บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับแก่นตะวัน

แก่นตะวัน (Kaentawan) จัดอยู่ใน Genus เดียวกับทานตะวัน มีชื่อสามัญคือ Jerusalem artichoke หรือ sunchoke และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus tuberosus* L. จัดอยู่ใน Family Asteraceae แก่นตะวันเป็นพืชล้มลุกมีอายุ 4-6 เดือน และมีลำต้นสะสมอาหารใต้ดิน (tuber) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนประเภทฟรุคแทน[1] หัวของแก่นตะวันมีลักษณะตะปุ่มตะป่ำคล้ายหัวของขิงหรือข่า (สนั่น จอกลอย และคณะ 2549ก) ลักษณะของหัวแก่นตะวันและส่วนต่างๆ ของหัวแก่นตะวันแสดงในภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1 ลักษณะและส่วนต่างๆ ของหัวแก่นตะวันพันธุ์ JA 89 โดย a คือ โคนหัวหลัก (basal part) b คือ กลางหัวหลัก (middle part) c คือ ปลายหัวหลัก (tip part) d คือ แขนงหัวใหญ่ (bud near basal) และ e คือ แขนงหัวเล็ก (bud near middle part) (สนั่น จอกลอย และคณะ 2549ก)

---

[1] ฟรุคแทน หมายถึง สารประเภทคาร์โบไฮเดรตซึ่งส่วนใหญ่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ 2-70 ประกอบด้วยหน่วยของฟรุคโตส และกลูโคสบางส่วน และอาจมีไดแซคคาร์ไรด์ คือ ซูโครส inulobiose และ levanbiose อยู่ร่วมด้วย ฟรุคแทนจึงมีความหมายรวมถึงอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (Suzuki and Chatterton 1993 and Kays and Nottingham 2008)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของหัวแก่นตะวัน

หัวแก่นตะวันประกอบด้วยน้ำร้อยละ 80 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 15 และโปรตีนร้อยละ 1-2 โปรตีนที่พบส่วนใหญ่เป็นกรดอะมิโนที่จำเป็น เช่น ไลซีนและเมทิโอนีน ส่วนไขมันพบปริมาณเล็กน้อยในรูปของกรดไขมันจำพวกไม่อิ่มตัวที่มี 1 พันธะคู่ (monounsaturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีมากกว่า 1 พันธะคู่ (polyunsaturated fatty acid) แต่ไม่พบกรดไขมันอิ่มตัว หัวแก่นตะวันมีแร่ธาตุในปริมาณสูง โดยเฉพาะธาตุเหล็ก แคลเซียม และโพแตสเซียม นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของวิตามิน โดยเฉพาะวิตามินบีคอมเพล็ก วิตามินซี เบต้า- แคโรทีน รวมทั้งโฟเลท และกรดโฟลิคในปริมาณสูง องค์ประกอบทางเคมีในแก่นตะวันแตกต่างกันขึ้นกับพันธุ์ อายุการเก็บเกี่ยว สภาวะการปลูก อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในหัวแก่นตะวันแตกต่างกันไป (Kays and Nottingham 2008) องค์ประกอบทางเคมีในหัวแก่นตะวันสด แสดงดังตารางที่ 2.1 และองค์ประกอบทางเคมีในแก่นตะวันผง แสดงดังตารางที่ 2.2

คาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของแก่นตะวัน คือ อินนูลิน โดยมีประมาณร้อยละ 7-30 ของน้ำหนักสด หรือประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักแห้ง อินนูลินมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นฟรุคแทน (fructan) ซึ่งประกอบด้วยฟรุคโตสร้อยละ 80 และกลูโคสร้อยละ 20 หน่วยของฟรุคโตสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β-(2,1)-D-fructosyl-fructose หน่วยของฟรุคโตสและกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-D-glucopyranosoyl อินนูลินส่วนใหญ่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ระหว่าง 2-70 หน่วยฟรุคโตส โดยแบ่งเป็นอินนูลินที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์มากกว่า 4 ร้อยละ 65.8 ไตรแซคคาร์ไรด์ (DP 3) ร้อยละ 13.2 และไดแซคคาร์ไรด์ (DP 2) ร้อยละ 13.8 หากระดับการเกิดพอลิเมอร์ที่น้อยกว่า 10 (DP<10) จัดเป็นฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (Kays and Nottingham 2008) โครงสร้างของอินนูลินแสดงดังภาพที่ 2.2

ระดับการเกิดพอลิเมอร์ของอินนูลินเป็นค่าวิกฤตเฉพาะที่ชี้บอกสมบัติและคุณภาพเชิงหน้าที่ ทั้งนี้ขึ้นกับพันธุ์ (cultivars) สายพันธุ์ (species) สภาวะการปลูก เป็นต้น ระดับการเกิดพอลิเมอร์ของอินนูลินใน Jerusalem artichoke, Chicory และ Globe artichoke แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งระดับการเกิดพอลิเมอร์สามารถชี้บ่งศักยภาพของการใช้ประโยชน์ของอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ได้ เช่น ฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ที่มีสายโซ่สั้น ซึ่งมีความหวานประมาณร้อยละ 30 ของซูโครส สามารถใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครส ส่วนอินนูลินที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์สูงสามารถใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารได้ (fat replacement) เป็นต้น (Kays and Nottingham 2008) ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของอินนูลินจากชิคอรี่ อินนูลินที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์สูงและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของหัวแก่นตะวันสด (ต่อน้ำหนักสด 100 กรัม)

องค์ประกอบ \ แหล่งข้อมูล	A	B	C	D	E	F	G	H*
น้ำ (ร้อยละ)	-	82.1	80.1	78	-	79	78.9	80.2
พลังงาน (กิโลแคลอรี่)	38	65	70	76	-	-	-	41
โปรตีน (กรัม)	0.5	2.1	2.1	2.0	-	2.4	-	1.6
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (กรัม)	15.9	14.1	16.7	17.3	-	15	15.8	10.6
เส้นใยอาหาร (กรัม)	4.0	2.6	0.6	1.3	-	-	-	3.5
น้ำตาลทั้งหมด (กรัม)	1.0	-	-	-	-	-	-	1.6
ซูโครส(กรัม)	0.6	-	-	-	-	-	-	-
แลคโทส (กรัม)	0	-	-	-	-	-	-	-
แป้งทั้งหมด (กรัม)	7.2	-	-	-	-	-	-	trace
ไขมันทั้งหมด (กรัม)	0.2	0.6	0.1	<1	-	-	-	0.1
กรดไขมันทั้งหมด (กรัม)	<0.1	0.48	-	<1	-	-	-	-
กรดไขมันอิ่มตัว	<0.1	0.17	-	0	-	-	-	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว 1พันธะ(กรัม)	<0.1	0.01	-	<1	-	-	-	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว >1พันธะ (กรัม)	<0.1	0.3	-	<1	-	-	-	-
คอเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	0.3	0	-	0	-	-	-	-
สเตอรอลทั้งหมด (มิลลิกรัม)	5.2	-	-	-	-	-	-	-
เถ้า (กรัม)	-	1.2	1.2	-	-	-	-	-
ไนโตรเจน (กรัม)	-	-	-	-	0.38	-	-	0.25
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	25	28	37	14	-	29.4	-	30
เหล็ก (มิลลิกรัม)	3.4	0.6	-	3.4	1.5	2.1	3.7	0.4
แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	16	16	-	17	17	14.4	-	-
โพแตสเซียม (มิลลิกรัม)	560	561	-	429	603	657	478	420
โซเดียม (มิลลิกรัม)	3	3	-	4	1.8	-	-	3
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	78	72	63	-	73	-	78	-
ทองแดง (มิลลิกรัม)	-	0.12	-	-	0.01	0.12	-	-
โบรอน (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	0.24	0.21	-	-

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของหัวแก่นตะวันสด (ต่อน้ำหนักสด 100 กรัม) (ต่อ)

องค์ประกอบ \ แหล่งข้อมูล	A	B	C	D	E	F	G	H*
แมงกานีส (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	0.30	0.28	-	nd
ซัลเฟอร์ (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	27	-	-	22
คลอรีน (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	-	-	-	nd
สังกะสี (มิลลิกรัม)	0	0.10	-	12.0	0.32	0.40	-	-
อะลูมินั่ม (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	4.0	-	-	-
เบเรียม (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	0.33	-	-	-
ซิลิคอน (มิลลิกรัม)	-	-	-	-	4.4	-	-	-
นิเกิล (ไมโครกรัม)	-	15.0	-	-	nd	16.0	-	-
ไอโอดีน (ไมโครกรัม)	0	0.10	-	-	-	-	-	nd
โครเมียม (ไมโครกรัม)	-	6.4	-	-	nd	84.0	-	-
วิตามิน บี2 (มิลลิกรัม)	0.05	0.06	-	0.06	-	-	0.16	trace
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.5	1.3	-	1.3	-	-	1.3	-
วิตามิน บี6 (มิลลิกรัม)	-	0.09	-	-	-	-	-	-
กรดเพนโทเทนิค (มิลลิกรัม)	-	0.38	-	-	-	-	-	-
แคดเมียม (ไมโครกรัม)	-	-	-	-	-	1.1	-	-
วิตามิน เอ (ไมโครกรัม)	0.6	1.0	-	1.0	-	-	-	-
ไบโอทิน (ไมโครกรัม)	-	0.50	-	-	-	-	-	-
โฟเลท (ไมโครกรัม)	13.0	22.0	-	13.3	-	-	-	-
วิตามิน บี 12 (ไมโครกรัม)	0	-	-	-	-	-	-	-
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	5.0	6.0	-	4.0	-	-	4.0	2.0
วิตามินดี (ไมโครกรัม)	0	-	-	-	-	-	-	-
วิตามินอี (มิลลิกรัม)	<0.1	0.15	-	-	-	-	-	0.2
วิตามินเค (ไมโครกรัม)	1.44	-	-	-	-	-	-	-
ทริปโตฟาน (มิลลิกรัม)	-	0.23	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ * หมายถึงหัวแก่นตะวันที่ผ่านการต้ม, อักษร A-H หมายถึง แหล่งอ้างอิงข้อมูลที่ต่างกัน,

nd = not detected

ที่มา: Kays and Nottingham (2008)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแก่นตะวันผง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ของแข็ง	91.7
โปรตีน	7.66
ไขมัน	0.38
เยื่อใย	3.31
เถ้า	4.23
แคลเซียม	0.11
ฟอสฟอรัส	0.20
สารสกัดปราศจากไนโตรเจน	75.81
พลังงานรวม(กก.แคลอรี่/กก.)	4,350

