บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล้วย

กล้วยจัดเป็นพันธุ์ไม้ล้มลุกขนาดใหญ่ มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Musa sapientum* Linn. จัดอยู่ในวงศ์ Musaceae อนุกรมวิธานได้จัดจำแนกกล้วยตามลำดับดังนี้ (สมศักดิ์, 2547)

Class	-	Monocotyledoneae
Order	-	Zingiberales
Family	-	Musaceae
Genus	-	Musa
Section	-	Eumusa
Species	-	spp.

พืชในตระกูล Musaceae จัดแบ่งได้ 2 สกุล ตามลักษณะของการแตกหน่อคือ สกุลกล้วยโทน (Ensete) ได้แก่ กล้วยที่ไม่มีการแตกกอจะขึ้นเป็นต้นเดี่ยวๆ มีอายุประมาณ 2 ปี หรือมากกว่าผลรับประทานไม่ได้เมื่อให้เมล็ดแล้วต้นก็จะตายไปนิยมใช้ทำแป้งหรือเอาเส้นใย ส่วนอีกสกุลหนึ่งคือ สกุลกล้วยแตกกอ (Musa) ได้แก่ กล้วยที่มีปลูกกันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีการแตกกอหรือหน่อ ผลของกล้วยสามารถนำมาใช้เป็นอาหารและรับประทานได้ ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกมีกล้วยอยู่ประมาณ 200 – 300 พันธุ์ สำหรับชนิดของกล้วยที่มีในประเทศไทยนั้นได้เก็บรวบรวมพันธุ์กล้วยและปลูกไว้ จำนวนชนิดของกล้วยแบ่งได้ 5 กลุ่ม (เกษร, 2545) ดังนี้

1. กล้วยป่าออร์นาตา (wild ornata : Musa ornata) ปลูกกันแถบภาคเหนือนิยมเรียก กล้วยบัว กล้วยป่า

2. กล้วยป่าอะคิวมินาตา (wild acuminata : Musa acuminata) กล้วยป่าในกลุ่มนี้มีอยู่ 5 ชนิด ได้แก่ malaccensis microcarpa seamea bankaii และ burmanica มีแพร่หลายในประเทศไทยอาจเรียกชื่อพ้องว่า กล้วยทอง กล้วยแข

3. กล้วยป่าบาลบิเซียนา (wild balbisiana : Musa balbis) กล้วยป่ากลุ่มนี้นิยมเรียกชื่อว่า กล้วยตานี หรืออาจเรียกชื่อพ้องว่า กล้วยพองลา กล้วยป่า

4. กล้วยในสายพันธุ์อะคิวมินาตา (acuminata cultivars) กล้วยที่อยู่ในกลุ่มนี้มีหลายพันธุ์ ได้แก่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยไข่ กล้วยทองร่วง กล้วยหอม กล้วยสา กล้วยนมสาว

กล้วยลาย กล้วยนาก กล้วยทองกายดำ กล้วยหอมทอง กล้วยหอมเขียว กล้วยกุ้งเขียว กล้วยหอมค่อม กล้วยไข่บอง กล้วยดอกไม้

5. กล้วยลูกผสมอะคิวมินาตากับบาลบิเซียนา (acuminata balbisiana) กล้วยที่อยู่ในกลุ่มนี้มีหลายพันธุ์ ได้แก่ กล้วยลังกา กล้วยเงิน กล้วยน้ำพัด กล้วยทองเดช กล้วยนางนวล กล้วยไข่โบราณ กล้วยน้ำ กล้วยขม กล้วยขมนาก กล้วยร้องหวี กล้วยนมหมี กล้วยหักมุก กล้วยปลวกนา กล้วยน้ำว้า กล้วยน้ำว้าค่อม กล้วยน้ำว้าขาว กล้วยน้ำว้าแดง กล้วยเทพรส กล้วยทิพย์ กล้วยพญา กล้วยส้ม

นอกจากนี้ยังมีการจำแนกชนิดกล้วยในประเทศไทยโดยการนับจำนวนโครโมโซม (chomosome) จากการรวบรวมพันธุ์กล้วยทั่วประเทศไทยทั้งหมด 330 พันธุ์ เมื่อนำมาจำแนกจะได้ประมาณ 56 สายพันธุ์ กล้วยใน section Eumusa แบ่งออกได้เป็น กลุ่มโครโมโซม AA ได้แก่ กล้วยป่าและกล้วยปลูก ได้แก่ กล้วยไข่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยทองร่วง กล้วยไล กล้วยสา กล้วยทองกาบดำ และกล้วยหอมทองสั้น กลุ่มโครโมโซม AAA ได้แก่ กล้วยนาก กล้วยครั่ง กล้วยกุ้งเขียว กล้วยหอมเขียว กล้วยหอมทอง กล้วยดอกไม้ กล้วยหอมแดง กล้วยคลองจัน และกล้วยไข่บอง กลุ่มโครโมโซม AB ได้แก่ กล้วยอ่างขาง หรือแดง หรือหก กลุ่มโครโมโซม AAB ได้แก่ กล้วยน้ำฝาด กล้วยลังกา กล้วยร้อยหวี กล้วยเงิน กล้วยนมสาว กล้วยไข่โบราณ กล้วยทองเดช กล้วยนางนวล กล้วยขม และกล้วยขมหนัก กลุ่มโครโมโซม ABB ได้แก่ กล้วยเปลือกหนา กล้วยนมหมีหรือพม่าแหกคุก กล้วยพญา กล้วยหักมุก กล้วยส้ม และกล้วยน้ำว้า กลุ่มโครโมโซม ABBB ได้แก่ กล้วยเทพรส หรือกล้วยปลีหาย กลุ่มโครโมโซม BB ได้แก่ กล้วยตานี กล้วย หรือพองลา หรืองู และกลุ่มโครโมโซม BBB ได้แก่ กล้วยเล็บช้างกุด เกิดจากการผสมระหว่างกล้วยเทพรสกับกล้วยตานี

สำหรับลักษณะภายนอกโดยทั่วไปของกล้วย คือ ลำต้นตั้งตรง เมื่อโตเต็มที่อาจจะมีความสูงสองถึงเก้าเมตร แต่ลำต้นที่เห็นกันนั้นแท้จริงแล้วเป็นลำต้นเทียม (pseudostem) ส่วนลำต้นที่แท้จริงของกล้วยจะเกิดเป็นเหง้าใต้ดิน (corm) ลำต้นเทียมจะประกอบด้วยกาบใบที่เรียงกันอัดกันแน่น ใบเป็นใบเดี่ยวสีเขียวขนาดใหญ่ ผิวใบด้านบนเรียบเป็นมัน ท้องใบสีนวลเส้นกลางใบใหญ่และแข็ง ก้านใบยาว ดอกของกล้วยออกเป็นช่อ (inflorescence) อยู่ที่ปลายยอด ลักษณะห้อยหัวลงมีสีแดงคล้ำ เรียกว่า ปลี (banana flower) เมื่อเปิดกาบปลีดูจะเห็นดอกเดี่ยวเรียงกันตั้งแต่ข้อแรกจนถึงข้อที่ 5 -15 ของช่อดอกเป็นดอกตัวเมีย ส่วนปลายของช่อดอกเป็นดอกตัวผู้ ผลของกล้วยทั้งหมดบนก้านดอกรวม เรียกว่า เครือ (bunch) ส่วนผลกล้วยแต่ละกลุ่ม แต่ละข้อเรียกว่า หวี (hand) แต่ละผลเรียกว่า ผลกล้วย (finger) กล้วยเครือหนึ่งอาจจะมีจำนวนหวี 5 - 15 หวี และแต่ละหวีมีจำนวนผลตั้งแต่ 5 - 20 ผล ขนาดของผลเมื่อโตเฉลี่ยประมาณ 5 - 15

เซนติเมตร กว้าง 2.5 - 5 เซนติเมตร ผลสุกโดยทั่วไปมีเปลือกสีเหลืองแต่อาจมีสีเขียวหรือแดง แล้วแต่พันธุ์ (พาณิชย์, 2542 และ สุธิดา, 250)

2.1.1 กล้วยน้ำว้า

กล้วยน้ำว้า ชื่อสามัญ Pisang Awak ชื่อพ้อง กล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยใต้ กล้วยมะลิอ่อง กล้วยตานี และกล้วยอ่อง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Musa* (ABB group) "Kluai Nam Wa" กล้วยน้ำว้ามีลำต้นเทียมสูงไม่เกิน 3.5 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกและด้านในมีสีเขียวอ่อน ก้านใบมีร่องค่อยข้างแคบ เส้นกลางใบมีสีเขียวอมชมพู ก้านช่อดอกไม่มีขน ใบประดับเป็นรูปไข่ค่อนข้างป้อมม้วนงอขึ้นปลายมน ด้านบนจะมีสีแดงอมม่วงมีนวลและด้านล่างสีแดงเข้ม ส่วนก้านของดอกตัวเมียจะตั้งตรงและมีสีงาช้าง สำหรับเกสรตัวผู้มีสีครีม ส่วนเกสรตัวเมียจะมีความยาวกว่าเกสรตัวผู้มาก กลีบรวมใหญ่สีชมพูอ่อนปลายสีเหลือง กลีบรวบเดี่ยวสีขาวใสมีรอยหยักที่ปลาย เครือห้อยลงเครือหนึ่งมี 7 – 10 หวี หวีหนึ่งมี 10 – 16 ผล มีเหลี่ยมก้านผลยาว (ภาพที่ 2.1) เมื่อสุกเนื้อจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองปนสีน้ำตาล มีรสหวาน และแกนกลางมีสีเหลือง ชมพู หรือขาว ซึ่งทำให้แบ่งออกเป็นกล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยน้ำว้าแดง และกล้วยน้ำว้าขาว ส่วนกล้วยน้ำว้าดำมีเนื้อขาวรสหวาน เปลือกมีสีม่วงและแตกลายงาเป็นสีสนิม สำหรับการเพาะปลูกจะปลูกกันอย่างแพร่หลายทั่วทุกภาคของประเทศไทย จังหวัดที่เพาะปลูกได้แก่ เลย นครพนม หนองคาย ชุมพร ระนอง และนครราชสีมา กล้วยน้ำว้าสามารถทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดีกว่ากล้วยพันธุ์อื่นๆ การดูแลรักษาง่ายและการใช้ประโยชน์จากผล ต้น ใบ และดอกมากกว่ากล้วยชนิดอื่นๆ การบริโภคส่วนใหญ่เป็นแบบบริโภคผลสดแต่ก็ยังมีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กล้วยตาก กล้วยกวน กล้วยทอด กล้วยฉาบ เป็นต้น สำหรับการส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูป เช่น กล้วยกระป๋องในน้ำเชื่อม กล้วยบวชชี กล้วยผสมกับผลไม้อื่น (ฟรุ๊ทสลัด) (เบญจมาศ, 2545 และนิรนาม, 2550)

