

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลำไย

ลำไย (longan) เป็นไม้ผลตระกูล Sapindaceae จำแนกออกได้เป็น 2 สายพันธุ์ ขึ้นอยู่กับลักษณะของลำต้น ผล และเมล็ด การใช้ประโยชน์ คือ ลำไยต้น *Euphoria longana* Lamk. หรือ *Euphoria longana* Lour. (Subhadrabandhu, 1990) หรือ *Dimocarpus longan* Lour. เป็นลำไยที่ปลูกในภาคเหนือของประเทศไทยที่จังหวัด เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง แพร่ น่าน พะเยา และในภาคอีสานที่จังหวัดนครราชสีมา เลย หนองคาย อีกสายพันธุ์หนึ่ง คือ ลำไยเถา *Euphoria scandens* Winit. Kerr. หรือ *Dimocarpus longan* var. *obtusus* ใช้เป็นไม้ประดับ โดยจะตัดเป็นพุ่มเตี้ยหรือปลูกเป็น ไม้กั้นลม (พงษ์ศักดิ์, 2542)

ลำไยเป็นผลไม้ชนิดบ่มไม่สุก (non-climacteric fruit) (Subhadrabandhu, 1990) มีขนาดลำต้นสูงปานกลางจนถึงขนาดใหญ่ สามารถขยายพันธุ์ได้ด้วยเมล็ดและตอนกิ่ง มีผลทรงกลม หรือ เบี้ยวเปลือกสีน้ำตาลปนเหลือง หรือปนเขียวผลสุกมีเปลือกสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอมแดง (พงษ์ศักดิ์, 2542) เนื้อลำไยมีรสหวาน มีกลิ่นหอม ไม่มีรสเปรี้ยว มีความหวานประมาณ 16-20° Brix ค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.7-6.9 (ชนันท์, 2545) เนื้อลำไยสดประกอบด้วยน้ำตาลหลัก 3 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลซูโครส มีกรดอินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ กรดกลูโคนิก กรดมาลิก กรดซิตริก และมีกรดอะมิโน 9 ชนิด ทำให้ลำไยมีสรรพคุณทางยา คือ ใช้เป็นยาบำรุงในคนที่ เป็นโรคประสาทอ่อนๆ และนอนไม่หลับ บำรุงม้าม และบำรุงหัวใจ (วิระชัย, 2538)

ลำไยพันธุ์คอหรืออีคอ เป็นลำไยพันธุ์เบา คือ ออกดอกและเก็บผลก่อนพันธุ์อื่น ชาวสวนจึงนิยมปลูกมากที่สุดเพราะเก็บเกี่ยวได้ก่อน ทำให้ได้ราคาดี ตลาดต่างประเทศนิยมสามารถจำหน่ายทั้งผลสดและแปรรูปทำลำไยกระป๋องและอบแห้ง ลำไยพันธุ์นี้เจริญเติบโตดีเฉพาะในดินอุดมสมบูรณ์และมีน้ำพอเพียง ทนแล้งและทนน้ำได้ดีปานกลาง ลำไยพันธุ์คอ แบ่งตามสีของยอดอ่อนได้ 2 ชนิด (ศูนย์วิจัยและพัฒนาลำไยและลิ้นจี่ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2543) คือคอดอยแดงและคอดอยเขียว โดยคอดอยแดงจะเจริญเติบโตเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอดอยเขียว ลำต้นแข็งแรงไม่หักง่าย เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาลปนแดง ใบอ่อนมีสีแดง ปัจจุบันไม่นิยมปลูกเนื่องจากออกดอกติดผลไม่ดี และเมื่อผลเริ่มสุกถ้าเก็บไม่ทันผลจะร่วงเสียหายมาก ส่วนคอดอยเขียวจะมีลักษณะต้น

คล้ายคอดแดง ใบอ่อนเป็นสีเขียว ออกดอกติดผลง่ายแต่อาจไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ลำไยพันธุ์คอดยังแบ่งตามลักษณะของก้านช่อผลได้อีก 2 ชนิด คือ คอก้านอ่อน จะมีเปลือกของผลบาง และคอก้านแข็ง มีเปลือกของผลหนาขนาดผลค่อนข้างใหญ่เฉลี่ย กว้าง 2.7 เซนติเมตร หนา 2.4 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร ทรงผลกลมแป้น เบี้ยว ยกบ้างเดียว ผิวสีน้ำตาล มีกระหรือตาห่าง สีน้ำตาลเข้ม เนื้อค่อนข้างเหนียว สีขาวขุ่น ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 20 เมล็ดขนาดใหญ่ปานกลาง รูปร่างแบนเล็กน้อย

### 2.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของลำไยสดและลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อลำไยสดที่ทำการศึกษาในปีพ.ศ. 2526-2527 และ ลำไยอบแห้งพบว่ามีส่วนประกอบดังตาราง 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตาราง 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อลำไยในระยะเก็บเกี่ยวผล

ส่วนประกอบ	ปีที่ศึกษา	
	2526	2527
เนื้อผล (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	19.80±0.20	16.50±0.70
เปลือกผล (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	35.70±0.60	35.60±0.40
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (ร้อยละ)	20.10±0.10	18.30±0.20
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	184.00±7.00	154.00±11.00
ซูโครส (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	27.00±15.00	29.00±3.00
กลูโคส (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	22.00±17.00	17.00±1.00
ฟรุกโตส มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	28.00±17.00	23.00±1.00
ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มิลลิกรัมสมมูล/กรัม)	2.30±0.10	2.10±0.10
ฟิเชช	6.20±0.10	6.40±0.10
กรดซิตริก (มิลลิกรัมสมมูล/กรัม)	0.13±0.01	0.12±0.01
กรดมาลิก (มิลลิกรัมสมมูล/กรัม)	0.89±0.16	0.35±0.07
กรดซักซินิก(มิลลิกรัมสมมูล/กรัม)	1.85±0.198	1.15±0.11
กรดแอสคอร์บิก (มิลลิกรัม/กรัม)	2.00±0.20	1.40±0.20
ปริมาณของฟีนอลทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)	0.80±0.10	0.50±0.10

ที่มา: Paull and Chen (1987)

ตาราง 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของลำไยอบแห้งต่อ 100 กรัม ของน้ำหนักแห้ง

องค์ประกอบ	หน่วย	ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง
<b>Proximates</b>		
Water	กรัม	17.6
Energy	กิโลแคลอรี	286
Energy	กิโลจูล	1197
Protein	กรัม	4.90
Total lipid (fat)	กรัม	0.40
Ash	กรัม	3.10
Carbohydrate, by difference	กรัม	74.0
<b>Minerals</b>		
Calcium, Ca	มิลลิกรัม	45
Iron, Fe	มิลลิกรัม	5.40
Magnesium, Mg	มิลลิกรัม	46
phosphorus, P	มิลลิกรัม	196
Potassium, K	มิลลิกรัม	658
Sodium, Na	มิลลิกรัม	48
Zinc, Zn	มิลลิกรัม	0.22
Copper, Cu	มิลลิกรัม	0.807
Manganese, Mn	มิลลิกรัม	0.248
<b>Vitamins</b>		
Vitamin C, Total ascorbic acid	มิลลิกรัม	28
Thiamin	มิลลิกรัม	0.040
Riboflavin	มิลลิกรัม	0.500
Niacin	มิลลิกรัม	1.000
Vitamin B-12	ไมโครกรัม	0.00
Vitamin A, IU	IU	0
Retinol	ไมโครกรัม	0

ตาราง 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของลำไยอบแห้งต่อ 100 กรัม ของน้ำหนักแห้ง (ต่อ)

องค์ประกอบ	หน่วย	ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง
<b>Lipids</b>		
Cholesterol	มิลลิกรัม	0
<b>Amino acids</b>		
Threonine	กรัม	0.128
Isoleucine	กรัม	0.097
Leucine	กรัม	0.202
Lysine	กรัม	0.172
Methionine	กรัม	0.049
phenylalanine	กรัม	0.112
Tyrosine	กรัม	0.094
Valine	กรัม	0.217
Arginine	กรัม	0.131
Histidine	กรัม	0.045
Alanine	กรัม	0.585
Aspartic acid	กรัม	0.469
Glutamic acid	กรัม	0.780
Glycine	กรัม	0.158
Proline	กรัม	0.158
Serine	กรัม	0.180

ที่มา: USDA national nutrient database for standard reference (2003)

### 2.1.2 กรดแกลลิก และกรดเอลลาจิกในลำไย

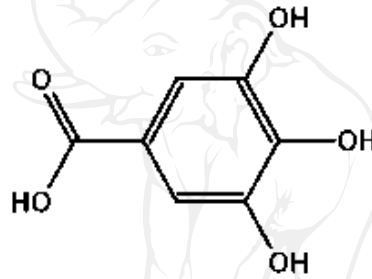
1) ลักษณะทั่วไป กรดแกลลิก และกรดเอลลาจิก เป็นสารประกอบโพลีฟีนอล ที่เกิดจากการสลายตัวของ สารประกอบTannins ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกฟีนอลที่ละลายน้ำ (water soluble phenolics) ที่มีหมู่ hydroxyl เป็นจำนวนมากและมีโมเลกุลมีโครงสร้างซับซ้อน

2) แหล่งที่พบ จะพบในส่วนของเนื้อไม้ เปลือกไม้ เปลือกผล และส่วนที่เป็นโครงสร้างพิเศษ เช่น gall นอกจากนี้อาจพบในส่วนของใบ ผล และฝัก ส่วนในลำไยจะพบกรดแกลลิก และกรดเอลลาจิก ในส่วนของเมล็ด เปลือก และเนื้อลำไย โดยพบในเมล็ดปริมาณมากที่สุด