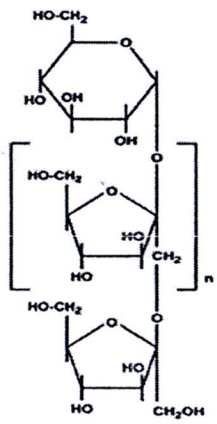
ที่มา: เยาวมาลย์ ค้าเจริญ (2544)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณฟรุคแทนที่ระดับการเกิดพอลิเมอร์ต่างๆ ในส่วนที่บริโภคได้ของพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของพืช	ปริมาณฟรุคแทน *	ระดับการเกิดพอลิเมอร์			
	(ร้อยละ)	≤ 9	10-20	20-40	> 40
แก่นตะวัน (Jerusalem artichoke)	16-20	52	22	20	6
ชิคอรี่ (Chicory)	15-20	29	24	45	2
Globe artichoke	2-9	0	0	13	87

* คิดต่อน้ำหนักแห้ง (dry matter; DM)

ที่มา: Kays and Nottingham (2008)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอินนูลิน (Gibson and Roberfroid 1995)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะทางเคมีและกายภาพของอินนูลินชนิดต่างๆ ในชิคอรี่

ปัจจัย	อินนูลิน	อินนูลินที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์สูง	ฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์
โครงสร้างทางเคมี	GFn (n=2-60)	GFn (n=10-60)	GFn+F (n=2-7)
ระดับการเกิดพอลิเมอร์	12	25	4
สิ่งแห้ง (dry matter; ร้อยละ) *	95	95	95
ปริมาณอินนูลินต่อฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (ร้อยละ) *	92	99.5	95
ปริมาณน้ำตาล (% dm)	8	0.5	5
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ร้อยละ10 w/w)	5-7	5-7	5-7
เถ้าในรูป Sulfated ash (% dm)	<0.2	<0.2	<0.2
โลหะหนัก (ร้อยละ) *	<0.2	<0.2	<0.2
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว	ผงสีขาว	ผงสีขาว
รสชาติ	ไม่มีรสชาติ	ไม่มีรสชาติ	รสหวานปานกลาง
ความหวานเมื่อเทียบกับซูโครส (ร้อยละ)	10	ไม่มีความหวาน	35
ความสามารถในการละลายที่ 25°ซ (กรัมต่อลิตร)	120	25	>750
ความหนืดในน้ำ (ร้อยละ) ที่ 10°ซ (มิลลิปาสคาล·วินาที)	1.6	2.4	1.0
คุณสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหาร	สารทดแทนไขมัน	สารทดแทนไขมัน	สารทดแทนน้ำตาล

หมายเหตุ

G หมายถึง glucosyl subunit; F หมายถึง fructosyl; n หมายถึง number of fructosyl subunits

DP หมายถึง ระดับการเกิดพอลิเมอร์

* หมายถึง คิดต่อน้ำหนักแห้ง

ที่มา: Kays and Nottingham (2008)

2.3 การใช้ประโยชน์จากแก่นตะวันในอุตสาหกรรมอาหาร

แก่นตะวันเป็นพืชหัวสะสมอินนูลิน ได้มีการนำแก่นตะวันมาสกัดอินนูลินหรือใช้บริโภคเป็นแหล่งอาหารเส้นใย เนื่องจากอินนูลินเป็นเส้นใยอาหารย่อยยาก ร่างกายไม่สามารถย่อยและดูดซึมอินนูลินได้โดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารตอนบน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ เช่น *Bifidobacteria* และ *Lactobacilli* สามารถหมักและย่อยอินนูลินได้ (Cabezas and others 2002) อินนูลินจึงมีคุณสมบัติเป็นสารพรีไบโอติก (Brien and others 2003) อินนูลินมีผลดีต่อการดูดซึมอิออนของแคลเซียมและฟอสเฟต อีกทั้งมีผลต่อการสังเคราะห์วิตามินบีคอมเพล็กซ์และส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกัน (Moscatto and others 2005) แหล่งสำคัญของสารสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ชิคอรี่และแก่นตะวัน (Kaur and Gupta 2002)

ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำอินนูลินไปใช้เป็นสารเพิ่มใยอาหารในผลิตภัณฑ์นม เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร ผลิตภัณฑ์ลูกกวาด โยเกิร์ตและชีส (fresh cheese) เบเกอรี่ ช็อกโกแลต และไอศกรีม ลักษณะเชิงหน้าที่ของอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์แตกต่างกันขึ้นกับความยาวของสายโซ่โมเลกุล อินนูลินมีความยาวของสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่าจึงทำให้ละลายได้น้อยกว่าฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์และสามารถเกิดผลึกขนาดเล็ก (microcrystals) เมื่ออินนูลินละลายอยู่ในน้ำหรือน้ำนมจะก่อให้เกิดลักษณะครีมนุ่มในปาก (smooth creamy) อินนูลินจึงสามารถใช้แทนไขมันในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผลิตภัณฑ์จากนม และน้ำสลัด (Kaur and Gupta 2002) ส่วนฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่คล้ายคลึงน้ำตาลซูโครสหรือกลูโคสไซรัป แต่ละลายน้ำได้มากกว่าซูโครสจึงมักใช้ร่วมในการเพิ่มความเข้มข้นของความหวานแทนที่น้ำตาล โดยเฉพาะใช้เป็นสารทดแทนน้ำตาลที่เรียกว่าน้ำเชื่อมฟรุคโตส (high fructose syrup; HFS) (สนั่น จอกลอย และคณะ 2549ข) เนื่องจากมีความหวานเพียงร้อยละ 30 ของซูโครสและให้พลังงานต่ำ (Kays and Nottingham 2008) อินนูลินและฟรุคโตโอลิโอแซคคาร์ไรด์ปริมาณ 1 กรัมให้พลังงานเพียง 1.1-1.7 กิโลแคลอรี่ (Kocsis and others 2007) และการใช้ฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์สามารถลดรสตกค้าง (after taste) ที่เกิดจากการใช้ aspartame หรือ acesulfame-K (Kaur and Gupta 2002)

Devereux and others (2003) ศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์คุกกี้ บลูเบอรี่มัฟฟิน เค้ก แครอท เค้กช็อกโกแลต เลมอนชีสเค้ก ไอศกรีม และไส้กรอกเนื้อที่มีการเติมอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์เป็นสารทดแทนไขมันในระดับ 4-13 กรัม/100 กรัม เพื่อต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณไขมันต่ำ ซึ่งช่วยลดปริมาณไขมันได้ประมาณร้อยละ 20-80 ทั้งนี้ผู้บริโภคได้ให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว แต่มีค่าคะแนนที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมปริมาณไขมันตามสูตรปกติ สอดคล้องกับการศึกษาของวิภาวี ศรีคำภา (2551) ซึ่งทดลองผลิตเค้กเนยไขมันต่ำที่มีการ

เติมแก่นตะวันผงและอินนูลินผงที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่า เค้กที่เสริมแป้งแก่นตะวันและอินนูลินมีปริมาณไขมันร้อยละ 6.5-10.3 ซึ่งต่ำกว่าเค้กสูตรควบคุมที่มีไขมันเต็ม (ร้อยละ 16.65) ในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่า เค้กที่มีการเติมอินนูลินร้อยละ 20 เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคโดยมีคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม อย่างไรก็ตาม Devereux and others (2003) รายงานว่า กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนปริมาณไขมันมีอัตราการปลดปล่อยกลิ่นในขณะเคี้ยวและกลิ่นรสโดยรวมต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ไม่มีการทดแทนปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์

นอกจากการใช้ประโยชน์จากแก่นตะวันในอุตสาหกรรมอาหารแล้ว แก่นตะวันยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอล โดยแก่นตะวัน 1 ตัน ผลิตเอทานอลประมาณ 80-100 ลิตร (สนั่น จอกลอย และคณะ 2549ข) เนื่องจากแก่นตะวันมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นเพียง 90-120 วัน จึงสามารถเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ปีละ 3 ครั้ง ซึ่งแตกต่างจากวัตถุดิบผลิตเอทานอลชนิดอื่น อีกทั้งมีต้นทุนการผลิตต่ำ การจัดการและการดูแลที่ไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้แล้วในการเพาะปลูกเป็นพื้นที่กว้าง ซึ่งแก่นตะวันจะมีดอกบานเมื่ออายุต้นหลังการปลูกประมาณ 60 วัน แก่นตะวันออกดอกสีเหลืองสดใสบานทั้งบริเวณทุ่งกว้าง สามารถเปรียบความสวยงามได้ไม่ต่างจากทุ่งบัวตองหรือทุ่งทานตะวัน สามารถส่งเสริมให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวได้ (สนั่น จอกลอย และคณะ 2549ก)

2.4 แหล่งและปริมาณอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในพืชชนิดต่างๆ

อินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์พบในพืชชนิดต่างๆ มากกว่า 36,000 ชนิด เช่น ชิคอรี่ หัวหอม หัวกระเทียม ต้นกระเทียม กล้วย และแก่นตะวัน เป็นต้น ปริมาณของอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในพืชแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของพืช (ตารางที่ 2.5)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตารางที่ 2.5 ปริมาณอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในพืชผักชนิดต่างๆ

ชนิดของพืช	อินนูลิน (ร้อยละน้ำหนักสด)	ฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (ร้อยละน้ำหนักสด)
หัวหอม (onion)	2 - 6	2 - 6
แก่นตะวัน (jerusalem artichoke)	16 - 20	10 - 15
ชิคอรี่ (chicory)	15 - 20	5 - 10
หน่อไม้ฝรั่ง (asparagus)	1 - 30	5 - 10
ต้นกะเทียมฝรั่ง (leek)	3 - 10	2 - 5
กระเทียม (garlic)	9 - 16	3 - 6
อาร์ติโช้ค (artichoke)	3 - 10	< 1
กล้วย (banana)	0.3 - 0.7	0.3 - 0.7
ข้าวสาลี (wheat)	1 - 4	1 - 4
ข้าวไรย์ (rye)	0.5 – 1	0.5 – 1
ข้าวบาเลย์ (barley)	0.5 - 1.5	0.5 - 1.5

ที่มา: Van Loo and others (1995)

2.5 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาของพืช

ผักและผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ยังคงดำเนินต่อเนื่องไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพไปในทางที่ด้อยลง การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของพืชหลังการเก็บเกี่ยวส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เช่น การเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล การเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นแป้ง การเปลี่ยนสี และการย่อยสลายตัวของผนังเซลล์ที่ทำให้ผลไม้มีเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มลง การเกิดเสี้ยน-เส้นใย กิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์เพคตินเอสเทอเรสและเซลลูเลสเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์ออกซิเดสลดลง ทั้งนี้กิจกรรมของเอนไซม์ผันแปรตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาและระยะความแก่ของผลไม้อีกด้วย (นิธิยา รัตนาปนนท์ และคนัย บุณยเกียรติ 2548) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตด้วยเพื่อดำเนินการจัดการและควบคุมปัจจัยในการเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวก่อนการนำไปใช้ประโยชน์หรือบริโภคให้สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่จะมีผลต่อการเสื่อมของคุณภาพ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
รับที่ 27 พ.ย. 2555
249307
เลขทะเบียน.....
เลขเรียกหนังสือ.....