ภาพที่ 2.1 กล้วยน้ำว้า

สำหรับปริมาณส่วนประกอบคุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้าดิบและสุกในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม แสดงดังตารางที่ 2.1 และปริมาณส่วนประกอบของกรดอะมิโนและโปรตีนของกล้วยน้ำว้าในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณส่วนประกอบคุณค่าทางอาหารของกล้วยน้ำว้าดิบและสุกในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

สารอาหาร	กล้วยน้ำว้าดิบ	กล้วยน้ำว้าสุก
พลังงาน (กิโลแคลอรี่)	100	122
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	28.7	26.1
โปรตีน (กรัม)	1.4	1.2
ไขมัน (กรัม)	0.2	0.3
วิตามินเอ (IU)	483	375
วิตามินบีหนึ่ง (มิลลิกรัม)	0.04	0.03
วิตามินบีสอง (มิลลิกรัม)	0.02	0.04
ไนอาซีน (มิลลิกรัม)	0.6	0.6
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	31	14
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	8.0	12
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	35.0	32
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.9	0.8
น้ำ (กรัม)	69.0	71.6

ที่มา : นิภา (2546) และ เบญจมาศ (2545)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณส่วนประกอบของกรดอะมิโนและโปรตีนของกล้วยน้ำว้าในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

โปรตีนและกรดอะมิโน	กล้วยน้ำว้า
โปรตีน (กรัม)	1.0
กรดอะมิโนทั้งหมด (มิลลิกรัม)	596
กรดอะมิโนที่จำเป็นทั้งหมด (มิลลิกรัม)	261
ไอโซลูซิน (มิลลิกรัม)	28
ลูซิน (มิลลิกรัม)	45
ไลซิน (มิลลิกรัม)	36
กรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบทั้งหมด (มิลลิกรัม)	12
เมไทโอนิน (มิลลิกรัม)	3
ซิสตีน (มิลลิกรัม)	9
กรดอะมิโนที่มีสูตรโครงสร้างเป็นวงกลม (มิลลิกรัม)	49
เฟนิลาลานิน (มิลลิกรัม)	30
ไทโรซิน (มิลลิกรัม)	19
ทรีโอนิน (มิลลิกรัม)	36
ทริปโตแฟน (มิลลิกรัม)	18
วาลิน (มิลลิกรัม)	37
กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น	
อาร์จินิน (มิลลิกรัม)	31
ฮิสตินิน (มิลลิกรัม)	31
อะลานิน (มิลลิกรัม)	69
กรดแอสปาติค (มิลลิกรัม)	66
ไกลซิน (มิลลิกรัม)	34
โปรซิน (มิลลิกรัม)	31
ซีรีน (มิลลิกรัม)	38

ที่มา : อภิสิทธิ์ (2543)

2.1.2 ขั้นตอนการสุกของกล้วย

ระยะการสุกของกล้วยสามารถแบ่งตามสีเปลือก ดังนี้

ระยะที่ 1 เปลือกมีสีเขียว ผลแข็ง ปอกเปลือกยาก เนื้อกล้วยมีสีขาว ไม่มีการสุกและไม่มีกลิ่นกล้วย

ระยะที่ 2 เปลือกมีสีเขียวและมีสีเหลืองปนเล็กน้อย ผลแข็ง ปอกเปลือกยาก เนื้อกล้วยจะมีสีขาว และไม่มีกลิ่นกล้วย

ระยะที่ 3 เปลือกมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง เนื้อนิ่ม เนื้อกล้วยยังเป็นสีขาว และไม่มีกลิ่นกล้วย

ระยะที่ 4 เปลือกมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว เนื้อกล้วยนิ่ม เริ่มจะสามารถปอกเปลือกได้ง่าย เนื้อกล้วยมีสีเหลืองอ่อนแต่ยังไม่มีการสุก และไม่มีกลิ่นกล้วย

ระยะที่ 5 เปลือกมีสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียวและเริ่มมีกลิ่นกล้วย

ระยะที่ 6 เปลือกมีสีเหลืองทั้งผลและผลกล้วยมีเนื้อแน่น

ระยะที่ 7 เปลือกมีสีเหลือง เนื้อกล้วยอ่อนตัวลงมาก (สุกเต็มที่และมีกลิ่นหอม) และเริ่มมีจุดน้ำตาลเกิดขึ้น

ระยะที่ 8 เปลือกมีสีเหลืองและมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไปและเนื้อเริ่มอ่อนตัวมากและมีกลิ่นกล้วยแรง)

ในช่วงการสุกของกล้วยจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพต่างๆ รวมทั้งคุณค่าทางอาหาร โดยเฉพาะแป้งซึ่งมีปริมาณมากในช่วงผลกล้วยดิบและจะมีปริมาณลดลงเมื่อกล้วยสุกมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลมากขึ้นทำให้กล้วยมีรสหวาน สำหรับกล้วยกลุ่มโครโมโซม AA และ AAA เช่น กล้วยไข่ กล้วยหอม เป็นต้น ปริมาณแป้งจะลดลงอย่างมากเมื่อกล้วยสุกและมีปริมาณกรดตั้งแต่ดิบถึงสุกค่อนข้างจะต่ำ ส่วนกล้วยที่มีกลุ่มโครโมโซม ABB เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหักมุก เป็นต้น เมื่อกล้วยดิบจะมีปริมาณแป้งอยู่มาก และเมื่อกล้วยสุกจะมีปริมาณแป้งลดลงแต่ไม่มากเท่ากลุ่มโครโมโซม AA และ AAA การที่มีปริมาณแป้งอยู่สูงในช่วงสุกจึงทำให้กล้วยมีความเหนียวและความหนาแน่นน้อยกว่ากล้วยในกลุ่มแรก แต่มีปริมาณกรดค่อนข้างสูงจึงทำให้เมื่อสุกแล้วจะมีรสเปรี้ยวเล็กน้อย (เบญจมาศ, 2545 และ สิริรัฐ, 2546)

2.1.3 ประโยชน์ของกล้วย

ประโยชน์ของกล้วยมีมากมาย (นิรนาม, 2550) ได้แก่

2.1.3.1 กล้วยช่วยบรรเทาโรคซึมเศร้า เนื่องจากกล้วยจะมีส่วนประกอบของ tryptophan เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่ร่างกายสามารถจะเปลี่ยนให้เป็น serotonin ซึ่งจะทำให้ร่างกายรู้สึกผ่อนคลาย อารมณ์ดีและมีความสุข

2.1.3.2 กล้วยช่วยรักษาโรคโลหิตจาง กล้วยเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบสูงทำให้สามารถกระตุ้นการสร้างเม็ดเลือดแดงและช่วยรักษาอาการโลหิตจาง

2.1.3.3 กล้วยช่วยควบคุมโรคความดันโลหิต เพราะกล้วยมีธาตุโปแตสเซียมสูงเป็นองค์ประกอบ เมื่อร่างกายมีปริมาณเกลือต่ำและการรับประทานกล้วยจะช่วยควบคุมความดันโลหิต

2.1.3.4 กล้วยช่วยระบบขับถ่ายในร่างกาย เนื่องจากกล้วยมีไฟเบอร์สูงช่วยให้ลำไส้ใหญ่ทำงานได้เป็นปกติ

2.1.3.5 กล้วยช่วยบรรเทาอาการเจ็บเสียดหน้าอก เพราะกล้วยจะช่วยลดความเป็นกรดในกระเพาะอาหารจึงเป็นการช่วยบรรเทาอาการเจ็บปวด

2.1.3.6 กล้วยช่วยบรรเทาโรคแผลในกระเพาะอาหาร เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ชนิดเดียวที่สามารถรับประทานได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ที่เป็นแผลเรื้อรัง อีกทั้งยังช่วยปรับภาวะกรดเกินในกระเพาะอาหารให้กลับสู่ปกติและช่วยลดอาการระคายเคืองในกระเพาะอาหาร

2.1.3.7 กล้วยช่วยบรรเทาความเครียด เนื่องจากกล้วยมีส่วนประกอบของธาตุโปแตสเซียมจะมีผลช่วยทำให้หัวใจเต้นเป็นปกติ ช่วยขนส่งออกซิเจนไปยังสมอง และรักษาสมดุลของน้ำในร่างกาย เมื่อเกิดอาการเครียดอัตราการเผาผลาญพลังงานของร่างกายจะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ระดับโปแตสเซียมในร่างกายลดลง ดังนั้นการรับประทานกล้วยจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากความเครียด

2.1.3.8 กล้วยสามารถจะช่วยลดอัตราการตายด้วยโรคเส้นเลือดที่ไปเลี้ยงสมองอุดตัน (stroke) ซึ่งงานวิจัยของ The New England Journal of Medicine พบว่า การรับประทานกล้วยเป็นประจำทุกวันจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงของอัตราการตายด้วยอาการเส้นเลือดอุดตันได้ถึงร้อยละ 40

2.1.4 การแปรรูปกล้วย

เทคโนโลยีการแปรรูปกล้วย ได้แก่

2.1.4.1 การอบหรือตาก เป็นการใช้เทคโนโลยีการตากแห้งหรืออบแห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ไม่เกิน 70°C เพราะเป็นการระเหยน้ำออกทำให้น้ำตาลในกล้วยเพิ่มขึ้น และอาจจะมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ (นิรนาม, 2550)

2.1.4.2 การทอด เป็นการใช้เทคโนโลยีการระเหยน้ำออก โดยมีอุณหภูมิที่ใช้ในการทอด คือ 160 - 180°C ถ้าเป็นกล้วยดิบจะมีส่วนประกอบเป็นแป้ง การทอดทำให้แห้ง และ