ซึ่งกรดแกลลิก และกรดเอลลาจิกมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และมีประโยชน์ดังนี้ (ชวลิต, 2539)

### 3) คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและประโยชน์

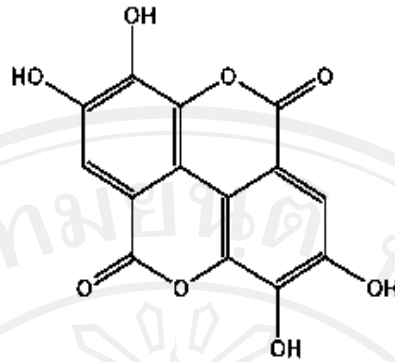
3.1) กรดแกลลิก (Gallic acid,  $C_7H_6O_5$ ) หรือ 3, 4, 5-Trihydroxybenzoic acid มีมวลโมเลกุล 170.12 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลว 250 องศาเซลเซียส มีสูตรโครงสร้างดังรูป 2.1 กรดแกลลิกสามารถพบได้ในพืชเกือบทุกชนิด พืชที่พบว่ามีกรดแกลลิกเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก ได้แก่ gallnuts องุ่น ชา สอป และเปลือกไม้ไผ่ เป็นต้น (Wikipedia<sup>1</sup>, 2008) กรดแกลลิกมีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดมะเร็ง ยับยั้งการกลายพันธุ์ ลดการอักเสบของบาดแผล และเป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาแอนติออกซิแดนซ์ในเซลล์ร่างกาย (Soong and Barlow, 2006)



รูป 2.1 สูตรโครงสร้างของกรดแกลลิก

ที่มา: (Wikipedia<sup>1</sup>, 2008)

3.2) กรดเอลลาจิก (Ellagic acid,  $C_{14}H_6O_8$ ) หรือ 2,3,7,8-Tetrahydroxy-chromeno มีมวลโมเลกุล 302.197 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลว 360 องศาเซลเซียส (Chemblink, 2008) มีสูตรโครงสร้างดังรูป 2.2 กรดเอลลาจิก พบในพืช ผักเกือบทุกชนิดชนิด เช่น สตรอเบอร์รี่ ลาสเบอร์รี่ แคนเบอร์รี่ เป็นต้น (Wikipedia<sup>2</sup>, 2008) มีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งการกลายพันธุ์ ต้านเชื้อไวรัส ต้านการเกิดมะเร็ง ป้องกันการเกิดเนื้องอก และเป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาแอนติออกซิแดนซ์ในเซลล์ร่างกาย (Soong and Barlow, 2006)



รูป 2.2 สูตรโครงสร้างของกรดเอลลาจิก

ที่มา: (Wikipedia<sup>2</sup>, 2008)

4) การสกัดและการทำให้บริสุทธิ์ ในการสกัดและทำให้บริสุทธิ์โดยทั่วไปมักใช้สารผสมระหว่างน้ำกับอะซิโตน ควรหลีกเลี่ยงการใช้เมธานอล เนื่องจากจะทำให้เกิด methanolysis ของ galloyl depsides การสกัดมักทำได้ดีในพืชสด เนื่องจากพืชแห้งสารประกอบกลุ่มนี้อาจรวมตัวอยู่กับโพลีเมอร์อื่น ๆ จากนั้นกำจัดอะซิโตนออกโดยการกลั่น แล้วแยก pigments และลิพิด โดย partition ด้วย dichloromethane เป็นต้น ต่อมาสกัดแยก dimeric proanthocyanidins และ gallotannins ออก โดย partition กับ ethyl acetate ส่วน polymeric proanthocyanidins และ high molecular weight gallotannins จะยังคงอยู่ใน aqueous phase แล้วทำให้บริสุทธิ์ต่อโดย gel filtration chromatography พิเศษ และตามด้วย reverse phase chromatography ใน water-alcohol หรือ water-alcohol acetone mixtures

#### 5) การตรวจสอบ

5.1) การตรวจสอบโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical screening) การทดสอบหา Hydrolyzable tannins เมื่อทดสอบสารสกัดด้วย ferric salts สารประกอบกลุ่ม Hydrolyzable tannins จะให้สีน้ำเงินเข้มถึงดำ (bluish-black colors) ในขณะที่ Condensed tannins จะให้สีตะกอนสีเขียวถึงสีเขียวอมน้ำตาล (greenish-brown precipitates) สารประกอบกลุ่ม Hydrolyzable tannins ทั้งหมดสามารถทดสอบโดยใช้น้ำปูนใส (Lime water) ผลบวกให้ตะกอนเหลืองสีน้ำเงินเทา นอกจากนี้สามารถแยกประเภทของ hydrolyzable tannins ได้โดยการทดสอบต่อไปนี้

5.1.1) การทดสอบหา Gallotannins ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Hydrolyzable tannins โดยใช้ potassium iodate ผลบวกจะให้สีชมพู (pink color) ส่วนกรดแกลลิกอิสระจะเกิดสีส้มกับ สารนี้



5.1.2) ทดสอบหา Ellagitannins ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Hydrolyzable tannins โดยใช้กรดไนตริกที่มีกรดอะซิติคผสมอยู่ด้วย ผลบวกให้สีชมพูในตอนแรก ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงและสุดท้ายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า

5.1.3) การทดสอบหา Condensed tannins โดยใช้ สารละลาย vanillin/hydrochloric acid ผลบวกให้สีแดง และ bromine water ผลบวกได้ตะกอนสีเหลือง ในขณะที่ Hydrolyzable tannins ไม่เกิดปฏิกิริยานี้

5.2) การตรวจสอบโดยใช้ TLC การตรวจสอบสารสกัดทั่วไปใช้เทคนิค TLC บนซิลิกาเจล หรือเซลลูโลส และดูการเรืองแสงภายใต้แสงอุลตราไวโอเล็ตและใช้สารที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ช่วยในการตรวจสอบผล หรือใช้เทคนิค HPLC reverse phase และใช้ solvent ที่เป็น slightly acidic alcoholic solvents เป็นวัฏภาคเคลื่อนที่

### 2.1.3 ลำไยอบแห้ง

ลำไยอบแห้ง หมายถึง ผลสดที่ได้อาจจากการนำลำไยมาผ่านกรรมวิธีตามความเหมาะสม (ไม่รวมหมักคอง) แล้วนำมาลดความชื้นตามต้องการ โดยกรรมวิธีตามธรรมชาติหรือใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยจะมีการปรุงแต่งรสหวานด้วยน้ำตาลหรือไม่ก็ได้ ความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 18 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

ลำไยอบแห้งสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ดังนี้ (พงษ์ศักดิ์ และคณะ, 2542)

1. การอบแห้งเปลือก เป็นการอบผลลำไยสด มีความนิยมสูง เพราะดำเนินการได้ง่าย รวดเร็ว และจำนวนมาก ทำโดยการคัดเกรดลำไยเข้าเตาอบ ใช้เวลาอบ 40-50 ชั่วโมง จากนั้นบรรจุถุงพลาสติกและกล่อง เก็บรักษาไว้ได้นาน สามารถส่งออกหรือเก็บไว้บริโภคได้ตลอดปีมีแนวโน้มในการผลิตและส่งออกที่สูงมาก โดยเฉพาะประเทศจีนและประเทศในแถบเอเชีย

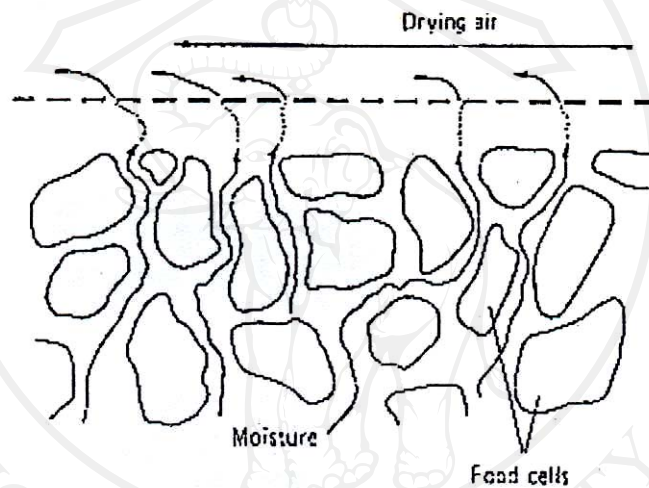
2. การอบเนื้อ เป็นการอบลำไยเฉพาะเนื้อล้วน ทำโดยคว้านเนื้อออกจากเปลือกและเมล็ด การดำเนินการใช้แรงงานในการดำเนินการมาก ค่าใช้จ่ายสูง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะดีมาก รับประทาน และตลาดภายในประเทศต้องการ

## 2.2 การทำแห้งอาหาร

### 2.2.1 ความหมาย

การทำแห้ง คือ การกำจัดน้ำออกจากอาหารเพื่อระงับหรือชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ชะลอการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหาร (Barbosa-

Canovas and Vega-Mercado, 1996) เพื่อเก็บรักษาถนอมผลิตภัณฑ์ ชีตอายุการเก็บรักษาโดยการลดความชื้นของอาหารลงจนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาอื่นๆได้ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเก็บรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางอาหาร (รุ่งนภา, 2535) กลไกการทำแห้งของอาหารคือ เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศจะถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ดังรูป 2.3



