเนื้อลำไยออกจากตะแกรงเครื่องอบทิ้งให้เย็น

นำเนื้อลำไยบรรจุถุงพลาสติกหนารัดปากถุงให้แน่นบรรจุกล่องกระดาษเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 - 10 องศาเซลเซียสสามารถเก็บได้นาน 6 - 9 เดือน ลักษณะที่ดีของเนื้อลำไยอบแห้งขนาดผลสม่ำเสมอไม่บุบแบนหรือฉีกขาดเนื้อมีสีเหลืองทองผิวแห้งสนิทไม่มีสิ่งเจือปนมีกลิ่นหอม

2. **คุณภาพลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ** (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)

2.1 คุณภาพทั่วไป

เนื้อลำไยสดอบแห้งทุกชั้นคุณภาพมีสีเหลืองตั้งแต่สีเหลืองอ่อนเหลืองทองจนถึงเหลืองทองเข้มในบรรจุภัณฑ์เดียวกันต้องมีสีสม่ำเสมอมีกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสตามลักษณะของผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้งไม่เหนียวติดมือไม่มีรสเปรี้ยวมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวของเนื้อลำไยสดอบแห้งไม่มีกลิ่นแปลกปลอมรสชาติไม่ผิดปกติและไม่มีสิ่งแปลกปลอมเช่นแมลงชิ้นส่วนของแมลงขนสัตว์ดินทรายและเศษโลหะ

2.2 คุณลักษณะทางเคมี

เนื้อลำไยสดอบแห้งจะต้องมีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนด ดังนี้

2.2.1 ความชื้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12และไม่เกินร้อยละ 18

2.2.2 ค่ากิจกรรมของน้ำไม่เกิน 0.6

2.2.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ไม่ต่ำกว่า 80องศาบริกซ์

2.2.4 ความเป็นกรด-ด่าง ไม่ต่ำกว่า 6.2

2.3 ชั้นคุณภาพ

เนื้อลำไยสดอบแห้งตามมาตรฐานนี้แบ่งเป็น 3 ชั้นคุณภาพดังนี้

2.3.1 ชั้นหนึ่ง (Class I) ความแน่นเนื้อต้องไม่น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดเนื้อลำไยอบแห้งต้องมีความสม่ำเสมอ และมีความแตกต่างจากขนาดเนื้อลำไยอบแห้งที่ระบุในทางการค้าไม่เกิน 1% โดยจำนวนหรือน้ำหนักของเนื้อลำไยสดอบแห้ง

2.3.2 ชั้นสอง (Class II) ความแน่นเนื้อน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดเนื้อลำไยอบแห้งค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีความแตกต่างจากขนาดเนื้อลำไยอบแห้งที่ระบุในทางการค้าไม่เกิน 10% โดยจำนวนหรือน้ำหนักของเนื้อลำไยสดอบแห้ง

2.3.3 ชั้นสาม (Class III) ความแน่นเนื้อน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดเนื้อลำไยอบแห้งไม่มีความสม่ำเสมอ และมีความแตกต่างจากขนาดเนื้อลำไยอบแห้งที่ระบุในทางการค้าเกิน 10% โดยจำนวนหรือน้ำหนักของเนื้อลำไยสดอบแห้ง

2.4 สุขลักษณะ

จุลินทรีย์ในเนื้อลำไยสดอบแห้งทุกชั้นคุณภาพต้องไม่เกินเกณฑ์กำหนด ดังตารางที่2

**3. จัดเกรดของลำไยอบแห้ง**

รัตนา และคณะ (2541) ระบุว่า มาตรฐานคุณภาพลำไยอบแห้งของตลาดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.1 ลำไยอบแห้งทั้งผลพร้อมเปลือก เปลือกลำไยต้องไม่แตก ไม่บุบ เปลือกมีสีน้ำตาล ไม่มีรอยเปื้อน ไม่มีมอดหรือแมลงอื่นทำลาย และเนื้อลำไยต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 (เนื้อลำไยต้องแห้ง)

เกรด AA ผลลำไยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24-27 มิลลิเมตร

เกรด A ผลลำไยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21-23 มิลลิเมตร

เกรด B ผลลำไยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17-20 มิลลิเมตร

เกรด C ผลลำไยมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 17มิลลิเมตร

เกรด คละ ไม่มีการคัดขนาดของผลลำไย

3.2 ลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ

3.2.1 ลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อสีทอง

เกรด A หมายถึง ลำไยอบแห้งที่ทำมาจากลำไยร่วงคัดผลใหญ่หรือลำไยที่คัดเป็นเกรด B และ C ของโรงงานลำไยกระป๋องเอามาคว้านเอาเฉพาะเนื้อ นำมาผ่านการแช่สารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และอบจนแห้งซึ่งมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 18 ลักษณะของเนื้อลำไยมีขนาดสม่ำเสมอไม่ฉีกขาดสีเหลืองทองแห้งสนิทไม่มีสิ่งเจือปนอื่นๆใช้บริโภคทันทีเหมือนผลไม้แห้งชนิดอื่น

เกรดคละหมายถึง เนื้อลำไยอบแห้งที่ทำมาจากลำไยร่วงมาคว้านเฉพาะเนื้อผ่านการแช่สารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และอบจนแห้งซึ่งมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 18 ลักษณะของเนื้อลำไยอบแห้งมีสีเหลืองทองขนาดผลไม่สม่ำเสมอ ฉีกขาดบ้างเล็กน้อย ไม่มีสิ่งเจือปนอื่นและใช้บริโภคได้ทันที

**ตารางที่ 2** เกณฑ์กำหนดจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยสดอบแห้ง

| microorganisms | n | c | m | M |
|---|---|---|---|---|
| yeast | 5 | 2 | $1 \times 10^4$ cfu/g[1/] | $1 \times 10^6$ cfu/g |
| mold | 5 | 0 | 500 cfu/g[1] | - |
| *Escherichia coli* | 5 | 0 | <3 MPN/g[2] | - |
| *Staphylococcus aureus* | 5 | 0 | < 10 cfu/g | - |
| *Salmonella* spp. | 5 | 0 | Not detectin 25 g | - |
| *Clostridium perfringens* | 5 | 0 | < 10 cfu/g | - |

หมายเหตุ 1/ cfu/g หมายถึง colony forming unit per gram

2/ MPN/g หมายถึง most probable number per gram

n หมายถึง จำนวนตัวอย่างที่ต้องนำมาตรวจสอบจากสินค้าแต่ละรุ่น (lot)

c หมายถึง จำนวนตัวอย่างสูงสุดที่พบจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่ตรวจสอบได้ในระดับสูงกว่า m

m หมายถึง จำนวนจุลินทรีย์ที่ยอมรับได้ในตัวอย่างที่ตรวจสอบ

M หมายถึง จำนวนจุลินทรีย์สูงสุดที่พบในตัวอย่างที่ตรวจสอบที่มีผลให้ไม่ยอมรับสินค้ารุ่นนั้น

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549)

3.2.2 ลำไยอบแห้งเฉพาะสีน้ำตาลทอง สีน้ำตาลหรือสีดำ

เกรดคัด หมายถึง เนื้อลำไยอบแห้งที่ทำมาจากการแกะเนื้อลำไยอบแห้งทั้งเปลือกที่เกือบแห้งและนำมาตาก หรืออบจนแห้ง หรืออบด้วยเตาฟืน จนมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 18 เนื้อลำไยจะมีสีน้ำตาลทองและสีน้ำตาลแดงผลอาจจะมีรอยฉีกขาดบ้างเล็กน้อยเนื้อลำไยแห้งใช้ทำน้ำลำไยหรือส่วนผสมยาจีน

เกรดรวม หมายถึง เนื้อลำไยอบแห้งที่ทำมาจากการแกะเนื้อลำไยอบแห้งทั้งเปลือกหรือรวมเศษเนื้อจากเกรดอื่น ลักษณะเนื้อลำไยมีสีน้ำตาลแดงไปจนถึงสีน้ำตาลดำ ลักษณะผลไม่

สมบูรณ์มีสีเจือปนเวลาจำหน่าย ส่วนใหญ่มักนำมาอัดเป็นก้อนหรือแท่ง เนื้อลำไยแห้งใช้ทำน้ำลำไย หรือส่วนผสมของยาจีน

**4. ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งลำไย**

4.1 ธรรมชาติของอาหาร มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในอาหารออกสู่ผิวภายนอกของอาหาร เช่น อาหารที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสโปร่ง รูพรุน การเคลื่อนที่ของความชื้นจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอาหารที่มีลักษณะเนื้อแน่น อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง รวมถึงอาหารที่ผ่านกรรมวิธีการต่างๆ เช่น การลวกอาหารก่อนนำไปผ่านกระบวนการอบแห้งจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า เนื่องจากเซลล์ของอาหาสูญเสียรูปร่างไป ทำให้ความชื้นหรือน้ำภายในอาหารถูกระเหยออกมาได้ง่าย

4.2 ขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักอาหาร เช่น อาหารที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ต่อผิวมากกว่าอาหารที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อนำมาอบแห้งจึงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า

4.3 ตำแหน่งของอาหารในถาดอาหารที่วางอยู่ในตำแหน่งที่สัมผัสกับลมร้อนจากเตาหรือตู้อบได้ดีกว่าจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกกว่า

4.4 ปริมาณอาหารต่อถาดหากปริมาณอาหารต่อถาดมีมากเกินไป หรือจัดเรียนอาหารซ้อนกัน จะทำให้อาหารสัมผัสกับลมร้อนได้ไม่ทั่วถึง และเกิดการแพร่กระจายของไอน้ำช้า ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น

4.5 ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อนอากาศที่มีไอน้ำอยู่ในบรรยากาศมาก จะสามารถรับไอน้ำได้น้อย ซึ่งมีผลในช่วงอัตราการทำแห้งอาหารคงที่

4.6 อุณหภูมิของอากาศร้อนในกรณีที่อากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การแพร่กระจายของน้ำในอาหารดีขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง

4.7 ความเร็วของลมร้อน เนื่องจากลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำจากผิวอาหารออกสู่ภายนอก เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เคลื่อนย้ายได้ดีขึ้นและความเร็วลมยังส่งผลให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาหรือตู้อบ ทำให้อากาศสัมผัสกับอาหารได้ดีขึ้น

**5. ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของลำไยอบแห้ง**

5.1 ค่ากิจกรรมของน้ำ ($a_w$) ของน้ำในอาหาร ค่ากิจกรรมของน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตต่อการเจริญของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะเข้าใกล้ 1 ซึ่งเป็นจุดที่สารอาหารละลายอยู่และมีความเข้มข้นเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ และค่ากิจกรรมของน้ำที่ต่ำที่สุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ คือ 0.61 ได้แก่ ราต่างๆ ซึ่งค่าที่ต่ำกว่าที่ได้กล่าวไป พบว่า จุลินทรีย์จะไม่สามารถเจริญได้ เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหายจากแรงดันภายในเซลล์

5.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะมีค่าใกล้เคียงกับ 7 เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์จะยอมให้ไฮโดรเจนอิออนผ่านเข้าออกได้เพียงเล็กน้อย และภายในไซโตพลาสซึมของเซลล์มีระบบบัฟเฟอร์ควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในเซลล์ หากค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ มีผลทำให้เกิดความผิดปกติภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น การสร้างเอนไซม์ที่ทำงานภายนอกเซลล์ รวมถึงกิจกรรมต่างๆ และกลไกในการสร้าง Adenosine tri phosphate (ATP) ในแบคทีเรีย

5.3 อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดความเปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ หรืออุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์ส่วนใหญ่เจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 15 ถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งในการเก็บรักษาอาหารที่ผ่านการทำแห้ง จุลินทรีย์อาจเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจนถึงมากกว่าจุดเดือด

5.4 บรรจุภัณฑ์และระยะเวลาการเก็บรักษา การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะสามารถช่วยรักษาคุณภาพ และป้องกันผลิตภัณฑ์สัมผัสกับความชื้นภายนอกได้

5.5 ปัจจัยภายนอก ในกรณีที่เป็นวัตถุดิบที่เป็นของสด หากได้รับแรงกระทบกระแทกจากภายนอก เช่น หากมีการช้ำจากแรงกดหรือแรงกระแทก จะส่งผลทำให้เร่งการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์เร็วขึ้น หรือ ปริมาณออกซิเจนที่อาจส่งผลให้เกิดการออกซิไดซ์จากอากาศ ทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง

## ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

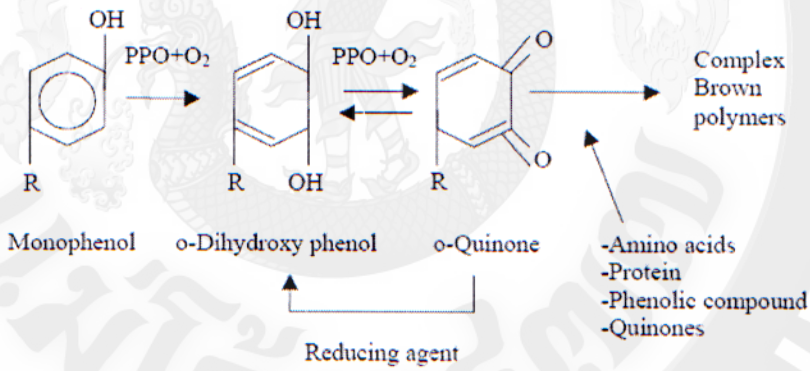
การแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ในอาหารได้ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)

### 1. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction)

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญที่ก่อให้เกิดลักษณะที่ไม่ดีในผลิตภัณฑ์ พบมากในผักและผลไม้สด ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อของผักและผลไม้เมื่อเซลล์ถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือกหรือการหั่นทำให้สารประกอบโมโนฟีนอลที่มีอยู่ภายในเซลล์สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส (PPO)

เป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน ได้เป็นออร์โทไดฟีนอล (o-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อให้เป็นออร์โทควิโนน (o-quinone) โดยสารควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสนี้ จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ หรือกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545)

ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในผักและผลไม้ ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และสารประกอบฟีนอลที่เป็นสับสเตรท ความเป็นกรด-ด่าง ออกซิเจน และอุณหภูมิ เป็นต้น (ศิวาพร, 2535) สับสเตรทที่ถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส ได้แก่ สารประกอบฟีนอล ซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ เช่นแอนโทไซยานิดิน ลูโคแอนโทไซยานิดิน ฟลาโวนอล แคตีคอล กรดคาเฟอิก กรดคลอโรจินิก แคตีชินเอสเทอร์ของกรดซินนามิก 3,4 – ไฮดรอกซีฟีนิลอะลานีน และไทโรซีนเป็นต้น ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสอยู่ในช่วง 5-7 นอกจากนี้ เอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสเป็นเอนไซม์ที่ไม่คงตัวถูกทำลายได้ด้วยความร้อนและถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแฮไลด์กรดฟีนอลิกซัลไฟต์ คีเลติ้งเอเจนต์และรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิค (ascorbic acid) และซีสเตอีน (cysteine) เป็นต้น (นิธิยา, 2545)




**ภาพที่ 3** ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส

ที่มา: Sapers (1993)

**2. ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)**

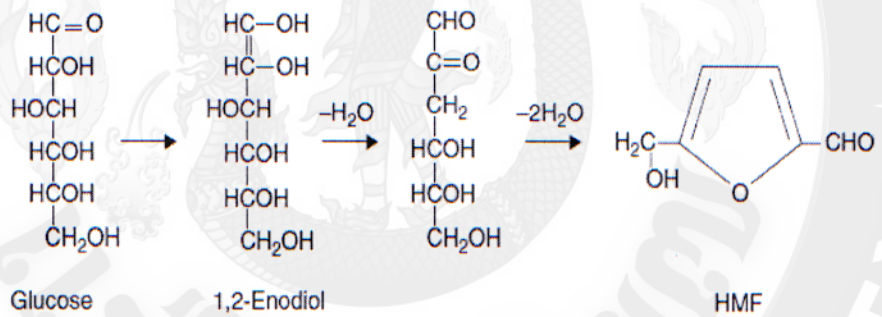
ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารทุกชนิดได้รับความร้อน จึงเกิดการสูญเสียน้ำ (dehydration) การสลายตัว (degradation) และการรวมตัวกัน (condensation) ของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซิงและพัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง ทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ ซึ่ง

การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของอาหารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีทั้งสีกลิ่นและรสชาติที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน และปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและจะผันแปรตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ (นิธิยา, 2545)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์ผัก ผลไม้และอาหารสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

2.1 การเกิดปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (caramelization reaction)

ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันเป็นการเกิดสีน้ำตาลที่มีน้ำตาลเป็นสารตั้งต้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่ได้รับความร้อนสูงและเกิดการสูญเสียน้ำ โดยไม่มีสารประกอบพวกอะมิโน หรือโปรตีน ซึ่งน้ำตาลบริสุทธิ์จะเกิดคาราเมลไลเซชันอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ phosphate alkalis acids และเกลือของกรดคาร์บอกซิลิค เช่นซิเตรตฟูมาเรตทาร์เทรต และมาเลต เป็นต้น สำหรับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาจะคล้ายกับการเกิดสีน้ำตาลระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโน แต่เปลี่ยนเป็น enolizationdehydration และแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเมทอลเฟอร์ฟูรอล ดังภาพที่ 4




**ภาพที่ 4** ปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน

ที่มา: Simpson et al. (2012)

2.2 การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction reaction)

การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นการจำกัดอายุการเก็บของน้ำผักและผลไม้และผักและผลไม้แห้งหลายชนิด นอกจากนี้ ยังมีการเกิดสีน้ำตาลที่เป็นผลมาจากการเสื่อมสลายของน้ำตาลหรือเกิดจากการออกซิเดชั่นของกรดแอสคอร์บิกแล้วเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบคาร์บอนิลโดยผ่านกระบวนการอัลโดลคอนเดนเซชัน (aldol condensation) หรือเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนให้ผลลัพธ์เป็นสารสีน้ำตาลซึ่งการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในอาหารจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของการเกิด

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard precursor) หรือวิตามินซีความเป็นกรด-ด่างค่ากิจกรรมของน้ำออกซิเจน เวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษา

ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวส์ ทั้งคีโตสและแอลโดสที่รวมกับหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นอิมีน (imine หรือ schiff base) จากนั้น มีการเรียงตัวใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (aldoseamine) หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า amadori product เกิดปฏิกิริยา enolization ของ amadori products แล้วได้เป็นคีโตสเอมีน หรือไดอะมิโนซูการ์ เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อไปได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซสอนุพันธ์ฟูแรน คือ 5-ไฮดรอกซิลเมทิล-2-เฟอรัลดีไฮด์ (5-hydroxymethyl-2-furaldehyde หรือไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล หรือ HMF) แสดงดังรูป 5 อนุพันธ์ฟูแรนวงแหวน เช่น 5-ไฮดรอกซิลเมทิล-2-เฟอรัลดีไฮด์ จะเกิดพอลิเมอไรซ์อย่างรวดเร็วได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำซึ่งต่างจากการเกิดคาราเมลไลเซชันที่มีน้ำตาลเพียงอย่างเดียวพบได้ในอาหารที่มีน้ำตาลรีดิวส์ซิงกรดอะมิโนโปรตีนหรือสารประกอบไนโตรเจนสารสีน้ำตาล

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Sapers, 1993)

1) ปริมาณสารตั้งต้น สารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลและกรดอะมิโนในผลิตภัณฑ์ หากปริมาณสารตั้งต้นมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นและเกิดสารชนิดหนึ่ง เรียกว่าเมลานอยดิน (Fennema, 1996) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้โดยการควบคุมปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนในวัตถุดิบ เช่น การกำหนดระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวก่อนนำมาแปรรูป

2) น้ำตาล สารประกอบคาร์บอนิลและเอมีนที่มีความคงตัวต่ำและสลายตัวได้ง่าย จึงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ที่อุณหภูมิห้องอาหารที่มีน้ำตาลรีดิวส์สูงจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้อย่างรวดเร็ว

3) กรดอะมิโน ชนิดของกรดอะมิโนมีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดกรดอะมิโนชนิดแอลฟา (α-amino acids) เช่นไกลซีนจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ดีที่สุด และเมื่อกรดอะมิโนมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาช้าลงกรดอะมิโนชนิดโอเมก้า (ω-amino acids) เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้เร็วขึ้นเมื่อความยาวของสายในโมเลกุลเพิ่มขึ้นเช่น ออร์นิทีนเกิดได้รวดเร็วกว่าไลซีนหมู่อะมิโนในโมเลกุลของไลซีนจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วที่สุด สำหรับกรดอะมิโนที่มีสมบัติเป็นด่างเช่นไลซีนและกรดอะมิโนที่เป็นอนุพันธ์เอไมด์ เช่น แอสพาราจีน และกลูตามีนจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ากรดอะมิโนที่มีสมบัติเป็นกรดและเป็นกลาง