เช่น กล้วยฉาบหากเป็นชิ้นหนาจะกรอบนอกนุ่มใน เป็นต้น (Herrmann, 2005)

2.1.4.3 การปิ้ง เป็นการใช้ความร้อนต่ำและให้โดยตรงกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งการปิ้งจะให้ความร้อนระอุอยู่ภายในและมีผลทำให้ผิวนอกแห้งแข็งแต่เนื้อภายในจะนุ่ม อุณหภูมิของความร้อนที่ใช้ปิ้งจะสูงเกิน 100 °C (นิรนาม, 2550)

2.1.4.4 การต้มหรือนึ่ง กล้วยที่ห่ามจะนำไปต้มในน้ำร้อน น้ำเดือด หรือนึ่งด้วยไอน้ำจนสุก วิธีนี้นิยมใช้ทำกล้วยต้มผสมมะพร้าวคลุกน้ำตาล (นิรนาม, 2550)

2.1.4.5 กล้วยดอง เป็นการนำกล้วยดิบหรือกล้วยที่ยังอ่อนมาผ่านเป็นชิ้นหนาๆ ตามทแยงทั้งเปลือก แช่ลงในน้ำเกลือผสมน้ำส้มสายชูซึ่งบรรจุลงในภาชนะเคลือบปากกว้าง หรืออาจจะดองโดยการใช้ใบตองหรือผ้าขาวบางปิดภาชนะแล้วตากแดดประมาณ 3 วัน การดองอาจดองเฉพาะกล้วยหรือดองรวมกับผักอื่นก็ได้ (นิรนาม, 2550)

2.1.4.6 กล้วยกวน วิธีนี้จะใช้กล้วยสุกงอมมายีจนเละเคล้ากับน้ำตาล น้ำกะทิ กวนในกระทะตั้งไฟอ่อนๆ จนสุกเหนียว แล้วนำมาปั้นหรือหั่นเป็นก้อนกลมหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยม หลังจากนั้นห่อด้วยกระดาษแก้วหรือพลาสติก (เกษร, 2545)

2.1.4.7 ท็อฟฟี่กล้วย นิยมใช้กล้วยสุกงอมมายีใส่น้ำตาล น้ำกะทิ และเพิ่มแบะแซทำให้ผลิตภัณฑ์นี้มีความแข็งมากกว่ากล้วยกวน แล้วห่อด้วยกระดาษแก้วหรือกระดาษว่าว (เกษร, 2545)

2.1.4.8 ข้าวเกรียบกล้วย นำกล้วยไข่สุกมาบดผสมแป้ง เกลือ และอาจจะเติมน้ำตาลเล็กน้อย แล้วปั้นเป็นแท่งยาวนำไปนึ่งพอสุก หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นและนำมาหั่นเป็นชิ้นๆ นำแผ่นกล้วยที่หั่นเป็นชิ้นนี้ไปตากแดดให้แห้งแล้วจึงนำมาทอด (เกษร, 2545)

2.1.4.9 แยมกล้วย เป็นการนำกล้วยหอมห่ามนำมาปอกเปลือก แล้วฝานเป็นแว่นบางๆ ผสมน้ำตาลทราย เนื้อส้มเกลี้ยงหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และน้ำมะนาว ต้มด้วยไฟอ่อนๆ ประมาณ 45 นาที (เกษร, 2545)

2.1.4.10 กล้วยคืนรูป นำกล้วยสุกมาฝานตามความยาวหรือตามแนวทแยงของผลกล้วย ลวกด้วยน้ำเดือดนานครึ่งถึงหนึ่งนาทีและนำไปตากแดดให้แห้ง สำหรับอายุการเก็บรักษาสามารถเก็บได้นาน 3 เดือน เมื่อต้องการนำมาประกอบอาหารให้นำกล้วยนี้มาแช่หรือต้มในน้ำเดือดประมาณ 5 – 10 นาที (เกษร, 2545)

2.1.4.11 ผลิตภัณฑ์เบเกอร์รี่ เช่น ทาร์ตกล้วย เค้กกล้วย ฟรุตเค้ก คุกกี้กล้วย ไอศกรีมกล้วย เป็นต้น (นิรนาม, 2550)

2.2 การทอด

การทอดเป็นกรรมวิธีที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร และความร้อนจากการทอดจะทำลายเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอาหาร รวมทั้งยังช่วยลดปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ที่ผิวนอกอาหารหรือทั้งชิ้นอาหาร

การทอด หมายถึง การนำอาหารใส่ลงในน้ำมันขณะร้อน ผิวนอกของอาหารมีอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด ซึ่งทำให้น้ำที่เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารเกิดการระเหยกลายเป็นไอจึงมีผลให้ผิวหน้าของอาหารแห้ง และผิวนอกของอาหารที่แห้งแข็งจะมีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดต่างๆ ในระหว่างการทอดน้ำและไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกทางรูพรุนนี้และน้ำมันจะเข้ามาแทนที่น้ำและไอน้ำที่ระเหยไป การเคลื่อนที่ของความชื้นที่เคลื่อนที่จากผิวนอกของอาหารผ่าน boundary film ของน้ำมัน ซึ่งความหนาของชั้น boundary film เป็นตัวควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ส่วนค่าความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างความชื้นภายในอาหารและน้ำมันจะมีผลให้เกิดการสูญเสียน้ำและความชื้นของอาหาร การทอดด้วยอุณหภูมิสูงอาหารจะสามารถทอดได้ปริมาณมากและใช้ระยะเวลาในการทอดน้อย แต่อุณหภูมิสูงนี้จะเป็นการเร่งให้น้ำมันเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้เร็วขึ้น เช่น การเกิดกรดไขมันอิสระ ความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น น้ำมันมีสีและกลิ่นเปลี่ยนไป เป็นต้น นอกนั้นยังทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันได้สารอะโครเลน (acrolein) ซึ่งเป็นควันสีน้ำเงินบนน้ำมันและทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ สำหรับอุณหภูมิในการทอดอาหารจะขึ้นกับชนิดของอาหารนั้นๆ โดยอาหารที่ต้องการให้ผิวนอกมีความกรอบและภายในยังมีความชื้นสูงต้องทอดด้วยอุณหภูมิสูง ซึ่งผิวนอกที่แห้งนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้ความชื้นออกสู่ภายนอกและควบคุมการถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในชิ้นอาหาร ส่วนอาหารที่ต้องการความแห้งทั้งชิ้นต้องทอดด้วยอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ไอน้ำภายในระเหยออกมาก่อนที่ผิวนอกจะมีลักษณะกรอบแข็งเป็นเปลือกหุ้ม และอาหารทอดควรจะแห้งก่อนที่ผิวภายนอกจะเกิดความผิดปกติของสี กลิ่น และรสชาติ (วิไล, 2547) สำหรับระยะเวลาในการทอดผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร อุณหภูมิของน้ำมัน วิธีการทอด ความหนาของชิ้นอาหาร และคุณภาพการบริโภคของอาหารทอดที่ความต้องการในผลิตภัณฑ์อาหารนั้นๆ ในทางอุตสาหกรรมจะมีวิธีในการทอด 2 วิธี ซึ่งจำแนกโดยวิธีการถ่ายเทความร้อนได้เป็นการทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) และน้ำมันท่วม (deep – fat frying)

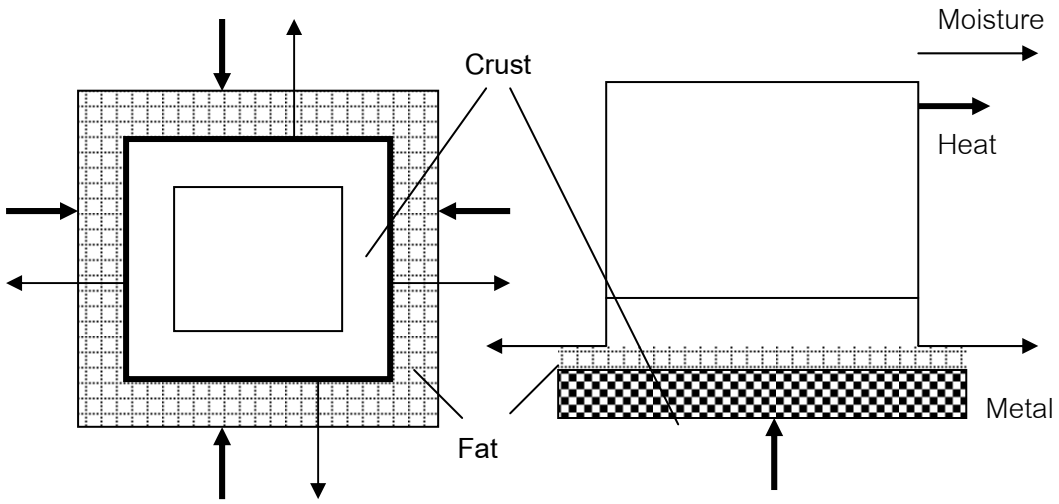
การทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) หรือการทอดโดยใช้น้ำมันน้อย เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไข่ และเบอร์เกอร์ ซึ่งความร้อนจากผิวของกระทะจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันไปสู่อาหาร (ภาพที่ 2.2) และความหนาของชั้นน้ำมันจะ

ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าอาหาร และการทอดแบบน้ำมันตื้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีไม่สม่ำเสมอกัน นอกจากนี้จะมีฟองของไอน้ำเกิดขึ้นขณะทอดซึ่งจะดันผิวนอกของชิ้นอาหารให้ลอยขึ้นเหนือผิวกระทะ ทำให้อุณหภูมิขณะทอดผันแปรจึงมีผลให้ชิ้นอาหารเกิดสีน้ำตาลไม่สม่ำเสมอกัน (นิธิยา, 2543)