คาร์โบไฮเดรตในผักและผลไม้อยู่ทั้งในรูปของอาหารสะสม เช่น แป้ง และน้ำตาลชนิดต่างๆ รวมถึงอินนูลินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลฟรุคโตส โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ในระหว่างการเจริญเติบโตและหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งอาจเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ เช่น เอนไซม์ในกระบวนการสร้างแป้งและสลายแป้ง เอนไซม์อินเวอร์เทสที่เปลี่ยนโครงสร้างน้ำตาล หรืออาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาณน้ำตาลที่ลดลงถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตในพืชยังอยู่ในรูปองค์ประกอบโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงของเซลล์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน ซึ่งอาจไม่เกี่ยวข้องกับรสชาติของผักและผลไม้โดยตรง แต่มีผลต่อคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น เหนียว เป็นเสี้ยนเส้นใย เป็นต้น (จริงแท้ ศิริพานิช 2546)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของพืชสะสมอินนูลิน

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบคุณภาพของผลผลิตนอกจากจะขึ้นกับลักษณะทางพันธุกรรม ความแก่-อ่อน แล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิในการเก็บรักษา ความชื้นสัมพันธ์ และระยะเวลาในการเก็บรักษา เป็นต้น สภาวะการเก็บรักษามีผลช่วยชะลอการเสื่อมเสียหรือรักษาคุณภาพของผลิตผลไว้ได้นานมากขึ้น

2.6.1 พันธุ์ (cultivars)

พันธุ์ของพืชที่แตกต่างกันมีผลต่อการสูญเสียคุณสมบัติหรือองค์ประกอบต่างๆ แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาผลผลิต อัตราการสลายของอินนูลินในระหว่างการเก็บรักษาอาจแตกต่างกันขึ้นกับพันธุ์ (Steinbaner 1932, *cited in* Kays and Nottingham 2008) Modler and others (1993) รายงานว่า การสลายของอินนูลินระหว่างการเก็บรักษาของแก่นตะวันพันธุ์ Columbia เกิดขึ้นมากกว่าการสลายอินนูลินของพันธุ์ Fusil, Sunroot และ Challenger

Chekroun and others (1997) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรตในหัวแก่นตะวัน (*Helianthus tuberosus* L.) 2 พันธุ์ คือ Kharkov และ Violet de Rennes ในระหว่างสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ พบว่า หัวแก่นตะวันทั้ง 2 พันธุ์ ยังคงปริมาณของแข็งคิดเทียบเป็นสิ่งแห้งและปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวม (total carbohydrates; TC) ได้นาน 7 สัปดาห์ หลังจากนั้นหัวแก่นตะวันมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมลดลง แก่นตะวันพันธุ์ Kharkov มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมลดลงมากกว่าพันธุ์ Violet de Rennes โดยมีการลดลงร้อยละ 0.19 และร้อยละ 0.26 ของหัวสด/สัปดาห์ ตามลำดับ แก่นตะวันพันธุ์ Kharkov และพันธุ์ Violet de Rennes มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมลดลง (คิดเทียบจากปริมาณเริ่มต้น) ในระหว่างสัปดาห์ที่ 7 และ 13

เป็นร้อยละ 16.7 และร้อยละ 19.1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสายพันธุ์แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมของหัวแก่นตะวัน

2.6.2 ความแก่-อ่อนของผลิตผล

Saengthongpinit and Sajjaanantakul (2005) ศึกษาลักษณะของอินนูลินจากหัวแก่นตะวันที่อายุการเก็บเกี่ยว 16, 18 และ 20 สัปดาห์ และอุณหภูมิในการเก็บรักษา -18, 2 และ 5°ซ พบว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะของอินนูลินขึ้นกับระยะความแก่อ่อนของหัวแก่นตะวัน ซึ่งปริมาณโดยรวมของอินนูลิน DP 3-10 ในหัวแก่นตะวันที่เก็บเกี่ยวในช่วงสัปดาห์ที่ 16-20 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ในขณะที่หัวแก่นตะวันที่อายุการเก็บเกี่ยว 20 สัปดาห์ มีการลดลงของอินนูลิน DP >10 และมีการเพิ่มขึ้นของฟรุคโตสและซูโครส โดยได้อธิบายว่า การลดลงของอินนูลินที่มี DP 11-20 กับการเพิ่มขึ้นของฟรุคโตสอิสระและกลูโคสอาจเป็นสาเหตุจากการลดระดับการเกิดพอลิเมอร์ (depolymerisation) ของฟรุคแทนโดยกิจกรรมของเอนไซม์ fructan exohydrolase (FEH) (Edelman and Jefford 1968, *cited in* Saengthongpinit and Sajjaanantakul 2005) นอกจากนี้ส่วนของพืชที่แตกต่างกันก็มีองค์ประกอบแตกต่างกันไป ทั้งนี้ Ernst and others (1995) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตในชิคอรี่ ซึ่งเป็นพืชอินนูลินเช่นเดียวกับแก่นตะวันในระหว่างการเจริญเติบโตและการเก็บรักษา พบว่า ระดับของซูโครสและฟรุคโตสในรากของชิคอรี่ยังคงเดิมในระหว่างการเจริญเติบโต ในขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของโครงสร้าง (total non-structural carbohydrate; TNC) และฟรุคแทนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบฟรุคแทนที่ไม่มีกลูโคสในโครงสร้าง (inulo-*n*-ose เมื่อ n= 2-18) ในขณะเดียวกันระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ฟรุคแทนที่มี DP สูงหรืออินนูลินและ TNC มีปริมาณลดลง ทั้งส่วนของก้านใบ (petioles) โดยเฉพาะส่วนฐานใบมีปริมาณฟรุคแทนสูงกว่าส่วนของใบ โดยส่วนของใบจะพบฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์สายโมโลกุลสั้นจนถึง DP 4 (inulotetraose)

2.6.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อคุณภาพของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากอุณหภูมิมีผลในการเร่งปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ให้เกิดเร็วขึ้น รวมถึงการหายใจและการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอื่นๆ ภายในผลิตผลเป็นผลให้ผลิตผลเสื่อมเสียได้เร็วขึ้น ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิต่ำมีผลช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวให้ผลิตผลทางการเกษตรมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิต่ำอาจก่อให้เกิดอาการสะท้านหนาว[2] (chilling injury) นอกจากนี้

---

[2] อาการสะท้านหนาว (chilling injury) หมายถึง การเกิดลักษณะทางสรีระวิทยาที่ไม่พึงประสงค์ของผลผลิตทางการเกษตรเนื่องจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเหนือจุดเยือกแข็ง แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของผลิตผลนั้นๆ (Sudheer and Indira 2007)

อุณหภูมิยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปริมาณความชื้นของอากาศรอบผลิตผล (จริงแท้ ศิริพานิช 2546)

Cabezas and others (2002) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อปริมาณอินนูลินและน้ำตาลในหัวแก่นตะวันและชิคอรี่ พบว่า ปริมาณอินนูลินในหัวแก่นตะวันและชิคอรี่ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °ซ และ 18°ซ ลดลงระหว่างการเก็บรักษา ส่วนปริมาณน้ำตาลซูโครส ฟรุคโตส และกลูโคสเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งการลดลงของปริมาณอินนูลินในชิคอรี่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณกลูโคสและฟรุคโตส

Modler and others (1993) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟรุคโตโอลิโอแซคคาร์ไรด์ในหัวแก่นตะวันพันธุ์ Columbia, Fusil, Sunroot และ Challenger ที่บรรจุในถุงพอลิเอทิลีนหนา 150 ไมโครเมตร โดยศึกษาที่สภาวะ 5 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิแวดล้อม 5°ซ, 2°ซ, -10°ซ และสภาวะการเก็บรักษาที่มีการลดอุณหภูมิลง 1 °ซ ต่อสัปดาห์ จากอุณหภูมิ 4°ซ จนถึงอุณหภูมิ -10°ซ โดยเก็บรักษาเป็นเวลา 16 เดือน พบว่า ระดับการเกิดพอลิเมอร์ของสายฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (DP) ในหัวแก่นตะวันลดลงในระหว่างการเก็บรักษา หัวแก่นตะวันที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2°ซ นาน 12 เดือน ยังคงลักษณะคุณภาพดีที่สุด ในขณะที่หัวแก่นตะวันที่อุณหภูมิ 5°ซ เกิดการงอกหลังเก็บรักษานาน 6 เดือน และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานาน 16 เดือน วิเคราะห์ไม่อินนูลินที่มีระดับการเกิดพอลิเมอร์มากกว่าหรือเท่ากับ 10 (DP ≥ 10) แต่มีการสะสมของฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ระดับการเกิดพอลิเมอร์ 1-4 (ตารางที่ 2.6) และพบการเน่าเสียหลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน

ตารางที่ 2.6 ร้อยละขององค์ประกอบอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ที่ละลายได้ใน หัวแก่นตะวันพันธุ์ Columbia เก็บรักษาที่ 5°ซ นาน 16 เดือน

ระดับการเกิดพอลิเมอร์	ระยะเวลาการเก็บรักษา		
(DP)	2 สัปดาห์	12 เดือน	16 เดือน
1	0.8	6.0	12.3
2	11.0	32.7	40.9
3	8.3	16.1	17.6
4	7.5	12.4	10.9
5	8.0	9.4	6.8
6	8.5	7.2	4.7
7	7.8	5.1	2.9
8	6.8	3.6	1.6
9	6.0	2.4	1.1
>9	34.5	5.2	1.3

ที่มา: Modler and others (1993)