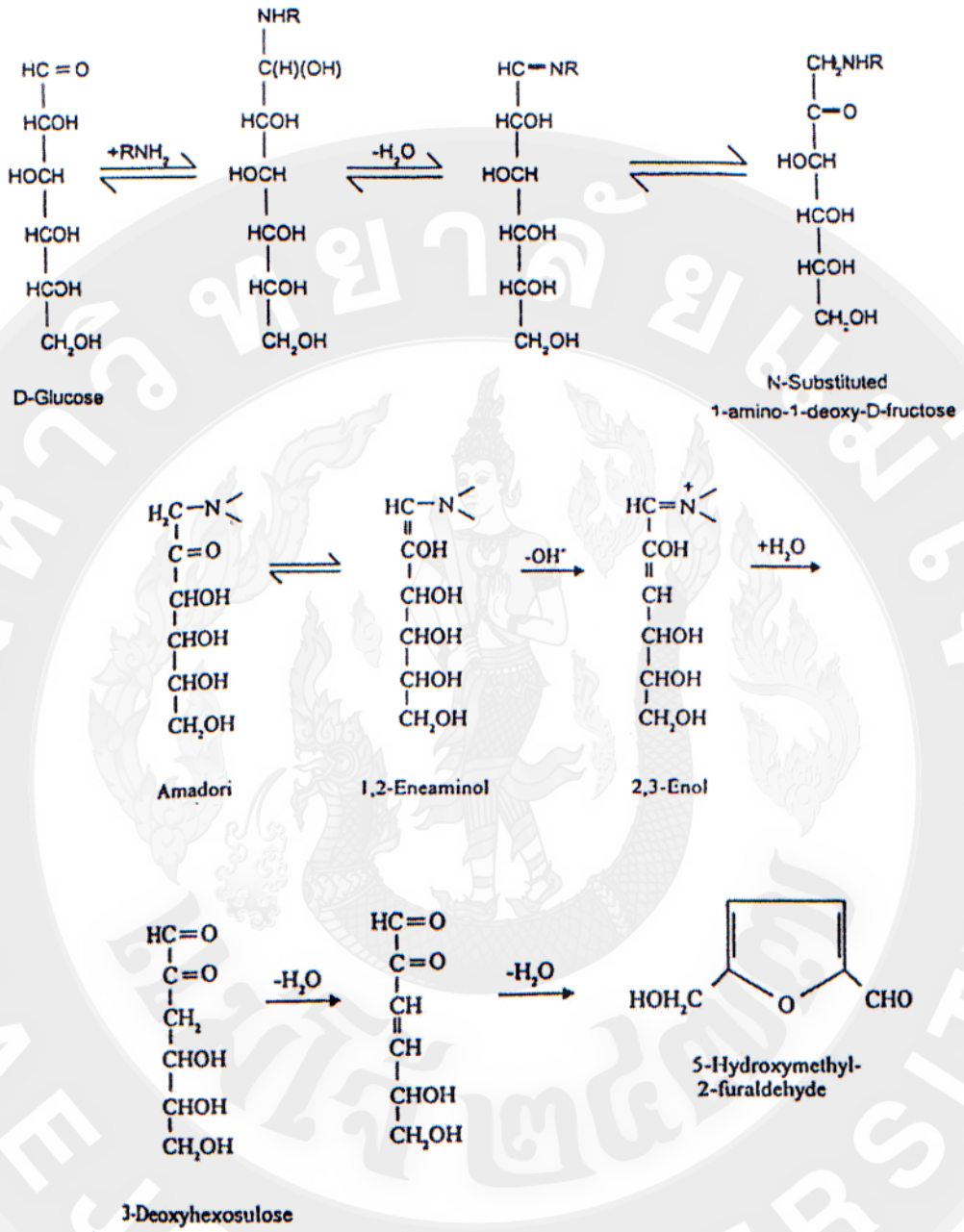
4) อุณหภูมิ อัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และภาวะที่สารมีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วที่สุดเนื่องจากเกิด autocatalytic

และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่าซึ่งอาหารที่มีน้ำตาลฟรุกโทสจะทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 5-10 เท่า และเพิ่มเร็วขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มของสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยดังนั้นการเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำจึงเป็นการชะลอการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดให้ช้าลง

5) ความเป็นกรด-ด่าง การลดค่าความเป็นกรด-ด่างให้ต่ำลงเช่นที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 น้ำตาลจะมีความคงตัวมากที่สุด ซึ่งจะอยู่ในรูป pyranosehemiacetal ring เมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นน้ำตาลจะเปลี่ยนเป็นรูป reactive acyclic aldehydo ทำให้เกิดปฏิกิริยารวมกันระหว่างน้ำตาลและเอมีนได้อย่างรวดเร็ว

6) ค่ากิจกรรมของน้ำ ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดได้ดีในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงเนื่องจากน้ำทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ได้เร็วจึงทำให้สามารถทำปฏิกิริยากันได้มากขึ้น ดังนั้นในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งอาจควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้โดยการทำแห้ง เพื่อลดความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ และควบคุมค่าค่ากิจกรรมของน้ำในผลิตภัณฑ์เนื่องจากจะสามารถลดการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้น ทำให้โอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นลดน้อยลง และในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารละลายอาจเติมน้ำเพื่อเจือจางสารตั้งต้น และลดโอกาสที่สารตั้งต้นมาเจอกันและทำปฏิกิริยากัน

7) ออกซิเจน ปฏิกิริยาเมลลาร์ดสามารถเกิดได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเนื่องจากออกซิเจนออกซิไดซ์สารอื่นให้อยู่ในรูปที่ไวต่อปฏิกิริยา ได้แก่ ไอออนทองแดง เหล็ก และสังกะสี ดังนั้นการเลือกบรรจุภัณฑ์เหมาะสมจะควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้ (นิธิยา, 2545)




ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด

ที่มา: ดัดแปลงจาก Fennema (1996)

**3. การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้**

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องเอนไซม์ในผักผลไม้ มีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งยังทำให้รสชาติและผลไม้บางชนิดเปลี่ยนแปลงไปด้วยอาจมีผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง และไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ สามารถทำได้หลายวิธี โดยจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนี้

3.1 การใช้ความดัน

การใช้ความดันประมาณ 5 บาร์ สามารถทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติแบบไม่สามารถแปรผันกลับได้ (irreversible) เนื่องจากสามารถทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) และพันธะเกลือภายในโมเลกุล (intramolecular salt bridges)ทำให้โครงสร้างตติยภูมิของเอนไซม์เปลี่ยน เอนไซม์จึงไม่สามารถทำงานได้ (Cheftel, 1992; Masson, 1992) แต่อาจส่งผลเสียต่อกลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์

3.2 การกำจัดหรือลดออกซิเจน

เนื่องปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกี่ยวและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถยับยั้งไม่ได้เกิดปฏิกิริยาได้โดยการแยกออกซิเจนออกจากการสัมผัสผลิตภัณฑ์ โดยอาจเติมสารละลายน้ำตาล หรือน้ำเชื่อม เพื่อลดการละลายออกซิเจนในเนื้อผลไม้ และลดการแพร่ออกซิเจนจากอากาศเข้าสู่เนื้อผลไม้ หรือการบรรจุผักผลไม้และผลิตภัณฑ์ในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ เช่น บรรจุแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในปริมาณร้อยละ 20 และไนโตรเจน ($N_2$) ในปริมาณร้อยละ 80 ก็สามารถช่วยชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ (Sapers, 1993)

3.3 การใช้อุณหภูมิต่ำ

การใช้อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยการชะลอการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำช่วยลดอัตราการเมตาบอลิซึม และลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งผักและผลไม้แต่ละชนิดต่างต้องเลือกใช้อุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม และแตกต่างกันไป หากใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลเสียจากการสะท้านหนาว (chilling injury) ได้ โดยทำให้เกิดรอยแผลสีน้ำตาลหรือดำบนผิวหรืออาจเป็นรอยบุ๋มลงไป เนื่องจากเซลล์บริเวณนั้นตาย (จริงแท้, 2541) มีการศึกษาพบว่าการเก็บรักษาผลแอปเปิ้ล 12 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน ทำให้เกิดสีน้ำตาลช้าลง และพบว่าการเก็บรักษาเนื้อผลแอปเปิ้ลที่ตัดแบ่งชิ้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ และจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นหากแช่ในกรดแอสคอร์บิคและแคลเซียมก่อนการเก็บรักษา (Kim et al, 1993)

3.4 การใช้ความร้อนหรือการลวก

การใช้ความร้อนเป็นวิธีการพื้นฐานที่ช่วยในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ เนื่องจากความร้อนจะทำให้เอนไซม์เสียสภาพตามธรรมชาติไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ จึงทำให้ไม่สามารถเกิด

สีน้ำตาลได้ ซึ่งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในวัตถุดิบแต่ละชนิดจะเสถียรต่อความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิและเวลามีความสัมพันธ์กันอย่างมากสำหรับการใช้ความร้อนในกระบวนการพรีทรีตเมนต์ก่อนการแปรรูปอาหาร โดยปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณเอนไซม์ที่มีในวัตถุดิบนั้นๆแต่การใช้ความร้อนหรือการลวกอาจทำให้เนื้อผลไม้นิ่ม เละ และมีกลิ่นรสเปลี่ยนแปลงไป

Valle et al. (1998) ได้ศึกษาผลของการลวกต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเนื้อแอปเปิ้ลอบแห้ง โดยการลวกเนื้อแอปเปิ้ลในน้ำเดือดอุณหภูมิ 97.3 องศาเซลเซียส และการลวกด้วยไอน้ำเดือดอุณหภูมิ 97.3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ และลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 40 55 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสจะลดลงร้อยละ 25-89 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางและเวลาในการลวก และการใช้น้ำมีประสิทธิภาพมากกว่าไอน้ำ เนื่องจากสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุดิบได้ดีกว่า และการใช้เวลาในการลวก 60 วินาที สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้มากกว่าการลวกนาน 30 วินาที ร้อยละ 24

Kumar et al. (2008) ทำการทดลองใช้ความร้อนในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเชอรี่ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45 55 65 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที พบว่า เอนไซม์มีความคงตัวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แต่ไม่มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส โดยกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการคลายตัวของโครงสร้างตติยภูมิ

Waliszewski et al. (2009) ทำการทดลองยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเมล็ดวนิลา โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 65 70 75 80 และ85 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเมล็ดวนิลาได้ดีที่สุด

3.5 การใช้สารเคมี

การใช้สารเคมีในผัก และผลไม้อบแห้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านต่างๆ ในอาหาร โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติและคุณค่าทางอาหาร กลุ่มสารเคมีที่นำมาใช้ในอาหาร ได้แก่ กรดซิติก กรดแอสคอร์บิค และ สารประกอบซัลไฟต์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารประกอบซัลไฟต์ในการผลิตเนื้อลำไยอบแห้งสีทอง

3.5.1 สารประกอบซัลไฟต์ (Sulfite compound) (อุดมเกียรติ และ รัชนี, 2532)

สารประกอบในกลุ่มซัลไฟต์ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์โซเดียมซัลไฟต์ โปตัสเซียมซัลไฟต์โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และ โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์

1) วัตถุประสงค์ของการใช้สารประกอบซัลไฟต์

1.1) ป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและถนอมอาหาร ซึ่งสารประกอบซัลไฟต์ ที่อยู่ในรูปของกรดซัลฟูรัสจะมีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ รา และแบคทีเรีย โดยมีผลต่อผนังเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ และพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น

1.2) ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลสารประกอบซัลไฟต์สามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้จากทั้งปฏิกิริยาที่เกี่ยวและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์

1.2.1) ยับยั้งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) โดยสารประกอบพวกซัลไฟต์จะมีส่วนช่วยในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้โดย ทำปฏิกิริยากับพันธะไดซัลไฟต์ที่อยู่ในเอนไซม์ ซึ่งทำให้โครงสร้างของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและนอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับออร์-โทควิโนน (*o*-quinone) เกิดเป็นsulphoquinones ซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้

1.2.2) ยับยั้งปฏิกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) โดยสารประกอบซัลไฟต์จะป้องกันการรวมทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ โดยสารประกอบซัลไฟต์จะเข้าทำปฏิกิริยากับกับโปรตีน หรือ หมู่อะมิโน ตรงพันธะไดซัลไฟด์ทำให้โปรตีนแตกตัวเป็น thiol และ thiosulfonate protein และทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ ตรงหมู่คาร์บอนิลได้สาร hydroxysulfonate ซึ่งไม่สามารถเกิดพอลิเมอไรซ์ไปเป็นสารที่มีสีน้ำตาลได้

1.3) ป้องกันการหืนในกระบวนการแปรรูปอาหารโดยที่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และเกลือซัลไฟต์ที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปของกรดซัลฟิวรัสซึ่งจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในพืชผักผลไม้ระหว่างการแปรรูปและยังช่วยต่อต้านการออกซิไดซ์หรือกันหืนในกระบวนการทำแห้งผลไม้

2) ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอาหาร

2.1) ชนิดของอาหารและปริมาณของสารประกอบซัลไฟต์ที่เติมลงไปอาหารที่มีองค์ประกอบของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยามาก เช่น อาหารที่มีปริมาณน้ำตาล หรือโปรตีน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟต์ จะได้ซัลโฟเนตซึ่งมีความคงตัว นอกจากนี้อาหารที่มีก๊าซออกซิเจนแทรกอยู่ หรือบรรจุในภาชนะที่อากาศสามารถแทรกผ่านได้ มีผลทำให้สารประกอบซัลไฟต์ถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต ซึ่งมีความคงตัว และการใช้สารประกอบซัลไฟต์ในปริมาณมาก ส่งผลให้มีปริมาณประกอบซัลไฟต์ซึ่งอยู่ในรูปซัลไฟต์อิสระจำนวนมากตกค้างในอยู่ในอาหาร ซึ่งสารชนิดนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร

2.2) กรรมวิธีการผลิต อาหารที่ผ่านขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอน หรือใช้อุณหภูมิในการผลิตสูง ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากความร้อนมีผลทำให้ซัลไฟต์บางส่วนสลายตัวเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต และบางส่วนทำปฏิกิริยากับสารอาหาร

2.3) ระยะเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น หรือเก็บรักษาในสภาวะที่อาหารสัมผัสกับออกซิเจน หรือ เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลให้สารประกอบซัลไฟต์สลายไปอยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต ส่งผลให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในอาหารลดลงแม้ว่าสารประกอบซัลไฟต์จะมีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากเป็นสารก่อภูมิแพ้ (food allergen) ปัจจุบันจึงได้มีการกำหนดเกณฑ์การใช้และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสำหรับเนื้อลำไยอบแห้งสีทองกำหนดให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างไม่เกิน 1500 ppm (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2547)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เบ็ญจวรรณ และ นาวิน (2539) ได้ทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อลำไยพบว่าควรใช้เวลาในการอบแห้งลำไยมากกว่า 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จึงจะได้เนื้อลำไยอบแห้งที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 ส่วนระยะเวลาในการแช่เนื้อลำไยในสารเคมี พบว่าเวลาทั้ง 3 ระดับคือ 30 นาที 1 ชั่วโมงและ 1 ชั่วโมง 30 นาที ให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสตัวอย่างเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ร้อยละ 1.0 ได้รับคะแนนเฉลี่ยเรื่องคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสสูงกว่าทุกๆ ตัวอย่าง และผลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตรวจพบซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างสูงที่สุด 1,113 ppm.

เบ็ญจวรรณ และ ประสิทธิ์ (2541) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพลำไยอบแห้งโดยวางแผนการทดลองแบบ Completely randomize design ประกอบด้วย 5 ทรีตเม้นท์ ดังนี้ ทรีตเม้นท์ control (แช่น้ำกลั่น), การลวกที่ 99 องศาเซลเซียสนาน 30 วินาที, การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ร้อยละ 1.0 สารละลายกรดซิตริก 0.2 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับกรดแอสคอร์บิค 200 ppm และสารละลายกรดซิตริกร้อยละ 0.2 โดยใช้ระยะเวลาในการแช่น้ำหรือสารละลายนาน 30 นาที แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ภายหลังการอบแห้งบรรจุผลิตภัณฑ์ใส่ถุงพลาสติกโพลีโพรพิลีนเก็บไว้ในสภาพอุณหภูมิห้องพบว่าทรีตเม้นท์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ร้อยละ 1.0 มีระดับการเกิดสีน้ำตาลและการดำเนินกิจกรรมของเอนไซม์

โพลีฟีนอลออกซิเดสต่ำ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลืองทอง ซึ่งผู้บริโภคให้การยอมรับสูงสุด นอกจากนี้ในระหว่างการเก็บรักษาไม่พบการปนเปื้อนของยีสต์และราทำให้มีอายุการเก็บรักษานานกว่าทรีตเม้นท์อื่นๆ

อรรณพ และ วรรณภา (2550) ได้ทำการศึกษาผลของสารเคมีต่อคุณลักษณะด้านสีของลำไยอบแห้งศึกษาองค์ประกอบทางเคมีตรวจสอบทางด้านจุลชีววิทยาพร้อมทั้งทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้งที่ผลิตขึ้นได้เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะทางด้านสีของลำไยอบแห้งให้ดีขึ้นโดยนำเนื้อลำไยมาแช่ในสารเคมี 3 ชนิด (ในรูปสารละลาย) ได้แก่โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์กรดแอสคอร์บิค และกรดซิตริก ซึ่งได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ดังนี้ สารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 สารละลายกรดแอสคอร์บิคความเข้มข้น ร้อยละ 0.5 สารละลายกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และสารละลายผสมของสารเคมี ทั้ง 3 ชนิด โดยแช่เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำเข้าอบในตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้านต่างๆ ซึ่งผลการศึกษา พบว่า การใช้สารประกอบซัลไฟต์ในรูปสารละลายเพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกับสารชนิดอื่นเป็นเวลานาน 10 นาที ก่อนนำไปอบแห้งสามารถช่วยปรับปรุงคุณลักษณะด้านสีของลำไยอบแห้งได้ โดยทำให้ค่าความสว่างและความเป็นสีเหลืองทองเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็สามารถลดระดับค่าความเป็นสีแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ดีกว่าการใช้สารละลายกรดซิตริกและสารละลายกรดแอสคอร์บิคเพียงชนิดเดียวในการแช่ผลลำไยสดก่อนการอบแห้ง และพบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้งนั้นอยู่ในระดับที่ปลอดภัยตามมาตรฐานที่ระบุไว้อีกทั้งการใช้สารละลายที่มีสารประกอบซัลไฟต์ ยังสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และราได้ดีกว่าการใช้น้ำสะอาดและสารละลายชนิดอื่นๆ ในการแช่ลำไยก่อนการอบแห้งและพบว่าคุณลักษณะด้านสีเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการให้คะแนนความชอบของคุณลักษณะด้านอื่นๆ จากผู้ทดสอบชิม

# บทที่ 3
# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

**1. วัตถุดิบ**

ผลลำไยสดพันธุ์อีดอ จากสวนของเกษตรกร อำเภอแม่ทา จังหวัดลำพูน

**2. สารเคมี**

2.1 วัตถุเจือปนอาหาร

2.1.1 โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (KMS, food grade)

2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

2.2.1 โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($KHC_8H_4O_4$, Fluka, A.R. grade)

2.2.2 ฟีนอฟทาลีน (phenolphthalein, Ajax Finechem,A.R. grade)

2.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, Merck, A.R. grade)

2.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด

2.3.1 กรดซัลฟิวริก ($H_2SO_4$, RCI Labscan, A.R. grade)

2.3.2 กลูโคส (D-Glucose, Ajax Finechem, A.R. grade

2.3.3 โพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต ($KNaC_4H_4O_6$, Ajax Finechem, A.R. grade)

2.3.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, Merck, A.R. grade)

2.3.5 กรดไดไนโตรซาลิไซลิค (3,5-Dinitrosalicylic acid ; DNS, Aldrich, A.R. grade)

2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล

2.4.1 กรดแอซิติค (RCI Labscan, A.R. grade)

2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล

2.5.1 ไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล (5-hydroxymethyl-2-furfural, Sigma-Aldrich, A.R. grade)

2.5.2 กรดไตรคลอโรแอซิติค (Merck, A.R. grade)

2.5.3 กรดไทคลอโรบาร์บิทูริค (Fluka, A.R. grade)

2.5.4 เอทานอล (Ethanol, RCI Labscan, A.R. grade)

2.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง

2.6.1 กรดฟอสฟอริค (Ortho-Phosphoric acid 85%, Merck, A.R. grade)

2.6.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซต์ ($H_2O_2$, Merck, A.R. grade)

2.6.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, Merck, A.R. grade)

2.6.4 เมทิลเรด (methyl red, Ajax Finechem, A.R. grade)

2.6.5 เมทิลีนบลู (methylene blue, Ajax Finechem, A.R. grade)

2.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

2.7.1 โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($NaH_2PO_4$, QRec, A.R. grade)

2.7.2 ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$, QRec, A.R. grade)

2.7.3 แคตาคอล (Sigma-Aldrich, A.R. grade)

2.7.4 โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl_2$, LobaChemie, A.R. grade)

2.8 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

2.8.1 เมทานอล (Methanol, RCI Labscan, A.R. grade)

2.8.2 Folin-ciocalteu reagent (LobaChemie, A.R. grade)

2.8.3 กรดแกลลิค (Sigma-Aldrich, A.R. grade)

2.8.4 โซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2CO_3$, Ajax Finechem, A.R. grade)

2.9 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

2.9.1 ไดฟีนิลฟิคิลไฮดราซิล (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl ; DPPH, Aldrich, A.R. grade)

2.9.2 ไทรฟริดิลเทรียซิน (2,4,6-tripyridyl-s-triazine ; TPTZ, Fluka, A.R. grade)

2.9.3 เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$, LobaChemie, A.R. grade)

2.10 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์

2.10.1 อาหารเลี้ยงเชื้อ (plate count agar; PCA, Himedia)

2.10.2 อาหารเลี้ยงเชื้อ (potato dextrose agar; PDA, Himedia)

2.10.3 อาหารเลี้ยงเชื้อ (peptone, Himedia)

**3. เครื่องมือ**

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างลำไย

3.1.1 เครื่องปั่น-เครื่องบดอาหาร (blender, House worth รุ่น 9308)

3.1.2 ตะแกรง

3.1.3 อุปกรณ์งานครัว ประกอบด้วย ช้อน มีดหั่น กะละมังสแตนเลส กะละมังพลาสติก ตะกร้าพลาสติก หม้อสแตนเลส ทัพพี กระชอนและชุดเตาแก๊ส

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance, Sartorius, รุ่น CP 224S)

3.2.2 ตู้อบลมร้อน (hot air oven,Termaks รุ่น TS4115)

3.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath, Memmert รุ่น WNB22)

3.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Metrohm รุ่น 744)

3.2.5 เครื่องผสมสารละลาย (vortex mixer, IKA รุ่น MS2)

3.2.6 เครื่องวัดสี (oolorimeter, Hunter Lab รุ่น Miniscan XE plus

3.2.7 เครื่องวัดกิจกรรมของน้ำ (water activity meter, Aqua lab รุ่น 3TE)

3.2.8 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer, Rayleigh รุ่น VIS-723G)

3.2.9 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge, Sorvallรุ่น RC-5 plus)

3.2.10 ตู้ปลอดเชื้อ (laminar flow, Holten รุ่น HB2472)

3.2.11 ตู้บ่ม (incubator, Termaks รุ่น B8000)

3.2.12 เครื่องเขย่าสารแนวราบ (orbital shaker, Ratek รุ่น OM8)

3.2.13 อุปกรณ์เครื่องแก้ว ประกอบด้วยหลอดทดลองฝาเกลียวหลอดย่อยกระบอกตวงปิเปตบิวเรตขวดรูปชมพู่บีกเกอร์ ขวดดูแรนกรวยกรองขวดปรับปริมาตรแท่งแก้วคนสาร จานเพาะเชื้อ ชุดกลั่นซัลเฟอร์ไดออกไซต์และโถดูดความชื้น