การทอดแบบน้ำมันท่วม (deep – fat frying) หรือการทอดโดยใช้น้ำมันมาก การทอดด้วยวิธีนี้ใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนในการทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นทั้งการพาความร้อนและการนำความร้อนสู่ภายในอาหาร ผิวนอกของอาหารจะได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วกันและทำให้อาหารที่ทอดมีสีที่สม่ำเสมอกัน (ภาพที่ 2.2) การทอดน้ำมันแบบท่วมเหมาะสำหรับอาหารทุกชนิด แต่อาหารที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจะต้องใช้น้ำมันในการทอดมากขึ้นและอาหารนั้นจะอมน้ำมันมากกว่าชิ้นอาหารที่มีรูปร่างสม่ำเสมอ การทอดอาหารแบบนี้เมื่อใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้น้ำมันทอดอาหารซ้ำหลายๆ ครั้ง มีผลทำให้วิตามินอีถูกทำลาย กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวถูกออกซิไดซ์และยังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่าย ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบที่เป็นพิษต่อร่างกายและบางชนิดอาจจะเป็นสารก่อมะเร็ง (นิธิยา, 2548 และ Brennan, 2006)

ผลของการทอดที่มีต่ออาหารนั้นจะขึ้นกับชนิดและสมบัติของน้ำมันที่ใช้ในการทอด คุณภาพของอาหาร และผลของความร้อนต่ออาหารที่ทอด สำหรับผลของความร้อนที่มีต่อน้ำมันที่ใช้ทอดโดยเมื่อน้ำมันได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานรวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนออกมาจากอาหารจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดสารระเหย เช่น สารคาร์บอนีล กรดไฮดรอกซี กรดคีโต และกรดอีพอกซี ทำให้อาหารเกิดกลิ่นผิดปกติและน้ำมันมีสีคล้ำขึ้น ส่วนการเกิดโพลีเมอไรเซชันของโมเลกุลน้ำมันในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะทำให้น้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้นและลดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวอาหารระหว่างการทอด และเมื่อเกิดการสลายตัวของน้ำมันมีผลให้เกิดสารประกอบที่เป็นพิษต่อผู้บริโภคอาหารนั้น ในขณะที่ผลของความร้อนที่มีต่ออาหารที่ทอดจะส่งผลต่อสี กลิ่น รสชาติ และความกรอบ ของอาหารนั้นๆ ดังนั้นคุณภาพการบริโภคจะเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดและสารประกอบที่ระเหยได้ที่อาหารนั้นดูดซับจากน้ำมัน (Brennan, 2006) ปัจจัยสำคัญที่ควบคุม คือ ชนิดของน้ำมัน อายุและความทนต่อความร้อนของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาในการทอด ขนาดและลักษณะผิวนอกของอาหาร และการจัดการภายหลังการทอด นอกจากนี้การทอดยังมีผลต่ออายุการเก็บรักษาของอาหารที่ผ่านการทอดซึ่งจะคำนึงถึงปริมาณความชื้นภายในอาหารหลังการทอด อาหารที่มีปริมาณน้ำเหลืออยู่ภายในอาหารมาก เช่น ปลาทอด ไก่ทอด เป็นต้น มีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำมันเกิดขึ้นภายในอาหารระหว่างการเก็บรักษา แต่การทอดอาหารจน

กรอบ เช่น มันฝรั่งทอด จะมีปริมาณความชื้นเหลือภายในน้อยมากจึงสามารถเก็บรักษาได้ถึง 12 เดือน ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นี้จะขึ้นกับบรรจุภัณฑ์และภาวะในการเก็บรักษาด้วย



ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทมวลและความร้อน : (a) การทอดแบบน้ำมันท่วม; (b) การทอดแบบน้ำมันตื้น

ที่มา : วิไล, 2547

Smith และ Davis (1968) ได้ศึกษาพบว่า การทอดแบบน้ำมันท่วมจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในน้ำมัน และการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นอาหารผิวอาหารทุกจุดจะได้รับความร้อนสม่ำเสมอเกิดการระเหยของน้ำบางส่วน สีและลักษณะปรากฏที่ผิวของชิ้นอาหารจึงสม่ำเสมอเหมาะกับอาหารที่มีรูปร่างทุกแบบ อุณหภูมิที่ใช้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 177 - 190°C และอุณหภูมิที่ใช้นิยมใช้กันส่วนใหญ่คือ 190 °C และ Vaisayanunt (1987) พบว่า การทอดที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 177°C) จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับไว้สูง เนื่องจากน้ำมันส่วนที่เกาะอยู่ที่ผิวหลังการทอด เมื่ออุณหภูมิเย็นลงน้ำมันส่วนนี้จะมีความหนืดสูงขึ้นทำให้ขัดขวางต่อการนำน้ำมันส่วนเกินออก ดังนั้นการลดปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับไว้และการกำจัดน้ำมันที่ติดมาหลังการทอดให้นำชิ้นผลิตภัณฑ์มาผ่านอุโมงค์ลมร้อน

สำหรับชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารทั่วไป คือ น้ำมันหมูและน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ซึ่งไขมันและน้ำมันทุกชนิดประกอบด้วยไตรเอซิลกลีเซอรอลหลากหลายชนิดผสมรวมกัน และภายใน

โมเลกุลไตรเอซิลกลีเซอรอลแต่ละชนิดจะมีกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่แตกต่างกัน โดยชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุลไตรเอซิลกลีเซอรอลนั้นๆ จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดให้แตกต่างกัน ไขมันและน้ำมันที่สกัดจากสัตว์และพืชนอกจากจะมีไตรเอซิลกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบแล้วยังมีสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟอสโฟลิพิด สารสีที่ละลายได้ในไขมันและน้ำมัน เป็นต้น (นิธิยา, 2548) สำหรับน้ำมันที่เหมาะสมและนิยมใช้ในการทอดอาหาร คือ น้ำมันปาล์ม วิภา (2541) และ Brennan (2006) กล่าวว่า น้ำมันปาล์มถูกย่อยสลายได้ง่ายและร่างกายสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ดีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถยับยั้งโรคเส้นโลหิตตีบตัน ไม่มีผลกระทบต่อระดับคลอเลสเทอรอลในร่างกายและความดันโลหิต นอกจากนี้น้ำมันปาล์มยังมีสารต่อต้านเนื้องอกและเป็นแหล่งคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญ เนื่องจากมี beta – carotene, tocopherol และ tocotrierols พบว่าถ้าบริโภคอาหารที่มี beta – carotene ต่ำมากจะมีอัตราเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งที่ปอดและหลอดลมสูง ส่วน tocotrierols เป็นองค์ประกอบสำคัญในการแข็งตัวของเลือด ช่วยปรับและลดคลอเลสเทอรอล และเป็นตัวช่วยป้องกันการเกิดสารที่ก่อมะเร็งในร่างกาย Gutcho (1973) กล่าวว่า น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มโอเลอีน น้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชัน น้ำมันปาล์มสเตียรีนจะมีความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและเสถียรต่อการทอดที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีผลึกของไขมันแบบ beta - crystal และมีสารกันหืนตามธรรมชาติ เช่น alpha – tocopherol และ gamma – tocotrierols เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันชนิดอื่นๆ

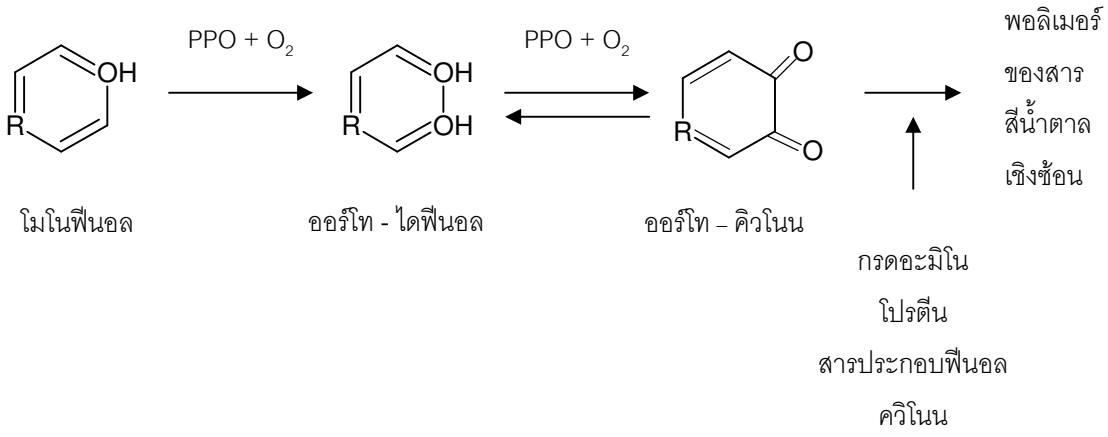
ส่วนอุณหภูมิและเวลาในการทอดอาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร โดยการศึกษาผลของเวลาในการทอดมันฝรั่งแบบแพตตี้ก่อนและหลังการแช่แข็งพบว่า เวลาที่เหมาะสมในการทอดผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังแช่แข็งเป็นเวลา 1 และ 2 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 190 $^{\circ}$C (วรัญญา, 2540) และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทอดมันฝรั่ง คือ อุณหภูมิ 180 $^{\circ}$C (Andrea, 2003) การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่มีคุณค่าทางโภชนาการจากแป้งมันเทศและเนื้อปลาป่น ซึ่งอุณหภูมิทอดที่ใช้คือ อุณหภูมิ 190±2 $^{\circ}$C นาน 10 นาที (ธีรวัฒน์, 2545) การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากแป้งเผือกใช้น้ำมันปาล์มในการทอดที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}$C นาน 20 วินาที (รองรัตน์, 2546) การศึกษาการใช้ประโยชน์แป้งข้าวกล้องทดแทนแป้งสาลีในการผลิตกรอบเค็มพบว่า ที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}$C เวลา 1.5 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทอด (เกษม และคณะ, 2547) และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทอดที่มีต่อคุณภาพของเฟรนไฟด์ พบว่า การทอดต้องใช้อุณหภูมิ 187.78°C เป็นเวลา 2.75 นาที (Janusz และ Charles, 1973)

2.3 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

อาหารและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดมีปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมีทั้งผลดีและผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร ดังนั้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ซึ่งเกิดจากหลายๆ ปฏิกิริยาร่วมกันและให้สารสีน้ำตาลที่ผันแปรไปตามชนิดของอาหารถึงแม้จะเป็นอาหารชนิดเดียวกัน เช่น การปอกมันฝรั่งจะเกิดปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ทำให้เกิดเป็นสีแดง น้ำตาล หรือดำ ส่วนเห็ดจะเกิดปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์เปลี่ยนเป็นสีชมพู น้ำตาล เทา ม่วง หรือดำ เป็นต้น และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอาจเกิดขึ้นได้ในวัตถุดิบที่มีการเติมกรดแอสคอร์บิกซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนทำให้เกิดสารสีน้ำตาล และอาศัยปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) (นิธิยา, 2545)