Saengthongpinit and Sajjaanantakul (2005) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงระดับการเกิดพอลิเมอร์ของอินนูลินในหัวแก่นตะวันที่เก็บรักษาที่ 2°ซ และ 5°ซ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตารางที่ 2.7) องค์ประกอบอินนูลินของหัวแก่นตะวันในระหว่างการเก็บรักษานาน 4-6 สัปดาห์ มีปริมาณซูโครสและ DP 3-10 เพิ่มขึ้นและ DP >10 ลดลง โครมาโตแกรม HPAEC-PAD ของหัวแก่นตะวันที่อายุการเก็บเกี่ยว 20 สัปดาห์และเก็บรักษานาน 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิต่างๆ (ภาพที่ 2.3) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอินนูลินและฟรุคแทนที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด (second fructan)[3] โดยฟรุคแทนที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดทั้งพบในแก่นตะวันที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 2°ซ และ 5°ซ และงานวิจัยของ Ernst and others (1996) รายงานว่า ฟรุคแทนที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดมีปริมาณเล็กน้อยในหัวแก่นตะวันสด อย่างไรก็ตามหัวแก่นตะวันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง -18°ซ สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของอินนูลินที่ระดับการเกิดพอลิเมอร์ต่างๆ ไว้ได้

[3] Second fructan คือ inulo-*n*-ose (n=2-18) ที่มีเพียงพันธะ β-(2,1)- ของโมเลกุลฟรุคโตสโดยไม่มีโมเลกุลของกลูโคสที่ปลาย หรืออาจเกิดจากการสลายโมเลกุลของฟรุคโตสหรือกลูโคสในสายโซ่ของอินนูลินที่มีความยาวมากกว่า (Ernst and others 1995)

ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของอินนูลินในระหว่างการเก็บรักษา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเก็บรักษา (°ซ)			
	หัวสด	-18	2	5
น้ำตาลโมโลกุลเดี่ยว	3.26[a]	1.26[b]	2.51[ab]	1.05[b]
ซูโครส	8.76[b]	4.33[c]	8.22[b]	10.23[a]
อินนูลิน DP 3-10	47.28[b]	40.82[c]	46.33[b]	57.06[a]
DP 11-20	26.71[b]	31.67[a]	27.48[b]	23.64[c]
DP 21-30	9.52[c]	15.29[a]	11.93[b]	6.77[d]
DP >30	4.48[b]	6.65[a]	3.54[b]	1.27[c]

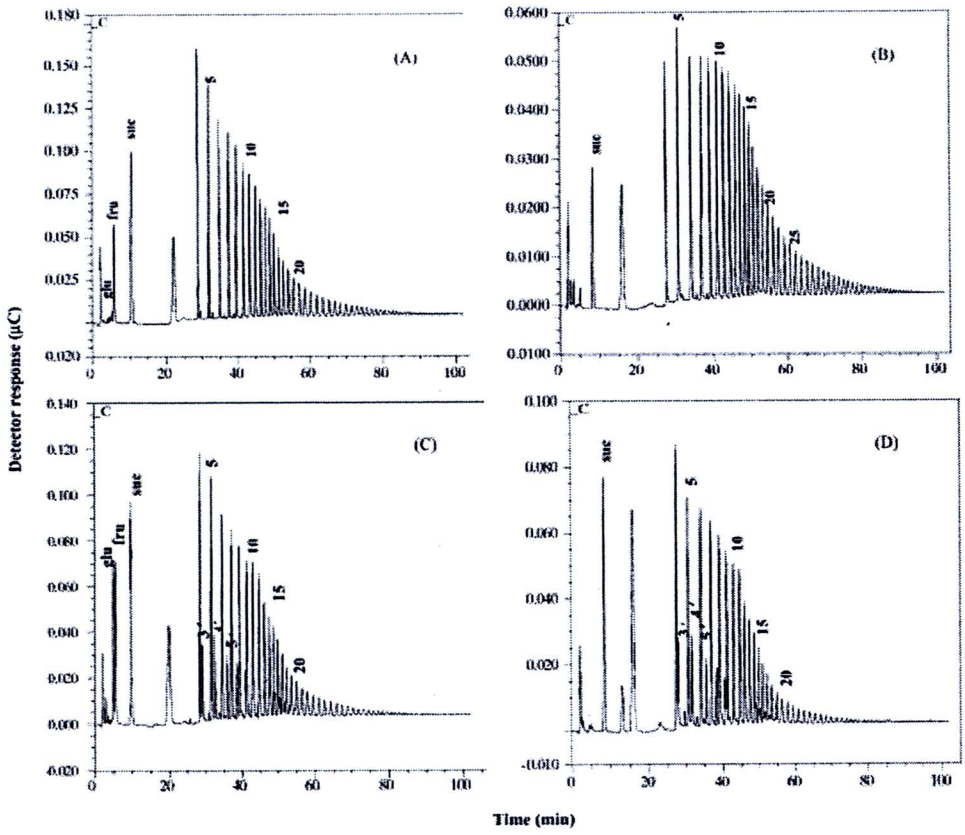
หมายเหตุ

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของร้อยละปริมาณสัมพัทธ์ (% relative)

ตัวอักษรในแนวนอนที่แตกต่างกัน หมายถึง ค่าที่แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

วิเคราะห์โดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT)

ที่มา: Saengthongpinit and Sajjaanantakul (2005)



ภาพที่ 2.3 กลุ่มของฟรุคแทนที่วิเคราะห์ได้จากโครมาโตแกรม HPAEC-PAD ของหัวแก่นตะวันระยะการเก็บเกี่ยว 20 สัปดาห์ และเก็บรักษานาน 8 สัปดาห์ (ภาพ A คือ หัวแก่นตะวันสด B คือ หัวแก่นตะวันที่อุณหภูมิ -18°ซ, C คือ หัวแก่นตะวันที่อุณหภูมิ 2°ซ และ D คือ หัวแก่นตะวันที่อุณหภูมิ 5°ซ)
(Saengthongpinit and Sajjaanantakul 2005)

2.6.4 ความชื้นสัมพัทธ์

ปริมาณไอน้ำในอากาศเป็นตัวกำหนดอัตราการสูญเสียน้ำของผลิตผลและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เช่น กระตุ้นการงอกของหอม-กระเทียม และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (จริงแท้ ศิริพานิช 2546) การเก็บรักษาผลิตผลในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการเก็บได้ยาวนานยิ่งขึ้น เช่น การเก็บหัวแก่นตะวันที่อุณหภูมิ 0-2°ซ เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 จะสามารถเก็บได้นานถึง 6-12 เดือน แต่หากเก็บหัวแก่นตะวันที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้หัวแก่นตะวันเหี่ยวลงอย่างรวดเร็ว (Kays and Nottingham 2008)

2.6.5 องค์ประกอบของบรรยากาศ

ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำหรือสภาวะขาดออกซิเจนพืชจะหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งก่อให้เกิดความผิดปกติทางสรีระวิทยาของพืชได้ ในทำนองเดียวกันหากมีการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหายใจในปริมาณที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดความผิดปกติทางสรีระวิทยาของพืชได้เช่นกัน นอกจากนี้ก๊าซเอทิลีนซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชในการกระตุ้นการสุกที่มีในองค์ประกอบบรรยากาศของการเก็บรักษา อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการ เช่น การงอกของมันฝรั่ง การสร้างเส้นใยในหน่อไม้ฝรั่ง เป็นต้น ดังนั้นองค์ประกอบของบรรยากาศในการเก็บรักษาผลิตผลต่างๆ จึงควรได้รับการปรับแปลงให้พอเหมาะต่อการชะลอการหายใจและการเปลี่ยนแปลงของผลิตผลแต่ละอย่าง (จริงแท้ ศิริพานิช 2546) การเก็บหัวแก่นตะวันในสภาวะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 22.5 และก๊าซออกซิเจนร้อยละ 20 ช่วยลดอัตราการสลายของอินนูลิน เนื่องจากสภาพดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สลายอินนูลิน (Denny and others 1944, *cited in* Kays and Nottingham 2008)

2.7 เอนไซม์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลผลิตพืช

กิจกรรมของเอนไซม์อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในทางที่ต้องการและไม่ต้องการต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร (Owusu-Apenten 2005) โดยผักและผลไม้แต่ละชนิดมีลักษณะคุณภาพที่โดดเด่นเฉพาะตัว เช่น ฝรั่งและแอปเปิลมีเนื้อสัมผัสกรอบ และฉ่ำน้ำเป็นคุณภาพโดดเด่น ในขณะที่ส้มจะมีความฉ่ำของเนื้อสัมผัส มีกลิ่นส้ม และรสหวาน เป็นต้น (Dris and Jain 2004) อย่างไรก็ตามคุณภาพของผักและผลไม้สดจะลดลงหลังการเก็บเกี่ยวหรือในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากกิจกรรมภายในเซลล์ยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกิจกรรมของเอนไซม์เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวเคมีและสรีระวิทยาซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และคุณค่าทางโภชนาการ (ตารางที่ 2.8)

2.7.1 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านสี

เอนไซม์ที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสีในผักและผลไม้ คือ พอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol oxidase (PPO); EC 1.10.3.1) เอนไซม์ PPO เร่งการเกิดออกซิเดชันของ *o*-diphenols ไปเป็น *o*-quinones ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันเองหรือจับกับสารอื่น เช่น โปรตีนหรือน้ำตาลรีดิวซ์ ทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงมีสีน้ำตาลหรือสีแดง (McEvily and others 1992, *cited in* Dris and Jain 2004) การเกิดสีน้ำตาลมีผลโดยตรงต่อลักษณะปรากฏ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสีที่คล้ำเข้มขึ้นส่งผลต่อต่อการยอมรับของผู้บริโภค

สารประกอบฟีนอลมีบทบาทในการต้านทานโรคพืช ในขณะเดียวกันก็มีผลต่อรสชาติ ฝาดเฝื่อนของพืชด้วย อีกทั้งยังเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยการเร่งของ PPO ปริมาณของเอนไซม์ PPO ในผลไม้มักมีมากเมื่อผลยังอ่อนและมีปริมาณลดน้อยลงเมื่อผลเจริญเติบโตขึ้นจนบริบูรณ์และสุก การยับยั้งไม่ให้สีน้ำตาลนี้เกิดขึ้นทำได้หลายวิธี เช่น การเก็บรักษาภายใต้สภาพที่มีออกซิเจนน้อย หรืออาจใช้กรดแอสคอบิคซึ่งจะรีดิวซ์สารประกอบควิโนนให้กลับเป็นสารประกอบฟีนอลไม่ให้เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น จึงไม่เกิดสารสีน้ำตาล-แดง (จริงแท้ ศิริพานิช 2546)