3.2.14 เครื่องมืออื่นๆ ประกอบด้วย ผ้าขาวบาง กระป๋องอลูมิเนียมพร้อมฝา คีมคีบช้อนตักสาร ลูกยางดูดสาร ขวดน้ำกลั่น ไมโครปิเปต กระดาษกรอง สำลี อะลูมิเนียมฟอยล์ นาฬิกาจับเวลา ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ แก้วน้ำ แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส คอมพิวเตอร์โปรแกรม Minitab และโปรแกรม SPSS for Windows เวอร์ชัน 16.0

## วิธีการ

### 1. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสด

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสดก่อนนำมาทดลองในแต่ละขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมขั้นต้น ขั้นตอนการอบแห้ง และขั้นตอนการเก็บรักษาโดยนำผลลำไยสด เกรด AA ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24-27 มิลลิเมตรมาล้างด้วยน้ำสะอาดคว้านเมล็ดโดยใช้ด้ามช้อนปอกเปลือกและนำเนื้อลำไยสดที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (ภาคผนวก ข) ได้แก่ ค่าสีด้วยระบบ CIE (L*, a* และ b*)

1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (ภาคผนวก ค) ได้แก่

1.2.1 ความชื้น

1.2.2 ความเป็นกรด-ด่าง

1.2.3 ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

1.2.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

1.2.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด

1.2.6 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล

1.2.7 ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล

1.2.8 ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง

1.2.9 กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

1.2.10 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

1.2.11 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH

1.2.12 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP

วางแผนการวิจัยแบบ Completely Randomized Design (CRD) และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p \leq 0.05$)

**2. การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเนื้อลำไย**

**2.1 ผลของอุณหภูมิในการลวก และความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสด**

หาสภาวะของการเตรียมขั้นต้นที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อลำไย โดยนำผลลำไยสดมาล้างด้วยน้ำสะอาด คว้านเมล็ดโดยใช้ด้ามช้อน ปอกเปลือก และนำไปลวกที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ทำให้เย็นทันทีโดยแช่ในน้ำอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที นำเนื้อลำไยไปแช่ในสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 500 1000 และ 1500 ppm เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้อัตราส่วนเนื้อลำไยสด 1 กิโลกรัม ต่อสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 1 ลิตร และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที นำไปเนื้อลำไยสดที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

2.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (ภาคผนวก ข) ตามข้อ 1.1

2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (ภาคผนวก ค) ได้แก่

1) ความเป็นกรด-ด่าง
2) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้
3) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้
4) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด
5) ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล
6) ปริมาณสารประกอบไฮดรกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล
7) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง
8) กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส
9) ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด
10) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH
11) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP

2.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา (ภาคผนวก ง) ได้แก่

1) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด
2) ปริมาณยีสต์และรา

วางแผนการทดลองแบบ factorial in completely randomized design และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p \leq 0.05$)

**2.2 ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยลมร้อนระบบการพาโดยการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature) และแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)**

หาความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (เนื้อลำไยสด) และเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยเลือกอุณหภูมิในการลวกร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ที่ใช้ในการแช่ที่สามารถลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ดีจากข้อ 2.1 จากนั้นศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและแบบหลายขั้น ดังตารางที่ 3 โดยใช้เนื้อลำไยสด 300±15 กรัม นำมาอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 18 ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่ถูกออกแบบและสร้างโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (ภาพผนวกที่ 1) และบันทึกน้ำหนักของเนื้อลำไยทุก 15 นาที

**ตารางที่ 3** ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

| การใช้อุณหภูมิ | ระดับอุณหภูมิ |
|---|---|
| แบบขั้นเดียว | 60 องศาเซลเซียส |
| | 70 องศาเซลเซียส |
| | 80 องศาเซลเซียส |
| แบบหลายขั้น | 80 (60 นาที) ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส |
| | 80 (90 นาที) ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส |
| | 80 (120 นาที) ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส |

**2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น**

2.3.1 แบบจำลองเอมพิริคัล ดังรูปแบบสมการได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

นำข้อมูลคุณลักษณะของการอบแห้งของเนื้อลำไยจากข้อ 2.2 มาคำนวณในรูปแบบอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio: MR) ตามสมการที่ (4) จากนั้นนำไปข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมโดยใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \qquad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$M_t$ คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ

$M_e$ คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์

$M_i$ คือ ความชื้นเริ่มต้น

ซึ่งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมอบแห้ง (มีรูปแบบสมการดังตารางที่ 1) ได้แก่

1) Page
2) Newton
3) Handerson and pabis

2.3.2 แบบจำลองกึ่งทฤษฎี

1) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นดังรูปแบบสมการที่ 1.4
2) พลังงานกระตุ้นดังรูปแบบสมการที่ 1.5

**2.4 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง**

นำเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นและเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่สามารถลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ดีจากข้อ 2.1 มาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งแบบขั้นเดียว 3 ระดับ และแบบหลายขั้น 3 ระดับดังตารางที่ 3 และใช้ระยะเวลาอบแห้งที่ทำให้เนื้อลำไยมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 18 จากข้อ 2.2 แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ดังนี้

2.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (ภาคผนวก ข) ตามข้อ 1.1

2.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (ภาคผนวก ค) ได้แก่

1) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด
2) ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล
3) ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล
4) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง
5) กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส
6) ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด
7) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH
8) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ FRAP

2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา (ภาคผนวก ง) ตามข้อ 2.1.3

2.4.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (ภาคผนวก จ)

วางแผนการทดลองแบบ completely randomized designและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p \leq 0.05$)

**3. ผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ**

นำเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นและเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นตามสภาวะการเตรียมขั้นต้นมาอบแห้งด้วยอุณหภูมิในการอบแห้งที่ลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ดีจากข้อ 2.4 จนมีความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ ทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 15 นาที บรรจุลงในถุงโพลีเอทิลีน ปิดผนึกถุงและเก็บรักษาแบบสภาวะเร่งที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 35 45 และ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 36 วัน โดยสุ่มเก็บตัวอย่างทุก 6 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (ภาคผนวก ข) ได้แก่

3.1.1 ค่าสีด้วยระบบ CIE ( L*, a* และ b*)

3.1.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ ($a_w$)

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (ภาคผนวก ค) ตามข้อ 1.2

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา (ภาคผนวก ง) ตามข้อ 2.1.3

3.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (ภาคผนวก จ) ตามข้อ 2.4.4

วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวน(analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p \leq 0.05$)

# บทที่ 4
# ผลการวิจัยและวิจารณ์

## 1. สมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสด

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้ได้มีการนำลำไยสดมาใช้ในการทดลอง 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมขั้นต้น ขั้นตอนการอบแห้ง และขั้นตอนการศึกษาอายุการเก็บรักษา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของลำไยที่นำมาใช้ในการทดลองแต่ละขั้นตอน เพื่อควบคุมคุณภาพและมาตรฐานของวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนนำมาทำการทดลอง จากผลการวิเคราะห์ ดังที่แสดงในตารางที่ 4 พบว่า เนื้อลำไยสดที่นำมาใช้ในการทดลองแต่ละขั้นตอนมีค่าสี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (BI) และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สำหรับค่าสีของเนื้อลำไย จะมีค่า L* อยู่ในช่วง 34.14-35.01 ค่า a* อยู่ในช่วง 9.00-9.11 และค่า b* อยู่ในช่วง 3.69-3.72 มีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลอยู่ในช่วง 0.15-0.22 และความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH (ร้อยละของการยับยั้ง) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.58-7.91

ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 16.45-18.00 องศาบริกซ์ ( ˚Brix) และค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 6.30-7.74 ซึ่งถือว่าลำไยที่นำมาทดลองอยู่ในช่วงของลำไยสดที่มีคุณภาพสดและดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Menzel and Waite (2005) ซึ่งรายงานว่า ในเนื้อลำไยสดมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด อยู่ในช่วง 16-25 % และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 7 สำหรับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าอยู่ในช่วง 14.02-29.73 mg/100g ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 35.38-96.55 mg/100g ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (TPC) มีค่าอยู่ในช่วง 2.04-2.60 mgGAE/100g ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี FRAP มีค่าอยู่ในช่วง 2.37-6.09 mM/g ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล (HMF) มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.36 mg/100g และมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง ($SO_2$) อยู่ในช่วง 432.71-2022.81 ppm ซึ่งการพบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเนื้อลำไยสดในปริมาณมาก อาจเกิดจากการปนเปื้อนจากเปลือกลำไย ในกระบวนการเตรียมเนื้อลำไยสดมาวิเคราะห์ ซึ่งปริมาณสารต่างๆ ดังที่ได้กล่าวข้างต้น มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) อาจเนื่องจากลำไยที่นำมาแต่ละครั้งมีการควบคุมแหล่งที่ปลูก แต่ช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวผลผลิตระยะสุกแก่ การขนส่ง การเก็บรักษาก่อนนำมาทดลอง

**ตารางที่ 4** สมบัติทางกายภาพ และเคมีของเนื้อลำไยสดที่นำมาใช้ทดลองแต่ละขั้นตอน

| physical and chemical properties | | fresh peeled longan fruit | | |
|---|---|---|---|---|
| | | for pretreatment | for drying | for shelf life |
| Physical properties | | | | |
| Color | L* $^{ns}$ | 34.16±1.53 | 35.01±1.25 | 34.14±1.13 |
| | a* $^{ns}$ | 9.00±0.40 | 9.10±0.30 | 9.11±0.25 |
| | b* $^{ns}$ | 3.69±0.22 | 3.72±0.18 | 3.69±0.21 |
| chemical properties | | | | |
| moisture (%) | | 83.87$^{a}$±0.06 | 81.47$^{b}$±1.85 | 84.35$^{a}$±0.21 |
| titrate acidity (°Brix) | | 7.68$^{a}$±0.80 | 3.12$^{b}$±0.28 | 8.54$^{a}$±1.17 |
| pH value | | 7.42$^{b}$±0.20 | 7.74$^{a}$±0.04 | 6.30$^{c}$±0.02 |
| total soluble solid (%) | | 16.65$^{b}$±1.45 | 18.00$^{a}$±0.00 | 16.45$^{b}$±0.10 |
| reducing sugar (mg/100g) | | 26.85$^{a}$±11.59 | 29.73$^{a}$±0.46 | 14.02$^{b}$±0.66 |
| total sugar (mg/100g) | | 57.38$^{b}$±4.17 | 96.55$^{a}$±4.49 | 35.38$^{c}$±0.58 |
| total phenolic content (mgGAE/100g) | | 2.04$^{b}$±0.52 | 2.60$^{a}$±0.05 | 2.07$^{b}$±0.22 |
| DPPH (% inhibition) $^{ns}$ | | 7.12±1.94 | 7.91±1.49 | 5.58±0.70 |
| FRAP (mM/g) | | 3.13$^{b}$±0.74 | 6.09$^{a}$±0.21 | 2.37$^{b}$±0.63 |
| browning index (OD) $^{ns}$ | | 0.17±0.07 | 0.22±0.05 | 0.15±0.02 |
| HMF content (mg/100g) | | 0.36$^{a}$±0.07 | 0.06$^{b}$±0.01 | 0.01$^{b}$±0.00 |
| residual of $SO_2$ (ppm) | | 2022.81$^{a}$±1164.42 | 432.71$^{a}$±113.53 | 717.15$^{b}$±295.87 |

หมายเหตุ a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

**2. สภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งลำไย**

**2.1 ผลของอุณหภูมิในการลวก และความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบ-ซัลไฟต์ (KMS) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสด**

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของเนื้อลำไยสดที่ใช้อุณหภูมิในการลวก และความเข้มข้นของสารละลาย KMS ที่ระดับแตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในขั้นต้น โดยคัดเลือกค่าติดตามจากการวัดปริมาณสารตั้งต้น หรือสารตัวกลาง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยานั้นซึ่งในส่วนการทดลองนี้ได้คัดเลือกจาก ค่า L* เนื่องจากค่า L* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่าง และสามารถเป็นดัชนีบ่งบอกการเกิดสีน้ำตาล หรือเกิดสีคล้ำในผลิตภัณฑ์ได้ (Ozkan et al, 1992) นอกจากนี้ ยังมีค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) ซึ่งเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ และค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (BI) ซึ่งวัดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 420-490 นาโนเมตร (นิธิยา, 2545) จากผลการทดลอง ได้แสดงผลในตารางที่ 5 และ 6

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิในการลวก พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการลวกสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า L* เพิ่มขึ้นค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) และค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล(BI) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลวกมีผลทำให้เอนไซม์ PPO ซึ่งเป็นโปรตีนเสียสภาพจนไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ มีรายงานระบุว่า กิจกรรมของเอนไซม์ PPO จะสูญเสียมากกว่าร้อยละ 50 เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที (Chutintrasri and Noomhorm, 2006) หรือสูญเสียมากกว่าร้อยละ 90 เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (Galeazzi and Sgarbieri, 1981) โดยมีสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเป็นสารตั้งต้นได้ ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPHที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย KMS พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย KMS เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารประกอบซัลไฟต์เมื่ออยู่ในสารละลายของน้ำจะแตกตัวอยู่ในรูปซัลไฟต์อิสระ ได้แก่ กรดซัลฟูริก ไบซัลไฟต์อิออน และซัลไฟต์อิออน เป็นต้น และเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะไดซัลไฟด์ที่อยู่ในเอนไซม์ PPO ส่งผลต่อโครงสร้างและการทำงานของเอนไซม์ PPO ทำให้เสียสภาพและไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยสารประกอบซัลไฟต์จะมีประสิทธิภาพดี เมื่อสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (อุดมเกียรติ และรัชนี, 2532) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ที่พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย KMS ที่ 1000 ppm มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการลวกและความเข้มข้นของสารละลายKMS พบว่า เนื้อลำไยที่ผ่านการลวกที่ 90 องศาเซลเซียสและแช่ในสารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 500 1000 และ 1500 ppm มีค่า L* ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่ากิจกรรมเอนไซม์ PPO ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารประกอบ HMF และ ปริมาณ $SO_2$ ตกค้าง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ยกเว้น ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ซึ่งพบว่าเนื้อลำไยที่ผ่านการลวกที่ 90 องศาเซลเซียสและแช่ในสารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 1000 ppm มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ สูงที่สุด ($p\leq0.05$)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สภาวะการเตรียมขั้นต้นที่เลือกนำไปศึกษาต่อในขั้นตอนการอบแห้ง คือ การใช้อุณหภูมิในการลวกเนื้อลำไยที่ 90 องศาเซลเซียสร่วมกับการแช่เนื้อลำไยภายหลังจากการลวกในสารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 1000 ppm เนื่องจากสภาวะการเตรียมขั้นต้นดังกล่าว ให้ค่า L* ของเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (38.91±2.30) สูงกว่าเนื้อลำไยสด (จากข้อมูลในตารางที่ 4 สดมภ์ที่1 ค่า L* เท่ากับ 34.16±1.53) ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ต่ำกว่าร้อยละ 50 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลต่ำที่สุด และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้สูงที่สุด

**ตารางที่ 5** สมบัติทางกายภาพ และเคมีของเนื้อลำไยสดที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

| factor | | physical and chemical properties | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | L* | a* | b* | total soluble | pH value | TA (% citric acid) | TPC$^{ns}$(mgGAE /100)g | DPPH (%) | FRAP$^{ns}$ (mM/g) |
| single factor temperature of blanching (˚C) | 70 | 35.04$^{a}$±1.66 | 8.86$^{ns}$±0.79 | 3.36$^{c}$±0.83 | 15.12±1.35 | 7.38$^{ns}$±0.10 | 6.39$^{ns}$±2.61 | 1.70±0.41 | 5.90$^{a}$±2.76 | 2.84±0.63 |
| | 80 | 36.71$^{b}$±1.68 | 8.95$^{ns}$±0.69 | 2.87$^{b}$±0.64 | 15.48±0.85 | 7.40$^{ns}$±0.13 | 8.42$^{ns}$±6.00 | 1.71±0.46 | 5.55$^{a}$±3.10 | 2.46±0.87 |
| | 90 | 38.85$^{c}$±2.77 | 9.16$^{ns}$±1.22 | 2.33$^{a}$±0.67 | 15.12±0.64 | 7.33$^{ns}$±0.09 | 8.05$^{ns}$±5.29 | 1.79±0.40 | 9.28$^{b}$±3.24 | 2.68±0.62 |
| single factor concentration of KMS (ppm) | 500 | 37.06$^{ns}$±2.63 | 8.91$^{ns}$±0.63 | 2.86$^{ns}$±0.56 | 15.38±0.92 | 7.40$^{b}$±0.11 | 5.68$^{a}$±0.41 | 1.79±0.53 | 5.47$^{ns}$±3.02 | 2.99±0.70 |
| | 1000 | 36.91$^{ns}$±2.43 | 8.87$^{ns}$±1.10 | 2.92$^{ns}$±1.21 | 15.20±0.63 | 7.31$^{a}$±0.12 | 13.10$^{b}$±4.15 | 1.79±0.41 | 7.38$^{ns}$±4.60 | 2.60±0.83 |
| | 1500 | 36.63$^{ns}$±2.80 | 9.19$^{ns}$±0.99 | 2.77$^{ns}$±0.55 | 15.13±1.32 | 7.39$^{ab}$±0.08 | 4.07$^{a}$±0.71 | 1.62±0.29 | 7.88$^{ns}$±1.83 | 2.39±0.48 |
| common factor temperature of blanching (˚C) x Concentration of KMS (ppm) | 70x500 | 35.33$^{ab}$±1.70 | 8.93$^{ab}$±0.51 | 2.92$^{bc}$±0.62 | 15.60±0.85 | 7.40$^{ab}$±0.10 | 6.08$^{ab}$±0.28 | 1.75±0.63 | 6.09$^{abc}$±1.5 | 3.18±0.62 |
| | 80x500 | 36.95$^{b}$±1.98 | 8.95$^{ab}$±0.79 | 2.80$^{bc}$±0.66 | 15.70±1.25 | 7.45$^{b}$±0.15 | 5.76$^{ab}$±0.05 | 1.77±0.66 | 3.02$^{a}$±1.42 | 2.89±1.21 |
| | 90x500 | 38.90$^{c}$±2.83 | 8.85$^{ab}$±0.59 | 2.85$^{bc}$±0.40 | 14.85±0.53 | 7.35$^{ab}$±0.05 | 5.21$^{ab}$±0.05 | 1.87±0.42 | 7.30$^{abc}$±4.1 | 2.89±0.25 |
| | 70x1000 | 35.37$^{ab}$±1.91 | 8.52$^{a}$±1.10 | 4.16$^{d}$±0.58 | 15.30±0.53 | 7.33$^{ab}$±0.14 | 9.41$^{bc}$±0.73 | 1.65±0.34 | 3.36$^{ab}$±3.05 | 2.66±0.96 |
| | 80x1000 | 36.45$^{b}$±1.61 | 8.89$^{ab}$±0.43 | 3.01$^{c}$±0.78 | 15.50±0.74 | 7.34$^{ab}$±0.15 | 15.87$^{d}$±2.93 | 1.77±0.51 | 7.55$^{abc}$±4.1 | 2.11±0.81 |
| | 90x1000 | 38.91$^{c}$±2.30 | 9.21$^{ab}$±1.47 | 1.59$^{a}$±0.38 | 14.80±0.54 | 7.26$^{a}$±0.07 | 14.01$^{cd}$±5.7 | 1.93±0.42 | 11.24$^{c}$±3.42 | 3.04±0.71 |
| | 70x1500 | 34.41$^{a}$±1.23 | 9.12$^{ab}$±0.53 | 2.99$^{bc}$±0.65 | 14.45±2.17 | 7.40$^{ab}$±0.07 | 3.67$^{a}$±0.48 | 1.70±0.33 | 8.25$^{bc}$±0.89 | 2.68±0.15 |
| | 80x1500 | 36.73$^{b}$±1.49 | 9.02$^{ab}$±0.82 | 2.79$^{bc}$±0.46 | 15.25±0.62 | 7.41$^{ab}$±0.07 | 3.63$^{a}$±0.02 | 1.61±0.25 | 6.08$^{abc}$±1.8 | 2.37±0.66 |
| | 90x1500 | 38.75$^{c}$±3.27 | 9.43$^{b}$±1.41 | 2.53$^{b}$±0.44 | 15.70±0.48 | 7.37$^{ab}$±0.12 | 4.92$^{ab}$±0.40 | 1.56±0.36 | 9.31$^{c}$±1.05 | 2.11±0.47 |