2.3.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์พืชถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือก การหั่น เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบโมโนฟีนอลสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็น *o* – diphenol สารนี้ถูกออกซิไดส์ได้เป็น *o* – quinone ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้สามารถรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ หรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO
ที่มา : นิธิยา, 2545

สำหรับเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลนี้ เรียกว่า ฟีนอเลส หมายถึง กลุ่มของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบโมโนฟีนอลและ*ออร์โท* – ไดฟีนอล ดังนั้นเอนไซม์ฟีนอเลสจึงรวมทั้งเอนไซม์อื่นๆ เช่น ฟีนอลออกซิเดส ไทโรซิเนส พอลินอลออกซิเดสแคตีคอเลส (catecholase) ครีโซเลส (cresolase) โดปาออกซิเดส (dopaoxidase) และออกซิเดสจากมันฝรั่งและมันเทศ เอนไซม์ฟีนอเลสนี้พบมากในพืช ได้แก่ ส้ม รากพืช กล้วย พลัม ท้อ สาลี่ แอปเปิ้ล อาโวกาโด มันเทศ มันฝรั่ง เห็ด มะเขือ แตง ข้าวสาลี ผักโขม มะเขือเทศ มะกอกฝรั่ง และใบชา เอนไซม์ฟีนอเลสเป็น homogeneous enzyme ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 128,000 ดาลตัน ในโมเลกุลมีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 0.2 โดย 1 โมเลกุลของเอนไซม์มีทองแดงอยู่ 4 อะตอม ในรูปคิวพรัสไอออน และเอนไซม์ฟีนอเลสมีความคงตัวมากที่สุดที่ความเป็นกรดด่างใกล้เป็นกลาง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เพียงระยะเวลาสั้นๆ หรือเขย่าสารละลายเอนไซม์อย่างรุนแรงจะทำให้เอนไซม์เสียสภาพความสามารถในการทำงาน แต่การแช่เยือกแข็งนานๆ ทำให้ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ลดน้อยลงและการสูญเสียนี้ทำให้กลับคืนไม่ได้ (Owusu – Apenten, 2005)

สับสเตรตที่ถูกออกซิไดส์ได้ด้วยเอนไซม์ PPO ได้แก่ สารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในพืชซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ (flavomoids) เช่น แอนโทไซยานิดิน ลูโคแอนโทไซยานิดิน ฟลาโว-นอลแคตีคอล กรดคาเฟอิก กรดคลอโรจินิก แคตีซีน เอสเทอร์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid ester) 3, 4 – ไดไฮดรอกซีฟีนิลอะลานีน (3, 4 – dihydroxyphenylalanine หรือ DOPA) และไทโรซีน (นิธิยา, 2545 และ Saper, 1993)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์นี้เป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปผักและผลไม้หลายชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ล ท้อ สาลี กล้วย องุ่น มันฝรั่ง เห็ด มะเขือ และผักสลัด รวมทั้งอาหารทะเลบางชนิด เช่น กุ้ง ปู และกุ้งมังกร เป็นต้น เมื่ออาหารเกิดสีน้ำตาลอายุการเก็บรักษาจะสั้นลงและทำให้เกิดปัญหากับผักและผลไม้ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งและแช่เยือกแข็ง (ปราณี, 2543)

ข้อดีของปฏิกิริยานี้ คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์บางชนิดมีสี กลิ่น และรสชาติที่ดีขึ้น เช่น การอบแห้งลูกเกด ลูกพรุน และอินทผลัม การคั่วเมล็ดกาแฟ และการหมักใบชา ซึ่งต้องการให้เกิดสีน้ำตาลช่วยให้มีกลิ่นและรสชาติที่ดี (ปราณี, 2543)

การเกิดสีน้ำตาลตามรอยช้ำหรือรอยตัดของเนื้อเยื่อผักและผลไม้ เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ *ออร์โท* – ควิโนน และพอลิเมอไรเซชันของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน การวัดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ PPO (นิธิยา, 2545) มีดังนี้

1. โดยการวัดอัตราการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคตีคอล

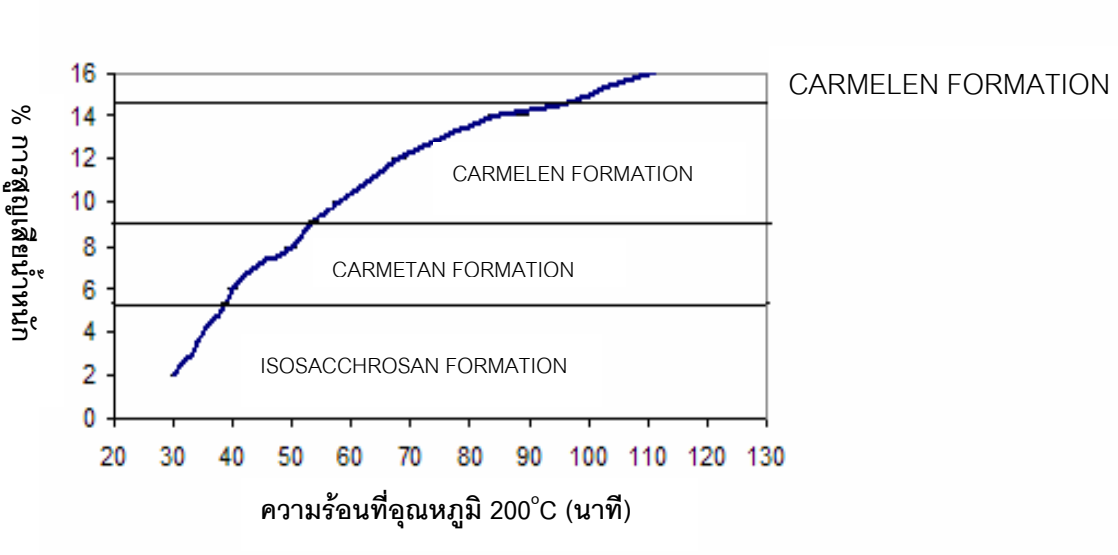
2. โดยวิธี Colorimetic วัดปริมาณของเพอพูโรแกลลิน (purpurogallin) ที่เกิดขึ้นจากไพโรแกลลอล (pyrogallol) ภายในเวลา 5 วินาที

3. โดยวิธี Chronometic วัดอัตราการสูญเสียวิตามินซี เนื่องจากออกซิเดชันโดย *ออร์โท* – เบนโซควิโนน ที่เกิดจากแคตีคอล

4. โดยวัดอัตราการเกิดสีจากสารลูโค – 2, 6 – ไดคลอโรเบนอินโด - 3‘ – คลอโรฟีนอล ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ *ออร์โท* – เบนโซควิโนน

2.3.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ สามารถจำแนกย่อยออกเป็น 2 ปฏิกิริยา (นิธิยา, 2545 และ Owusu – Apenten, 2005) ดังนี้

2.3.2.1 การเกิดคาราเมไลเซชัน (caramelization) เป็นการใช้ความร้อนสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก (themolysis) และเกิดพอลิเมอไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้สารเริ่มต้นจะเป็นน้ำตาลเท่านั้น เช่น การเผาน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 200 $^{\circ}$C น้ำจะถูกกำจัดออกไปจากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสโดยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน (anhydro ring) มีความข้นหนืด มีรสขม และมีสีเข้มขึ้น ซึ่งจะผันแปรตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ สารประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำตาลได้รับความร้อนสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สารประกอบที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาคาราไมเซชัน เมื่อน้ำตาลซูโครสได้รับความร้อนสูงในระยะเวลาต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 200 °C

ที่มา : นิธิยา, 2545

เมื่อน้ำตาลได้รับความร้อนจะสูญเสียน้ำและได้เป็นสารประกอบใหม่ คือ ไอโซแซ็กโครแซน (isosacchrosan) ซึ่งมีสูตรเป็น $C_{12}H_{20}O_{10}$ เมื่อสารนี้ได้รับความร้อนนานขึ้นจะสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุลของน้ำตาลอีก 2 โมเลกุล และเกิดการรวมตัวกันของน้ำตาล 2 โมเลกุลเป็นดีไฮโดรซูการ์ (dehydrosugar) สารที่เกิดขึ้นใหม่มีสูตรเป็น $C_{24}H_{36}O_{16}$ เรียกว่า คาราเมแลน (caramelan) สารนี้สามารถละลายน้ำได้ เมื่อได้รับความร้อนนานขึ้นอีกจะสูญเสียน้ำและได้เป็นสารใหม่ เรียกว่า คาราเมเลน (caramelen) มีสูตร $C_{36}H_{50}O_{25}$ ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของน้ำตาลซูโครส 3 โมเลกุล และสูญเสียน้ำออกไป 8 โมเลกุล หากยังคงให้ความร้อนต่อไปจะเกิดเป็นฮิวมิน ซึ่งเป็นสารสีดำไม่ละลายน้ำและไม่แพร่กระจาย เรียกว่า คาราเมลิน (caramelin) สารสีของปฏิกิริยาคาราเมไลเซชันของน้ำตาลเพียงอย่างเดียวจะมีองค์ประกอบคือ คาร์บอน ไฮโรเจน และออกซิเจน เรียกว่า คาราเมล (caramel)

2.3.2.2 การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อนซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) และเกิดการสลายตัว (degradation) และมีการรวมตัวกัน (condensation) ระหว่างหมู่คาร์บอนิลจากโมเลกุลของน้ำตาลรีดิวซิงกับหมู่เอมีนที่มีอยู่ในโมเลกุลของแอโมเนีย กรดอะมิโน หรือโปรตีน เป็น carbonyl – amine reaction เมื่อน้ำตาลแอลโดสหรือคีโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซิงได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำ (a_w มากกว่า 0.2) กับเอมีนจะทำให้เกิดสารประกอบต่างๆ หลายชนิด ซึ่งมีผลต่อสี กลิ่น และรสชาติของอาหาร และ