รูป 2.3 การเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากชิ้นอาหารระหว่างการทำแห้ง  
ที่มา: วิไล (2543)

สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอน้ำที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหารเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำขึ้น อาหารชิ้นด้านในจะมีความดันไอน้ำสูงและค่อยๆลดต่ำลงเมื่อชิ้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันไอน้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

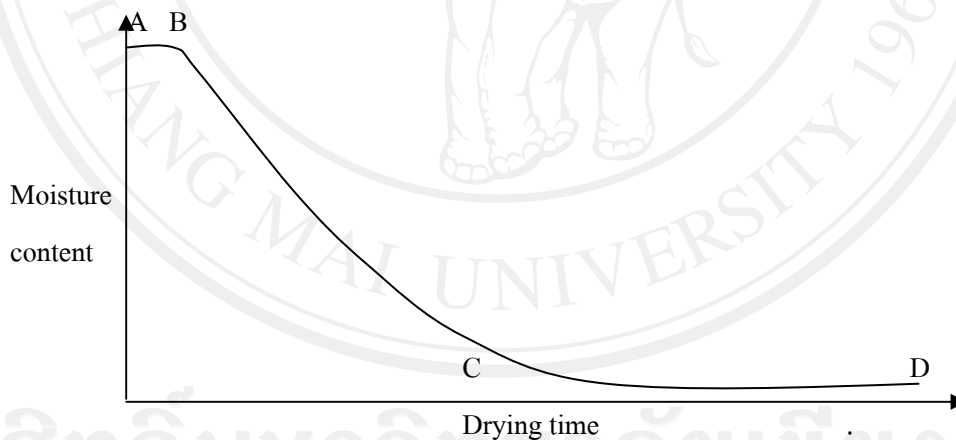
- 1) การเคลื่อนที่ของของเหลวโดยแรงแคปิลารี
- 2) การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายในอาหารส่วนต่างๆ
- 3) การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
- 4) การแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหารซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอน้ำ



การทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหารเพื่อทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอล้ำระเหยออกจากอาหาร การใช้เครื่องอบแห้งจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของอาหารได้อย่างรวดเร็ว โดยการให้กระแส ลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านอาหาร การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าใช้กำลังงานจากแสงแดงจะเรียกว่า การตากแห้ง แต่ถ้าใช้พลังงานไฟฟ้า ก๊าซหรือไอน้ำจะเรียกว่า การอบแห้ง การทำแห้งมีประโยชน์หลายด้าน เช่น ป้องกันการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์ เก็บไว้ได้นานโดยไม่ต้องใช้ตู้เย็น ทำให้มีใช้ในยามขาดแคลน นอกฤดูการผลิตหรือแหล่งห่างไกล ลดขนาดและน้ำหนักอาหาร ทำให้สะดวกในการบรรจุ เก็บรักษาและขนส่งได้ ผลผลิตภัณฑ์ใหม่ และความสะดวกใช้การใช้ (สุคนธ์ชื่น, 2539)

### 2.2.2 กราฟการทำแห้ง

เมื่อนำปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยสดพันธุ์คอกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นเวลาในการอบแห้ง ปริมาณความชื้นเป็นแกนตั้งจะได้กราฟดังรูป 2.4 เรียกว่า กราฟการทำแห้ง



รูป 2.4 เส้นกราฟการทำแห้ง

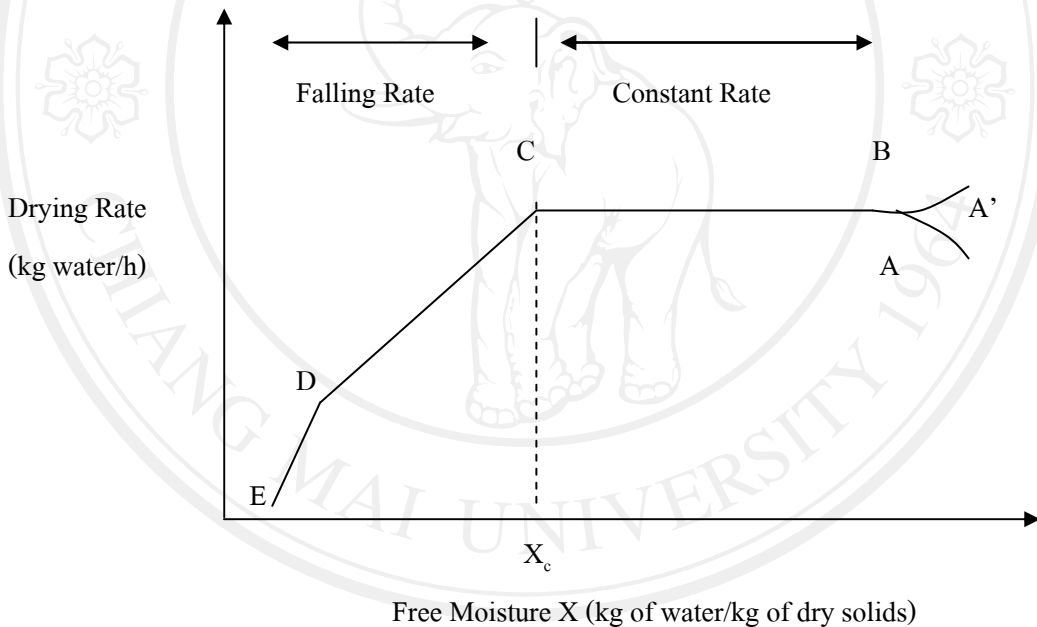
ที่มา: วิไล (2543)

เมื่อนำอาหารมาใส่ในเครื่องทำแห้ง ช่วงเวลาสั้นๆ ตอนเริ่มการอบแห้งจะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้ผิวหน้าของอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก(AB ในรูปที่ 2.4) แล้วจึงเริ่มการทำให้แห้งโดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของอาหารออกมาด้วยความเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้า ผิวหน้าจึงเปียกอยู่เรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงอัตราเร็วของการอบแห้งคงที่ (constant rate period) เมื่อทำการอบแห้งต่อไปน้ำอิสระในอาหารจะเหลือน้อยลงทำให้เคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าของ

อาหารได้น้อยลง ทำให้อัตราการระเหยของน้ำต่ำลง และอัตราการระเหยก็จะลดลงจนใกล้ศูนย์ซึ่งเป็นช่วงอัตราการลดลง (falling-rate period) ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นานที่สุดของกระบวนการทำแห้ง (วิไล, 2543)

### 2.2.3 กราฟอัตราการทำแห้ง

กราฟอัตราการทำแห้ง ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการทำแห้ง มีลักษณะโดยทั่วไปดังรูป 2.3 ซึ่งสามารถใช้หาเวลาในการอบแห้งที่สภาวะเดียวกันได้



รูป 2.5 กราฟอัตราการทำแห้ง

ที่มา: Barbosa-Canovas and Vega-Mercado. (1996)

จากรูป 2.6 เส้นกราฟแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้ช่วง  $A \rightarrow B$  หรือ  $A' \rightarrow B$  เป็นช่วงของการ warm up ของอุณหภูมิในชั้นผลิตภัณฑ์ ช่วง  $B \rightarrow C$  เรียกว่า ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นเป็นน้ำอิสระ น้ำที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเหยกลายเป็นไอและเคลื่อนที่ไป

กับอากาศร้อน การเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเนื่องจาก hydraulic gradient และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผิวจะเท่ากับอัตราการระเหยที่ผิวของผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้เป็นค่าอัตราการทำแห้งได้ ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการทำแห้งในช่วงนี้คืออุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราเร็วของอากาศ จุด C เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) เกิดจากช่วงแรกผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงเมื่อทำแห้งไปเรื่อยๆ ปริมาณความชื้นที่ผิวลดลงจนกระทั่งนำที่บริเวณผิวระเหยไปหมดและความชื้นในผลิตภัณฑ์ต่ำลงทำให้อัตราการทำแห้งเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถพบการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีโครงสร้างในเป็นรูพรุน ช่วง C → D และ D → E เรียกว่า ช่วงที่อัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แต่เกิดที่ภายในเนื้อของผลิตภัณฑ์การเคลื่อนที่เป็นลักษณะของการแพร่ (diffusion) ของน้ำ หรือไอน้ำที่อยู่ใน pore หรือ capillary ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์จึงเคลื่อนที่ไปกับอากาศร้อนซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ช้ากว่าแบบการพา ทำให้อัตราการทำแห้งช่วงนี้ลดลง ปัจจัยที่ควบคุมการทำแห้งในช่วงนี้ คือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในผลิตภัณฑ์ และในช่วงนี้อุณหภูมิในของผลิตภัณฑ์จะสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ จากกราฟเห็นว่ามีช่วงอัตราการทำแห้งลดลง 2 ช่วง เนื่องจากช่วง C → D ยังคงมีความชื้นอยู่ที่ผิวหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย แต่ที่จุด D ความชื้นที่ผิวระเหยไปหมดทำให้ผิวหน้าแห้งสนิท อัตราการระเหยจึงช้าลงไปอีก (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996)

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งอาหาร มีดังนี้ (สุคนธ์ชื่น, 2539)

1) ธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบเร็วกว่าการแพร่ในอาหารที่มีลักษณะเนื้อแน่น จึงแห้งเร็วกว่า อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำทำให้การทำแห้งช้า และอาหารที่มีการลวก นวด คลึง จะทำให้เซลล์แตกและแห้งได้เร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น อาหารที่มีรูปร่างเหมือนกันถ้ามีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ด้วย ถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงเกิดได้ช้าๆ ที่พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักมีมาก

3) ตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง อาหารที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีหรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำจะมระเหยได้ดีกว่า

4) ปริมาณอากาศต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างจะไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรืออาจได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5) ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่น้อย

6) อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้กระจายของน้ำในอาหารดีขึ้นด้วย

7) ความเร็วของอากาศร้อน อากาศร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกดังนั้น เมื่อความเร็วของอากาศร้อนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนย้ายไอน้ำก็จะเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเครื่องอบแห้งอากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดี การเคลื่อนย้ายไอน้ำเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็วลม 244 เมตร/นาที่

#### 2.4 ผลของการอบแห้งที่มีต่ออาหารอบแห้งในด้านต่างๆ

การอบแห้งมีผลต่ออาหารอบแห้งในด้านต่างๆ ดังนี้ (กุลยา, 2540)

1) คุณค่าอาหาร การอบแห้งจะระเหยความชื้นหรือน้ำออกจากอาหาร และเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน การถนอมอาหารโดยวิธีอบแห้งจะทำให้คุณภาพลดลงโดยเฉพาะวิตามินที่ละลายน้ำจะสูญเสียไปกับน้ำจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และถ้ามีการการอบแห้งโดยวิธีการตากแดดต่างจากการใช้เครื่องอบแห้งคือ ไม่สามารถควบคุมความชื้นอากาศ แสงแดด อุณหภูมิได้

2) โปรตีน จะเสียคุณค่าไปมากหรือน้อยเพียงขึ้นกับวิธีการอบแห้งอาหาร ถ้าใช้เวลานานเกินไปและอุณหภูมิโปรตีนจะเปลี่ยนสภาพและคุณค่าทางโภชนาการจะลดลง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำทำให้อาหารแห้งโปรตีนจะใช้ทำประโยชน์มากกว่าแต่จะขึ้นอยู่กัชนิดของโปรตีนด้วย

3) คาร์โบไฮเดรต การเปลี่ยนสีของผลไม้ตากแห้งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) เกิดโดยกรดอะมิโนในผลไม้รวมกับน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ทำให้เกิดสีน้ำตาลป้องกันโดยการใช้สารเคมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) หรือโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

4) ไขมัน อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะทำให้อาหารที่อบแห้งเหม็นหืน ดังนั้นจึงควรใช้ อุณหภูมิต่ำหรือใช้สารกันหืน(antioxidants) ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น BHT (Butylated hydroxyl toluene)

5) เอนไซม์จะหยุดกิจกรรมเมื่อใช้ความร้อนถึง 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 นาที แต่ถ้าใช้ ความร้อนในการอบแห้งปฏิกิริยาของเอนไซม์จะทนทานดังนั้นการอบแห้งจึงต้องลวกน้ำร้อนหรือ ใช้สารเคมีเพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ก่อนที่จะนำไปอบ

6) จุลินทรีย์ เป็นสาเหตุของการทำให้อาหารเสียหายหรือเน่า การลดความชื้นในอาหารให้ เหลือน้อยที่สุดก็จะทำให้อาหารไม่เสียหายและเก็บไว้ได้นาน ถ้าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 12 เชื้อราจะ เจริญได้ ส่วนแบคทีเรียและยีสต์จะเจริญเติบโตได้ดีถ้าความชื้นสูงกว่าร้อยละ 30 การอบแห้งนิยม ไล่เกลือแกลงในอาหารที่จะอบแห้งเพื่อควบคุมจุลินทรีย์เมื่ออบแห้งแล้วต้องเก็บใส่หีบห่อให้ดี ไม่เก็บในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเพราะเชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเร็ว

7) เม็ดสีในอาหาร อาหารอบแห้งจะมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยน ไปสี ของอาหารจะเปลี่ยนไปเม็ดสีพวกแคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) จะซีดจางลงถ้า ใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาาน หรือใช้สารเคมีบางชนิดในการอบแห้งเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาของ เอนไซม์ เช่น รมควันด้วยกำมะถันจะฟอกสีอาหารให้จางลง ดังนั้นพวกผักและผลไม้จึงมีการ fixed สีก่อนอบแห้งโดยการลวกน้ำร้อนหรือแช่สารเคมี เช่น สารละลายด่างอ่อนจะทำให้สีผักผลไม้ ไม่ซีดจางลงหรือเป็นสีน้ำตาล แต่อาจจะทำให้อาหารแข็งกระด้างขึ้น

## 2.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ )

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) หมายถึง อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร (p) ต่อความ ดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่จุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ( $p_0$ )

$$a_w = p/p_0$$

Raoult's law กล่าวว่า ตัวถูกละลายจะลดความดันไอของน้ำในอาหาร มีผลทำให้ค่า  $a_w$  ลดลงด้วย อาหารทุกชนิดมีน้ำเป็นส่วนประกอบ สถานภาพของน้ำในอาหารอธิบายโดยอาศัย ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบๆอาหารนั้น อัตราส่วนของตัวเลขทั้งสองนี้เป็นค่า  $a_w$  น้ำในอาหารทำให้เกิดความดันไอซึ่งความดันไอที่เกิดขึ้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร
- 2) อุณหภูมิ

3) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น เกลือและน้ำตาล (นิธิยา, 2549)

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารเป็นน้ำที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลทางเคมีของอาหาร (bound water) และยังเป็นอิสระ (free water) อยู่ในอาหาร ถ้ามีมากจะทำให้อาหารเก็บไว้ได้ไม่นานหรืออายุการเก็บรักษา (shelf-life) สั้น ถ้าความชื้นของอาหารน้อยกว่าร้อยละ 50 หรือในอาหารแห้งโดยทั่วไปควรหาค่า  $a_w$  เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอาหารได้ชัดเจนว่าโดยถ้าค่าความชื้นในอาหารเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยก็จะเห็นความแตกต่างของค่า  $a_w$  ทั้งนี้ อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง จะมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง ค่า  $a_w$  จะลดลงต่ำกว่า 1.0 ดังนั้นค่า  $a_w$  มีความสำคัญต่ออาหาร โดยค่า  $a_w$  ต่างจะมีผลต่ออาหาร ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ความสำคัญของค่า  $a_w$  ต่ออาหาร

$a_w$	ปรากฏการณ์
0.95	ยับยั้งการเจริญของ Pseudomonas, Bacillus, Clostridium perfringens และยีสต์บางชนิด
0.90	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของแบคทีเรียทั่วไป เช่น Salmonella, Lactobacillus Vibrio parahaemolyticus, Clostridium botulinum รวมทั้งยีสต์และราบางชนิด
0.85	ยีสต์ส่วนใหญ่ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต
0.80	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับกิจกรรมของเอนไซม์ส่วนใหญ่และการเจริญของเชื้อราส่วนใหญ่ Staphylococcus aureus ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต
0.75	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับแบคทีเรียฮาโลไฟล์ (Halophile)
0.70	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับเชื้อรา Xerophile ส่วนใหญ่
0.65	อัตราเร็วสูงสุดในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด
0.60	ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการเจริญของยีสต์และราประเภท Osmophile หรือ Xerophile
0.55	เกิดความผิดปกติกับกรดคือออกซิไรโบนิวคลีอิก (ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับสิ่งมีชีวิต)
0.40	อัตราเร็วต่ำสุดในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
0.25	ความต้านทานสูงสุดของสปอร์แบคทีเรีย

ที่มา: วิล (2543)



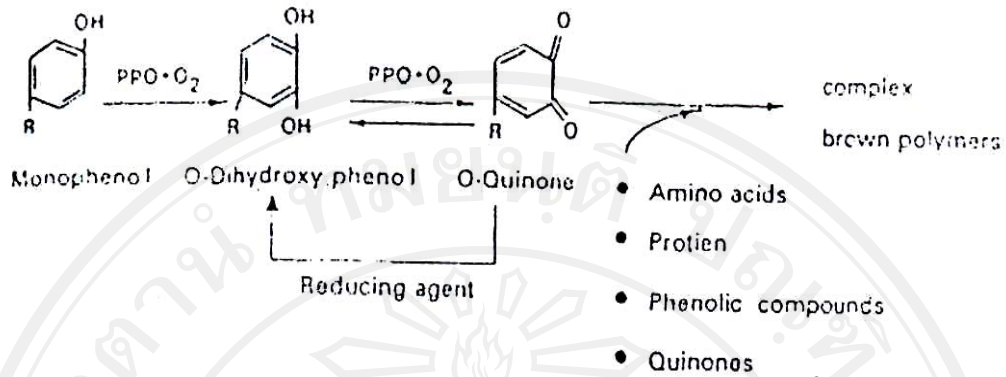
## 2.6 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหาร

อาหารและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดมีปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) และปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ที่เกิดจากการแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ปฏิกริยาสีน้ำตาลมีทั้งผลดีและผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร (นิธิยา, 2549)

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหารเป็นปฏิกริยาทางเคมีที่สลับซับซ้อน เพราะไม่ได้เป็นปฏิกริยาปฐมภูมิ (Primary reaction) แต่เป็นปฏิกริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) หลากหลายปฏิกริยาที่เกิดขึ้นและให้สารสีน้ำตาลที่ผันแปรไปตามชนิดของอาหาร ถึงแม้จะเป็นอาหารชนิดเดียวกันก็ตาม ปฏิกริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลนี้ยังอาจเกิดขึ้นได้ในวัตถุดิบที่มีการเติมวิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก แล้วทำปฏิกริยาต่อกับกรดอะมิโน ทำให้เกิดสีน้ำตาลได้ โดยอาศัยปฏิกริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เรียกว่าปฏิกริยามเมลลาร์ด (Maillard reaction)