ตารางที่ 2.8 กลุ่มเอนไซม์ที่ส่งผลต่อลักษณะคุณภาพด้านต่างๆ ของผักและผลไม้สด

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง	ลักษณะคุณภาพ	องค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลง
Polyphenoloxidase	ลักษณะปรากฏ	สี
β-Galactosidase Polygalacturonase Pectinmethylesterase	เนื้อสัมผัส	ความแน่นเนื้อ ความแข็ง ความนุ่ม
Cellulase Phenylalanineammonialyase Peroxidase		ความเหนียว ความเป็นเส้นใย
Peroxidase Lipoxygenase	กลิ่นรส	การเปลี่ยนแปลงกลิ่นรส
Invertase Sucrose synthase Sucrosephosphate synthase Glutamine synthetase	คุณค่าทางโภชนาการ	คาร์โบไฮเดรต

ที่มา: Dris and Jain (2004)

Zawistowski and others (1988) รายงานว่า เอนไซม์ PPO ในแก่นตะวันมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 86 และ 120 kDa และ Tchone and Barwald (2005) ศึกษากิจกรรมและการยับยั้งเอนไซม์ PPO ในหัวแก่นตะวัน 9 พันธุ์ พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ PPO เกิดสูงสุดที่บริเวณผิวเปลือก โดยมีกิจกรรมในช่วง 1274-3026 nKat[4] ในส่วนเนื้อของหัวแก่นตะวันมีกิจกรรมของเอนไซม์ PPO น้อยมาก (2-5 nKat) กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ที่ส่วนผิวและเนื้อของหัวแก่นตะวันทั้ง 9 พันธุ์ แสดงในภาพที่ 2.4 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของเอนไซม์ PPO ในหัวแก่นตะวัน คือ 60°ซ โดยกิจกรรมของเอนไซม์ PPO เกิดที่ pH 5-10 และเหมาะสมที่ pH 7 อย่างไรก็ตามความร้อนที่อุณหภูมิ 85°ซ นาน 10 นาที และอุณหภูมิ 100°ซ นาน 6 นาทีสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO ในหัวแก่นตะวันได้ นอกจากนี้ Tchone and Barwald (2005) ยังได้ศึกษาการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO โดยใช้กรดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำมะนาว กรดแอสคอบิค และกรดซิตริค พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ลดลงที่ช่วงความเป็นกรดด่าง 3.5-4.5 โดยเอนไซม์ PPO จากหัวแก่นตะวันมีกิจกรรมคงเหลือร้อยละ 6 และร้อยละ 3 ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ในกรดซิตริคและน้ำมะนาว ตามลำดับ ในขณะที่เอนไซม์ PPO จากหัวแก่นตะวันนี้สูญเสียกิจกรรมอย่างสมบูรณ์ในกรดแอสคอร์บิคที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ดังนั้นจึงควรใช้น้ำมะนาวสด (ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.7) ซึ่งประกอบด้วยกรดแอสคอบิคและซิตริคในการยับยั้งกิจกรรมของ PPO ในหัวแก่นตะวัน เนื่องจากเป็นสารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลจากธรรมชาติ (natural antibrowning)

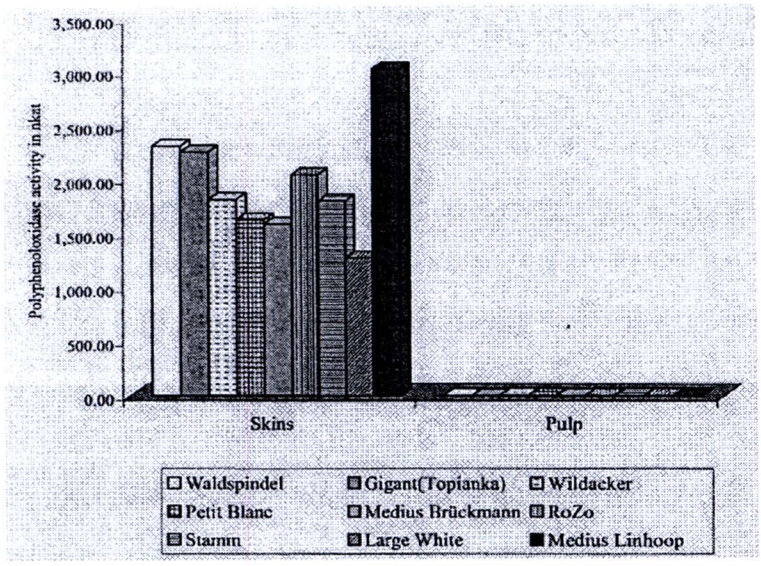
เอนไซม์ในกลุ่มของ PPO ได้แก่ catechol oxidase, phenolase, tyrosinase และ cresolase พบได้ในพืชหัว (tubers) รากสะสมอาหาร (storage roots) และผลไม้ โดยบริเวณเนื้อเยื่อซึ่งมีสารประกอบฟีนอลิคจะมี PPO ในระดับสูงด้วย ระดับของ PPO และสารตั้งต้นของ PPO พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในวงจรชีวิตของพืช และเอนไซม์ PPO ในสารสกัดของผักและผลไม้สด อาจมีหลายไอโซไซม์ (Dris and Jain 2004)

---

[4] nKat คือ สัญลักษณ์ย่อของ nanokatal มีค่าเท่ากับ 10^{-9} katals

Katal (Kat) เป็นหน่วยสากลระบบใหม่ (SI unit) ในการวัดความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ ซึ่งหมายถึง ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้น 1 โมลไปเป็นผลิตภัณฑ์ในเวลา 1 วินาที (1 Kat = 6×10^{7} IU)

IU เป็นหน่วยการวัดความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ในระบบเดิม (International unit) หมายถึง ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยนสารตั้งต้น 1 ไมโครโมลไปเป็นผลิตภัณฑ์ในเวลา 1 นาที (1 IU = 16.67 nKat) (Meyers 1995)



ภาพที่ 2.4 กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสที่ส่วนผิวเปลือกและเนื้อของหัวแก่นตะวันทั้ง 9 พันธุ์ ที่ความเป็นกรด-ด่าง 7 และอุณหภูมิ 60°ซ
(Tchone and Barwald 2005)

2.7.2 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ อาจเนื่องมาจากการสูญเสียแรงดันเต่งของเซลล์เนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในเซลล์ และ/หรือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิแซคคาร์ไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น การสร้างเส้นใยและ/หรือการสลายของโครงสร้างและองค์ประกอบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวเคมีซึ่งมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งกระบวนการ (Dris and Jain 2004)

เพคตินเป็นสารประกอบพอลิแซคคาร์ไรด์ของกรดกาแลคทูโรนิค พบทั่วไปในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงและชั้นระหว่างเซลล์ของพืช เพคตินมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ (ปราณี อ่านเปรื่อง 2547) เพคตินประกอบด้วยโมเลกุล galacturonic acid residue 300-1000 หน่วย เอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเพคตินและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ คือ เอนไซม์พอลิกาแลคทูโรเนส (exo-Polygalacturonase (exo-PG, PG II); EC 3.2.1.67) เอนไซม์เพคตินเมทิลเอสเทอร์เรส (Pectinmethylesterases (PME); EC 3.1.1.11) และเอนไซม์เบต้ากาแลคโทซิเดส (β-Galactosidases (β-Gal); EC 3.2.1.23) (Tavarini and others 2009) นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ฟีนิลอะลานีนแอมโมเนียไลเอส (phenylalaninelyase; PAL) และเอนไซม์เพคตินไลเอส (pectinlyase; PL) เป็นต้น ภาพที่ 2.5 แสดงกลไกกิจกรรมในการเร่งการสลายเพคตินของ PME, PG และ PL

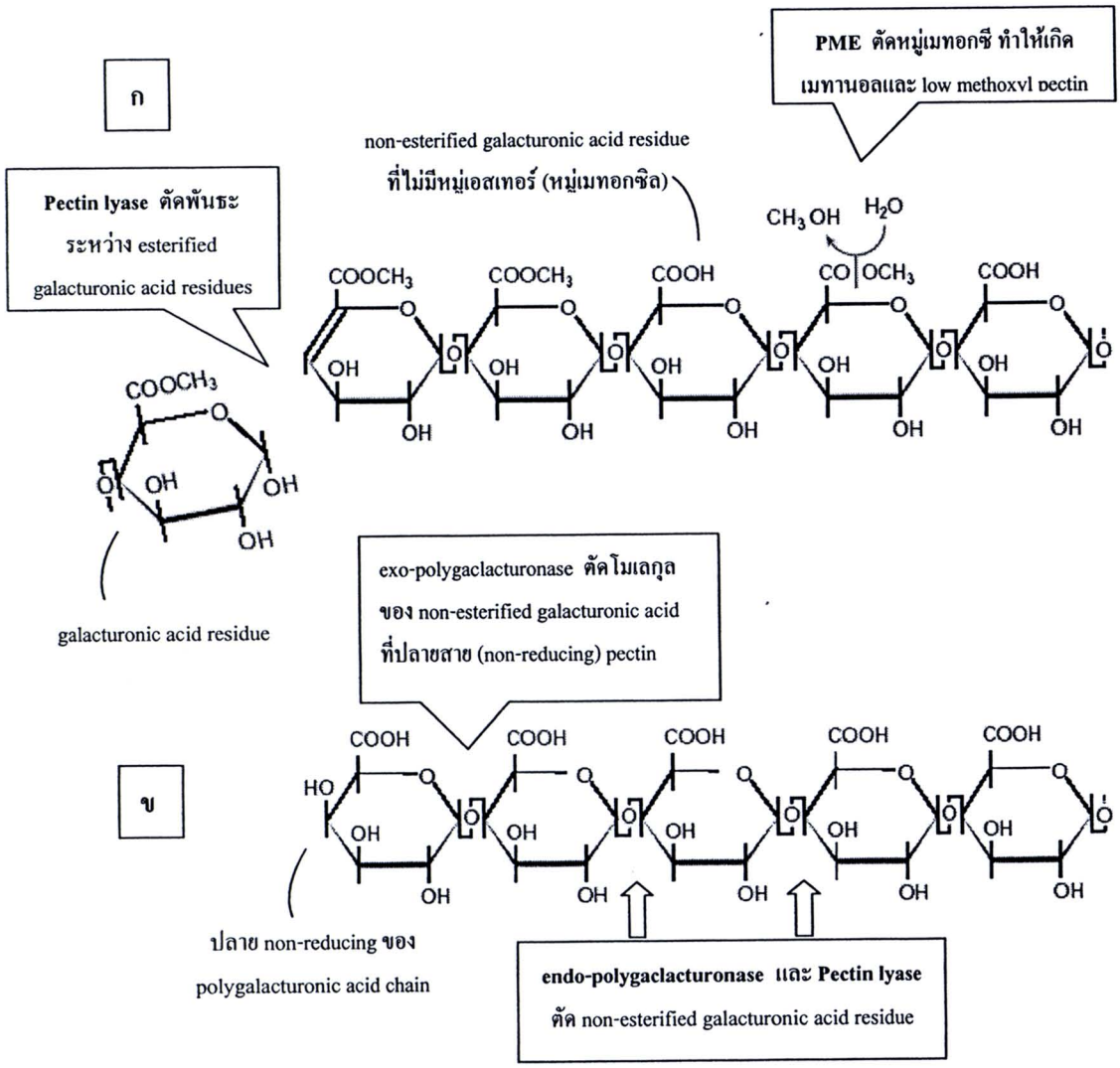
2.7.2.1 เอนไซม์เพคตินเมทิลเอสเทอร์เรส (Pectinmethylesterases (PME); EC 3.1.1.11)