อาจเป็นสิ่งที่พึงประสงค์หรือไม่พึงประสงค์ ปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นขณะทอด อบ ปิ้ง ย่าง หรือระหว่างเก็บรักษาอาหาร น้ำตาลรีดิวซิงจะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนในโมเลกุลของแอมโมเนียกรดอะมิโน และโปรตีน ซึ่งจะได้เป็นไกลโคซิลเอมีน และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล เรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด หรือ nonenzymatic browning ขั้นตอนของปฏิกิริยาเมลลาร์ด มีดังนี้

1. เริ่มจากน้ำตาลรีดิงซิงทั้งคีโตสและแอลโดสรวมตัวกับหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน

2. เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรชันได้เป็นอิมีน (imines หรือ Schiff base) และมีการเรียงตัวใหม่ซึ่งมีชื่อว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (aldoamine) หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า Amadori products ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้เมื่อมีความเป็นกรดด่าง 5 หรือต่ำกว่า

3. เกิดปฏิกิริยา enolization ของ Amadori products ได้เป็นไดคีโตสเอมีนหรือไดอะมิโนซูการ์

4. เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อได้เป็นอนุพันธ์ของ furan ถ้าเป็นน้ำตาลเฮก-โซสอนุพันธ์ฟูแรน คือ 5 – hydroxymethyl – 2 – furaldehyde หรือ HFM

5. อนุพันธ์วงแหวนของ furan เช่น HFM จะเกิดพอลิเมอไรเซชันอย่างรวดเร็วได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบและไม่ละลายน้ำ ซึ่งต่างจากการเกิดคาราเมไลเซชันซึ่งมีน้ำตาลเพียงอย่างเดียว สำหรับสารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า เมลานอยดิน (melanoidins) ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ดจึงมีทั้งพอลิเมอร์ที่ละลายและไม่ละลายน้ำ และพบได้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีน้ำตาลรีดิวซิง กรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ อยู่รวมกันและได้รับความร้อน

ข้อเสียปฏิกิริยาเมลลาร์ด คือ ทำให้กรดอะมิโนไลซีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นทั้งที่อยู่ในรูปอิสระและที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนลดน้อยลง ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบนี้จะทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง นอกจากนี้หากเป็นอาหารที่มีโปรตีนสูงและได้รับความร้อนสูง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นสาร heterocyclic amine ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด คือ อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง ปริมาณความชื้น ออกซิเจน โลหะ ฟอสเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.4 การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้สามารถเกิดจากการอาศัยเอนไซม์และไม่อาศัยเอนไซม์ทำให้มีผลต่อสีของผักและผลไม้ วิธีการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมี 2 วิธี (นิธิยา, 2545 และ Lilly, 1994) คือ

2.4.1 Physical Methods โดยทั่วไปวิธีนี้นิยมใช้ความร้อนในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

2.4.1.1 Blanching การลวกเป็นวิธีที่นิยมใช้ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในมันฝรั่งแช่แข็ง โดยทำการลวกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 นาที หรือ อุณหภูมิ 94°C เป็นเวลา 5 นาที และวิธีนี้ยังนิยมใช้เพื่อป้องกันการเกิดสีเขียวในเมล็ดพริกไทยอบแห้ง

2.4.1.2 Ultrafiltration เป็นวิธีที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เช่น ไวน์ เป็นต้น

2.4.1.3 Sonication เป็นวิธีที่พัฒนามาจากหลักการใช้ความร้อนกับ ultrasonic waves เพื่อลดประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ PPO

2.4.2 Chemical Methods ได้มีการศึกษาสารเคมีที่มีประสิทธิภาพเพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลจากเอนไซม์และไม่อาศัยเอนไซม์แทนการใช้สารประกอบซัลไฟต์ ซึ่งสารประกอบซัลไฟต์สามารถช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดเอนไซม์และไม่ใช่เอนไซม์ได้ดี เช่น sulfur dioxide, sulfites, bisulfates และ metabisulfates ซึ่งสารประกอบประเภทนี้นอกจากจะช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลแล้วยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามสารประกอบซัลไฟต์นี้มีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคจึงได้มีการนำสารเคมีตัวอื่นมาใช้แทน เช่น ascorbic acid, sodium chloride, ascorbic acid phosphate, ascorbic acid triphosphate, citric acid, L – cystein, cinnamic acid, sucrose, calcium chloride และ glutathione เป็นต้น (Fellow, 2000; Guerrer และคณะ, 1996 และ Lu และ คณะ, 2007)

2.5 การบรรจุอาหาร

การบรรจุอาหารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะสามารถช่วยรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารให้นานขึ้น รวมทั้งยังช่วยให้เกิดความสะดวกต่อการบริโภค การพาณิชย์ และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์นั้นๆ คำนิยามของการบรรจุ หรือ packaging หมายถึง เทคนิคทางอุตสาหกรรมและการตลาดเพื่อบรรจุ คุ้มครอง สร้างเอกลักษณ์

ให้ผลิตภัณฑ์ ส่งเสริมการจำหน่ายและการกระจายผลิตผลทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และสินค้าอุปโภค – บริโภค ส่วนคำว่า ภาชนะบรรจุ หมายถึง ภาชนะหรือโครงสร้างใดๆ ที่ใช้เพื่อบรรจุ ห่อหุ้มและรวบรวมผลิตภัณฑ์ไว้เป็นหน่วย เพื่อนำส่งผลิตภัณฑ์ถึงผู้บริโภคในสภาพที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังรวมถึงฉลากและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการมัดหรือปิดผนึกภาชนะบรรจุด้วย สำหรับหน้าที่ของภาชนะบรรจุอาหาร คือ บรรจุผลิตภัณฑ์ ถนอมรักษา และคุ้มครองผลิตภัณฑ์ การใช้งานและความสะดวก สื่อสารและให้ข้อมูล ป้องกันการปลอมปน ป้องกันการเสื่อมเสีย เป็นต้น ในปัจจุบันนี้พลาสติกได้ถูกนำมาใช้เพื่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย สำหรับชนิดของพลาสติกที่นิยมนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (งามทิพย์, 2550) มีดังนี้

2.5.1 Polyolefins ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นพอลิเมอร์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถเปิดผนึกได้ การใช้ polyolefins จะนำมาเป็นส่วนหนึ่งในบรรจุภัณฑ์ของ flexible pouches หรือกล่องผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ซึ่งองค์ประกอบหลักของ polyolefins คือ polyethylenes (PE) และ polypropylene (PP) (งามทิพย์, 2550)

2.5.1.1 Polyethylene (PE) สำหรับ monomer คือ ethylene หรือ ethene โดยทั่วไปแล้ว PE มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุ่นตัวได้ ไม่มีกลิ่นและรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า ใส่สีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น สำหรับชนิดของ PE สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทตามวิธีการสังเคราะห์และความหนาแน่น คือ LDPE (Low density polyethylene) เป็นพลาสติกที่ใช้มากในอุตสาหกรรมการบรรจุ ทั้งในรูปวัสดุอ่อนตัวและภาชะบรรจุแบบคงรูป สมบัติทั่วไป คือ เหนียว โปร่งแสง ทนทานต่อแรงดึงขาดได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ไม่ดี ต้านทานการซึมผ่านของไขมันไม่ดี ไม่สามารถทนทานที่อุณหภูมิสูงได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ถุงพลาสติกใส่ของทั่วไปและภาชนะและของใช้พลาสติกในบ้านที่ไม่ต้องการความแข็งแรงทนทานมากนัก สำหรับ HDPE (High density polyethylene) เป็นพลาสติกที่ใช้มากรองจาก LDPE มีคุณสมบัติ คือ มีความหนาแน่นสูง ทนร้อนได้ดี มีความยืดตัวลดลง ขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงคงตัวมากกว่า LDPE ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ถุงร้อนแผ่นใสและของใช้พลาสติกในบ้านที่ต้องการความแข็งแรงทนทานและทนไฟมากขึ้น

2.5.1.2 Polypropylene (PP) มี monomer คือ Propylene หรือ Propene คุณสมบัติ คือ มีความหนาแน่นสูง ทนร้อน ทนไฟ และคงทนกว่า HDPE และยังสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนได้ดี (งามทิพย์, 2550)

2.5.2 Polyvinyl chloride (PVC) โดย monomer คือ vinylchloride หรือ 1 - chloroethene คุณสมบัติ คือ มีความแข็งแรงมาก ทนร้อน ทนไฟ ได้ดีกว่าและคงทนกว่า PP ป้องกันความชื้นได้ดี อากาศซึมผ่านได้น้อย (งามทิพย์, 2550)

2.5.3 Polyvinylidene chloride (PVdC) ชื่อทั่วไป คือ saran โดย monomer จะเป็นการเติมอะตอมของคลอไรด์เข้าไปในมเลกุลของ ethylene มักนิยมผลิตเป็นฟิล์มใสที่มีความเหนียวสูง อากาศและไอน้ำจะซึมผ่านได้น้อยมาก (นิรนาม, 2551)

2.5.4 Ethylene vinyl alcohol (EVOH) คุณสมบัติคือ สามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดีมาก และบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้มีหลายเกรดซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ ethylene/ vinyl alcohol แต่มีข้อเสียคือ การป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนจะต่ำ เมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์สูง เพราะพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย (นิรนาม, 2551)

2.5.5 Polystyrene (PS) มี monomer คือ styrene หรือ vinyl benzene เนื่องจากการมีหมู่ฟีนิลซึ่งมีขนาดใหญ่จึงมีความหนาแน่นสูงและการเลื่อนไหลของโซ่โพลีเมอร์น้อย จึงทำให้มีความแข็งแรงมาก ทนร้อน และทนไฟได้ดี (StÖllman และคณะ,1994)

2.5.6 Polyamides (nylons) เป็นพลาสติกที่เกิดจากการรวมตัวกัน (condensation) ของ di – acids กับ di – amines หรือการเกิด shelf – condensation ของ amino acids คุณสมบัติ คือ มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน ตกไม่แตก ไม่มีปฏิกิริยาต่อน้ำมัน ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่เป็นพิษ สามารถทำเป็นสีต่างๆ ได้ แต่มีราคาแพง (StÖllman และคณะ,1994)