### 2.6.1 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชเมื่อเซลล์ถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือก หรือการหั่นชิ้น ทำให้เกิดปฏิกริยาของสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (*o*-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นออร์โท-ควิโนน (*o*-quinone) เอนไซม์ PPO อาจมีชื่อเรียกว่า พอลิฟีนอลเลส ฟีนอเลส ไทโรซิเนส ออร์โท-ไดฟีนอลออกซิเดส (*o*-diphenol oxidase) ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้ จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกริยามเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆหรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล ดังรูป 2.6



รูป 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO

ที่มา: Mcevely *et al.* (1992)

สับสเตรทที่ถูกออกซิไดส์ด้วยเอนไซม์ PPO ได้แก่ สารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในพืชซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เช่น แอนโทไซยานิดิน ลูโคแอนโทไซยานิดิน ฟลาโวนอล แคลทีคอล กรดคาเฟอิก กรดคลอโรจีนิก แคลดีซิน เอสเทอร์ของกรดซินนามิก 3,4-ไดไฮดรอกซีฟีนิลอะลานีน และไทโรซีน ฟิเอนที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์ PPO อยู่ในช่วง 5-7 เอนไซม์นี้ไม่ค่อยคงตัว ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน และถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแฮไลด์ กรดฟีนอล ซัลไฟต์ คีเลติงเอเจนต์ และรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก และซิสเตอีน เป็นต้น

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วย เอนไซม์เป็นปัญหาที่สำคัญในการแปรรูปผลไม้และผักหลายชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ล ท้อ สาลี่ กลั้ว องุ่น มันฝรั่ง เห็ด มะเขือ ใบชา และเมล็ดกาแฟ รวมทั้งอาหารทะเลบางชนิด เช่น กุ้ง ปู และกุ้งมังกร เมื่ออาหารเกิดสีน้ำตาลจะทำให้อายุการวางจำหน่ายสั้นลง และปฏิกิริยานี้ยังอาจทำให้เกิดปัญหากับผักและผลไม้ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งและแช่เยือกแข็งอีกด้วย

ข้อดีของปฏิกิริยานี้คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์บางชนิดมีสี กลิ่น และรสชาติดีขึ้น เช่นการอบแห้ง ลูกเกด ลูกพรุน และอินทผลัม การคั่วเมล็ดกาแฟ และการหมักใบชา ซึ่งต้องการให้เกิดสีน้ำตาลช่วยให้มีกลิ่นและรสชาติดี การควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ไม่ให้เกิดขึ้นในผักและผลไม้บางชนิดทำได้โดยการลวก เพื่อยับยั้งเอนไซม์ PPO แต่วัตถุดิบบางชนิดหากนำไปลวกจะมีผลกระทบต่อกลิ่น รสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น ผลไม้และหัวหอม

เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล บางทีเรียกว่า ฟีนอกเลส ซึ่งหมายถึงกลุ่มของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบโมโนฟีนอลและออร์โท-ไดฟีนอล ดังนั้น

เอนไซม์ฟีนอลเอสจึงรวมทั้งเอนไซม์ที่มีชื่อว่า ฟีนอลออกซิเดส ไทโรซิเนส พอลิฟีนอลออกซิเดส แดทีคอกเลส ครีโซเลส โดปาออกซิเดส และ ออกซิเดสจากมันเทศและมันฝรั่ง

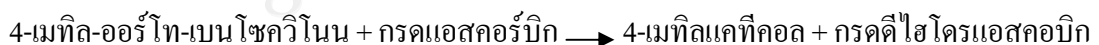
สารละลายเอนไซม์ฟีนอลเอสมีความคงตัวมากที่สุดที่พีเอชใกล้เป็นกลาง สารละลายที่เข้มข้นจะมีความคงตัวมากกว่าสารละลายที่เจือจาง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพียงระยะเวลาสั้นๆ หรือเขย่าสารละลายเอนไซม์อย่างรุนแรงในอากาศ จะทำให้เสียสภาพธรรมชาติได้ แต่สารละลายเอนไซม์ฟีนอลเอสเข้มข้นในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่พีเอชใกล้เป็นกลาง สามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิ 1 หรือ -25 องศาเซลเซียส นานหลายเดือน โดยไม่สูญเสียความสามารถในการทำงาน แต่การแช่เยือกแข็งนานๆจะทำให้ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ลดน้อยลง และการสูญเสียนี้ทำให้กลับคืนไม่ได้

## 2.6.2 การควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในอาหาร

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์เมื่อเกิดขึ้นในอาหารจะทำให้อาหารมีสีเปลี่ยนไปและยังทำให้รสชาติของอาหารบางชนิดเปลี่ยนแปลงไปด้วย อาหารจึงมีคุณภาพลดลงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์นี้ทำได้หลายวิธี จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอาหารแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น

- 1) ใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ PPO หรือ ฟีนอลเอส
- 2) ใช้สารเคมียับยั้งการทำงานของเอนไซม์ PPO หรือ ฟีนอลเอส
- 3) เติมสารรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.1-0.3
- 4) กำจัดออกซิเจน โดยใช้ภาชนะที่อากาศผ่านเข้าไม่ได้ หรือลดความดันของอากาศให้ต่ำกว่า 380 ทอร์ (torr) หรือเก็บรักษาในบรรยากาศที่มีออกซิเจนต่ำมากๆ
- 5) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานที่มีอยู่ในธรรมชาติ

การยับยั้งเอนไซม์อาจใช้ 2-3 วิธีร่วมกันได้ แต่การลวกด้วยไอน้ำใช้กับผลไม้ไม่ได้เพราะจะทำให้ผลไม้บางชนิดมีกลิ่นผิดปกติ และทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มลง อย่างไรก็ตามสามารถใช้ความร้อนยับยั้งเอนไซม์ในน้ำผลไม้และเนื้อผลไม้ตีปั่น (puree) หรือใช้เติมกรดแอสคอร์บิกลงไป ทำให้ทำปฏิกิริยากับ ออร์โท-ควิโนน เพื่อเปลี่ยนกลับให้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล ดังสมการ



เอนไซม์ PPO จะถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ในการทำลายเอนไซม์ PPO และควรมีการศึกษาหา

อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม ในการทำลายเอนไซม์ PPO หรือฟีนอลเอสในผักหรือผลไม้แต่ละชนิด และภายหลังการลวกแล้วต้องทำให้ผักผลไม้เย็นลงอย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาคุณภาพของอาหารไว้ให้ดีที่สุด

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารเคมีที่ขยับยั้งเอนไซม์ PPO หรือฟีนอลเอสได้ดีที่สุด และเป็น การยับยั้งแบบถาวรไม่กลับคืนนิยมใช้กับผลไม้อบแห้ง เช่น ลูกเกด แต่มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดกลิ่น ถ้าใช้มากเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพและทำให้ผู้บริโภคบางคนเกิดอาการแพ้ได้ เช่น ทำให้เกิดอาการหอบหืด เป็นต้น

### 2.6.3 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์

ปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์หรือปฏิกิริยามอลลาร์ด เป็นปฏิกิริยาที่ถูกค้นพบ ครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1912 โดย Louis Maillard เมื่ออาหารทุกชนิดได้รับความร้อนจะมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) มีการสลายตัว (degradation) และมีการรวมตัวกัน (condensation) ของหมู่อะมิโนกับ สารประกอบรีดิวซ์ พัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนถึงน้ำตาลและน้ำตาลแดง ทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ

การเกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดของอาหารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีทั้งสี กลิ่น และรสชาติเกิดขึ้นแตกต่างกัน และปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และจะแปรผันตามระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ เช่น เกิดขึ้นระหว่างการกั่วมีสติกกาแฟ ถั่วลิสง และ โกโก้ การไหม้ของน้ำตาล (sugar caramel) การทอด การอบเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ขนมอบ และการบึ่ง ย่าง เผา อาหาร เป็นต้น อาหารบางชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดแล้วจะทำให้อาหารมีคุณภาพสี กลิ่น และรสชาติดีขึ้น แต่มีอาหารบางชนิดก็ไม่พึงประสงค์จะให้เกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดนี้

### 2.6.4 การจำแนกชนิดของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ สามารถจำแนกย่อยออกได้เป็น 2 แบบ คือ การเกิดปฏิกิริยาการเมลลาร์ด (caramellization) และการเกิดปฏิกิริยามอลลาร์ด เป็นปฏิกิริยา ระหว่างหมู่คาร์บอนิลจากโมเลกุลของน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่เอมีนที่อยู่ใน โมเลกุลของแอม โมเนีย กรดอะมิโน หรือ โปรตีน เป็น carbonyl-amine reaction อย่างไรก็ตาม ทั้งสองปฏิกิริยามีอินเทอร์มีเดียตและผลิตภัณฑ์สุดท้ายเหมือนกัน

### 2.6.5 การเมลเลชัน

การเมลเลชัน เป็นการให้ความร้อนสูงสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก (thermolysis) และเกิดพอลิเมอร์เซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้ สารเริ่มต้นจะเป็นน้ำตาลเท่านั้น เช่น การเผาน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส น้ำจะถูกกำจัดออกไปจากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสโดยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่ และเป็นวงแหวน (anhydro ring) มีความขุ่นหนืด มีรสขม และมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งจะผันแปรตามระยะเวลาและระดับอุณหภูมิที่ใช้