**หมายเหตุ** a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

**ตารางที่ 6** การเกิดสีน้ำตาลของเนื้อลำไยสดที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

| factor | | browning | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | residual of $SO_2$ (ppm) | PPO activity (% relative) | browning index (OD) | HMF content (mg/100g) | reducing sugar$^{ns}$ (mg/100g) | total sugar (mg/100g) |
| single factor temperature of blanching(˚C) | 70 | 1763.73$^{ns}$±1086.71 | 73.78$^{b}$±20.06 | 0.21$^{b}$±0.09 | 0.24$^{ns}$±0.17 | 17.55±5.40 | 53.24$^{ns}$±12.16 |
| | 80 | 1190.45$^{ns}$±934.01 | 70.54$^{b}$±16.46 | 0.25$^{b}$±0.14 | 0.14$^{ns}$±0.11 | 18.58±4.19 | 50.10$^{ns}$±11.50 |
| | 90 | 1236.59$^{ns}$±508.98 | 50.83$^{a}$±7.35 | 0.10$^{a}$±0.08 | 0.22$^{ns}$±0.08 | 18.26±3.78 | 52.39$^{ns}$±7.80 |
| single factor concentration of KMS (ppm) | 500 | 1726.04$^{ns}$±1336.15 | 78.93$^{b}$±22.63 | 0.17$^{ns}$±0.11 | 0.17$^{ns}$±0.11 | 19.45±5.07 | 58.17$^{b}$±7.87 |
| | 1000 | 1094.09$^{ns}$±405.51 | 59.83$^{a}$±12.50 | 0.18$^{ns}$±0.15 | 0.27$^{ns}$±0.16 | 16.91±3.00 | 41.89$^{a}$±9.64 |
| | 1500 | 1370.64$^{ns}$±604.17 | 56.40$^{a}$±8.57 | 0.20$^{ns}$±0.10 | 0.16$^{ns}$±0.10 | 18.04±4.83 | 55.66$^{b}$±4.38 |
| common factor temperature of blanching (˚C) x Concentration of KMS (ppm) | 70x500 | 2851.84$^{b}$±1200.67 | 97.24$^{c}$±10.10 | 0.21$^{ab}$±0.10 | 0.19$^{a}$±0.16 | 20.12±6.12 | 60.83$^{c}$±8.61 |
| | 80x500 | 1397.90$^{a}$±1406.68 | 88.69$^{c}$±4.93 | 0.24$^{b}$±0.11 | 0.10$^{a}$±0.07 | 19.72±5.71 | 58.08$^{c}$±10.03 |
| | 90x500 | 928.38$^{a}$±666.26 | 50.87$^{ab}$±11.33 | 0.06$^{a}$±0.01 | 0.24$^{ab}$±0.04 | 18.52±4.71 | 55.61$^{bc}$±7.25 |
| | 70x1000 | 1023.39$^{a}$±437.76 | 63.60$^{ab}$±16.16 | 0.15$^{ab}$±0.06 | 0.38$^{b}$±0.21 | 16.03±1.95 | 40.76$^{ab}$±10.97 |
| | 80x1000 | 946.49$^{a}$±421.12 | 66.34$^{b}$±6.42 | 0.31$^{b}$±0.19 | 0.15$^{a}$±0.10 | 17.11±3.38 | 39.20$^{a}$±11.68 |
| | 90x1000 | 1312.39$^{a}$±367.04 | 49.54$^{a}$±7.32 | 0.07$^{a}$±0.03 | 0.26$^{ab}$±0.08 | 17.57±4.03 | 45.72$^{abc}$±8.96 |
| | 70x1500 | 1415.96$^{a}$±475.59 | 60.51$^{ab}$±2.23 | 0.26$^{b}$±0.07 | 0.16$^{a}$±0.06 | 16.51±7.23 | 58.13$^{c}$±6.36 |
| | 80x1500 | 1226.96$^{a}$±950.86 | 56.59$^{ab}$±14.33 | 0.19$^{ab}$±0.11 | 0.16$^{a}$±0.16 | 18.91±3.93 | 53.01$^{abc}$±2.41 |
| | 90x1500 | 1469.00$^{a}$±406.11 | 52.09$^{ab}$±3.42 | 0.16$^{ab}$±0.11 | 0.16$^{a}$±0.09 | 18.70±3.61 | 55.83$^{bc}$±3.26 |

หมายเหตุ a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

**2.2 คุณลักษณะการอบแห้งของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยการใช้อุณหภูมิโดยการใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature) และแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)**

จากการศึกษาพบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่า 4.8229±0.2637 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ และ5.2656±0.0288 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ ตามลำดับ และเมื่อทำการอบแห้งโดยกำหนดให้มีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.2195$g_{water}/g_{dry\ matter}$ (ร้อยละ 18) ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติสำหรับเนื้อลำไยสดอบแห้ง (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549) กำหนด พบว่าเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.2183±0.0011 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ และ 0.2188±0.0007 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาและอัตราการอบแห้งดังที่แสดงในตารางที่ 7

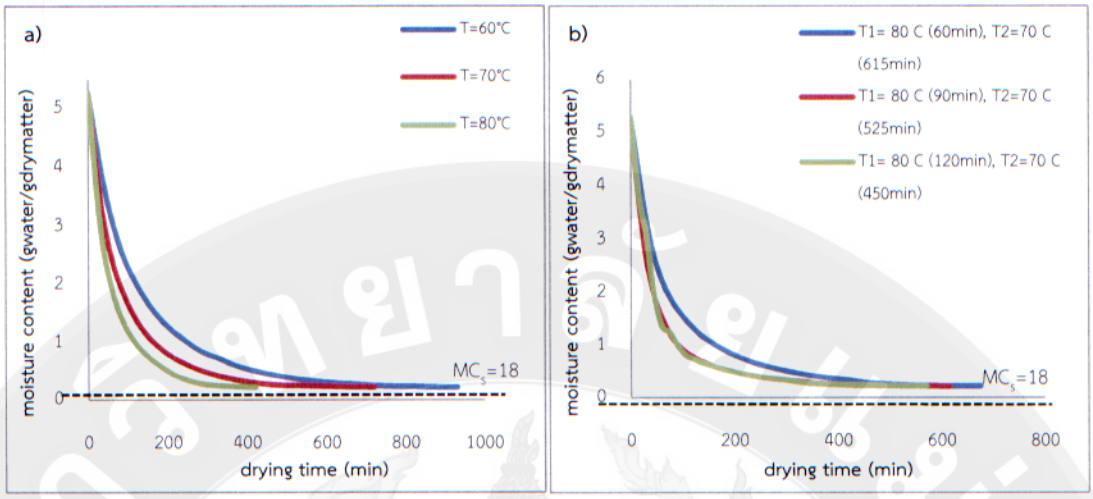
ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นและระยะเวลาในการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นสามารถอธิบายได้จากภาพที่ 6 และ 7 ที่แสดงให้เห็นว่า ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากช่วงแรกเนื้อลำไยจะสัมผัสกับลมร้อนและเกิดการถ่ายเทความร้อนจนอุณหภูมิของเนื้อลำไยมีค่าสูงขึ้น และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของลมร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นค่าความร้อนที่ทำให้มวลความชื้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยที่น้ำไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะ ต่อมาเมื่อน้ำที่ผิวหน้าเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ ถูกถ่ายเทมวลความชื้นและถูกพาออกไปพร้อมกับอากาศร้อนที่ไหลผ่าน ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ เรียกว่า ความร้อนแฝง มวลความชื้นที่ผิวของเนื้อลำไยจะสูญเสียสมดุล ส่งผลให้มวลความชื้นภายในเนื้อเยื่อเคลื่อนที่ออกมาทดแทนความชื้นที่สูญเสียไป ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในโครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อ จึงต้องมีการแพร่มวลความชื้นมาทดแทนยังผิวหน้าเซลล์ให้เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ซึ่งเรียกว่าเป็นช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ และทำการอบแห้งไปจนกระทั่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์แพร่มาทดแทนที่ผิวหน้าช้ากว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของลำไย (ผดุงศักดิ์, 2551; เนาวนิตย์ และคณะ, 2556)

จากตารางที่ 7 พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้น ทำให้เกิดความต่างของความดันไอระหว่างอาหารและอากาศภายนอก ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความมวลและความร้อนได้ดีขึ้น และเมื่อโมเลกุลน้ำภายในอาหารได้รับพลังงานที่เพิ่มขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลได้ ทำให้ระเหยน้ำได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง ซึ่งการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าและการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว ยกเว้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเนื่องจากการอบแห้งแบบโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการอบแห้งโดยเริ่มต้นอบแห้งที่อุณหภูมิสูง และตามด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำลง

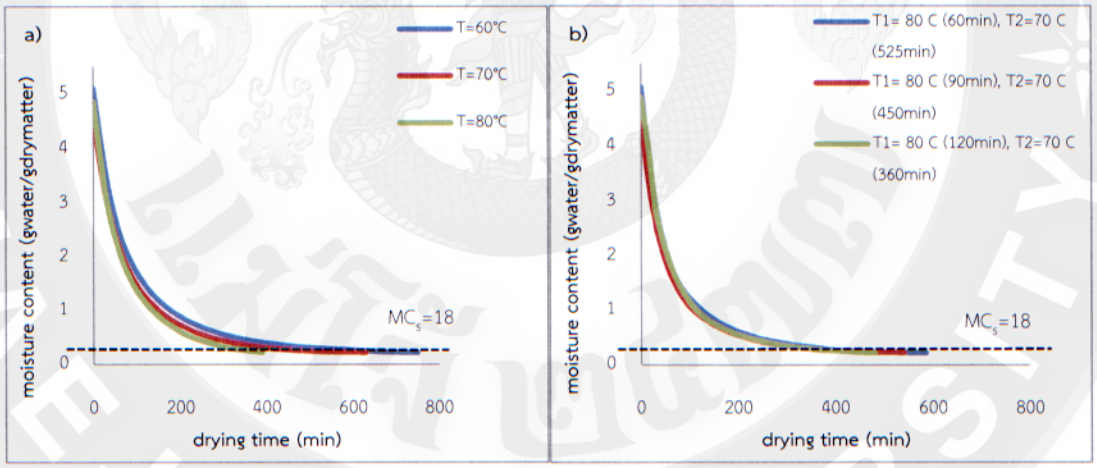
โดยอบแห้งจนถึงเนื้อลำไยมีความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งกลไกการอบแห้งเริ่มต้นที่ใช้อุณหภูมิสูง เพื่อเป็นการเร่งการถ่ายเทมวลความชื้นในอาหาร ทำให้น้ำอิสระให้เคลื่อนที่ออกมาสู่ผิวหน้าได้ดี และจากนั้นจึงใช้อุณหภูมิที่ต่ำลงเพื่อขับน้ำอิสระที่มีอยู่ภายในให้ออกมาสู่ภายนอก ซึ่งหลักการนี้เป็นกลไกที่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) ซึ่งกลไกนี้นอกจากจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งแล้ว ยังสามารถลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากความร้อนได้อีกด้วย (ผดุงศักดิ์, 2551) และเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น เนื่องจากขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมขั้นต้น เช่น การลวกเนื้อลำไยมีผลทำให้เซลล์ของเนื้อลำไยเกิดความเสียหาย (ณัฐพงษ์, 2553) และเมื่ออบแห้งความชื้นภายในเนื้อลำไยจึงระเหยออกมาสู่นอกเซลล์ได้ง่ายขึ้น

**ตารางที่ 7** ระยะเวลาและอัตราการอบแห้งของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

| drying condition | drying time (min) | | drying rate ( $g_{water}$/ $g_{dry\ matter}$*min) | |
|---|---|---|---|---|
| | Untreated peeled longan | pretreated peeled longan | Untreated peeled longan | pretreated peeled longan |
| single-stagedrying temperature | | | | |
| 60 °C | 930 | 750 | 0.0054 | 0.0065 |
| 70 °C | 720 | 630 | 0.0070 | 0.0069 |
| 80 °C | 420 | 390 | 0.0120 | 0.0119 |
| multi-stagedrying temperature | | | | |
| 80°C (60 min) and 70°C | 675 | 585 | 0.0075 | 0.0084 |
| 80°C (90 min) and 70°C | 615 | 540 | 0.0081 | 0.0091 |
| 80°C (120 min) and 70°C | 570 | 480 | 0.0089 | 0.0097 |




**ภาพที่ 6** การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น
a) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature)
b) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)



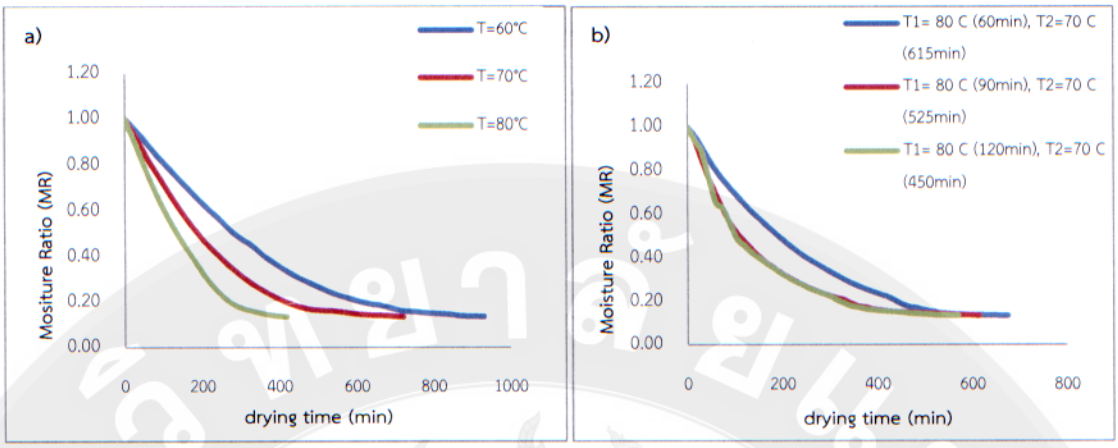

**ภาพที่ 7** การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น
a) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature)
b) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)

**2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น**

2.3.1 แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัลที่ใช้ในศึกษาในครั้งนี้คือ Newton Page และ Henderson and Pabis ซึ่งการหาแบบจำลองที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (ดังภาพที่ 8 และ 9) มาใช้วิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยที่ไม่เป็นเส้นตรง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) ค่าไคกำลังสอง ($X^2$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) ซึ่งเป็นดัชนีในการบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง โดยแบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) สูง เพื่อแสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย แต่สำหรับค่าไคกำลังสอง ($X^2$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความผิดพลาดในการทำนายจะต้องมีค่าต่ำ

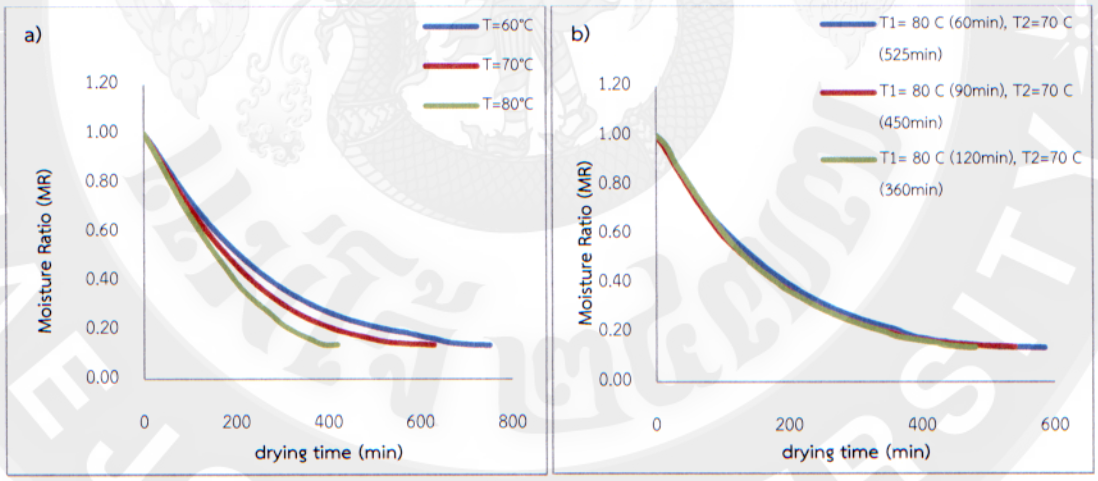
จากผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นดังตารางที่ 8 และ 9 ซึ่งแสดงค่าคงที่ของการอบแห้งและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว และแบบหลายขั้น พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) สูง แต่สำหรับค่าไคกำลังสอง ($X^2$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Newton และ Henderson and Pabis โดยเนื้อลำไยอบแห้งที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (ตารางที่ 8) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) ในช่วง 0.9899-0.9982 และมีค่าไคกำลังสอง ($X^2$) อยู่ระหว่าง 0.00054-0.00216 และมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) อยู่ระหว่าง 0.02294-0.04492 และสำหรับเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (ตารางที่ 9) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) ในช่วง 0.9963-0.9985 มีค่าไคกำลังสอง ($X^2$) อยู่ระหว่าง 0.00034-0.00125 และมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) อยู่ระหว่าง 0.01808-0.03473 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของการศึกษาผลกระทบของต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวดอกเก๊กฮวยใบโหระพามะเขือเทศแผ่นและเนื้อลำไย พบว่าแบบจำลองเอมพิริคัล Page ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (นิรุธ, 2553; ปองพล และคณะ, 2556; ฤทธิชัย, 2558; Abano et al., 2011; Janjai et al., 2011)




**ภาพที่ 8** การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งเนื้อลำไย ที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

a) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature)

b) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)




**ภาพที่ 9** การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียม

a) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว (single-stage drying temperature)

b) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น (multi-stage drying temperature)

**ตารางที่ 8** ค่าคงที่การอบแห้งของเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

| drying model | temperature (°C) | empirical drying model constants | analytical parameter | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\chi^2 \times 10^{-3}$ | *RMSE* | $R^2$ |
| Newton | 60 | $k$ = 0.002 | 4.70 | 0.06749 | 0.9878 |
| | 70 | $k$ = 0.004 | 1.72 | 0.04069 | 0.9889 |
| | 80 | $k$ = 0.005 | 0.91 | 0.02918 | 0.9935 |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $k$ = 0.004 | 1.31 | 0.03580 | 0.9962 |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.004 | 6.75 | 0.08120 | 0.9672 |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.005 | 2.70 | 0.05126 | 0.9751 |
| Page | 60 | $k$ = 0.002 $n$ = 1.055 | 1.62 | 0.03958 | 0.9962 |
| | 70 | $k$ = 0.004 $n$ = 0.972 | 0.92 | 0.02978 | 0.9919 |
| | 80 | $k$ = 0.003 $n$ = 1.082 | 2.16 | 0.04492 | 0.9899 |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $k$ = 0.004 $n$ = 0.969 | 0.54 | 0.02294 | 0.9982 |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.018 $n$ = 0.765 | 0.81 | 0.02816 | 0.9902 |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.017$n$ = 0.784 | 0.93 | 0.03012 | 0.9899 |
| Henderson and Pabis | 60 | $k$ = 0.003$a$ = 1.029 | 2.74 | 0.05154 | 0.9931 |
| | 70 | $k$ = 0.004$a$ = 1.007 | 1.59 | 0.03911 | 0.9889 |
| | 80 | $k$ = 0.005$a$ = 1.027 | 1.28 | 0.03459 | 0.9935 |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $k$ = 0.004$a$ = 0.996 | 1.39 | 0.03689 | 0.9962 |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.005$a$ = 0.920 | 2.57 | 0.05009 | 0.9712 |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.005$a$ = 0.932 | 2.17 | 0.04601 | 0.9751 |

หมายเหตุ *k* คือ ค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือ ค่าดัชนีการอบแห้ง; *a* คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

**ตารางที่ 9** ค่าคงที่การอบแห้งของเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

| drying model | temperature (°C) | empirical drying model constants | analytical parameter | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\chi^2 \times 10^{-3}$ | *RMSE* | $R^2$ |
| Newton | 60 | $k$ = 0.003 | 0.59 | 0.02390 | 0.9982 |
| | 70 | $k$ = 0.004 | 0.64 | 0.02478 | 0.9963 |
| | 80 | $k$ = 0.005 | 1.25 | 0.03401 | 0.9971 |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.004 | 1.41 | 0.03707 | 0.9963 |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.005 | 0.98 | 0.03086 | 0.9906 |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $k$ = 0.005 | 0.43 | 0.02047 | 0.9970 |
| Page | 60 | $k$ = 0.004 $n$ = 0.942 | 1.25 | 0.03473 | 0.9963 |
| | 70 | $k$ = 0.004 $n$ = 0.992 | 0.34 | 0.01808 | 0.9974 |
| | 80 | $k$ = 0.002 $n$ = 1.170 | 0.41 | 0.01941 | 0.9985 |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.008 $n$ = 0.903 | 0.64 | 0.02500 | 0.9982 |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.009 $n$ = 0.889 | 0.49 | 0.02186 | 0.9966 |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $k$ = 0.006 $n$ = 0.965 | 0.36 | 0.01865 | 0.9979 |
| Henderson and Pabis | 60 | $k$ = 0.003$a$ = 0.992 | 0.51 | 0.02206 | 0.9982 |
| | 70 | $k$ = 0.004$a$ = 1.009 | 0.54 | 0.02270 | 0.9963 |
| | 80 | $k$ = 0.005$a$ = 1.040 | 0.51 | 0.02172 | 0.9971 |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $k$ = 0.004$a$ = 0.977 | 0.97 | 0.03068 | 0.9963 |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $k$ = 0.005$a$ = 0.972 | 1.25 | 0.03487 | 0.9906 |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $k$ = 0.005$a$ = 1.004 | 0.40 | 0.01973 | 0.9970 |

หมายเหตุ $k$ คือ ค่าคงที่การอบแห้ง; $n$ คือ ค่าดัชนีการอบแห้ง; $a$ คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

2.3.2 แบบจำลองกึ่งทฤษฎี

การถ่ายเทความชื้นในระหว่างการอบแห้งของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองกึ่งทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($D_{eff}$) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นในโครงสร้างของเซลล์ลำไย ได้แสดงผลในตารางที่ 10 และ 11 พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น การค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลในการเพิ่มพลังงานความร้อน หรือค่าเอนทาลปีในระบบให้มีค่าสูงขึ้น จึงช่วยเร่งอัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าของอาหาร โดยมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างของเซลล์อาหารที่มาทดแทนน้ำที่บริเวณผิวหน้าของเซลล์อาหาร ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ และการเตรียมขั้นต้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เนื่องจากการลวกเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง มีส่วนช่วยทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของลำไยอ่อนตัวลงและเพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์มากขึ้น (วิชมณี, 2556) จึงส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าสูงกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

สำหรับพลังงานกระตุ้นของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น โดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว และแบบหลายขั้นสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Arrheniusโดยค่าที่ได้จากการคำนวณได้แสดงค่าในตารางที่ 10 และ 11 จากผลการทดลอง พบว่าการเตรียมขั้นต้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากเมื่อเนื้อลำไยผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยการลวกและแช่สารละลาย KMS จึงทำให้ภายในโครงสร้างเชิงซ้อนของเนื้อเยื่อเปลี่ยนไป เช่นมีความชื้นเริ่มต้นลดลง จึงทำให้ต้องมีการใช้พลังงานกระตุ้นเพื่อระเหยน้ำมากกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (น้ำฝน และคณะ, 2556) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าองค์ประกอบภายในเซลล์ โครงสร้างเนื้อเยื่อ พื้นที่ผิวจำเพาะของผลิตภัณฑ์ และระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอีก มีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้นของผลิตภัณฑ์

**ตารางที่ 10** ค่าพลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

| drying condition | effective moisture diffusivity ($D_{eff}$) | activation energy ($E_a$) |
|---|---|---|
| single-stagedrying temperature | | |
| 60 °C | $3.80 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | 38.57 kJ/mol |
| 70 °C | $4.75 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| 80 °C | $8.39 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| multi-stage drying temperature | | |
| 80°C (60 min) and 70°C (615 min) | $5.22 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | 49.47 kJ/mol |
| 80°C (90 min)and 70°C (525 min) | $5.07 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| 80°C (120 min) and 70°C (450 min) | $5.54 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |

**ตารางที่ 11** ค่าพลังงานกระตุ้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

| drying condition | effective moisture diffusivity ($D_{eff}$) | activation energy ($E_a$) |
|---|---|---|
| single-stagedrying temperature | | |
| 60 °C | $4.43 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | 30.16 kJ/mol |
| 70 °C | $5.38 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| 80 °C | $8.23 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| multi-stagedrying temperature | | |
| 80°C (60 min) and 70°C (525 min) | $5.70 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |
| 80°C (90 min) and 70°C (450 min) | $6.17 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | 135.05 kJ/mol |
| 80°C (120 min) and70°C (360 min) | $6.97 \times 10^{-8}$ $m^2/s$ | |

**2.4 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง**

โดยศึกษาเนื้อลำไย 2 ตัวอย่าง ได้แก่ เนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (untreated) และเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น (pretreated) จากสภาวะเตรียมเนื้อลำไยสดในขั้นต้น จากตอนที่ 2.1 เป็นเพียงการลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ โดยการยับยั้งค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้เพียงบางส่วน แต่ยังไม่สามารถยับยั้งได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์จึงมีโอกาสเกิดได้หากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม (เมย์, 2552) ด้วยเหตุนี้จึงได้นำเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นจากตอนที่ 2.1 มาศึกษาต่อเพื่อติดตามกิจกรรมของเอนไซม์รวมถึง ติดตามค่าต่างๆที่เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการเกิดสีน้ำตาล หรือเกิดสีคล้ำทั้งจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ได้แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 12 -14 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อพิจารณาการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว พบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ดังนี้ ค่า L* มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่า a* เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเนื้อลำไยอบแห้งมีสีคล้ำขึ้น และมีแนวโน้มของสีแดงมากกว่าสีเขียว สอดคล้องค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารประกอบ HMF และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น จึงมีผลไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวส์ ทั้งคีโตสและแอลโดส และหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีนเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นเอมีนจากนั้นเกิดการเรียงตัวใหม่เรียกว่าamadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า amadori product เกิดปฏิกิริยา enolization ของ amadori products แล้วได้เป็นคีโตสเอมีนหรือไดอะมิโนซูการ์และเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อไปได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน ซึ่งจะเกิดพอลิเมอไรซ์อย่างรวดเร็วได้เป็นสารสีน้ำตาล (นิธิยา, 2549) และภายหลังจากการอบแห้งเนื้อลำไยพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานวิจัยของรุ่งทิพย์ (2549) ที่ศึกษาพบว่า สารประกอบ ฟีนอลทั้งหมดในเนื้อลำไยอบแห้งทั้งผลพร้อมเปลือกพันธุ์อีดอมีปริมาณเพิ่มขึ้นภายหลังจากการอบแห้ง และเมื่อปริมาณสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันของสารประกอบฟีนอลทั้งหมดได้เป็นออร์โทไดฟีนอลซึ่งจะถูกออกซิไดส์ต่อให้เป็นออร์โทควิโนนโดยสารควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ หรือกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาลต่อไป (นิธิยา, 2545)และสำหรับคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นและสำหรับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์และรา มีแนวโน้มลดลง แต่ไม่เกิน

เกณฑ์ที่มาตรฐาน (มกอช. 8-2549) กำหนด (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)

เมื่อพิจารณาการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิช่วงแรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนานขึ้น คุณภาพของเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ค่า L* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า a* ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO และค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการอบแห้งแบบหลายขั้นเป็นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงแรกเพื่อเร่งการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากภายในโครงสร้างเซลล์ออกมาที่ผิวของเนื้อลำไยและลดอุณหภูมิต่ำให้ต่ำลงในช่วงที่สอง ซึ่งหากอบแห้งที่อุณหภูมิสูงในช่วงแรกเป็นเวลานานขึ้นส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาอบแห้งในช่วงอุณหภูมิช่วงที่สองลดลง จึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดลดลง และพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีน้อยกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการเตรียมขั้นต้นจากการลวก ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH สำหรับปริมาณ $SO_2$ ตกค้าง พบว่า เนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 และ 90 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 525 และ 450 นาที ตามลำดับ มีปริมาณ $SO_2$ ตกค้างเกินกว่ามาตรฐานกำหนด (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2547) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ มีแนวโน้มลดลง แต่ยีสต์และรามีปริมาณแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ไม่เกินเกณฑ์ที่มาตรฐาน (มกอช. 8-2549) กำหนด(สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549) และสำหรับคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นมีแนวโน้มสูงเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิช่วงแรกนานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการอบแห้งระหว่างการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวและแบบหลายขั้น พบว่า การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวที่อุณหภูมิต่ำ มีแนวโน้มของค่า L* ไม่แตกต่างกับการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น และการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวมีแนวโน้มค่า a* ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้น้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jino and Assawarachan (2015) และ Cerníšev (2010) ศึกษาการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นในการอบแห้งเพื่อรักษาสีของหญ้าหวานและมันฝรั่งตามลำดับสำหรับการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียวมีแนวโน้มของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์และรา สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่มาตรฐาน (มกอช. 8-2549) กำหนด (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)และการอบแห้งโดยใช้

อุณหภูมิแบบหลายขั้นมีแนวโน้มของคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นพบว่า เนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีแนวโน้มของค่า L* ปริมาณ $SO_2$ ตกค้างและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่า ขณะที่ค่า a* ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลปริมาณสารประกอบ HMF และปริมาณจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา ต่ำกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น เป็นผลเนื่องจากสารประกอบพวกซัลไฟต์จะมีส่วนช่วยในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลหรือเกิดสีคล้ำได้ ทั้งจากปฏิกิริยาที่เกี่ยวและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ โดยทำปฏิกิริยากับพันธะไดซัลไฟต์ที่อยู่ในเอนไซม์ ซึ่งทำให้โครงสร้างของเอนไซม์ PPO เดสเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ PPO ส่งผลทำให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO มีค่าลดลง และป้องกันการรวมทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ โดยเข้าทำปฏิกิริยากับกับโปรตีนหรือหมู่อะมิโนตรงพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้โปรตีนแตกตัวเป็น thiol และ thiosulfonate และทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ตรงหมู่คาร์บอนิลได้สาร hydroxysulfonate ซึ่งไม่สามารถเกิดพอลิเมอไรซ์ไปเป็นสารที่มีสีน้ำตาลได้ จึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารประกอบ HMF และนอกจากนี้สารประกอบซัลไฟต์อยู่ในรูปของกรดซัลฟูรัสยังมีบทบาทในการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา โดยมีผลต่อผนังเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณจุลินทรีย์ ยีสต์ และราที่มีค่าลดลง (อุดมเกียรติ และ รัชนี, 2532) และเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีแนวโน้มของคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสทางด้าน รส เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม สูงกว่าเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

จากตารางที่ 12-14 เมื่อพิจารณาจากค่าติดตามการเกิดสีน้ำตาลหรือเกิดสีคล้ำ ซึ่งในส่วนการทดลองนี้ได้คัดเลือกจาก ค่าL* ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลและปริมาณสารประกอบHMF และ คุณลักษณะทางเคมีตามที่มาตรฐาน (มกอช. 8-2549) กำหนด คือ ปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่ต่ำกว่า 80 องศาบริกซ์ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549) ปริมาณ $SO_2$ ตกค้างในผลไม้อบแห้งไม่เกิน 1500 ppm (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2547) รวมถึงคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น คือ การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360นาที และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 450 นาที จึงนำสภาวะการอบแห้งนี้ไปศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาต่อไป

**ตารางที่ 12** สมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

| treatment | drying temperature | physical chemical and biological properties | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | L* | a* | b* | final moisture (%) | total soluble solid (°Brix) | TPC (mgGAE/100g) | FRAP (mM/g) | DPPH (% inhibition | total microorganism (CFU/g) | yeast and mold (CFU/g) |
| untreated | 60 | $21.80^{def}\pm4.38$ | $4.73^{ab}\pm0.91$ | $17.27^{ab}\pm4.58$ | $17.95^{b}\pm0.04$ | $72.50^{a}\pm1.29$ | $19.14^{def}\pm0.84$ | $36.53^{c}\pm0.36$ | $68.50^{d}\pm3.26$ | 375±7.07 | 150±70.71 |
| | 70 | $17.72^{abc}\pm3.38$ | $12.20^{h}\pm2.52$ | $20.34^{bc}\pm3.04$ | $17.58^{a}\pm0.40$ | $74.00^{ab}\pm1.63$ | $19.88^{f}\pm0.76$ | $35.78^{c}\pm2.73$ | $69.33^{d}\pm4.24$ | 125±35.36 | 150±70.71 |
| | 80 | $16.18^{a}\pm3.09$ | $10.14^{g}\pm2.10$ | $16.38^{ab}\pm5.14$ | $18.00^{b}\pm0.01$ | $76.00^{abc}\pm1.63$ | $21.31^{g}\pm0.46$ | $36.19^{c}\pm1.84$ | $68.81^{d}\pm3.46$ | 115±7.07 | 150±70.71 |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $18.76^{abcd}\pm2.32$ | $8.79^{f}\pm1.15$ | $26.72^{d}\pm3.57$ | $17.97^{b}\pm0.00$ | $82.00^{c}\pm1.63$ | $17.17^{b}\pm0.85$ | $29.91^{b}\pm1.24$ | $55.39^{bc}\pm3.90$ | 125±7.07 | 100±0.00 |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $18.98^{abcd}\pm3.05$ | $6.23^{cd}\pm1.32$ | $14.89^{a}\pm2.73$ | $17.95^{b}\pm0.04$ | $77.00^{bc}\pm3.46$ | $20.00^{f}\pm0.67$ | $36.51^{c}\pm2.57$ | $61.88^{cd}\pm6.99$ | 105±7.07 | 100±0.00 |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $20.14^{bcdef}\pm2.86$ | $7.62^{ef}\pm1.50$ | $18.41^{abc}\pm3.22$ | $17.80^{ab}\pm0.26$ | $80.00^{cd}\pm0.82$ | $19.56^{ef}\pm0.92$ | $36.59^{c}\pm1.63$ | $62.72^{bd}\pm5.62$ | 115±35.36 | 100±0.00 |
| pretreated | 60 | $23.16^{f}\pm4.32$ | $4.38^{a}\pm0.73$ | $17.20^{ab}\pm4.86$ | $17.88^{ab}\pm0.03$ | $77.00^{bc}\pm4.76$ | $13.38^{a}\pm0.39$ | $23.95^{a}\pm1.21$ | $39.26^{a}\pm3.47$ | 165±7.07 | 100±0.00 |
| | 70 | $22.62^{ef}\pm3.38$ | $5.38^{abc}\pm0.73$ | $19.18^{abc}\pm4.61$ | $17.86^{ab}+0.10$ | $82.00^{c}\pm1.63$ | $18.58^{cde}\pm0.39$ | $34.32^{c}\pm1.62$ | $66.10^{d}\pm1.57$ | 125±35.36 | < 10 |
| | 80 | $17.07^{ab}\pm2.07$ | $8.37^{f}\pm0.83$ | $18.28^{abc}\pm4.81$ | $18.06^{b}+0.05$ | $83.50^{c}\pm3.70$ | $21.33^{g}\pm0.52$ | $36.45^{c}\pm0.98$ | $67.11^{d}\pm8.41$ | 90±28.28 | < 10 |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $19.44^{abcde}\pm2.58$ | $6.99^{de}\pm1.00$ | $20.36^{bc}\pm5.46$ | $17.98^{b}+0.02$ | $83.00^{c}\pm1.15$ | $18.41^{cd}\pm1.38$ | $30.5b^{b}\pm1.5$ | $68.52^{d}\pm7.98$ | 100±7.07 | < 10 |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $20.62^{cdef}\pm3.67$ | $6.10^{cd}\pm0.98$ | $20.68^{bc}\pm7.14$ | $17.97^{b}+0.02$ | $80.00^{cd}\pm1.63$ | $16.98^{b}\pm1.06$ | $31.62^{b}\pm2.18$ | $51.05^{b}\pm6.89$ | 100±0.00 | < 10 |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $21.11^{cdef}\pm2.78$ | $6.00^{bcd}\pm0.52$ | $22.77^{cd}\pm5.64$ | $17.92^{ab}+0.00$ | $80.00^{cd}\pm3.27$ | $17.61^{bc}\pm0.31$ | $31.48^{b}\pm0.63$ | $63.61^{d}\pm1.34$ | 80±14.14 | < 10 |

หมายเหตุ a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

**ตารางที่ 13** การเกิดสีน้ำตาลของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

| treatment | drying temperature | browning | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Residual of $SO_2$ (ppm) | PPO activity (% relative) | browning index (OD) | HMF content (mg/100g) | reducing sugar (mg/100g) | total sugar (mg/100g) |
| untreated | 60 | $593.29^{ab} \pm 114.63$ | $2.56^{bc} \pm 0.52$ | $0.15^{bcd} \pm 0.01$ | $0.10^{abcd} \pm 0.01$ | $100.73^{e} \pm 4.08$ | $439.97^{def} \pm 32.01$ |
| | 70 | $924.87^{bcd} \pm 86.24$ | $4.86^{d} \pm 1.17$ | $0.37^{g} \pm 0.05$ | $0.11^{bcd} \pm 0.02$ | $121.65^{g} \pm 7.50$ | $423.89^{bcde} \pm 36.45$ |
| | 80 | $415.34^{ab} \pm 62.53$ | $3.18^{c} \pm 0.37$ | $0.75^{h} \pm 0.10$ | $0.22^{e} \pm 0.02$ | $126.60^{g} \pm 3.40$ | $432.45^{cdef} \pm 27.39$ |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $322.96^{ab} \pm 99.04$ | $1.76^{b} \pm 0.26$ | $0.25^{e} \pm 0.06$ | $0.13^{cd} \pm 0.02$ | $105.51^{ef} \pm 5.22$ | $451.68^{ef} \pm 31.52$ |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $584.80^{a} \pm 107.75$ | $0.59^{a} \pm 0.03$ | $0.16^{cd} \pm 0.01$ | $0.11^{bcd} \pm 0.02$ | $107.27^{ef} \pm 2.88$ | $453.42^{ef} \pm 12.35$ |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $340.16^{ab} \pm 100.06$ | $0.53^{a} \pm 0.74$ | $0.18^{d} \pm 0.01$ | $0.12^{bcd} \pm 0.01$ | $109.19^{f} \pm 5.97$ | $459.84^{f} \pm 18.36$ |
| pretreated | 60 | $759.64^{abc} \pm 68.38$ | $0.67^{a} \pm 0.02$ | $0.08^{a} \pm 0.01$ | $0.07^{a} \pm 0.04$ | $54.65^{a} \pm 3.25$ | $392.74^{ab} \pm 24.35$ |
| | 70 | $692.01^{ab} \pm 153.28$ | $0.50^{a} \pm 0.14$ | $0.12^{abc} \pm 0.01$ | $0.09^{abc} \pm 0.01$ | $57.56^{ab} \pm 4.31$ | $396.8^{ab} \pm 27.89$ |
| | 80 | $1257.79^{cde} \pm 768.06$ | $3.17^{c} \pm 0.11$ | $0.29^{f} \pm 0.02$ | $0.30^{f} \pm 0.06$ | $91.23^{d} \pm 7.14$ | $380.69^{a} \pm 44.63$ |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $2406.21^{f} \pm 567.42$ | $0.56^{a} \pm 0.17$ | $0.13^{bc} \pm 0.02$ | $0.13^{d} \pm 0.01$ | $78.25^{c} \pm 4.58$ | $414.33^{abcd} \pm 24.16$ |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $1607.66^{e} \pm 727.20$ | $0.37^{a} \pm 0.03$ | $0.12^{abc} \pm 0.01$ | $0.10^{abcd} \pm 0.03$ | $64.88^{b} \pm 7.14$ | $398.15^{abc} \pm 8.13$ |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $1386.20^{de} \pm 230.43$ | $0.13^{a} \pm 0.07$ | $0.11^{ab} \pm 0.01$ | $0.08^{ab} \pm 0.01$ | $75.05^{c} \pm 5.41$ | $403.94^{abc} \pm 13.65$ |

หมายเหตุ a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

**ตารางที่ 14** สมบัติทางประสาทสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

| treatment | drying temperature | sensory properties | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | color | ordor | taste | texture | overall acceptance |
| untreated | 60 | $6.61^{abc}\pm1.48$ | $5.89^{ab}\pm1.42$ | $6.00^{bcde}\pm1.59$ | $6.30^{de}\pm1.64$ | $6.45^{de}\pm1.45$ |
| | 70 | $6.33^{bc}\pm1.42$ | $5.94^{ab}\pm1.52$ | $5.82^{abcd}\pm1.69$ | $5.05^{ab}\pm2.00$ | $5.84^{bc}\pm1.56$ |
| | 80 | $5.60^{a}\pm1.79$ | $5.77^{ab}\pm1.47$ | $5.25^{a}\pm1.95$ | $4.57^{a}\pm1.74$ | $5.25^{a}\pm1.68$ |
| | $80^{60}$ and $70^{615}$ | $6.48^{bcd}\pm1.59$ | $6.10^{b}\pm1.51$ | $5.87^{abdce}\pm1.81$ | $5.12^{ab}\pm1.92$ | $5.90^{bcd}\pm1.64$ |
| | $80^{90}$ and $70^{525}$ | $6.75^{cd}\pm1.54$ | $6.02^{ab}\pm1.41$ | $6.47^{e}\pm1.79$ | $6.80^{e}\pm1.79$ | $6.82^{e}\pm1.50$ |
| | $80^{120}$ and $70^{450}$ | $6.89^{d}\pm1.62$ | $6.13^{b}\pm1.57$ | $6.25^{cde}\pm1.85$ | $5.95^{d}\pm1.67$ | $6.39^{cde}\pm1.61$ |
| pretreated | 60 | $6.18^{b}\pm1.60$ | $6.06^{ab}\pm1.52$ | $6.18^{cde}\pm1.80$ | $6.14^{d}\pm1.91$ | $6.52^{e}\pm1.65$ |
| | 70 | $6.57^{bcd}\pm1.21$ | $6.01^{ab}\pm1.30$ | $6.06^{bcde}\pm1.76$ | $5.72^{cd}\pm1.73$ | $6.34^{bcde}\pm1.45$ |
| | 80 | $6.16^{b}\pm1.59$ | $5.54^{a}\pm1.53$ | $5.46^{ab}\pm1.72$ | $5.04^{ab}\pm1.97$ | $5.87^{bc}\pm1.61$ |
| | $80^{60}$ and $70^{525}$ | $6.18^{b}\pm1.54$ | $5.67^{ab}\pm1.64$ | $5.64^{abc}\pm1.76$ | $5.22^{bc}\pm1.77$ | $5.95^{bcd}\pm1.67$ |
| | $80^{90}$ and $70^{450}$ | $6.28^{bc}\pm1.42$ | $5.93^{ab}\pm1.59$ | $5.71^{abc}\pm1.97$ | $4.90^{ab}\pm1.98$ | $5.81^{b}\pm1.84$ |
| | $80^{120}$ and $70^{360}$ | $6.35^{bc}\pm1.52$ | $6.14^{b}\pm1.64$ | $6.43^{de}\pm1.62$ | $6.30^{de}\pm1.85$ | $6.81^{e}\pm1.49$ |

หมายเหตุ a,b,c,... ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

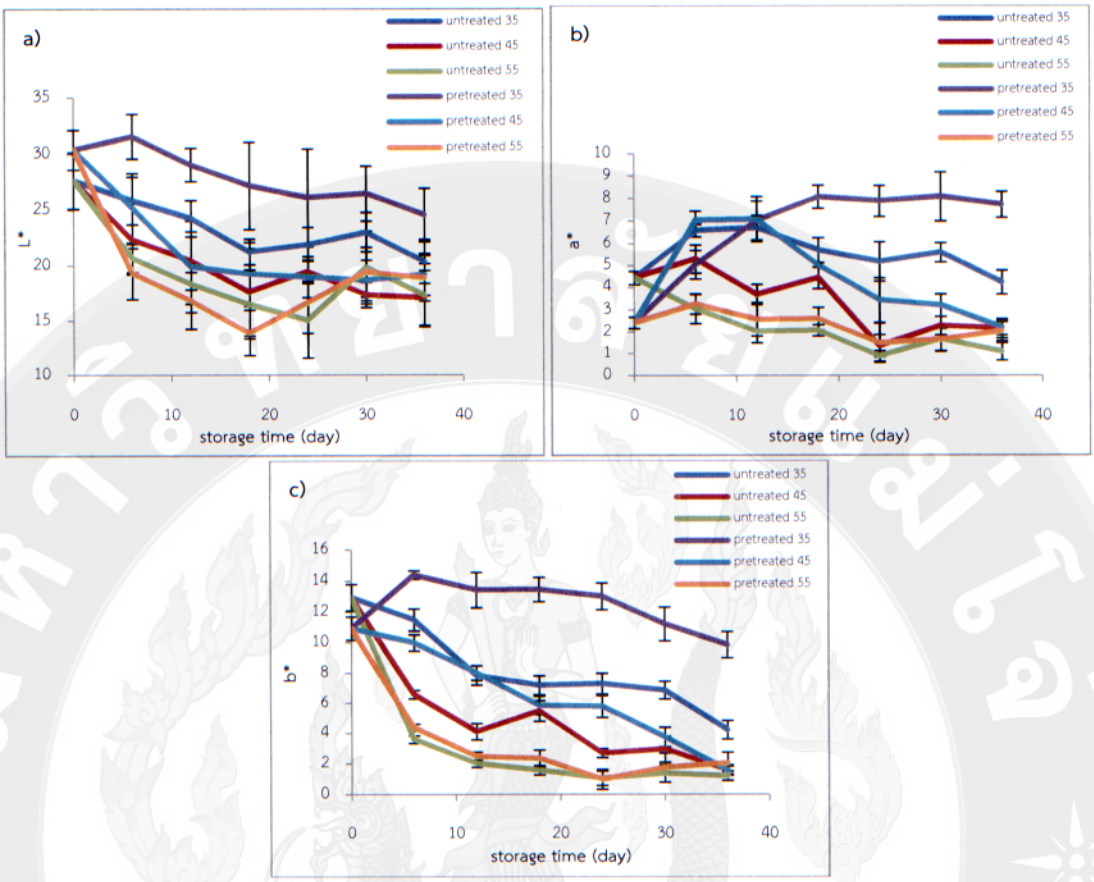
**3. ผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ**

จากการศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยเลือกสภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยที่เหมาะสมจากตอนที่ 2 จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังนี้

ค่าสี L* a* และ b* ของเนื้อลำไยอบแห้ง (ภาพที่ 10 (a-c)) พบว่ามีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงระยะเวลาในการเก็บรักษา อาจเป็นผลจากการลดลงของปริมาณ $SO_2$ ตกค้าง เนื่องจากสภาวะการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูง หรืออาหารได้สัมผัสกับออกซิเจนในอาหาร จึงให้สารประกอบซัลไฟต์สลายไปในรูปของ $SO_2$ หรือถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต ส่งผลให้ไม่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ ส่งผลให้ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล และปริมาณสารประกอบ HMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมตัวกัน (condensation) ของหมู่อะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซ์และพัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง (นิธิยา, 2545)

สำหรับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดช่วงระยะเวลาในการเก็บรักษา อาจเป็นผลจากการการสลายตัวของน้ำตาลซูโครสเป็นฟรุกโทสและกลูโคสในสภาวะที่มีความร้อนสูง (นิธิยา, 2545) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Cinqanta et al. (2002) ที่อบแห้งเนื้อลูกพลัมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอบลมร้อน ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที จากนั้นจึงหาปริมาณน้ำตาลโดยวิธี HPLC ซึ่งพบว่า เนื้อลูกพลัมภายหลังจากการอบแห้งมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อลูกพลัมสด

สำหรับค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสมีแนวโน้มลดลง ซึ่งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่า เนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีแนวโน้มลดลงช้ากว่าเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH และ FRAP (ภาพที่ 13 (a-c)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกลับการทดลองของ Rangkadilok et al. (2005) ได้รายงานว่า เนื้อลำไยอบแห้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นภายหลังจากการอบแห้งแบบทั้งผลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



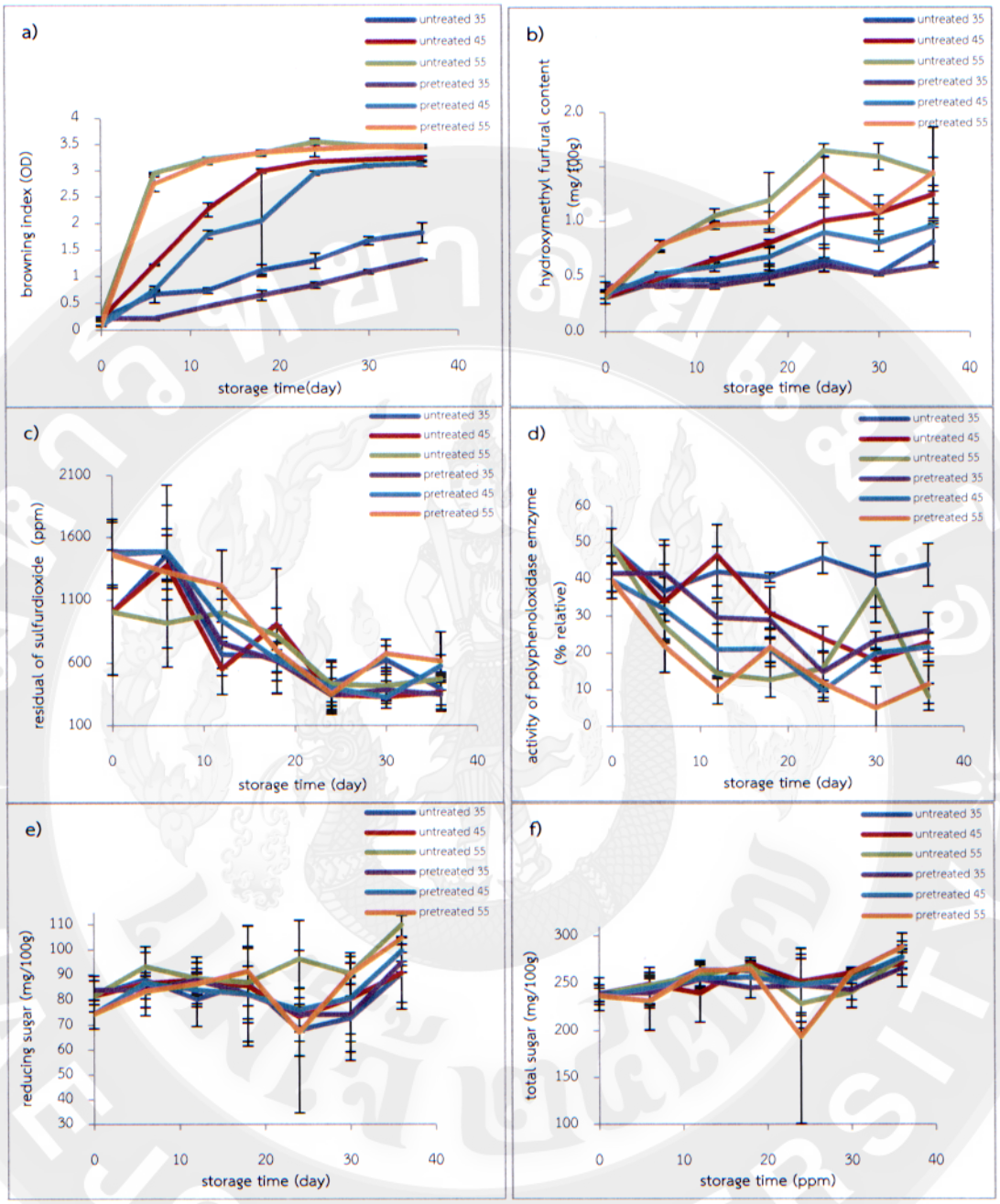

**ภาพที่ 10** ค่าสีของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ค่า L*

b) ค่า a*

c) ค่า b*

ค่ากิจกรรมของน้ำมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงระยะเวลาในการเก็บรักษา ยกเว้นเนื้อลำไยอบแห้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silveira et al. (1996) ที่ได้นำสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย KMS ร้อยละ 0.25 กรดซิตริก ร้อยละ 2 และสารละลายซูโครสร้อยละ 50 ที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 เดือน เมื่อวัดค่ากิจกรรมของน้ำพบว่า มีค่าคงที่เท่ากับ 0.7 จากผลการทดลอง (ภาพที่ 11 (a)) พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าค่ากิจกรรมของน้ำอยู่ในช่วง 0.41-0.60 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน (มกอช. 8-2549) กำหนด (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)




**ภาพที่ 11** การเกิดสีน้ำตาลของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ดัชนีการเกิดสีน้ำตาล

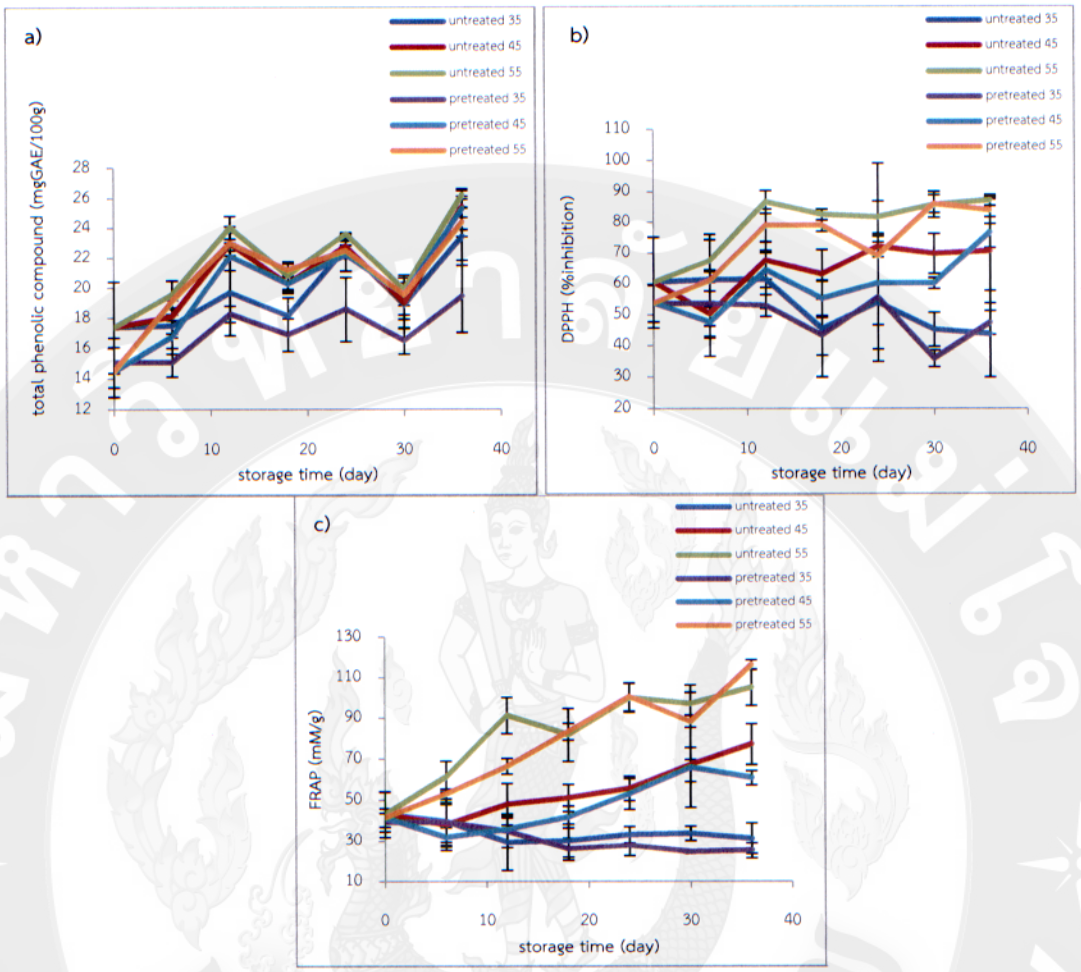
b) ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล

c) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง

d) ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

e) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

f) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด




**ภาพที่ 12** ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

b) ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH

c) ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันโดยวิธี FRAP

ปริมาณความชื้น (ภาพที่11 (b)) ของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยพบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 11.94±0.155 และ 9.32±0.40 ตามลำดับ ในขณะที่เนื้อลำไยอบแห้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยพบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีปริมาณความชื้นสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 19.38±2.56 การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในเนื้อลำไยอบแห้งอาจเป็นผลจากชนิดบรรจุภัณฑ์และสภาวะในการเก็บ

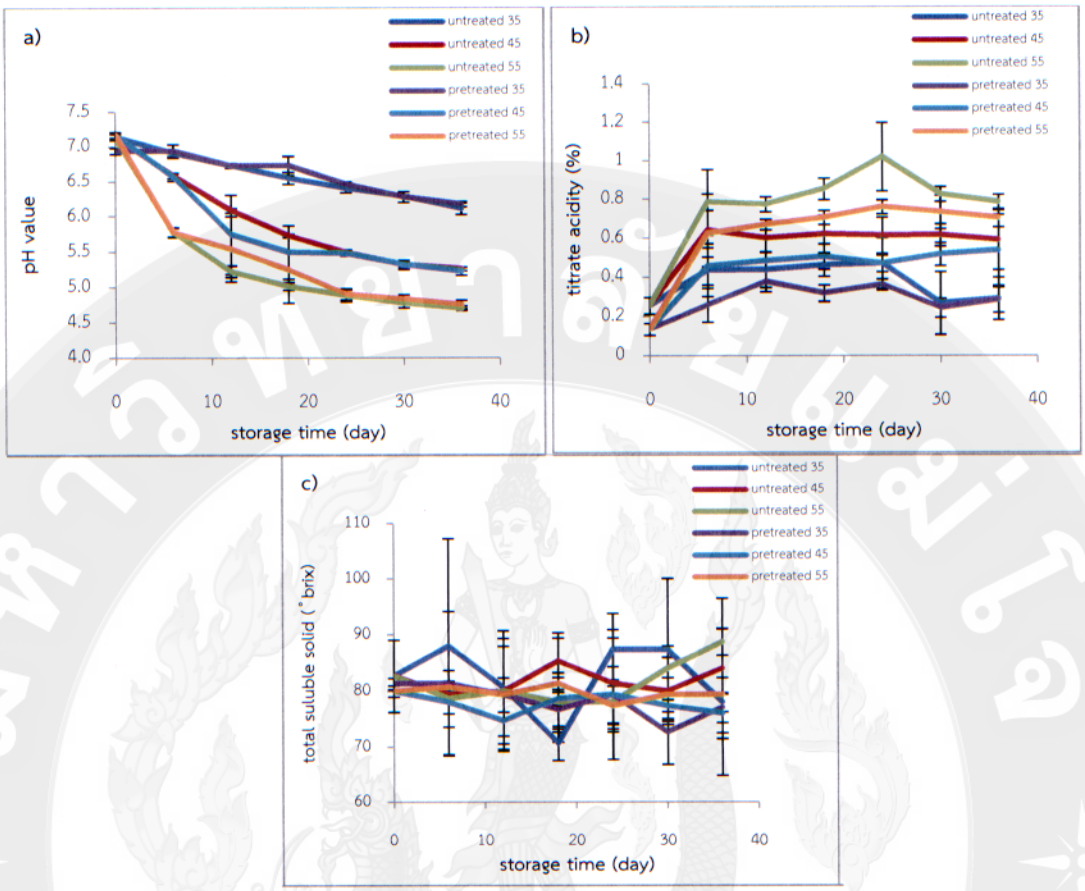
รักษาซึ่งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติสำหรับเนื้อลำไยสดอบแห้ง (มกอช. 8-2549) ได้กำหนดให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่ต่ำกว่า ร้อยละ 12 และไม่เกิน ร้อยละ 18 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่14 (a-b)) เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนน้ำตาลในเนื้อลำไยอบแห้งให้กลายเป็นกรดได้ และนอกจากนี้สารประกอบคาร์บอนิลยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอีกด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุรภา (2548) ได้รายงานว่า ปริมาณกรดทั้งหมดในเนื้อลำไยอบแห้งสีทองมีค่าร้อยละ 1.27 และมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น

ซึ่งค่ากิจกรรมของน้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ยีสต์และรา โดยซึ่งจุลินทรีย์ทุกชนิดจะสามารถเจริญได้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 หรือมีความเป็นกรดเล็กน้อย แต่ไม่สามารถเจริญได้ที่ค่ากิจกรรมของน้ำเท่ากับ 0.9 ซึ่งต่างจากยีสต์และราที่สามารถเจริญได้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4-6 หรือมีความเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 15 (a-b) ที่พบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง ต่างกับปริมาณยีสต์และราที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านสี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมจากภาพที่ 16 (a-e) พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มของคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านต่างๆ สูงกว่าที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส และพบว่าเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ได้รับคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองในตอนนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การเตรียมขั้นต้นสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงด้านสี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลและปริมาณสารประกอบ HMF ในเนื้อลำไยอบแห้งได้ แต่สำหรับการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่า เนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นได้รับคะแนนการยอมรับไม่แตกต่างกัน และสำหรับอุณหภูมิการเก็บรักษาเนื้อลำไยอบแห้งพบว่าการเก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส ยังคงได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค ซึ่งต่างจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงไม่ควรเก็บรักษาที่อุณหภูมิเกิน 35 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้เนื้อลำไยอบแห้งมีคุณภาพลดลง

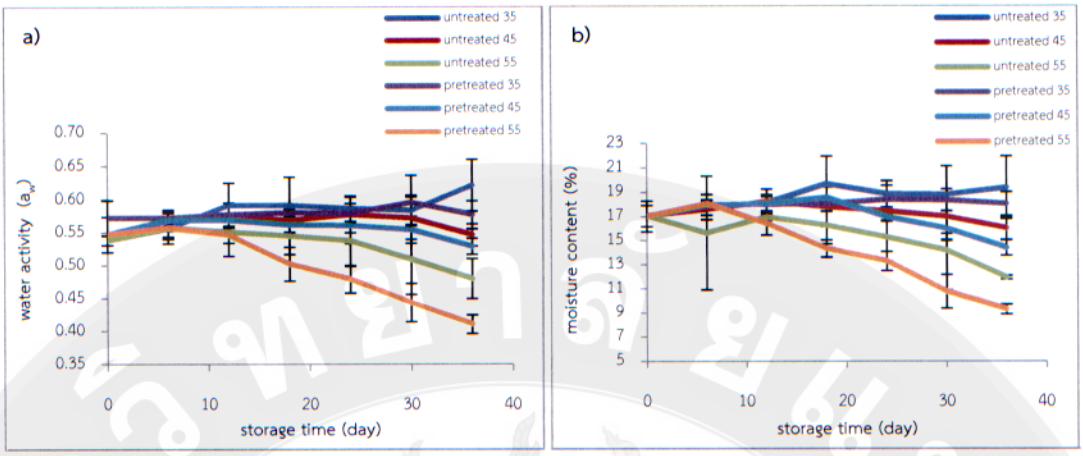



**ภาพที่ 13** สมบัติทางเคมีของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ค่าความเป็นกรด-ด่าง

b) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

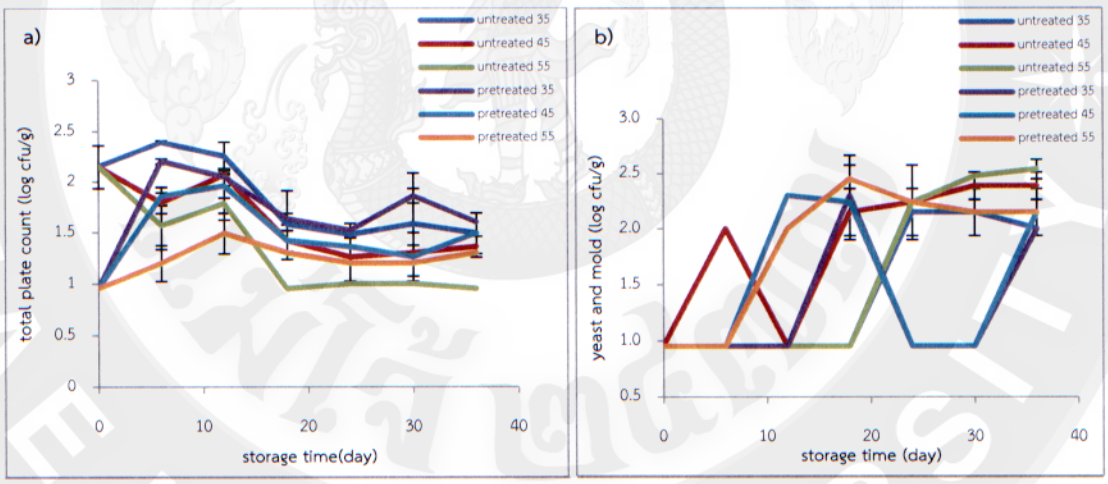
c) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้




**ภาพที่ 14** ค่ากิจกรรมของน้ำและปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ค่ากิจกรรมของน้ำ

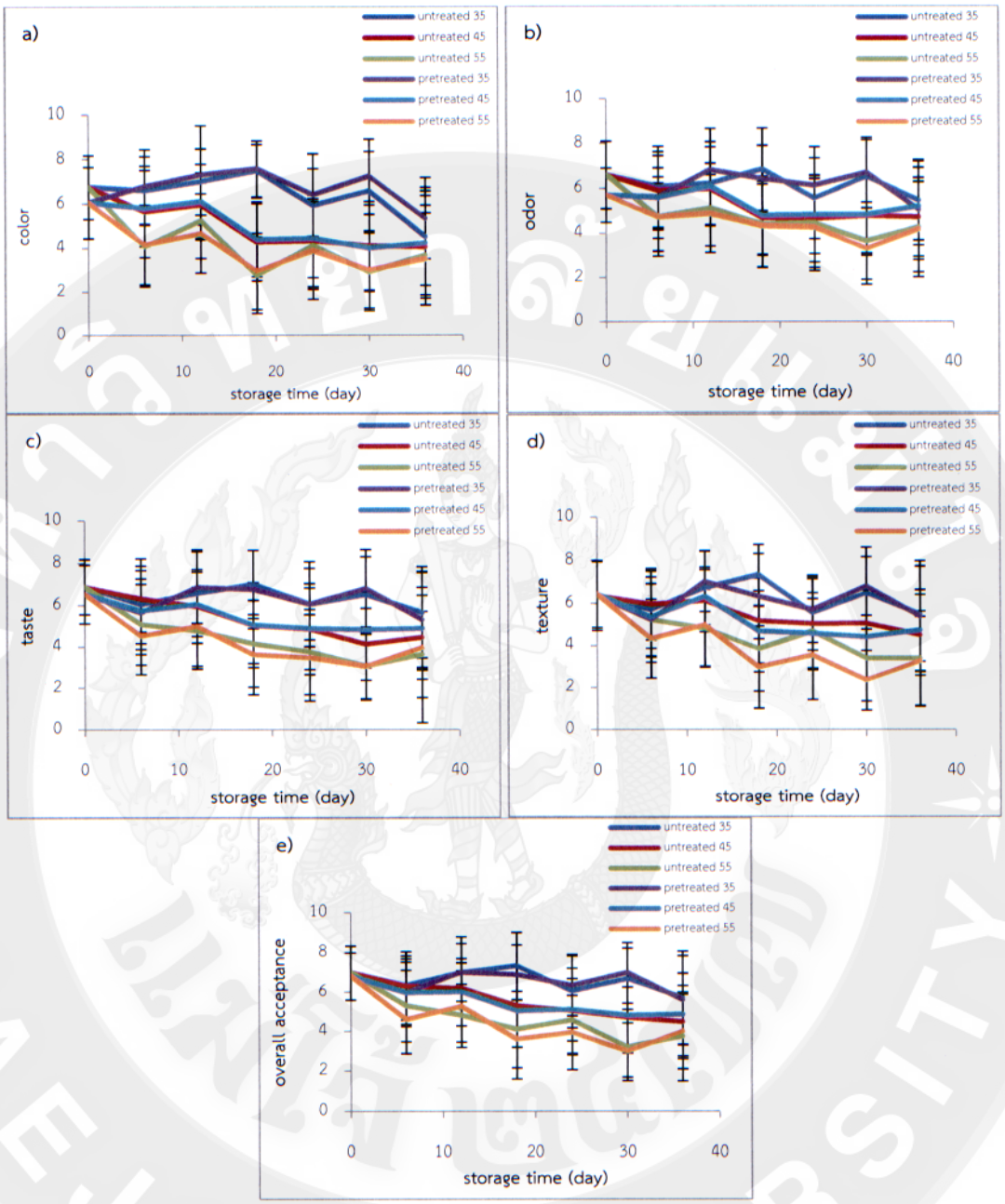
b) ปริมาณความชื้น




**ภาพที่ 15** ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์ และราของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

b) ปริมาณยีสต์และรา




**ภาพที่ 16** การยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยวิธี 9 point hedonic scale ของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

a) การยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสี

b) การยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น

c) การยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติ

d) การยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส

e) การยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวม

# บทที่ 5
# สรุปและข้อเสนอแนะ

## สรุป

1. สภาวะในการเตรียมขั้นต้นที่เหมาะสมในสำหรับเนื้อลำไยสด คือ การลวกเนื้อลำไยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และแช่ในสารละลายโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 1000 ppm นาน 5 นาที โดยเนื้อลำไยที่ได้จะมีค่า L* และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้สูงที่สุด ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลงร้อยละ 50 และค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลต่ำที่สุด