2.5.7 Polyesters สำหรับ monomer คือ terephthalic acid กับ ethyleneglycol ปัจจุบันนิยมใช้ในรูปของ polyethylene terephthalate (PET) เกิดเป็นเส้นใยที่อ่อนนุ่ม ในปัจจุบันนี้นิยมนำมาผลิตเป็นขวด PET ซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดีและสะดวกต่อการขนส่ง (StÖllman และคณะ,1994)

นอกจากพลาสติกที่นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารแล้ว อะลูมิเนียมฟอยด์ยังเป็นหนึ่งที่นิยมใช้ผลิตวัสดุหลายชั้นที่ต้องการสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านที่สูงมากและป้องกันแสง นิยมใช้ผลิตทั้งตัวภาชนะประเภทถาด ถุง ถ้วย เป็นต้น เนื่องจากแผ่นเปลวอะลูมิเนียมฉีกขาดง่ายและอาจมีรูเข็ม จึงจำเป็นต้องลามิเนตกับพลาสติกเพื่อความแข็งแรงทนทานและลดการซึมผ่านรูเข็มและลามิเนตกับพลาสติกทั้ง 2 ด้าน ซึ่งการลามิเนต

เป็นวิธีนำเอาชนิดของพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่ต้องการเพื่อผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น ป้องกันแสง ป้องการซึมผ่านของอากาศ เป็นต้น มารวมกันเป็นชั้น เพื่อให้ได้ภาชนะบรรจุที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (งามทิพย์, 2550)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Sacharow และ Griffin (1980) และ Matz (1984) รายงานว่า ภาชนะของอาหารประเภทขนมขบเคี้ยวควรมีออกซิเจนซึมผ่านได้น้อยกว่า 1 มิลลิลิตร/ 1.6ตารางเซนติเมตร/ 24 ชั่งโมง ที่ความดัน 1 บรรยากาศ 23.9 °C และมีค่าอัตราการซึมผ่านของความดันไอน้ำ (Water Vapour Transmission Rate, WVTR) ต่ำกว่า 0.4 กรัม/ 1.6 ตารางเซนติเมตร/ 24 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95% (37°C) และค่าความชื้นในอาหารขนมขบเคี้ยวควรน้อยกว่า 3.5% ซึ่งถ้ามากกว่านี้จะทำให้ความกรอบลดลง วัสดุภาชนะบรรจุที่เหมาะสมกับอาหารขนมขบเคี้ยว ได้แก่ ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ นอกจากจะทึบแสงและปิดผนึกด้วยความร้อนแล้ว เมื่อลามิเนตกับฟิล์มบางๆ จะมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ คือ มีค่า 0 – 0.02 ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ที่ดีควรมีความหนามากกว่า 0.00035 นิ้ว ซึ่งจะมีรูเล็ก ๆ (pin hole) น้อยกว่า 20 ต่อตารางฟุต และถ้ามีการลามิเนตด้วยฟิล์มพลาสติกปัญหาเรื่องรูเล็กๆ จะหมดไป

สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาอายุการเก็บ คือ ถุงลามิเนต ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ในถุงลามิเนต เช่น ข้าวตังหน้าตั้งสำเร็จรูปจากเทมเป้ข้าว ถั่วลิสง และงา พบว่า การบรรจุในถุงพลาสติกและถุงถุงลามิเนตมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 48 วัน และ 53 วัน ตามลำดับ (สุชาดา, 2541) ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากปลายข้าวหอมมะลิพบว่า เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุงลามิเนตที่อุณหภูมิ 30°C มีอายุการเก็บรักษา 8 สัปดาห์ (นฤศันส์, 2541) ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเมล็ดข้าวโพดหวานอบกรอบพบว่า ถุงลามิเนตช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษา 171 วัน ที่อุณหภูมิ 25°C (สมชัย, 2543) ข้าวเกรียบปลาในถุงลามิเนตพบว่า สามารถยืดอายุการเก็บรักษาข้าวเกรียบปลาได้นานกว่าถุงโพลีโพรพิลีนที่สภาวะการเก็บเดียวกัน (อรนุช, 2545) และผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากแป้งปลายข้าวหอมมะลิผสมแป้งมันเทศและงาดำปน เมื่อเก็บรักษาในถุงลามิเนตสามารถเก็บได้นาน 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้อง (สัมพันธ์, 2547) เป็นต้น

Irwandi และคณะ (1998) ได้ศึกษาอายุการเก็บรักษาของทุเรียนแผ่นในภาชนะบรรจุ 4 ชนิด ได้แก่ Laminated Aluminium Foil (LAF), High – density polyethylene (HDPE), Low – density polyethylene (LDPE) และ Polypropylene (PP) ณ อุณหภูมิห้อง พบว่า มีการเกิดสีน้ำตาลขึ้นในทุเรียนแผ่นที่บรรจุในภาชนะทั้ง 4 ชนิด เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยมีการเกิดสีน้ำตาลมากที่สุดใน LDPE และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทุเรียนแผ่นจะมี

การสูญเสียความชื้นทำให้มีค่าความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเก็บทุเรียนแผ่นใน LAF จะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภาชนะบรรจุทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ LAF ยังสามารถรักษาเนื้อสัมผัสของทุเรียนไว้ได้ดีที่สุดและช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2.6 อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร

สำหรับการอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารนั้นๆ อาหารที่มีการเสื่อมเสียได้ง่ายตามธรรมชาติ เรียกว่า perishable มีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา ในสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการแปรรูปและการเก็บรักษามีผลต่อคุณภาพของอาหารภายหลังการเก็บในช่วงเวลาหนึ่ง สมาคมผู้ประกอบการอาหารแห่งชาติของสหรัฐอเมริกาได้นิยามอายุการเก็บไว้ คือ “ผลิตภัณฑ์อาหารหนึ่งยังอยู่ในช่วงเวลาของอายุการเก็บต่อเมื่อคุณรูปของผลิตภัณฑ์ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคในการนำไปใช้ และตราบเท่าที่ภาชนะบรรจุยังคงปิดผนึกไม่มีการรั่วและสามารถป้องกันอาหารที่บรรจุอยู่” ส่วน IFT (The Institute of Food Technologists) ในสหรัฐอเมริกาได้ให้คำนิยามอายุการเก็บรักษาว่า “เป็นช่วงเวลาระหว่างการผลิต และการซื้อปลีกของผลิตภัณฑ์อาหารใดๆ โดยระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณรูปทางด้านคุณค่าทางอาหาร รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏเป็นที่พอใจของผู้บริโภค” นอกจากนี้ยังมีนิยามอายุการเก็บอื่นอีก คือ “อายุการเก็บเป็นช่วงเวลาระหว่างการบรรจุผลิตภัณฑ์และการใช้ โดยคุณรูปของผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้ใช้” อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารเป็นการบ่งบอกถึงระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์นั้นยังมีความปลอดภัยต่อการบริโภค โดยปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยภายใน (intrinsic factors) ซึ่งเป็นปัจจัยที่แสดงถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความเป็นกรดด่าง ค่าความเป็นกรดโดยรวม (total acidity) ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ แร่ธาตุต่างๆ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่มีอยู่ การใช้สารป้องกันการเสื่อมเสีย องค์ประกอบของสารกลุ่มชีวเคมีต่างๆ เป็นต้น และปัจจัยภายนอก (extrinsic factors) เช่น การควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาและการจัดจำหน่าย ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างกระบวนการผลิต การเก็บรักษา และการจัดจำหน่าย การสัมผัสกับแสงต่างๆ เป็นต้น (งามทิพย์, 2550)

อาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษาปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งจะมีอัตราเร็วการเกิดที่แตกต่างกัน (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549) ปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ มีสาเหตุเกิดจากความผิดพลาดในการจัดการกับอาหารในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว การผลิต และการขนส่ง เช่น การบอบช้ำ การแตกหัก เปียกน้ำ เป็นต้น การเสื่อมเสียนี้สามารถแก้ไขด้วยการเลือกใช้ภาชนะบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสม สำหรับการเสื่อมเสียที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดเจล การเปลี่ยนสี การแยกชั้นของครีม การเกาะรวมกันของอาหารผง เป็นต้น

2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในขั้นตอนการผลิตและการเก็บรักษา และปฏิกิริยาเคมีหลายปฏิกิริยาเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียคุณภาพอาหาร ทั้งคุณภาพทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบภายในของอาหาร ซึ่งยังมีปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกมาเป็นส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่พบมาก ได้แก่ การปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน การแปลงสภาพของโปรตีน ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ปฏิกิริยาจากเอนไซม์ เป็นต้น

3. การเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้ต้องอาศัยปัจจัยที่จะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความเป็นกรดด่าง ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล เกลือ อุณหภูมิ เป็นต้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเกิดกลิ่นรสผิดปกติ ลักษณะปรากฏเปลี่ยนไป เป็นต้น

2.6.1 **การทดสอบหาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร**

คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารโดยทั่วไปจะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดที่ต้องการระยะเวลาการเก็บหรือการบ่มที่เหมาะสมเพื่อให้ส่วนประกอบต่างๆ ในอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือจุลินทรีย์ซึ่งทำให้อาหารเกิดกลิ่นรส ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏที่ต้องการ สำหรับอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารนิยมนับตั้งแต่ระยะเวลาผลิตจนถึงเวลาที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารไม่เป็นที่ยอมรับ โดยวิธีในการทดสอบอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารมี 2 วิธี (งามทิพย์, 2550) ดังนี้

1. การทดสอบในสภาวะปกติเป็นเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำการทดสอบไว้ที่สภาวะควบคุมปกติ และสุ่มตัวอย่างมาตรวจสอบคุณภาพเป็นระยะๆ จนกระทั่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์เสื่อมเสียจนไม่เป็นที่ยอมรับ กำหนดให้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับเป็นอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารนั้น

2. การทดสอบในสภาวะเร่ง (Accelerated Shelf Life Testing - ASLT) โดยเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารที่ทดสอบไว้ที่สภาวะควบคุมที่สามารถเร่งการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น อุณหภูมิสูงกว่าปกติ ความชื้นสัมพันธ์สูงหรือต่ำกว่าปกติขึ้นกับประเภทของ