### 2.6.6 ปฏิกิริยามอลาร์ด

เมื่อน้ำตาลแอลโดสหรือคีโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซิงได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำ ( $a_w > 0.2$ ) กับเอมีนจะทำให้เกิดสารประกอบต่างๆมากมายหลายชนิด ซึ่งมีผลต่อสี กลิ่นและรสชาติของอาหาร และอาจเป็นสิ่งที่พึงประสงค์หรือไม่พึงประสงค์ก็ได้ ปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นขณะทอด อบ ปิ้งย่าง หรือระหว่างการเก็บรักษาอาหารน้ำตาลรีดิวซิงจะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีโนในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน และโปรตีนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล เรียกว่า ปฏิกิริยามอลาร์ด หรือ nonenzymatic browning ซึ่งต่างจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามอลาร์ด มีดังนี้

- 1) น้ำตาลรีดิวซิงทั้งคีโตสและแอลโดส จะรวมตัวกับหมู่เอมีโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน
- 2) เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นเอมีน และมีการเรียงตัวใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (aldoseamine) หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า Amadori products เช่น 1-อะมิโน-1-ดีออกซี-คีโตส ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ เมื่อมีพีเอช 5 หรือต่ำกว่า

- 3) เกิดปฏิกิริยา enolization ของ Amadori products ได้เป็นไดคิโตสเอมีน หรือไดอะมิโนซูการ์ เช่น 3-ดีออกซีเฮกโซซูโลส

- 4) เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซสอนุพันธ์ฟูแรน คือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอรัลดีไฮด์ (5-hydroxymethyl-2-furaldehyde หรือ HMF)

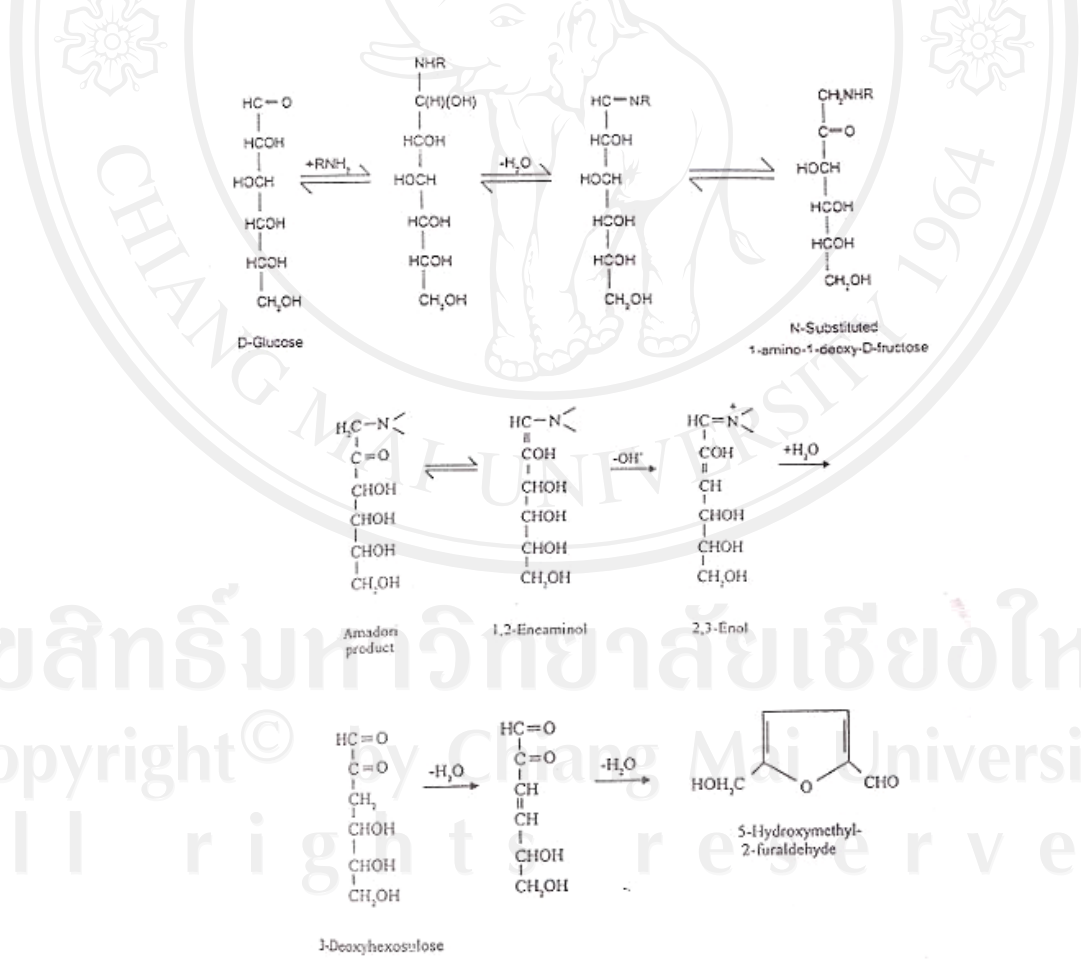
- 5) อนุพันธ์ฟูแรนวงแหวน เช่น HMF จะเกิดพอลิเมอร์หรืออย่างรวดเร็วดังกล่าวได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำ ซึ่งต่างจากการเกิดการเมลเลชันซึ่งมีน้ำตาลเพียงอย่างเดียว สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นนี้จึงเรียกว่า เมลานอยดิน (melanoidins) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโมลต่อโมล (mole per mole reaction) ดังรูป 2.8 ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จากการ



เกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ดจึงมีทั้งพอลิเมอร์ที่ละลายและไม่ละลายในน้ำและพบได้ในอาหารที่มีน้ำตาล ริคิวซิง กรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบในโตรเจนอื่นๆอยู่รวมกันและได้รับความร้อน เช่น การเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ขนมอบ ปฏิกิริยานี้ยังมีความสำคัญต่อการทำคาราเมล ทอฟฟี่ และ ช็อกโกแลตนม เป็นต้น

ข้อเสียของปฏิกิริยามเมลลาร์ด คือทำให้กรดอะมิโนไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นทั้งที่อยู่ในรูปอิสระและที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของโปรตีนลดน้อยลง ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบนี้จะทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง นอกจากนี้หากเป็นอาหารที่มีโปรตีนสูงและได้รับความร้อนสูงด้วย ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นสาร heterocyclic amine ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ด คือ อุณหภูมิ พีเอช ความชื้น ออกซิเจน โลหะ ฟอสเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์



รูป 2.7 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ด  
ที่มา: นิธิยา (2549)



อัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นภาวะที่มีสารมีความเข้มข้นสูง และอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากเกิด autocatalytic อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้จะเพิ่มเป็น 2-3 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ถ้าในอาหารมีน้ำตาลฟรุกโตสจะทำให้อัตราเร็วขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น ความเข้มข้นของสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำจะชะลอปฏิกิริยาเมลลาร์ดให้ช้าลงได้

นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนิลกับเอมีนยังสามารถยับยั้งได้เมื่อลดค่าพีเอชให้ต่ำลง เช่น ที่พีเอช 3 น้ำตาลจะมีความคงตัวมากที่สุดในรูป pyranose hemiacetal ring เมื่อพีเอชสูงขึ้น น้ำตาลจะเปลี่ยนรูป reactive acyclic aldehyde ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันระหว่างน้ำตาลกับเอมีนได้อย่างรวดเร็ว การที่พีเอชลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดช้าลง ดังนั้นการสูญเสียกรดอะมิโนซึ่งมีสมบัติเป็นด่างในปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเป็นปฏิกิริยาที่ยับยั้งตัวเองได้

น้ำ หรือ  $a_w$  ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด เช่น ในภาวะแห้งน้ำตาลกลูโคสกับกรดอะมิโน ไกลซีนจะคงตัวและไม่เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดถึงแม้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียสก็ตาม แต่เมื่อมีน้ำเพียงเล็กน้อยปฏิกิริยาเมลลาร์ดก็จะเกิดขึ้นได้ทันที ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำ การเกิดปฏิกิริยานี้จึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนรูปของน้ำตาลเป็นรูป reactive aldehyde แต่ที่อุณหภูมิสูง การสูญเสีย น้ำออกจากโมเลกุลของน้ำตาลจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เพราะทำให้มีน้ำเกิดขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะช้าลงอีกครั้งเมื่อมีปริมาณน้ำมากจนทำให้สับสเตรทเจือจางลง ซึ่งปริมาณน้ำสูงสุดสำหรับปฏิกิริยาสีน้ำตาล คือประมาณร้อยละ 30

ออกซิเจนไม่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด นอกจากออกซิเจนจะช่วยออกซิไดส์สารอื่นให้เป็นรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลนี้จึงเกิดขึ้นได้ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ส่วนแร่ธาตุที่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด ได้แก่ ไอออนทองแดง เหล็ก และสังกะสี

ขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ สรุปได้ดังแผนภูมिरูป 2.9

## 2.6.7 การวัดปฏิกิริยาเมลลาร์ด

การวัดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของสับสเตรทแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน และยังแปรผันตามขั้นตอนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดอีกด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดสี กลิ่น และรสชาติ ของผลิตภัณฑ์อาหารแตกต่างกันออกไป

ปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้น คือ ปฏิกิริยาของน้ำตาลกับกรดอะมิโน ซึ่งสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของ optical rotatory power ของสารละลายน้ำตาลได้หรือติดตามการเปลี่ยนพีเอช ของสารละลายเมื่อหมู่อะมิโนที่มีสมบัติเป็นด่างถูกทำปฏิกิริยา ทำให้มีปริมาณลดน้อยลงนอกจากนั้นยังอาจใช้วิธี potentiometric titration, cryscopy และ polarography ก็ได้



1) การควบคุมปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่ดีที่สุด คือ การกำจัดสารเริ่มที่เป็นสับสเตรทของปฏิกิริยา ซึ่งน้ำตาลกลูโคสเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ก่อนข้างเร็วกว่าน้ำตาลฟรักโตส และสามารถกำจัดน้ำตาลกลูโคสได้โดยออกซิไดส์ให้เป็นกรดกลูโคนิกด้วยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส

2) การล้างเป็นวิธีการง่ายๆที่ช่วยลดปริมาณน้ำตาลและกรดอะมิโนออกจากผิวนอกได้ เพราะสารเหล่านี้ละลายได้ดีในน้ำ สำหรับอาหารบางชนิด เช่น มันฝรั่ง การเก็บรักษาไว้ระยะหนึ่งจะทำให้ปริมาณน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสตาร์ช จะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลให้น้อยลงระหว่างการแปรรูป หรือระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้

3) ภาวะที่ใช้ในการแปรรูปอาหาร ควรใช้อุณหภูมิต่ำสุด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดน้อยที่สุด

4) ควบคุมปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลง หรือเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้นจนทำให้สับสเตรทเจือจางลง

5) การลดพีเอชก็ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ และอาจเพิ่มพีเอชของผลิตภัณฑ์อาหารให้สูงขึ้นตามที่ต้องการในภายหลัง

6) ใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ degradation product ของอะมิโนซูการ์ ป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันเกิดพอลิเมอร์เซชันเป็นเมลานอยดิน ข้อเสียของการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือ จะไปทำปฏิกิริยากับวิตามินบีหนึ่งและโปรตีนด้วย ทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง จึงไม่อนุญาตให้ใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอาหารที่เป็นแหล่งวิตามินบีหนึ่งหรือโทอะมิน

7) การใช้สารเคมียับยั้งการทพหน้าทีของหมู่คาร์บอนิลอิสระ หรือสารประกอบคาร์บอนิลอื่นๆก็ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ เช่น ใช้สารประกอบซัลไฟด์ คือ โซเดียมและโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์จะยับยั้งปฏิกิริยาการรวมตัวของสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิลกับเอมีน โดยหมู่ซัลไฟด์จะไปรวมตัวกับหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลแอลโดส และทำให้เกิดสารประกอบ ดังสมการ



ปัจจุบันยังไม่พบว่ามีการใช้สารเคมีใดที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดีเทียบเท่ากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การใช้เกลือโซเดียมและโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์ให้ผลยับยั้งได้ไม่ดีเท่ากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

8) หากสารประกอบคาร์บอนิลเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด การยับยั้งอาจทำได้โดยใช้สารต้านออกซิเดชัน สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง อาจใช้กรดแอสคอบิกได้ แต่การใช้ปริมาณกรดแอสคอบิกสูงในปฏิกิริยาเมลลาร์ด อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว

ขึ้น เนื่องจากเกิด oxidative degradation ของกรดแอสคอบิก และทำปฏิกิริยาต่อกับสารประกอบคาร์บอนิล ผ่านทางแอลดอลคอนเดนเซชัน หรือทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนเกิดเป็นสารสีน้ำตาลได้

อย่างไรก็ตามถึงแม้ปฏิกิริยามेलลาร์ดนี้ไม่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด เพราะทำให้คุณภาพของอาหารลดต่ำลง แต่ก็มีผลิตภัณฑ์อาหารอีกหลายชนิดที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยามेलลาร์ด เพื่อทำให้อาหารนั้นมีสี กลิ่น และรสชาติดี เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบต่างๆ อาหารขบเคี้ยว เนื้ออบ และบาร์บีคิว

การปรุงอาหารโดยใช้ไมโครเวฟจะไม่เกิดปฏิกิริยามेलลาร์ด ดังนั้นอาจต้องใช้ browning precursor เติมลงในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นระหว่างการทำให้อาหารร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ นอกจากนี้สารให้กลิ่นที่ระเหยได้หลายชนิดจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยามेलลาร์ดระหว่างการปรุงอาหาร เพื่อทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติดี ดังนั้น ปัจจัยต่างที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยามेलลาร์ดนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร (เช่น Maillard precursor หรือ กรดแอสคอบิก) ค่า  $a_w$  การได้รับออกซิเจน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร

## 2.7 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

เครื่องอบแห้งถูกพัฒนาขึ้นมาใช้เนื่องจากการตากแห้งมีข้อด้อยหลายด้าน เช่น กำลังงาน ความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิที่ไม่สูงนักและกระแสลมธรรมชาติไม่แรงพอ ทำให้ใช้เวลานาน ใช้พื้นที่มากและมักทำในที่เปลี่ยว ซึ่งทำให้มีโอกาสปนเปื้อน (Potter and Hotchkiss, 1995)

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมสำหรับการเก็บรักษาอาหารและมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตอาหาร การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดการถ่ายเทความร้อนแลมวลาสารในเวลาเดียวกันรวมทั้งเป็นการดำเนินการทำให้ค่ากัมมันตภาพน้ำต่ำลง โดยการกำจัดน้ำโดยการระเหยไปยังไอน้ำที่ไม่อิ่มตัว (Khrasheh *et al.*, 1997) วัตถุประสงค์หลักของการอบแห้งของผลิตภัณฑ์อาหาร คือการกำจัดน้ำออกจากของแข็งเพื่อให้ถึงระดับที่ไม่ให้เกิดสปอร์ของจุลินทรีย์ ดังนั้นเหตุผลหลักที่เป็นที่นิยมของการอบแห้งอาหารการเก็บรักษาอาหารที่ยาวนานขึ้นรวมถึงปริมาณที่ลดลงของผลิตภัณฑ์ (Prabhanjan *et al.*, 1995) การอบแห้งแบบลมร้อนผลิตภัณฑ์จะแห้งที่อุณหภูมิสูงและเวลาในการอบแห้งนาน

ข้อเสียของการอบแห้งแบบลมร้อน คือ ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งที่เกิดจากการอบแห้งแบบลมร้อน คืออุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งแบบลมร้อนใช้ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ยาวนานเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงซึ่งได้แก่ สี

กลิ่น คุณค่าทางอาหาร ความหนาแน่น และการคืนรูป (Lin *et al.*, 1998; Drouzas *et al.*, 1999) การแข็งตัวของเปลือกก็เป็นปัญหาพื้นฐานของการอบแห้งผักและผลไม้ซึ่งเกิดจากการอบแห้งอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขึ้นเพราะในกระบวนการอบแห้งอัตราการระเหยของน้ำมีสูงกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แข็ง (case hardening) (Yongsawatdigul and Gunasekaran, 1996) ข้อเสียอื่น ๆ ของการอบแห้งแบบลมร้อนคือ ประสิทธิภาพในการใช้กำลังงานต่ำทำให้สิ้นเปลืองกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าหาวิธีการอบแห้งแบบอื่น ๆ เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งการอบแห้งแบบลมร้อนสามารถแก้ไข้ปัญหาของการอบแห้งแบบลมร้อนได้

## 2.8 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ

การให้ความร้อนโดยใช้เครื่องไมโครเวฟเกิดจากการเปลี่ยนรูปของกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นกำลังงานความร้อน โดยอาศัยโมเลกุลที่มีขั้วของวัตถุดิบนั้น มีลักษณะพิเศษที่สำคัญ คือเป็นการให้ความร้อนแบบ volumetric heating (Mullin, 1995) คือ การที่วัตถุดิบสามารถดูดซับกำลังงานไมโครเวฟได้โดยตรงและเข้าสู่ภายในวัตถุดิบและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งแบบลมร้อนที่อาศัยการพาความร้อนต่อด้วยการนำความร้อนโดยความร้อนจะแพร่จากผิวหน้าของวัตถุดิบเข้าไปในวัตถุ ในการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ ความร้อนจะเกิดขึ้นในวัตถุดิบตลอดเวลาทำให้มีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนที่ความร้อนจะแพร่จากผิวหน้าเข้าสู่วัตถุดิบ (Gowen *et al.*, 2006) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟเกิดจากความดันที่แตกต่างกันระหว่างภายในกับบริเวณผิวหน้าของวัตถุดิบทำให้เป็นแรงผลักดันทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากวัตถุดิบ

ข้อดีของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ คือ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟใช้กำลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟช่วยในการกำจัดความชื้นของผลิตภัณฑ์โดยไม่เกิดปัญหาผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แข็ง (Prabhajan *et al.*, 1995) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนลดเวลาในการอบแห้งของวัตถุดิบที่เป็นพืชลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน โดยคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายไว้ได้ดี (Ren and Chen, 1998) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟใช้พื้นที่ในกระบวนการผลิตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนเนื่องจากการเพิ่มอัตราการผลิตสามารถทำได้โดยการออกแบบเครื่องมือให้ใช้วัตถุดิบที่มากและหนาแน่นขึ้นในพื้นที่น้อยได้โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ในการอบให้มากขึ้นได้ ในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟต้นทุนการผลิตจะต่ำ