เอนไซม์ PME พบในพืชชั้นสูง ทำหน้าที่เร่งการสลายพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทธิลในโครงสร้างเพคติน (Ren and Kermode 2000) ได้เป็นกรดเพคติกและเมทานอล (Voragen and others 2001 *cited in* Pires and Finardi-Filho 2005) กิจกรรมของเอนไซม์ PME มีบทบาทสำคัญในกระบวนการของการซ่อมแซมหรือสร้างผนังเซลล์ใหม่ (remodeling) ของพืช ซึ่งเกี่ยวข้องกับการขยาย การเพิ่ม การเจริญเติบโตของเซลล์ และกระบวนการสุกของผลไม้ (Richard and Noat 1986 *cited in* Dris and Jain, 2004) การเกิด calcium cross-linking ของเพคตินในผลไม้จะเพิ่มความแน่นเนื้อของผลไม้ กิจกรรมของเอนไซม์ PME มีความสัมพันธ์กับกิจกรรมของเอนไซม์ PG ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความแน่นเนื้อและการเพิ่มความนุ่มของผลไม้ (Villavicencio and others 2004) กิจกรรมของเอนไซม์ PG และเอนไซม์ PME ในมะเขือเทศเพิ่มขึ้นระหว่างการสุก โดยกิจกรรมของเอนไซม์ทั้งสองมีความสัมพันธ์ผกผันกับความแน่นเนื้อ

เอนไซม์ PME จากแหล่งหรือวัตถุดิบที่แตกต่างกันจะมีมวลโมเลกุลและสภาวะที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน Christensen and others (1998) รายงานว่าเอนไซม์ PME ที่สกัดได้จากน้ำส้มมีมวลโมเลกุล 36 kDa มีสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 50°ซ และ pH 7.0 ตามลำดับ Unal and Bellur (2009) รายงานว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของเอนไซม์ PME ที่สกัดจากแครอทสีเข้ม (black carrot) คือ อุณหภูมิ 55°ซ และความเป็นกรด-ด่าง 7.5 Mcmillan and Perombelon (1995) รายงานว่า เอนไซม์ PME จากมันฝรั่งพันธุ์ katahdin มีค่า pI และมวลโมเลกุลเท่ากับ 8.6 และ 33 kDa ตามลำดับ และมีสภาวะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมที่อุณหภูมิ 60°ซ ความเป็นกรด-ด่าง 7.0 นอกจากนี้ Laratta and others (2008) รายงานว่า PME ที่ได้จากผล bergamot (*Citrus bergamia* R.) มีมวลโมเลกุลเป็น 42 kDa

2.7.2.2 เอนไซม์พอลิกาแลคทูโรเนส (Polygalacturonase; PG)

เอนไซม์ PG พบในพืชชั้นสูงและทำหน้าที่เร่งการสลายพันธะ α-1,4-glycosidic ระหว่างหน่วย anhydrogalacturonic acid ของสารประกอบเพคติน (Whitaker 1994) ซับสเตรทของเอนไซม์พอลิกาแลคทูโรเนส คือ กรดเพคติก หรือ de-esterified homogalacturonans ในผนังเซลล์ (Carpita and Gibeaut 1993, *cited in* Villavicencio and others 2004) เอนไซม์ PG มีทั้งชนิดที่เป็น endo-PG (EC 3.2.1.15) และ exo-PG (EC 3.2.1.67)



ภาพที่ 2.5 การย่อยเพคตินของเอนไซม์ **PME, PL** และ **PG** เมื่อ ก คือ high methoxyl pectin และ ข คือ low methoxyl pectin (Anonymous 2000)

การสุกของผลไม้เป็นผลจากกิจกรรมของ endo-PG (Brummell and Harpster 2001, *cited in* Villavicencio and others 2004) มะเขือเทศและอะโวกาโดเป็นพืชที่มีเอนไซม์ PG สูง และการสูญเสียคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะเขือเทศและอะโวกาโดเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายของเพคติน ส่วนกิจกรรมของเอนไซม์ PG ในแครอท กล้วย สตรอเบอรี่ และเมลอนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังกล่าวมากนัก (Tucker 2004, *cited in* Sila and others 2008)

2.7.2.3 เอนไซม์เพคตินไลเอส (Pectatelyases (PL); EC 4.2.2.10)

เอนไซม์ PL พบได้เฉพาะในจุลินทรีย์ (Whitaker 1994) ทำหน้าที่สลายเพคตินโดยการตัดพันธะระหว่าง esterified galacturonic acid residues และ non-esterified galacturonic acid residue (Anonymous 2000) รวมทั้งการขจัดและปลดปล่อยโอลิโกแซคคาร์ไรด์ที่ปลาย non-reducing (Biocatalysts n.d) เอนไซม์นี้มีแคลเซียมอิออนเป็นตัวกระตุ้น (ปราณี อ่านเปรื่อง 2547) ปัจจุบันมีการนำเอนไซม์นี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร กระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Yadav and others 2009)

2.7.2.4 เอนไซม์ฟีนิลอะลานีน แอมโมเนียไลเอส (Phenylalanine ammonia-lyase (PAL); EC 4.3.1.5)

นอกจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพคตินจะมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้แล้ว ความเหนียว (toughness) ของเนื้อเยื่อพืชผักระหว่างการเก็บรักษาเกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมของฟีนอลิก (phenolic metabolism) และการสร้างลิกนิน (lignification) โดย L-phenylalanine จะถูกเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไปเป็น *trans*-cinnamic acid และแอมโมเนีย (NH_3) (สมการที่ 1) โดยเอนไซม์ PAL ซึ่งโครงสร้างหลักของ *trans*-cinnamic acid สามารถรวมตัวกันไปเป็นสารประกอบในพืชได้หลากหลาย รวมทั้งลิกนินและฟลาวานอยด์ (Eskin 1979, *cited in* Dris and Jain 2004) และกรด cinnamic สามารถถูก hydroxylated ไปเป็นสารประกอบฟีนอลิคหลากหลายชนิด นอกจากนี้กรด cinnamic สามารถถูก hydroxylated โดย cinnamic acid-4-hydroxylase ไปเป็นกรด coumaric และ lignin ผ่าน shikimic acid pathway ความเหนียวในหน่อไม้ฝรั่งเกิดจากการสร้างลิกนินของ fibrovascular bundles และกิจกรรมของเอนไซม์ PAL (Powers and Drake 1980, *cited in* Dris and Jain 2004)

$$\text{L-phenylalanine} \xleftrightarrow{\text{PAL}} \textit{trans}\text{-cinnamate} + NH_3 \quad \ldots\ldots (1)$$

2.7.2.5 เอนไซม์เบต้า-กาแลคโทซิเดส (β-Galactosidases (β-Gal); EC 3.2.1.23)

เอนไซม์ β-Gal เป็นเอนไซม์ที่เร่งการสลาย β-D-galactosides ไปเป็น monosaccharide (ภาพที่ 2.6) กิจกรรมของเอนไซม์ β-Gal เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่มีโพแทสเซียมอิออน (K^+) และแมกซีเซียมอิออน (Mg^{2+}) ซึ่งเป็นโมโนเวเลนต์และไดเวเลนต์อิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยทั่วไป β-Gal มักหมายถึง exo-galactanases ซึ่งสามารถปลดปล่อยน้ำตาลกาแลคโตสจากผนังเซลล์ที่มี β-(1,4)-D-galactan เอนไซม์ β-Galactosidase (exo β-[1,4]-D-galactopyranosidase; EC 3.2.1.23) สามารถสลาย (1,4) galactan bonds ได้โดยตรง ซึ่งอาจมีบทบาทในการสูญเสีย galactan

side chain ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของเอนไซม์เบต้า-กาแลคโตซิเดสอิสระ (free Gal) และผลิตภัณฑ์จาก β-Galactosidase เป็นข้อสนับสนุนว่า β-Galactosidase สามารถย่อย galactosyl residues จากผนังเซลล์ระหว่างการสุกได้ (Dris and Jain 2004)

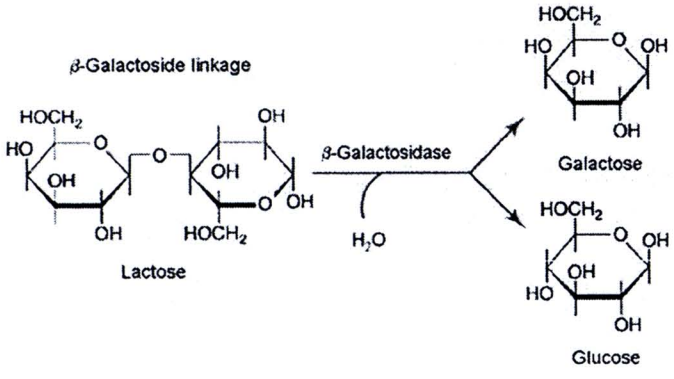
เอนไซม์ β-Gal เพียงบางไอโซไซม์ (isozymes) เท่านั้นที่มีส่วนให้เกิดการสูญเสีย galactosyl residues จากผนังเซลล์ระหว่างการสุกของผลไม้ เช่น ในมะเขือเทศมี β-Gal จำนวน 3 ไอโซไซม์ คือ β-Gal I , II และ III แต่มีเพียง β-Gal II เท่านั้นที่เร่งการการสูญเสีย galactosyl residues และทำให้เนื้อมะเขือเทศอ่อนนิ่มขึ้น (Pressy 1983; Carey and others 1995; Carrington and Pressy 1996, *cited in* Dris and Jain 2004) การสุกของมะละกอซึ่งทำให้ความแน่นเนื้อลดลงเกิดจากทั้งกิจกรรมของ α-Gal และ β-Gal (Ali and others 1998, *cited in* Soh and others 2006) ซึ่ง α-Gal (EC 3.2.1.22) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อย galactosyl-sucrose oligosaccharides เช่น raffinose และ stachyose หรือ gactolipids และ galactoproteins เพื่อปลดปล่อยกาแลคโตสอิสระ (Keller and Pharr 1996, *cited in* Soh and others 2006)