ผลิตภัณฑ์ เป็นต้น สภาวะเก็บที่รุนแรงเหล่านี้จะทำให้คุณภาพของอาหารเสื่อมเสียเร็วขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบจึงสั้นลง

2.6.2 **จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาและกราฟอายุการเก็บ** (Kinetics of Reaction and Shelf – life Plot)

ปฏิกิริยาเคมีและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเกิดการเสื่อมเสียซึ่งอัตราการเสื่อมเสียขึ้นกับ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยภายในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ องค์ประกอบของอาหารเอง และปัจจัยภายนอก เช่น สภาวะแวดล้อมที่เก็บรักษาอาหารนั้น ดังนั้นจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยวัดจากมวลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหรือมวลของสารเริ่มต้น (reactant) ที่ลดลงต่อเวลา ผลการศึกษาของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยานี้สามารถนำมาใช้อธิบายอัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร (งามทิพย์, 2550)

อันดับปฏิกิริยา โมเลกุลที่เข้ามาทำปฏิกิริยา (รวมทั้งองค์ประกอบของอาหาร) จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ บางครั้งอาจทำปฏิกิริยากับสารเดียวกัน อัตราที่สารเหล่านี้เข้าทำปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของโมเลกุลที่อยู่ติดถัดกัน คือ ความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นของโมเลกุลอื่นๆ มีค่าคงที่ และถ้าสมมติฐานว่าเป็นสัดส่วนของ power law ดังนั้นที่อุณหภูมิคงที่ ดังสมการที่ 1

$$-r_A = -dC_A/dt = kC_A^n \quad \text{..... (1)}$$

โดย $-r_A$, dC_A/dt = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร A เทียบเวลา t

k = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

n = อันดับของปฏิกิริยา (order)

C_A = ปริมาณความเข้มข้นของสาร A

ตารางที่ 2.3 สมการอันดับของปฏิกิริยาและสมการอัตราเร็ว

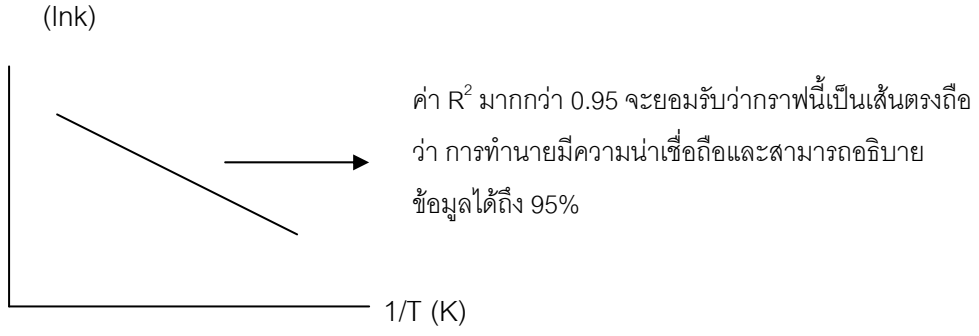
สมการอันดับที่	สมการอัตราเร็ว
0	$C_A = -kt + C_{A0}$
1	$\ln(C_A/C_{A0}) = -kt$
2	$1/C_A - 1/C_{A0} = kt$

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero – order reaction) เมื่อกำหนดให้ A เป็นตัววัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่จะลดลงระหว่างการเก็บรักษา และอันดับของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับศูนย์ (n = 0) ดังตารางที่ 2.3 เมื่อเขียนกราฟของปฏิกิริยาอันดับศูนย์จะได้กราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A และอัตราการเกิดนี้จะคงที่ ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่อาศัยเอนไซม์ และปฏิกิริยาต่างๆ ที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เป็นต้น

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสอง (First/Second – order reaction) กรณีที่ A ลดลงระหว่างการเก็บรักษา และอันดับของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับหนึ่ง (n =1, 2) ดังตารางที่ 2.3 เมื่อเขียนกราฟของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสองจะได้กราฟเป็นเอกซ์โพเนนเชียลหรือกราฟไม่เป็นเส้นตรง และอัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับคุณภาพของอาหารขณะเวลานั้น ดังนั้นอัตราการเสื่อมเสียจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของวิตามิน การเสื่อมเสียของโปรตีน เป็นต้น และปฏิกิริยาอันดับสองจะไม่พบในผลิตภัณฑ์อาหารมากนัก

กราฟอายุการเก็บรักษา (shelf- life) หรือ Q_{10} ซึ่งกราฟอายุการเก็บ หมายถึงกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (แกน Y)กับอุณหภูมิเก็บรักษา (แกน X) มีประโยชน์ในการศึกษาหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ และใช้เพื่อวางแผนการทดสอบหาอายุการเก็บที่สภาวะเร่ง โดยกราฟนี้จะอาศัยสมการอาร์เรเนียสและอันดับการเสื่อมเสียของปฏิกิริยา กราฟสมการอาร์เรเนียสจะสร้างระหว่าง (lnk) เทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) แสดงดังภาพที่ 2.5 (Man และ Jones, 2000)



ภาพที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (lnk) เทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T)
ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2549

เมื่อนำโมเดลของ Arrhenius มาศึกษาจะได้ดังสมการที่ 2

$k = k_0 \exp(-E/RT)$ ..... (2)

$\ln k = \ln k_0 - (E/RT)$

ส่วนสมการอันดับปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 3

$$k = \frac{\text{amount lost at time } t_s}{t_s}$$

$\ln k = \ln(\text{amount lost at time } t_s) - \ln t_s$ ..... (3)

โดยค่า E/R และ slope เป็นค่าคงที่

T คือ อุณหภูมิ (K)

k คือ rate constant

R คือ gass constant มีค่าเท่ากับ 8.314 J/molK

E หรือ E_a คือ พลังงานกระตุ้น (Activation energy) (KJ/mol)

t_s คือ ระยะเวลาใดๆ

จากสมการที่ 2 และ 3 จะได้ดังสมการที่ 4

$-\ln t_s = -\ln(\text{amount lost at time } t_s) + \ln k_0 - E/RT$ .....(4)

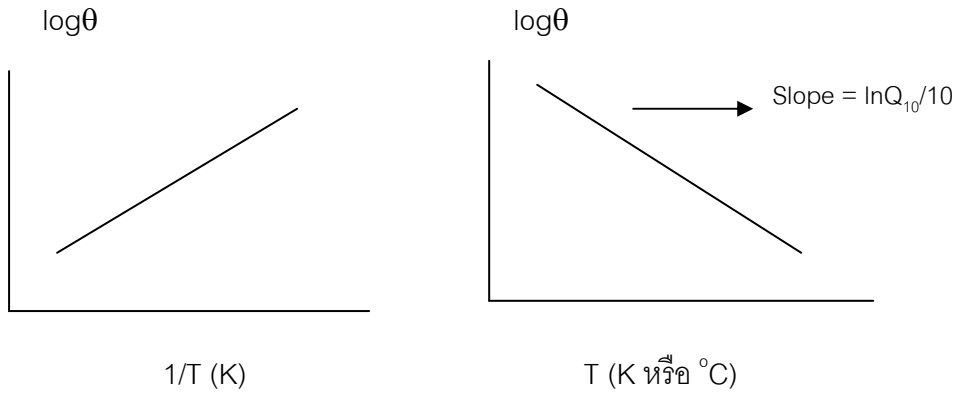
สำหรับกรณีที่ศึกษาในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 20 °C อาจใช้กราฟดังภาพที่ 2.5 ในการทำนายอายุการเก็บได้ ซึ่งจะทำให้สะดวกในการอ่านและแปรค่ามากกว่า และจากกราฟนี้สามารถเขียนเป็นสมการและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บกับอุณหภูมิได้ดังสมการที่ 5 และภาพที่ 2.6

$\theta = \theta_0 \exp(-aT)$ ..... (5)

เมื่อ θ หมายถึง อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอ้างอิง

a หมายถึง ความชันของกราฟ

T หมายถึง ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเก็บรักษากับอุณหภูมิอ้างอิง



ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง logθ เทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) หรือ T ที่มา : Man และ Jones (2000)

สำหรับ Q_{10} หรือ Temperature Quotient เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิต่างกัน 10°C ดังสมการที่ 6 หรือหาจากอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างกัน 10 °C ตามสมการที่ 7

$$Q_{10} = \frac{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ } (T + 10)^{\circ}C}{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ } T^{\circ}C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

$$Q_{10} = \frac{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ } T^{\circ}C}{\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ } (T + 10)^{\circ}C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

นอกจากนั้น ค่า Q_{10} สามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องวัดที่อุณหภูมิต่างกัน 10 °C ได้ โดยหาจากสมการที่ 8

$$Q_{10}^{\Delta/10} = \frac{\text{อัตราของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า } T_2{}^{\circ}C}{\text{อัตราของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า } T_1{}^{\circ}C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

เมื่อทราบค่า Q_{10} ของผลิตภัณฑ์แล้วก็สามารถใช้ค่านี้ในการคาดคะเนอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยแทนค่าในสมการที่ 9

$$Q_{10}^{\Delta/10} = \frac{\text{อายุการเก็บที่ } T_1\ ^{\circ}C}{\text{อายุการเก็บที่ } T_2\ ^{\circ}C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

หรือ $$Q_{10}^{\Delta/10} = \frac{\theta(T_1)}{\theta(T_2)}$$

เมื่อ Δ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ T_2 และอุณหภูมิ T_1 $(T_2 - T_1)$

$\theta(T_1)$ คือ อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่ผลต่างไม่เท่ากับ 10 หรือเป็นอุณหภูมิที่ต้องการทราบ

$\theta(T_2)$ คือ อายุการเก็บที่อุณหภูมิที่ทราบอายุการเก็บ

จากสมการที่ศึกษาข้างต้นสามารถนำมาวางแผนการทดลองหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะเร่ง โดยเมื่อทราบค่าของการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นและกำหนดอุณหภูมิเก็บที่ต้องการศึกษาจะสามารถวางแผนระยะเวลาเก็บที่เหมาะสมและจำนวนตัวอย่างที่ต้องการศึกษาได้