เพราะในการอบแห้งจะไม่มี การสูญเสียกำลังงานความร้อนให้แก่ผนังของเครื่องไมโครเวฟและ สิ่งแวดล้อม (Mullin, 1995; Thuery, 1992) ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ไม่ได้เกิดขึ้นจากผนังหรือเกิดจากอากาศรอบผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีการสูญเสียกำลังงานต่ำมาก ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีอุณหภูมิรอบๆผลิตภัณฑ์ไม่สูง อีกทั้งยังสามารถ ควบคุมการเปิดและปิดได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำในการให้ความร้อน (Mullin, 1995) ข้อดี อื่นๆของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟคือการยับยั้งอุณหภูมิบริเวณผิวหนังของผลิตภัณฑ์ไม่ให้สูง ยับยั้งการหายใจของผลิตภัณฑ์ มีอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ต่ำเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิคสุญญากาศลดการ สูญเสียความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบและประหยัดกำลังงานการอบแห้งด้วย ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 20 จึงควรใช้การอบแห้งด้วย ไมโครเวฟในช่วง falling rate หรือในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำจนเสร็จสิ้นการอบแห้ง (Maskan, 2000)

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกับการอบแห้งด้วยวิธีอื่น เช่น Freeze drying, radio frequency drying การอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่า ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง มีสี กลิ่นที่ดี คงคุณค่าทางอาหาร มีความคงทนต่อเชื้อจุลินทรีย์ มีการ ยับยั้งเอนไซม์ต่างๆ มีการคืนรูปที่ดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้กรอบและดูสดมากกว่าการอบแห้งแบบอื่นๆ (Vadivambal R. and Jayas D.S, 2007)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 ในการศึกษาการพัฒนาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟของผลไม้ชนิดต่างๆ มีรายงาน การศึกษา ดังนี้

การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยทดลองใช้เนื้อลำไยพันธุ์คอ 500 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 495 (ฐานแห้ง) อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 18 ปรับ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ควบคู่กับการปรับระดับกำลังงาน ไมโครเวฟ 4 ระดับ คือ 100, 180, 300 และ 450 วัตต์ ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบลำดับขั้น ซึ่งใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ระดับกำลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 1.7 ชั่วโมง ตามด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระดับกำลังงานไมโครเวฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 3.3 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุด โดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ 0.96 กิโลกรัมต่อชั่วโมง-กิโลกรัมของแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส การใช้ไมโครเวฟ



ร่วมกับลมร้อนแบบลำดับขั้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ร้อยละ 64.2 และลดอัตราการสิ้นเปลืองกำลังงานจำเพาะได้ร้อยละ 45.6 เมื่อลำโอบแห้งที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองทอง มีค่า  $L^* = 53.89$ ,  $a^* = 4.70$  และ  $b^* = 14.74$  (Varith *et al.*, 2007)

การอบแห้งแผ่นแอบเปิ้ลด้วยวิธีไมโครเวฟแบบการใช้และไม่ใช้ลมร้อน (ลมร้อนมีอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส) ก่อนการอบแห้งแบบไมโครเวฟ ในการอบแห้งโดยไมโครเวฟใช้กำลังงานเท่ากับ 150, 300, 450 และ 600 วัตต์ พบว่า การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนก่อนการอบแห้งแบบไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งโดยไม่ใช้ลมร้อนก่อนการอบแห้งประมาณ 3 เท่า (Wang *et al.*, 2007)

การอบแห้งกากแอบเปิ้ลด้วยวิธีไมโครเวฟแบบการใช้และไม่ใช้ลมร้อนก่อนการอบแห้งแบบไมโครเวฟ โดยเครื่องอบไมโครเวฟ โดยในการทดลองใช้กำลังงานของเครื่องอบไมโครเวฟเท่ากับ 150, 300, 450 และ 600 วัตต์ ใช้ลมร้อนก่อนการอบด้วยไมโครเวฟที่ 105 องศาเซลเซียส พบว่า การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนก่อนการอบแห้งแบบไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งโดยไม่ใช้ลมร้อนก่อนการอบแห้งประมาณ 3 เท่า ดังรูป 2.10 (Wang *et al.*, 2007)

การศึกษาการคืนรูปและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของการอบแห้งลูกพีช โดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟและเครื่องอบแห้ง Far-Infrared ที่ระดับกำลังงานต่างๆ พบว่า

1) เมื่อใช้กำลังงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟและเครื่องอบแห้ง Far-Infrared เพิ่มขึ้น อัตราการคืนรูปจะเพิ่มขึ้นและการใช้กำลังงานในการอบแห้งลดลง

2) ช่วง Falling Rate ของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟและเครื่องอบแห้ง Far-Infrared จะมี 2 ช่วงคือ ช่วงก่อนความชื้นมากกว่าร้อยละ 1.7 ของน้ำหนักแห้ง และช่วงความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 1.7 ของน้ำหนักแห้ง

3) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของการอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )

4) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของการอบแห้งด้วยเครื่อง Far-Infrared พบว่าผู้ทดสอบมีความชอบลดลงเมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นและอัตราการใช้กำลังงานต่ำสุดเมื่อการแลกเปลี่ยนความชื้น 1.730 กิโลกรัมวัตต์ต่อกิโลกรัม ผู้ทดสอบชิมมีความชอบมากที่สุดและการใช้กำลังงานต่ำสุดของกำลังงาน คือ 2.891 และ 2.860 กิโลกรัมวัตต์ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อัตราการใช้กำลังงานลดลงเมื่อเพิ่มกำลังงาน กำลังงานที่ผู้ทดสอบชิมมีความชอบมากที่สุดคือ 1.231 กิโลกรัมวัตต์ต่อกิโลกรัม (Wang J. and Sheng K., 2006)

2.8.2 ผลการศึกษาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟของอาหารประเภทผักชนิดต่างๆ มีรายงานการศึกษาดังนี้

การศึกษาการอบแห้งกลีบกระเทียมโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะต่างๆ คือ ใช้กำลังงานของไมโครเวฟที่ 10, 20, 30 และ 40 วัตต์ ใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วลมร้อน 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที โดยศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การคงทนของกลิ่น และวิตามินซี เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งจากการศึกษา พบว่า สภาวะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่ สภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 40 วัตต์ร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 1.0 เมตรต่อวินาที ให้กลีบกระเทียมอบแห้งที่มีคุณภาพดีที่สุดในด้านสี กลิ่น และปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ รวมทั้งมีการใช้กำลังงานน้อยที่สุด (Sharma and Prasad, 2006)

การอบแห้งแผ่นฟักทองด้วยวิธีไมโครเวฟ ลมร้อนและแบบการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้กำลังงานของไมโครเวฟ 160 และ 350 วัตต์ ใช้อุณหภูมิลมร้อนในการอบแห้ง 50 และ 75 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที และการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะของกำลังงานไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อน 4 การทดลอง คือ 160 วัตต์ 50 องศาเซลเซียส, 160 วัตต์ 75 องศาเซลเซียส, 350 วัตต์ 50 องศาเซลเซียส และ 350 วัตต์ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า อัตราการอบแห้งของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่าการใช้ไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียวโดยที่สภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 75 องศาเซลเซียส ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดรองลงมาคือสภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียสและการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีอัตราการอบแห้งต่ำสุด ส่วนค่าสีที่ดีที่สุด (ค่า L สูงที่สุด) คือสภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 75 องศาเซลเซียสให้ค่าสีที่ดีที่สุดรองลงมาคือสภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส และการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าสีที่ไม่ดีที่สุด และในแง่ของการใช้กำลังงานได้ผลในทำนองเดียวกับอัตราการอบแห้ง และค่าสี คือ ที่สภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 75 องศาเซลเซียสใช้กำลังงานต่ำที่สุดรองลงมาคือสภาวะกำลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส และการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสใช้กำลังงานมากที่สุด (Alibas, 2007)

การอบแห้งมันฝรั่งด้วยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบลมร้อนที่สภาวะกำลังงานของไมโครเวฟที่ 480 วัตต์และแปรผันความดันของสุญญากาศที่ 6, 12, 18 และ 24 กิโลปาสกาล พบว่าเวลาในการอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศเร็วกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสประมาณ 6 เท่าและจากการศึกษาคุณภาพของมันฝรั่งอบแห้งใน

ด้านส่วนประกอบ ค่าสี คุณสมบัติด้านกายภาพ และ โครงสร้างพบว่าขึ้นอยู่กับความเป็นสัพัญญากาศของเครื่องไมโครเวฟและที่สภาวะความดันสัพัญญากาศของเครื่องไมโครเวฟสัพัญญากาศเป็น 24 กิโลปาสกาล จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดและให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆดีที่สุด (Bonddaruk *et al.*, 2007)

การอบแห้งแครอทแผ่นบางโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ, ไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนและการอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนจะทำให้หลังจากการอบแห้งแครอทให้ได้ความชื้นที่ 0.47 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง โดยเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้ง การคั้นรูปและสีของผลิตภัณฑ์ พบว่า การอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่สภาวะกำลังงานไมโครเวฟสูงสุดร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนร้อยละ 98 และมีผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ส่วนค่าสีการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนจะมีค่า L (Lightness) น้อยที่สุด ค่า a\* และ b\* มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ และมีร้อยละการคั้นรูปมากกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน (Sumnu *et al.*, 2005)