2.7.3 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านกลิ่นรส

สารประกอบทางเคมีส่งผลให้เกิดกลิ่นรสและการรับรู้ด้วยประสาทสัมผัส เอนไซม์สำคัญที่เกี่ยวข้องในการเกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติในผักและผลไม้ ได้แก่ เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส และเอนไซม์ลิพอกซีจิเนส (Dris and Jain 2004)

2.7.3.1 เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase (POD); EC 1.11.1.7)

เอนไซม์ POD พบได้ทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เพอร์ออกซิเดสเป็นชื่อเรียกทั่วไป ซึ่งมีความเฉพาะมากขึ้นโดยแบ่งตามสับสเตรท เช่น NADH peroxidase (EC 1.11.1.1), glutathione peroxidase (EC1.11.1.9) และ iodide peroxidase (EC 1.11.1.8) (Hamid and Rehman 2009)



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาของเบต้า-กาแลคโทซิเดส (Whitaker 1994)

เอนไซม์ POD เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างลิกนินในพืช ป้องกันการเสื่อมเสียทางกายภาพ และป้องกันการติดเชื้อของเนื้อเยื่อพืช (Biles and Martyn 1993, *cited in* Hamid and Rehman 2009) เอนไซม์ POD มีมวลโมเลกุลระหว่าง 30-150 kDa (Hamid and Rehman 2009) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของซับสเตรทที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) แสดงดังสมการที่ 2 ซึ่งมี AH_2 ทำหน้าที่เป็นตัวให้ไฮโดรเจนอะตอม (donor) การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ POD มี 4 รูปแบบ คือ peroxidatic, oxidatic, catalatic และ hydroxylation การเร่งปฏิกิริยาตามสมการที่ 2 เป็นการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ POD แบบ peroxidatic ซึ่งรูปแบบการเร่งปฏิกิริยาแบบ peroxidatic เป็นรูปแบบการเร่งปฏิกิริยาที่มีความสำคัญหากสับสเตรทของปฏิกิริยา คือ สารประกอบฟีนอลิค (Whitaker 1994)

$$H_2O_2 + 2AH_2 \longrightarrow 2H_2O + \text{polymerized products (HAAH)} \quad .....(2)$$

2.7.3.2 เอนไซม์ลิพอกซิจิเนส (Lipoxygenases (LOX); EC 1.13.11.12)

เอนไซม์ลิพอกซิจิเนสพบได้ทั้งในพืชและสัตว์ พบมากในเมล็ดของพืชตระกูลถั่วและหัวมันฝรั่ง (Baysal and Demirdoven 2007) ทำหน้าที่เร่งออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายพันธะ (polyunsaturated fatty acid; PUFA) (Dris and Jain 2004) ซับสเตรทของ LOX มีโครงสร้างเป็น cis,cis-1,4- pentadiene-double bond (-CH=CH-CH_2-H=H-) กรดลิโนเลอิคและลิโนเลนิคเป็น PUFA หลักที่พบในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งกรดลิโนเลอิคเป็นซับสเตรทที่ดีของ LOX ในพืช (Baysal and Demirdoven 2007)

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ LOX สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ถูกใช้ในปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ (conjugation of double bonds) และการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Whitaker 1994) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของ LOX จะเปลี่ยนรูปต่อไปโดย (1) allene oxide synthse (AOS) pathway เกิดเป็น traumatin (12-oxo-*trans*-10-dodecenoate) และ jasmonic acid หรือ (2) hydroperoxide lyase (HPL) pathway ก่อให้เกิดโมเลกุลที่ให้กลิ่นรส เช่น เฮกซีนอล เฮกซานอล เอสเทอร์ และแอลกอฮอล์ชนิดอื่น (Owusu-Apenten 2005) นอกจาก LOX จะก่อให้เกิดกลิ่นรสและสารประกอบที่ให้กลิ่นหอม (aroma compound) ในผักและผลไม้แล้วยังสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอื่นๆ เช่น วิตามิน เม็ดสี สารฟีนอลิค และโปรตีน แม้ว่า LOX ก่อให้เกิดกลิ่นรสที่พึงประสงค์แก่ผักและผลไม้หลายชนิด ในขณะเดียวกันก็อาจเป็นเหตุให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ในผักบางชนิด โดยเฉพาะกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ในในบรอคโคลี่

หน่อไม้ฝรั่ง และแครอทอีกด้วย (Morales-Blancas and others 1992, *cited in* Dris and Jain 2004) นอกจากนี้ LOX ยังทำหน้าที่ควบคุมการตอบสนองเมื่อเซลล์พืชได้รับบาดเจ็บอีกด้วย (Royo and others 1996)

การเร่งปฏิกิริยาของ LOX ในข้าวโพดหวานมีสภาวะเหมาะสมที่ 50°ซ และความเป็นกรดด่างที่ 6.0-7.0 (Theerakulkait and Barrett 2006) ในขณะที่ LOX จากเมล็ดถั่ว (pea seeds) มีมวลโมเลกุล 93 kDa และความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมที่ 5.5 (Szymanowska and others 2009) และ Wang and others (2008) รายงานว่า LOX จากมะเขือเทศมีมวลโมเลกุลเป็น 97 kDa

2.7.4 เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพด้านโภชนาการ

คุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญของผักและผลไม้ คือ ปริมาณวิตามินซี แร่ธาตุ คาร์โบไฮเดรต และใยอาหาร ซึ่งในผักและผลไม้จะมีเอนไซม์ที่เร่งการย่อยสลายสารโภชนาการเหล่านี้ เอนไซม์ในกลุ่มย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate metabolizing) เช่น invertase, sucrose synthase, sucrose phosphate synthase และเอนไซม์ในกลุ่มย่อยสลายกรดอะมิโน (amino acid metabolizing) เช่น glutamine synthetase และ glutamate dehydrogenase ส่งผลต่อการเสื่อมเสียของคาร์โบไฮเดรตโดยรวม (total carbohydrate) เส้นใยอาหาร (dietary fiber) โปรตีนและกรดอะมิโน ไขมันและกรดไขมัน วิตามินและแร่ธาตุในผักและผลไม้ (Dris and Jain 2004)

2.8 บทบาทของเอนไซม์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอินนูลิน

กระบวนการสังเคราะห์ฟรุคแทนของพืชอินนูลินในระหว่างการการเจริญเติบโตมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง 2 ชนิด คือ sucrose: sucrose 1-fructosyl transferase (1-SST, EC 2.4.1.99) และ fructan: fructan 1-fructosyl transferase (1-FFT, EC 2.4.1.100) (Kays and Nottingham 2008)

เอนไซม์ 1-SST มีมวลโมเลกุล 65-70 kDa และทำหน้าที่เร่งการสังเคราะห์ 1-kestose และกลูโคสจากซูโครส 2 โมเลกุล (สมการที่ 3) โดยมีความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาเป็น 5.0 (Kays and Nottingham 2008)

$$\underset{\text{sucrose}}{\text{G-F}} + \underset{\text{sucrose}}{\text{G-F}} \xrightarrow{\text{1-SST}} \underset{\text{1-kestose}}{\text{G-F-F}} + \underset{\text{glucose}}{\text{G}} \qquad \text{..... (3)}$$

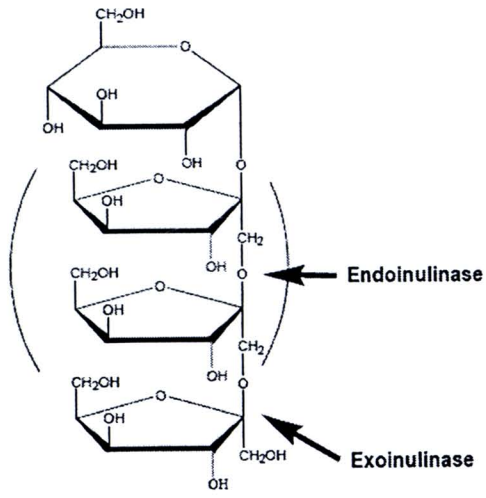
เอนไซม์ 1-FFT มีมวลโมเลกุล 70 kDa ทำหน้าที่เร่งการสร้างสายโซ่ของอินนูลินที่ยาวขึ้น โดยเริ่มต้นจาก 1-kestose และฟรุคแทนที่มี DP>3 ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นให้หน่วยฟรุคโตซิล (donor) เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้น 1-FFT จึงทำหน้าที่ทั้งสร้างและสลายองค์ประกอบของอินนูลิน (สมการที่ 4) เอนไซม์ 1-FFT ทำหน้าที่สลายองค์ประกอบของอินนูลินเมื่อไม่มีซูโครสในกระบวนการ ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ 1-FFT คือ 5.5-7.0 (Kays and Nottingham 2008)

$$\underset{\text{acceptor}}{\text{G-F-F}_n} + \underset{\text{donor}}{\text{G-F-F}_m} \xleftrightarrow{\text{1-FFT}} \underset{\text{acceptor}}{\text{G-F-F}_{n+1}} + \underset{\text{donor}}{\text{G-F-F}_{m-1}} \quad \text{..... (4)}$$

เอนไซม์ fructan 1-exohydrolase (1-FEH) หรือ exoinulinases (β-D-fructan fructohydrolase) (EC 3.2.1.80) มีมวลโมเลกุล 75-79 kDa ทำหน้าที่เร่งการสลายโมเลกุลของอินนูลินในระหว่างการเก็บรักษา โดย 1-FEH จะย่อยโมเลกุลของฟรุคแทนหรืออินนูลินที่ส่วนปลาย non-reducing ได้เป็นฟรุคแทนสายสั้นลงและฟรุคโตสอิสระ (สมการที่ 5) โดยมีความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาเป็น 5.2 (Kays and Nottingham 2008)

$$\underset{\text{donor}}{\text{G-F-F}_m} \xrightarrow{\text{1-FEH}} \underset{\text{donor}_{m-1}}{\text{G-F-F}_{m-1}} + \underset{\text{fructose}}{\text{F}} \quad \text{..... (5)}$$