2. อุณหภูมิในการอบแห้งสำหรับเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยการอบแห้งแบบขั้นเดียวที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 930 720 และ 420 นาที ตามลำดับ และการอบแห้งแบบหลายขั้น ซึ่งกำหนดเวลาการอบแห้งของอุณหภูมิในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 3 ระดับ ได้แก่ 60 90 และ 120 นาที ตามด้วยอุณหภูมิช่วงที่สองที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 615 525 และ 450 นาที ตามลำดับและอุณหภูมิในการอบแห้งสำหรับเนื้อลำไยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นโดยการอบแห้งแบบขั้นเดียวได้แก่ 60 70 และ 80 องศา ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 750 630 และ 390 นาที ตามลำดับ ซึ่งกำหนดเวลาการอบแห้งของอุณหภูมิในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 3 ระดับ ได้แก่ 60 90 และ 120 นาที ตามด้วยอุณหภูมิช่วงที่สองที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 525 450 และ 360 นาที ตามลำดับ

3. เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นได้เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลอง Page โดยให้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2$) สูงที่สุด ค่า chi-square ($X^2$) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*RMSE*) ต่ำที่สุด

4. การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้นส่งผลที่ดีต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของเนื้อลำไยอบแห้งได้ดีกว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิแบบขั้นเดียว โดยเฉพาะค่าสีของเนื้อลำไย ค่าติดตามการเกิดสีน้ำตาลหรือสีคล้ำต่างๆ ได้แก่ ค่ากิจกรรมเอนไซม์ PPO ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล และได้รับคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส 360 นาที และ 80 องศาเซลเซียส 120 นาที ตามด้วย 70 องศาเซลเซียส 450 นาที เป็นอุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับเนื้อลำไยที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ตามลำดับ

5. เมื่อเก็บรักษาที่ 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 36 วัน เนื้อลำไยอบแห้งมีแนวโน้มของการเกิดสีน้ำตาลหรือสีคล้ำเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เนื้อลำไยอบแห้งที่เก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียสยังคงได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค

## ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการอบแห้งโดยการใช้อุณหภูมิแบบหลายขั้น ควรศึกษาระยะเวลาการอบแห้งในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสในช่วงกว้างกว่านี้
2. ควรศึกษาวิธีการลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลนอกเหนือจากการใช้สารเคมี
3. ควรศึกษาวิธีการลดการเกิดสีน้ำตาล หรือสีคล้ำของลำไยอบแห้งสีทอง ในระหว่างการเก็บรักษา

# บรรณานุกรม


กรมการค้าภายใน. 2539. **ทิศทางการส่งเสริมการตลาดลำไย**. เอกสารประกอบการสัมมนา 30 กันยายน. ลำพูน: กรมการค้าภายใน.

จินตนา กิจเจริญวงศ์ และ ยุพเรศ เอื้อตรงจิตต์. 2558. การประเมินการได้รับสัมผัสของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการบริโภคผักและผลไม้แห้งนำเข้าจากต่างประเทศของคนไทย พ.ศ. 2548-2557. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์**, 57(1), 58-68.

จริงแท้ ศิริพานิช. 2541. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จำเนียร ทองพันชั่ง. 2546. **ความรู้เกี่ยวกับการปลูกลำไย**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เกษตรสาส์น.

ชลิดา เนียมนุ้ย, จิตวัต ศิวาวุธ และ รพีพัฒน์ กะดีแดง. 2555. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกในบัวบก *Centellaasiatica* (Linn.) ระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อน. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 43(3), 208-211.

ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**, 35(2), 269-283.

ณัฐพงษ์ กีพงษ์. 2553. **ผลกระทบของการลวกด้วยน้ำร้อนต่ออัตราการอบแห้ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 22(1), 37-47.

ดำรง สุภามูล. 2541. **การถนอมผลผลิตลำไยโดยการอบแห้งของเกษตรกรในเขตกิ่งอำเภอดอยหล่อจังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทรงสิริ ศิริสัมพันธ์, นฤพร หรรษาคณามัย, วิลาวรรณ ไชยบุตร, สุกัญญา ไชยโพธิ์ และ หทัยรันต์ โชคทวีพาณิชย์. 2539. **ลำไยอบแห้ง: รายงานวิชาการเครื่องกลเกษตร**. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทองวัน ปัญญาแก้ว. 2541. **เทคโนโลยีการอบแห้งลำไยและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของสมาชิกกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรอำเภอป่าซางจังหวัดลำพูน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, และฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2556. แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. น. 445-452. ใน **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติครั้งที่ 16**. 1-4 เมษายน 2556. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

นิพัฒน์ สุขวิบูลย์. ม.ป.ป. **ประวัติความสำคัญในลำไย**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ดอกเบี้ย.

นิรุธ ล้ำเลิศ. 2553. **การอบแห้งลำไย: ไคเนติกส์ของการอบแห้ง และสมรรถนะของเครื่องอบแห้งลำไย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เนาวนิตย์ โพธิ์ศรี, พิมลพรรณ คงบุตร, เกียรศักดิ์ อุตตมะติง และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2556. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและสีของในสะระแหน่ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน. **ว.มทรส.,** 1(2), 103-114.

เบ็ญจวรรณ ชุติชุเดช และ นาวิน ถาน้อย. 2539. การพัฒนาการอบแห้งเนื้อลำไย. **วารสารวลัยรุกขเวช**, 1(1), 53-59.

เบ็ญจวรรณ ชุติชุเดช และ ประสิทธิ์ ชุติชุเดช. 2541. การพัฒนาการอบแห้งเนื้อลำไย. ใน **รายงานการวิจัยภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร**. มหาสารคาม: คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ปองพล สุริยะกันธร, ประพันธ์ จิโน และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2556. ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจาลองการอบแห้งเก๊กฮวย. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 20(2), 43-51.

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. **พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

พรพิมล เทพบรรทม และ สิริมา ชินสาร. 2550. ผลของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนต่อคุณภาพของใบมะกรูดและตะไคร้. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.,** 38(6), 135-138.

พาวิน มะโนชัย. 2543. **ลำไย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: สิรินาฏการพิมพ์.

เมย์ สุรจิตตาภรณ์. 2552. **การป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งสีทองระหว่างการเก็บรักษา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ไมตรี เยาวรัตน์ และ วิจิตร เจริญธง. 2547. การแปรรูปลำไยให้ได้คุณภาพ. **วารสารเพื่อการพัฒนาชนบทธ.ก.ส.,** 4(4), 93-99.

รัตนา อัตตปัญโญ, กมลงาม สมสุขม, อนุสนธิ์ อัตตปัญโญ, ศรัณย์ อารยสกษฎ์ และ เยาวเรศ เชาวนพูนผล. 2541. **รายงานฉบับสมบูรณ์: อุตสาหกรรมแปรรูปลำไย.** เชียงใหม่: ภาควิชาเศรษฐศาสตร์การเกษตร คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่:

เรียวโซ, เทโอ. 2525. **อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม.** แปลโดย วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

รุ่งทิพย์ วงศ์ต่อม. 2549. **การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในกระบวนการอบแห้งลำไย *(Euphoria longana Lam.)* แบบทั้งผล.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วิชมณี ยืนยงพุทธกาล. 2556. ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 18(1), 226-233.

วิไล รังสาดทอง. 2545. **เทคโนโลยีแปรรูปอาหาร.** กรุงเทพฯ: เท็กซ์แอนด์เจอร์นัลพับลิเคชัน.

วิไล เสือดี. 2541. **กระบวนการอบแห้งและการส่งออกลำไยอบแห้งของจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดลำพูน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศิวพร ศิวเวช. 2535. **วัตถุเจือปนอาหารในผลิตภัณฑ์อาหาร.** กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.** พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุเนตร สืบค้า และ ฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรุน. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 17(1), 59-66.

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, สลิลลา ชาญเชี่ยว และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล. 2556. การอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตใบบัวบกแห้งชงดื่มด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด: จลนพลศาสตร์ความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพ. **วารสารวิจัย มข.**, 18(2): 311-324.

สุรภา จิระสันติกุล. 2548. **ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผลิตในจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2547. **ประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่อง ข้อกำหนดการใช้วัตถุเจือปนอาหาร.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/0E/00153091.PDF (9 กรกฎาคม 2559).

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2559. **สถิติการส่งออกลำไยสดและลำไยอบแห้ง.** [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/fruit_report/export_import/export_result.php (15 กรกฎาคม 2559).

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2549. **เนื้อลำไยสดอบแห้ง**. (มกอช. 8-2549). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ.

อีหลีหย๊ะ สนิโซม, ฟามีรา สุอุดี และ รัชดาภรณ์ ฮานาฟี. 2555. สภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม. **วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา**, 7(2), 105-114.

อรรณพ ทัศนอุดม และ วรรณภา สระพินครบุรี. 2550. **การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะด้านสีในผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้ง: รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์**. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเขตพื้นที่พิษณุโลก.

อุดมเกียรติ พรรธนประเทศ และ รัชนี สวางคพันธ์. 2532. บทบาทและปฏิกิริยาของสารซัลไฟต์ในอาหาร. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์**, 31(1), 63-71.

Abano, E.E., Ma, H., Qu, W. 2011. Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices, **Journal of Food Process Technol**, 2(5), 1-9.

AOAC. 2000. **Association of Official Analytical Chemistry**. Washington D.C.: Association of official chemistry.

_____. 2005. **Official method of Analysis**. 18th ed. Washington DC.: Association of Officiating Analytical Chemists.

Assawarachan, R & Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum microwave concentration behavior of pineapple juice. **Journal of Food Process Engineering**, 34(5), 1,485-1,505.

Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka, N. & Amornlerdpison, D. 2013. Effect of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of spirogyra sp. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, 11(1), 15-18.

Baloch, A. K., Buckle, K. A. & Edwards, R. A. 1973. Measurement of non enzymicbrowningof dehydrated carrot. **Journal of Food Science and Food Agricultural**, 24, 389-398.

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of ''antioxidant power'': The FRAP assay. **Analytical Biochemistry**, 239, 70–76.

Crank, J. 1995. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd ed. Oxford, England: Oxford University Press.

Cerniševv, S. 2010. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato.**Journal of Food Engineering**, 96, 114–118.

Cheftel, J. C. 1992. Effect of high hydrostatic pressure on food consituents: overview. p. 195-209. In C. Balny, R. Hayashi, K. Heremans & P. Masson (Eds.). **High Pressure and Biotech**. London: John LibbeyEurotext.

Chutintrasri, B. & Noomhorm, A. 2006. Thermal inactivation of polyphenoloxidase in pineapple puree. **LWT.**, 39: 492-495.

Cinquanta, L., Matteo, M.D. & Esti, M. 2002. Physical pretreatment of plums (*Prunusdomestica*). Part 2. Effect on The Quality Characteristics of Different Prune Cultivars. **Food Chemistry**, 79, 233-238.

Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundeliatournefortii* L. **Food and Bioproducts Processing**, 90, 323-332.

Fennema, O. R. 1996. **Food Chemistry**. 3rd ed. New York: Marcel Dekker.

Rattanathanalerk, M. Chiewchan, N. & Srichumpoung, W. 2005. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. **Journal of Food Engineering**, 66, 259-265.

Fellows, P. 2000. **Food Processing Technology**. 2nd ed. New York: Woodhead Publishing Limited.

Flurkey, W. H. & Jen, J. J. 1978. Peroxidase and polyphenol oxidase activities indeveloping peaches. **Journal of Food Science**, 4, 1826-1828.

Galeazzi, M.A.M. & Sgarbieri, V.C. 1981. Substrate specificity and inhibition of polyphenol oxidase (PPO) from a dwarf variety of banana (*Musa cavendishii* L.). **Journal of Food Science**, 46, 1404-1406.

Limpaiboon, K. 2011. Effects of temperature and slice thickness on drying kinetics of pumpkin slices. **Walailak J. Sci. & tech**, 8(2), 159-166.

James, C. S. 1995. **Analytical chemistry of foods**. Glasgow UK: Chapman and Hall. (มีในภาคผนวกค่ะตรงวิธีวิเคราะห์ ข้อ 5)

Janjai, S., Precoppe, M., Lamlert, N., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M. & Muller, J. 2011. Thin-layer Drying of litchi (Litchi chinensisSonn.). **Food and Bioproducts Processing**, 89,194-201.

Jino, P. & Assawarachan, R. 2015. Comparative study of color retention of dried stivia leaves (Stevia rebaudianaBertoni) by single-stage drying and multi-stage drying. **Journal Food Science and Agriculture Technology**, 1(1), 83-88.

Kim, D. M., Smit, N. L. & Lee, C. Y. 1993. Quality of minimally processed apple sliced from selected cultivars. **Journal of Food Science**, 58(5), 1115-1117.

Kingly, A. R. P. & Singh, D. B. 2007. Drying Kinetics of Pomegranate Arils. **Journal of Food Engineering**, 79, 741-744.

Kudra, T. & Mujumdar, A.S. 2009. **Advanced Drying Technology**. 2nd. N.P.: CRC Press Taylor & Francis Group.

Kumar, V. B., Mohan, T. C. & Murugan, K. 2008. Purification and kinetic characterization of polyphenol oxidase from Barbados cherry (malpighiaglabra L.). **Food Chemistry**, 110, 328-333.

Li, H. Y. & Li, C. F. 1999. The early high quality and high production techniques for longan trees. **South China fruits**, 28, 30-33.

Masson, P. 1992. Pressure denaturation of protein. p. 89-99. In C. Balny, R. Hayashi, K. Heremans& P. Masson (Eds.). **High Pressure Technol**. London: John Libbey Eurotext.

McMinn, W. A. M. 2006. **Design and Analysis of Experiments**. New York: John Wiley & Son Asia.

Menzel, C. M. & Waite, G. K. 2005. **Litchi and Longan: Botany, production and uses**. Trowbridge: Cromwell Press.

Ozkan, M., Kirca, A. & Cemeroglu, B. 2002. Effect of Moisture Content on CIE Color Value in Dried Apricots. **European Food Research and Technology**, 216, 217-219.

Paull, R. E. & Chan, N.J. 1987. Change in longan and rambutan during postharvest Storage. **Hort Science**, 22(6), 1303-1304.

Pongtong, K., Assawarachan, R. &Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum drying characteristic of pomegranate aril. **Journal of Food Science and Engineering**, 1(1), 11-19.

Rangkadilok, N., Sitthimonchai, S., Worasuttayangkurn, L., Mahidol, C., Ruchirawat, M. and Satayavivad, J. 2005. Evaluation of free radical scavenging and antityrosinaseactivities of standardized longan fruit extract. **Food and Chemical Toxicology**, 45, 328-336.

Sapers, G. M. 1993. Browning of foods: Control by sulfites, antioxidants and other means. **Food Technology**, 47(10), 75-84.

Silveira, E.T.F., Rahman, M.S. & Buckle, K.A. 1996. Osmotic dehydration of pineapple: kinetic and product quality. **Food Research International**, 29(3-4), 227-223.

Simpson, B. K., Nollet, L. M.L., Toldrá, F., Benjakul, S., Paliyath, G. & Hui, Y.H. 2012. **Food Biochemistry and Food Processing**. 2nd ed. N.P.: Blackwell.

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology Viticulture**, 16, 144–158.

Soong, Y. Y. & Barlow, P. J. 2004. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. **Food Chemistry**, 88, 411-417.

Valle, J. M., Aranguiz, V. & Leon, H. 1998. Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. **Food Research International**, 31(8), 557-569.

Walisezewski, K. N., Marquez, O. & Pardio, V. T. 2009. Quantification and characterization of polyphenol oxidase from vanilla bean. **Food Chemistry**, 117, 196-203.

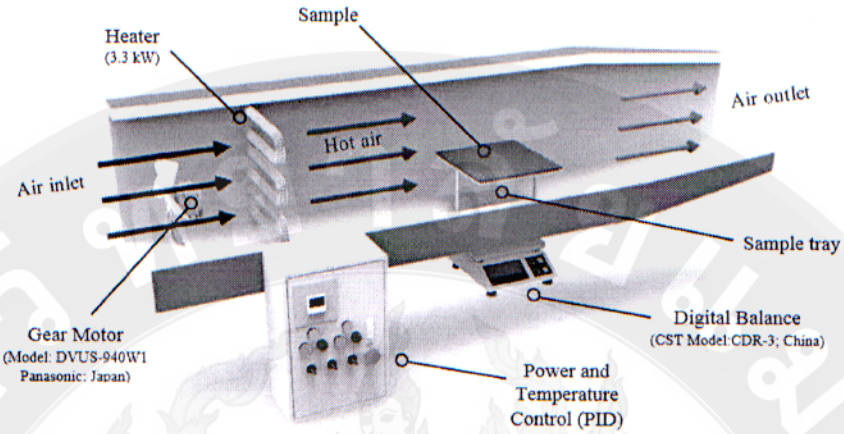
Zhang, A., Fang, Y., Wang, H., Li, H., & Zhang, Z. 2011. Free-Radical Scavenging Properties and Reducing Power of Grape Cane Extracts From 11 Selected Grape Cultivars Widely Grown in China. **Molecules**, 16, 10104-10122.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

# ภาพและข้อมูลประกอบการวิจัย

## ภาพประกอบงานวิจัย




**ภาพผนวกที่ 1** เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่ถูกออกแบบและสร้างโดย สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่ถูกออกแบบและสร้างโดย สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จานวน 3 ขดและพัดลมซึ่งถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (DVUS- 940W1, Panasonic Corp., Japan) ระบบควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan) ถาดสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตราชั่ง (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของเนื้อลำไยและบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

# ภาคผนวก ข

# การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

**1. การวัดสีระบบ CIE Lab**

เป็นการวัดค่าสี L*, ค่าสี a* และค่าสี b* ของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter, Hunter Lab ก่อนการวัดสีทุกครั้งต้องทำการปรับมาตรฐานเครื่อง (calibration) โดยใช้แผ่นสีมาตรฐานแล้วจึงวัดสีของผลิตภัณฑ์ บันทึกค่าที่ได้จากจอแสดงผล ซึ่งค่าสีที่แสดงในระบบ CIE Lab ประกอบด้วย

1. ค่า L*เป็นค่าความสว่างของสี (lightness) มีค่าอยู่ในช่วง 0 คือสีดำ ถึง 100 คือสีขาว
2. ค่า a* เป็นค่าสีแดงและสีเขียว(redness/greenness) โดยค่าบวกแสดงถึงความเป็นสีแดง และค่าลบแสดงถึงความเป็นสีเขียว
3. ค่า b* เป็นค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (yellowness/blueness)โดยค่าบวกแสดงถึงความเป็นสีเหลือง และค่าลบแสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน

**2. ค่ากิจกรรมของน้ำ ($a_w$)**

ใช้เครื่องวัดค่ากิจรรมของน้ำ เปิดเครื่องก่อนใช้งานประมาณ 30 นาที บรรจุตัวอย่างเนื้อลำไยลงในถ้วยวัด นำไปวางในช่องใส่ตัวอย่าง ทำการวัดค่ากิจกรรมของน้ำ บันทึกค่าที่อ่านได้จากจอแสดงผล

# ภาคผนวก ค

# การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

1. **ความชื้น** (AOAC, 2005)

นำกระป๋องอะลูมิเนียมไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก ($W_1$) ชั่งตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ใส่ลงใน กระป๋องอะลูมิเนียมที่อบและชั่งน้ำหนักไว้เรียบร้อยแล้ว ($W_2$) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก นำไปอบซ้ำจนได้น้ำหนักคงที่ ($W_3$) คำนวณหาปริมาณความชื้นและปริมาณของแข็งทั้งหมดจากสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(W_2 - W_1)}{W_s} \times 100$$

2. **ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้** (AOAC, 2000)

**สารเคมี**

1. ฟีนอฟทาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$) ความเข้มข้นร้อยละ 1
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 นอร์มอล
3. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($KHC_8H_4O_4$) 0.1 นอร์มอล

**วิธีการวิเคราะห์**

ชั่งตัวอย่างประมาณ 2กรัม ใส่ลงขวดรูปชมพู่ เจือจางตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 20 เท่า กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ปิเปตสารละลายส่วนใส 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอฟทาลีน 2-3 หยด เขย่าให้เข้ากัน นำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 0.1 โมลาร์ เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารที่เตรียมได้) จนถึงจุดยุติเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต จากนั้นคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก จากสมการ

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก(\%)} = \frac{\text{ปริมาตรของ}NaOH \times 0.7 \times dilution factor}{1000} \times 100$$

3. **ความเป็นกรด-ด่าง (pH)**

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (ซึ่งได้ปรับค่ามาตรฐานด้วยสารละลายมาตรฐานที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.00 และ 7.00 ตามลำดับ

ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยใช้ electrode ของเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง จุ่มลงไปในตัวอย่าง อ่านค่าจากจอแสดงผล

**4. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid)**

วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้โดยใช้hand refractometer (Atago, Japan) ปรับค่ามาตรฐานโดยใช้น้ำกลั่นแล้วปรับขีดบอกจำนวนบริกซ์ให้อยู่ที่ 0 องศาบริกซ์ หยดตัวอย่างลงที่ปริซึมของ hand refractometer ปิดฝา อ่านค่าที่ได้แล้วบันทึกผล