นอกจากนี้ endoinulinases (2,1-β-D-fructan fructanohydrolase; EC 3.2.1.7) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยอินนูลิน แต่เป็นการย่อยพันธะ β-2,1-fructofuranosidic ได้ inulooligosaccharides เป็นผลิตภัณฑ์หลัก เช่น inulotriose, inulotetraose และ inulopentaose (Chen and others 2009) สภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 50°ซ ความเป็นกรด-ด่างที่ 7.5 endoinulinases แยกได้จาก *Arthrobacter* sp. มีมวลโมเลกุล 75 kDa (Kang and others 1998) ตำแหน่งการสลายพันธะของ exo- และ endo-inulinase แสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ตำแหน่งการสลายพันธะของ exo- และ endo-inulinase (IRIS Biotech n.d)

Cabezas and others (2002) รายงานว่า หัวแก่นตะวันที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°ซ มีปริมาณฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 800-1200 Da เพิ่มขึ้น หลังจากที่ซูโครสมีปริมาณสูงสุด (0.13 กรัม ต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสลายตัวของฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า 1200 Da โดยเอนไซม์ 1-FEH หรือการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ของฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โดยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ฟรุคแทน คือ 1-SST และ 1-FFT แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 800-1200 Da มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอหลังจากฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า (>1200 Da) ลดลงเป็นศูนย์ ขณะที่ความเข้มข้นของซูโครสและฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุล 500-800 Da ลดลง ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 800-1200 Da เนื่องมาจากการเกิดพอลิเมอร์ของฟรุคแทนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า

2.9 การประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัส

ผู้บริโภคโดยทั่วไปจะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินหรือตัดสินใจในการยอมรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยเกณฑ์การยอมรับผลิตภัณฑ์จะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพหรือลักษณะของผลิตภัณฑ์ ในการประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัสสามารถแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ได้ วิธีที่ใช้ในการประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัสมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีการบรรยายเชิงพรรณนาลักษณะ (Quantitative Descriptive Analysis; QDA) การประชุมสัมมนากลุ่ม (Focus Group; FG) และ Free Choice Profiling (FCP)

2.9.1 การประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัส โดยวิธี QDA

ผู้ประเมินได้รับการฝึกฝนตามระยะเวลาที่กำหนด พร้อมทั้งมีตัวอย่างอ้างอิงมาตรฐานในการฝึกฝน มีการสร้างคำศัพท์และคำจำกัดความที่เห็นพ้องต้องกัน (Meilgaard and others 1991) แสดงข้อมูลแบบผังใยแมงมุม (spider web) ซึ่งจะทำให้ทราบว่าในแต่ละลักษณะของผลิตภัณฑ์มีระดับความเข้มเท่าใด (ปราณี อ่านเปรื่อง 2551) วิธี QDA อาจมีข้อจำกัด คือ ระยะเวลาในการฝึกฝนซึ่งใช้ระยะเวลานาน อีกทั้งผู้ประเมินอาจมีอคติในการพัฒนาคำอธิบายลักษณะ และถ้าไม่มีการให้ข้อมูลตอบกลับถึงผลประเมินที่รวดเร็วอาจทำให้ผู้ประเมินเรียนรู้น้อย (Meilgaard and others 1991)

2.9.2 การประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัส โดยวิธี FG

ในการประชุมสัมมนากลุ่มใช้ผู้ประเมินจำนวน 10-12 คน ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เป็นวิธีที่กระตุ้นให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ประเมินแต่ละคนในการแสดงความคิดเห็นต่อหัวข้อที่เป็นประเด็น ข้อจำกัดของวิธีการ คือ ผู้ดำเนินการต้องมีทักษะในการพูดเพื่อให้ผู้ประเมินแต่ละคนแสดงความคิดเห็นได้อย่างเต็มที่และเป็นผู้ฟังที่ดี วิธีการ FG ควรประเมินอย่างน้อย 3 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้อาจมีความยุ่งยากในการนำไปวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความยุ่งยากในการตีความหมายและการแปลความ (MacFie and Thomson 1994)

2.9.3 การประเมินโครงร่างทางประสาทสัมผัส โดยวิธี FCP

วิธี FCP เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการประเมินการรับรู้ของผู้บริโภคและการสร้างโครงร่างของผลิตภัณฑ์จากผู้ประเมินที่เป็นผู้บริโภคทั่วไป เป็นวิธีที่คิดค้นขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่ผู้บริโภคใช้คำอธิบายลักษณะหนึ่งๆ ต่างกัน โดยมีผู้ประเมินเป็นตัวแทนผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 10-12 คน (William and Arnold 1984, *cited in* Fillion and Kilcast 2002) วิธี FCP เป็นการศึกษารูปแบบของคำศัพท์ในการอธิบายผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้นจากผู้ประเมิน ซึ่งคำศัพท์นั้นอาจมีความเฉพาะสำหรับผู้ประเมินแต่ละคนและอาจเป็นคำที่ไม่ตรงกับผู้ประเมินคนอื่น ด้วยวิธีการนี้ผู้ประเมินจะสร้างคำศัพท์และคำจำกัดความของตนเอง (Fillion and Kilcast 2002) คำศัพท์ที่ได้จากการอธิบายลักษณะของตัวอย่างอาจไม่เป็นภาษาทางวิทยาศาสตร์ (Williams and Langron 1984) ผู้ประเมินจะประเมินให้ค่าคะแนนความเข้มของแต่ละผลิตภัณฑ์ในแต่ละลักษณะซึ่งเป็นลักษณะทางประสาทสัมผัสที่รู้สึกได้เอง เนื่องจากคำศัพท์ที่สร้างจากผู้ประเมินแต่ละคนมีความเฉพาะจึงอาจต้องมีการปรับแก้โดยผู้วิจัย เช่น หากเป็นคำศัพท์ที่มีความหมายเหมือนกันแต่ใช้คำที่ต่างกันก็ปรับแก้ให้เป็นคำศัพท์คำเดียวกันหรือหากเป็นคำศัพท์ที่เป็นคำเฉพาะของผู้ประเมินมากเกินไปต้องปรับเปลี่ยน

เป็นคำศัพท์ที่เข้าใจได้ง่ายขึ้นและมีความหมายเดียวกันกับคำนั้นๆ (Jack and others 1990, *cited in* Narain and others 2003)

การวิเคราะห์ข้อมูลของวิธี FCP ใช้การวิเคราะห์แบบ GPA (Generalised procrustes analysis; Gower 1975) เนื่องจากข้อมูลเป็นเมทริกซ์ที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากจำนวนคำศัพท์และคำศัพท์ที่แตกต่างกันของผู้ประเมินแต่ละคน ซึ่ง GPA จะมีการปรับความแตกต่างของสเกลที่ผู้ประเมิน แต่ละคนใช้ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดึงข้อมูล (simulate) ที่สูญหายจากชุดข้อมูลที่มีอยู่ ข้อมูลจาก FCP สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการให้ค่าคะแนนความเข้มของผู้ประเมินแต่ละคนต่อผลิตภัณฑ์และแนวโน้มของลักษณะด้านต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ได้ (Jack and Piggott 1992, *cited in* Narain and others 2003)

Narain and others (2003) ใช้เทคนิค FCP เพื่อศึกษาลักษณะของผลิตภัณฑ์กาแฟ 2 ชนิด คือ unsweetened และ sweetened black filter coffee เพื่อให้ได้ลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ผู้บริโภครับรู้ต่อผลิตภัณฑ์กาแฟ 12 ผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด ในการศึกษามีผู้ร่วมทดสอบ 13 คน เพื่อให้ได้คำศัพท์หรือลักษณะของผลิตภัณฑ์จากผู้บริโภค ซึ่งทำการประเมินในลักษณะด้านกลิ่น (aroma) รสชาติ รสชาติตกค้างและความรู้สึกในปาก (mouth feel) ได้คำศัพท์ที่แสดงลักษณะของ unsweetened black filter coffee จำนวนทั้งสิ้น 110 คำ และคำศัพท์สำหรับ sweetened black filter coffee จำนวนทั้งสิ้น 83 คำ และจัดกลุ่มคำที่แสดงลักษณะที่สำคัญของกาแฟได้ดังนี้ กลิ่นรส (10,9), รสชาติ (11,10), รสชาติตกค้าง (7,4) และความรู้สึกในปาก (4,4) ซึ่งตัวเลขในวงเล็บเป็นคำศัพท์ของ unsweetened และ sweetened filter coffee ตามลำดับ นอกจากนี้ ธีระเดช ศรีวงศ์ (2552) นำวิธี FCP มาใช้เพื่อสร้างโครงร่างทางประสาทสัมผัสของผักคะน้าและสร้างความเชื่อมโยงของลักษณะทางประสาทสัมผัสกับลักษณะทางกายภาพ พบว่า ผักคะน้าที่มีเนื้อสัมผัสที่กรอบและมีสีเขียวเข้มเป็นลักษณะเด่นที่ผู้บริโภคยอมรับและมีความตั้งใจซื้อมากที่สุด ความชอบโดยรวมและความตั้งใจซื้อของผู้บริโภคมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นสีเขียวของใบและลักษณะเนื้อสัมผัสที่รับรู้ได้จากการสัมผัส เช่น ลักษณะความกรอบของใบและลำต้น เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์จึงได้นำวิธี FCP และเทคนิค GPA มาวิเคราะห์ลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ผู้บริโภคใช้ในการประเมินคุณภาพหัวแก่นตะวันสด เนื่องจากวิธี FCP มีข้อดี คือ ประหยัดเวลาในการดำเนินการวิเคราะห์เนื่องจากไม่ต้องฝึกฝนผู้ประเมิน และเนื่องจากผู้ประเมินเป็นตัวแทนจากผู้บริโภคทั่วไป ลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ได้จึงเป็นลักษณะที่สามารถแทนกลุ่มผู้บริโภคได้อย่างแท้จริง (Meilgaard and others 1991) และการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ GPA สามารถสร้างผังโครงร่างทางประสาทสัมผัสและผังผลิตภัณฑ์เพื่อแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะด้านต่างๆ และผลิตภัณฑ์ได้