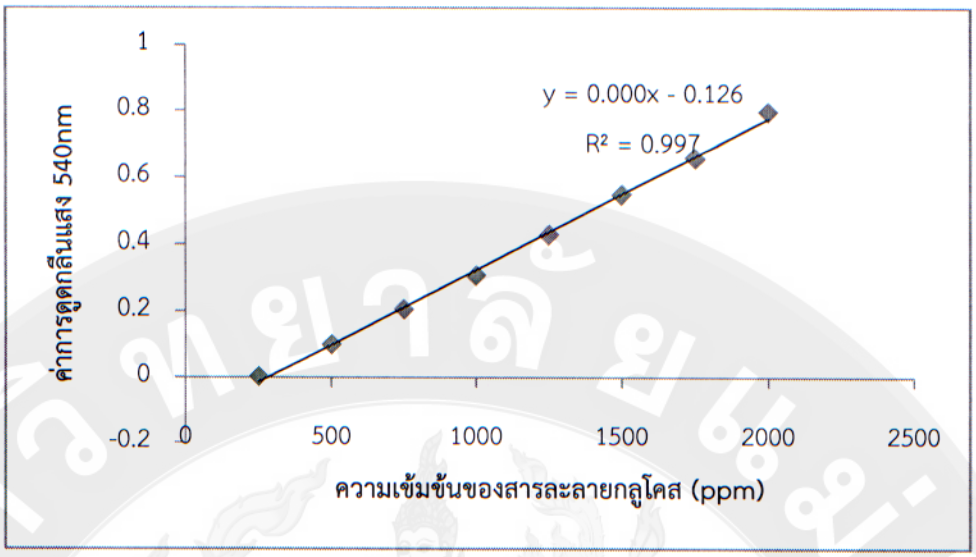
**5. ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด (reducing sugars and total sugars)** (ดัดแปลงจาก James, 1995)

**สารเคมี**

1. น้ำตาลกลูโคส
2. กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ10
4. DNS (3, 5-Dinitrosalicylic acid) reagent เตรียมโดยชั่ง DNS 1 กรัม นำมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์จำนวน20 มิลลิลิตร โดยต้องอุ่นและคนตลอดเวลา จากนั้นชั่งโซเดียมโปแตสเซียมทาร์เทรท 30 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำสารละลายทั้งหมดที่เตรียมไว้ผสมเข้าด้วยกัน แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100มิลลิลิตร จากนั้นเก็บในขวดสีชา

**การเตรียมกราฟมาตรฐาน**

เตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 0100 250 500 750 100 1250 1500 1750 และ 2000 ppm ปิเปตสารละลายกลูโคสมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ0.2 มิลลิลิตร เติม DNS reagent 2 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 5.8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่100องศาเซลเซียส เป็นเวลา5 นาที ทำให้เย็นทันที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank นำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน




**ภาพผนวกที่ 2** กราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส

**วิธีการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์**

ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่ใน flask เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรจากนั้นปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 0.2 มิลลิลิตร เติม DNS reagent 2 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา5 นาที ทำให้เย็นทันที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรนำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐาน (ภาพผนวกที่ 2) รายงานหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

**วิธีการวิเคราะห์น้ำตาลทั้งหมด**

ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตรนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา20 นาทีแล้วจุ่มลงในน้ำเย็นทันทีเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ10จำนวน 12 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 0.2 มิลลิลิตร เติม DNS Reagent 2 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5.8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็นแล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรนำค่าที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐาน (ภาพผนวกที่ 2) รายงานหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

**6. ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (browning index)** (ดัดแปลงจาก Baloch et al., 1973)

**สารเคมี**

1. กรดอะซิติกร้อยละ 2

**วิธีการวิเคราะห์**

ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม เติมกรดอะซิติกร้อยละ 2 จำนวน 20 มิลลิลิตร ผสมทิ้งไว้ 10 นาที นำมาปั่น 30 วินาที แล้วจึงนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

**7. สารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล (HMF)** (ดัดแปลงจาก Rattanathanalerk et al., 2005)

**สารเคมี**

1. กรดไทคลอโรบาร์บิทูริค ความเข้นข้น 0.025 โมลาร์
2. กรดไตรคลอโรแอซิติค ความเข้มข้นร้อยละ 12
3. เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 95
4. ไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล

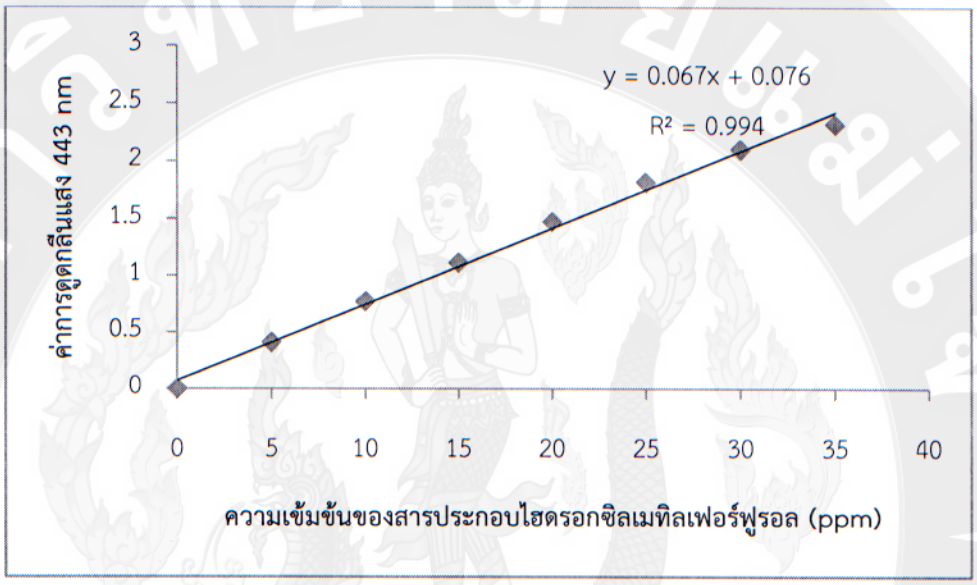
**การเตรียมกราฟมาตรฐาน**

เตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 ppm ปิเปตสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ 2 มิลลิลิตร เติม กรดไตรคลอโรแอซิติค ความเข้มข้นร้อยละ 12จำนวน 2 มิลลิลิตรและกรดไทคลอโรบาร์บิทูริค ความเข้นข้น 0.025 โมลาร์จำนวน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที แล้วทำให้เย็นทันที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 443นาโนเมตร โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ 2 มิลลิลิตร เติม กรดไตรคลอโรแอซิติค ความเข้มข้นร้อยละ 12 จำนวน 4 มิลลิลิตร เป็น blank นำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

**วิธีการวิเคราะห์**

ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม เติมเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 95 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน 1 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 9000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 40 นาที นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ปิเปตสารละลาย ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ 2 มิลลิลิตร เติม กรดไตรคลอโรแอซิติค

ความเข้มข้นร้อยละ 12 2 มิลลิลิตร และกรดไทคลอโรบาร์บิทูริค ความเข้นข้น 0.025 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที แล้วจุ่มลงในน้ำเย็นทันที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 443 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายจำนวน 2 มิลลิลิตร เติม กรดไตรคลอโรแอซิติค ความเข้มข้นร้อยละ 12 จำนวน 4 มิลลิลิตร เป็น blank นำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน (ภาพผนวกที่ 3)




**ภาพผนวกที่ 3** กราฟมาตรฐานของสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล

8. **ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง** (ดัดแปลงจาก จินตนา และ ยุพเรศ, 2558)

**สารเคมี**

1. เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 95
2. กรดฟอสฟอริคความเข้มข้นร้อยละ25
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซต์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.3
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01นอร์มอล
5. อินดิเคเตอร์เมทิลเรด-เมทิลีนบลู

**วิธีวิเคราะห์**

1. ชั่งตัวอย่าง 3 กรัม ในขวดก้นกลมเติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตรเติมเอทานอล 2 มิลลิลิตรเติมกรดฟอสฟอริคความเข้มข้นร้อยละ 25 20 มิลลิลิตรต่อเข้าชุดกลั่นทันทีซึ่งชุดกลั่นต้องเตรียมขวดรูป

ลูกแพร์ที่มีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.3 20 มิลลิลิตรเติมอินดิเคเตอร์-เมทิลเรดเมทิลีนบลู 2-3 หยด สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง และหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอลจนได้สารละลายสีเขียวสำหรับดักเก็บไอสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2. เริ่มกลั่นโดยใช้ความร้อนผ่านก๊าซไนโตรเจนปรับอัตราการไหล 1 ฟองปุดต่อ 1 วินาทีและกลั่นต่อเป็นเวลา 45 นาทีหลังจากสารละลายเริ่มเดือด

3. นำสารละลายที่ได้ที่มีการเปลี่ยนเป็นสีม่วงไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้วจึงนำปริมาตรที่ไทเทรตได้ไปคำนวณหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในตัวอย่าง

**9. ค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส**

**9.1 การสกัดเอนไซม์** (ดัดแปลงจาก Flurkey and Jen, 1978)

**สารเคมี**

1. โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($NaH_2PO_4$) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์
2. ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์
3. ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 โดยเติมโซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ลงในไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟตความเข้มข้น 0.05 M คนตลอดเวลาจนได้ pH 6.2
4. โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์

**การเตรียมสารสกัดเอนไซม์**

โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 กับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ปริมาตร 5 มิลลิลิตรผสมกับโซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตรนำไปแช่เย็นไว้

**วิธีการสกัดเอนไซม์**

ชั่งตัวอย่างที่ปั่นจนละเอียด 20 กรัมผสมกับโซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ pH 6.2 กับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่ผ่านการแช่เย็นมาแล้วปริมาตร50 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 30 นาทีรินเอาส่วนใสไปเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยง หนีศูนย์กลางความเร็ว 4600 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ4องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีนำส่วนใสที่สกัดได้ไปวัดกิจกรรม

**9.2 กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส** (ดัดแปลงจาก Flurkey and Jen, 1978)

**สารเคมี**

1. โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($NaH_2PO_4$) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
2. ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
3. ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ pH 7.0

โดยเติมโซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ลงในไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์คนตลอดเวลาจนได้pH 7

4. แคตาคอล ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์โดยใช้โซเดียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอ์ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ pH 7.0 ปรับปริมาตร (เตรียมตอนจะวัดกิจกรรมของเอนไซม์)

**วิธีการวิเคราะห์**

ปิเปตสารละลายเอนไซม์ที่สกัดได้ 0.2 มิลลิลิตรเติมสารละลายสับสเตรตคือแคตาคอล ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ pH 7.0 ปริมาตร 4.0 มิลลิลิตรนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตรอ่านค่าทุก 30 วินาทีเป็นเวลา 2 นาทีนำค่าที่วัดได้ไปเขียนกราฟระหว่างระยะเวลากับค่าการดูดกลืนแสงวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวอย่างในช่วงของเส้นกราฟที่มีความชันเป็นเส้นตรงโดยกำหนดให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส 1 หน่วยเท่ากับปริมาณเอนไซม์ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตรเพิ่มขึ้น 0.001 หน่วยในเวลา 1 นาทีที่ค่าpH 7.0 แล้วคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสเป็น % relative โดยกำหนดให้ blank คือสารละลายเอนไซม์ที่สกัดได้ 0.2 มิลลิลิตรและเติม ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 M pH 7.0 ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร

**10. การสกัดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน** (ดัดแปลงจาก Singleton and Rossi, 1965)

ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม เติมเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ80จำนวน 20 มิลลิลิตร นำไปวางบนเครื่องเขย่าสารแนวราบเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แยกสารละลายส่วนใส (supernatant) มาวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระต่อไป

**11. ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (total phenolic content)** (ดัดแปลงจาก Singleton and Rossi, 1965)

**สารเคมี**

1. กรดแกลลิค
2. Folin-Ciocalteau reagent (เจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:10)
3. โซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7.5%

**การเตรียมกราฟมาตรฐาน**

เตรียมสารละลายกกรดแกลลิคมาตรฐานความเข้มข้น 40 80 120 160 200 240 280 320 360 และ 400 ppm เมทานอล ร้อยละ 80 ปิเปตสารละลายแกลลิคมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ 0.5 มิลลิลิตร เติม Folin-Ciocalteau reagent 2.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เติมโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 จำนวน2มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank นำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

**วิธีการวิเคราะห์**

ปิเปตสารสกัดตัวอย่าง จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับ Folin-Ciocalteau reagent จำนวน 2.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 8 นาที เติมโซเดียมคาร์บอเนต 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blankนำค่าที่ได้คำนวณค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างจากสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (ภาพผนวกที่ 4) นำค่า X ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ที่มีในตัวอย่าง ซึ่งรายงานค่าต่อหน่วย GAE/100 กรัมตัวอย่างจากสมการดังนี้

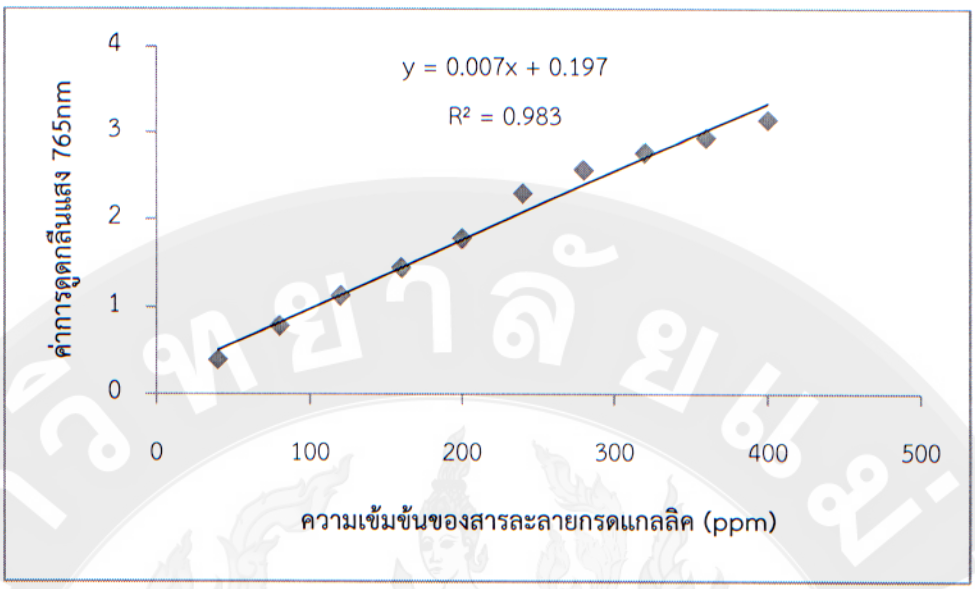
$$T = XV/M$$

เมื่อ T คือ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

X คือ ค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้จากกราฟมาตรฐาน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

V คือ ปริมาณสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

M คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีหน่วยเป็นกรัม




**ภาพผนวกที่ 4** กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิค

**12. ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยวิธี DPPH** (ดัดแปลงจาก Zhang et al., 2011)

**สารเคมี**

DPPH ความเข้มข้น 62.5 ไมโครโมลาร์

**วิธีการวิเคราะห์**

ปิเปตสารสกัดตัวอย่าง จำนวน 50 ไมโครลิตร ผสมกับ DPPH 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้เมทานอลบริสุทธิ์เป็น blank และเป็น control นำค่าที่ได้คำนวณค่าความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชัน ดังนี้

$$\%\text{inhibition} = \frac{Absorbance control - Absorbance sample}{Absorbance control} \times 100$$

เมื่อ $Abs_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH

$Abs_{sample}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง

**13. ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยวิธี FRAP** (ดัดแปลงจาก Benzie and Strain, 1996)

**สารเคมี**

1. สารละลายเฟอริคคลอไรด์เตรียมจากเฟอริคคลอไรด์จำนวน 3.2442 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร

2. สารละลาย ไทรฟริดิลเทรียซิน (TPTZ) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เตรียมจาก TPTZ จำนวน 3.1233 กรัม ปรับปริมาตรด้วยความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์จนครบ 1000 มิลลิลิตร

3. สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเป็นกรด-ด่าง 3.6 ความเข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ เตรียมจากโซเดียมอะซิเตตจำนวน 0.31 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อย เติมกรดอะซิติก 1.6 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างให้ได้ 3.6 ด้วยกรดอะซิติก ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนครบ 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 40 มิลลิโมลาร์ เตรียมจากกรดไฮโดรคลอริค 3.3631มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร

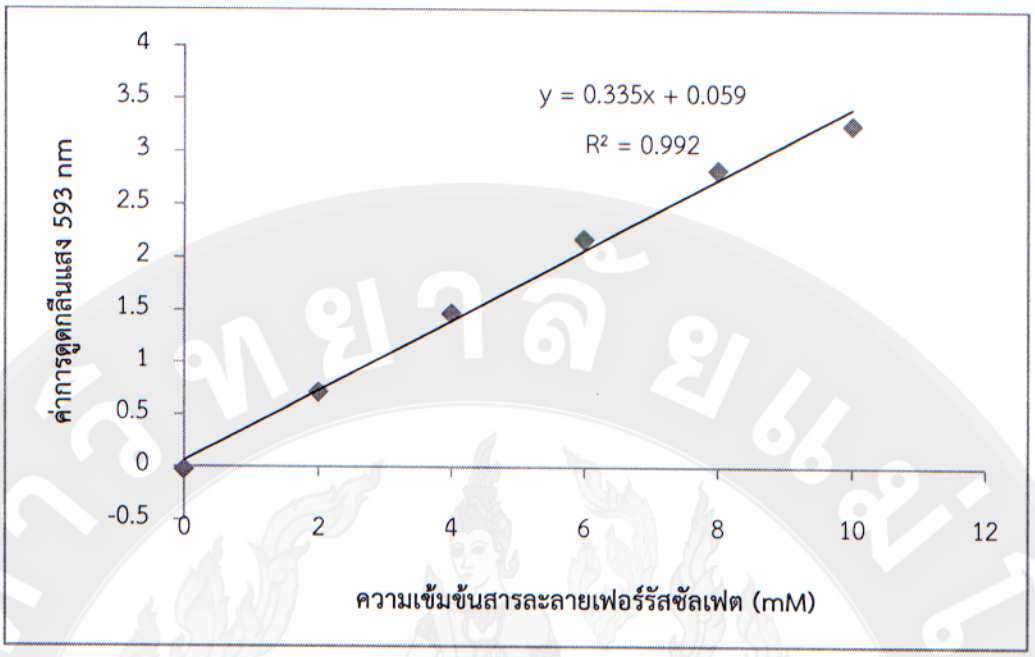
5. สารละลาย FRAP อัตราส่วน 10:1:1 จากสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเป็นกรด-ด่าง 3.6 ความเข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ต่อสารละลาย TPTZ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ต่อสารละลายเฟอริคคลอไรด์ 20 มิลลิโมลาร์

**การเตรียมกราฟมาตรฐาน**

เตรียมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, และ 1.0 มิลลิโมลาร์ เติมสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตแต่ละความเข้มข้น 80 ไมโครลิตรน้ำกลั่น 0.4 มิลลิลิตร และสารละลาย FRAP reagent ปริมาตร 3.6 มิลลิลิตร (อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสก่อนนำมาใช้) เขย่าให้เข้ากัน และแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร โดยใช้สารละลาย FRAP reagent เป็น blank นำค่าที่อ่านได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

**วิธีการวิเคราะห์**

ปิเปตสารสกัดตัวอย่าง จำนวน 80 ไมโครลิตร เติมน้ำกลั่น 0.4 มิลลิลิตร และสารละลาย FRAP 3.6 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 10 นาที วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร




**ภาพผนวกที่ 5** กราฟมาตรฐานของสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตจากวิธี FRAP

# ภาคผนวก ง

# การวิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา

# การวิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา

1. **ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด** (AOAC, 2005)

สุ่มตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว เติมสารละลายเปปโตน 9 มล. ผสมให้เข้ากันทำการเจือจางตัวอย่างจนได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยใช้สารละลายเปปโตน จากนั้นทำการ pour plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ PCA แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนอยู่ระหว่าง 25-250 โคโลนี รายงานผลในหน่วยจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (cfu/g)

2. **ปริมาณยีสต์และรา** (AOAC, 2005)

สุ่มตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว เติมสารละลายเปปโตน 9 มล. ผสมให้เข้ากันทำการเจือจางตัวอย่างจนได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยใช้สารละลายเปปโตน จากนั้นทำการ spread plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ PDA นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72-120 ชั่วโมง ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานเพาะเชื้อ หาค่าเฉลี่ย แล้วรายงานค่าเป็นจำนวนโคโลนีของยีสต์และราทั้งหมดต่อตัวอย่าง 1 กรัม (cfu/g)

# ภาคผนวก จ

## แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

# แบบทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส

**ผลิตภัณฑ์**.....**ชื่อผู้ทดสอบ**.....

**วันที่**.....**เพศ** ..... **อายุ** .....

**คำแนะนำ:** กรุณาทดสอบชิมตัวอย่าง เพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแต่ละคุณลักษณะ คือ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม แล้วจึงให้คะแนนตามระดับความชอบของท่าน (กรุณาบ้วนปากด้วยน้ำที่เตรียมให้ก่อนการชิมตัวอย่างทุกครั้ง)

**คะแนนความชอบ:**

| | | |
|---|---|---|
| 1 = ไม่ชอบมากอย่างยิ่ง | 2 = ไม่ชอบมาก | 3 = ไม่ชอบปานกลาง |
| 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย | 5 = เฉยๆ | 6 = ชอบเล็กน้อย |
| 7 = ชอบปานกลาง | 8 = ชอบมาก | 9 = ชอบมากอย่างยิ่ง |

| **ลักษณะทางประสาทสัมผัส** | **รหัสตัวอย่าง** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| สี | | | | | | |
| กลิ่น | | | | | | |
| รสชาติ | | | | | | |
| เนื้อสัมผัส | | | | | | |
| ความชอบโดยรวม | | | | | | |

**ข้อเสนอแนะ**

.....

.....

.....

**"ขอบคุณที่ให้ความร่วมมือ"**

# ภาคผนวก ฉ

# ประวัติผู้วิจัย

# ประวัตินักศึกษา

| | | |
|---|---|---|
| **ชื่อ-สกุล** | นางสาวพัชรมรี อุณหพิพัฒพงศ์ | |
| **เกิดเมื่อ** | 27 กุมภาพันธ์ 2533 | |
| **ประวัติการศึกษา** | พ.ศ. 2554 | วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ |
| | พ.ศ. 2550 | มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนปรินส์รอยแยลล์วิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ |
| **อีเมล** | Pat_manee@hotmail.co.th | |