บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มันเทศและผลิตภัณฑ์มันเทศ

ประวัติความเป็นมาของมันเทศ

มันเทศมีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่บริเวณเขตร้อนของทวีปอเมริกา แต่มันเทศที่ปลูกกันอยู่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ไม่มีหลักฐานแน่นอนว่ามีวิวัฒนาการมาจากพืชป่าชนิดใด มนุษย์รู้จักปลูกมันเทศมานานนับพันปี ในสมัยโบราณนั้นมันเทศเป็นอาหารหลักของมนุษย์สองเขต คือ พวกอินเดียนในอเมริกากลาง และบริเวณเทือกเขาแอนดีส ประเทศเปรู พวกอินเดียนทั้งสองแหล่งนี้ปลูกข้าวโพดเพื่อใช้เป็นอาหารหลัก และในขณะเดียวกันก็ปลูกมันเทศด้วย อีกเขตหนึ่ง คือชนเผ่าโพลิเนเชียนที่อาศัยอยู่บนหมู่เกาะต่างๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิกและตอนเหนือของเกาะนิวซีแลนด์ เชื่อกันว่ามันเทศที่ชาวโพลิเนเชียนปลูกกันในสมัยก่อนนั้นนำมาจากทวีปอเมริกาในคริสต์ศตวรรษที่ 16 หลังจากชาวยุโรปค้นพบทวีปอเมริกา นักสำรวจชาวสเปนได้นำมันเทศไปสู่ประเทศสเปน จากประเทศสเปนก็แพร่ต่อไปยังประเทศอื่น ๆ ในยุโรป (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2523)

ในทวีปเอเชีย ต้นมันเทศถูกนำมายังอินเดีย ฟิลิปินส์ จีนและญี่ปุ่น โดยนักสำรวจชาวสเปน และโปรตุเกส สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานบันทึกว่าได้มีการนำมันเทศเข้ามาปลูกในสมัยใด แต่เข้าใจกันว่ามีผู้นำมันเทศมาแพร่หลายในราวสมัยกรุงศรีอยุธยาเป็นราชธานี เพราะมีเรือสำเภาไปมาค้าขายระหว่างประเทศจีน ชาวจีนคงนำติดมือมาตามนิสัยที่ไปอยู่ที่ไหนก็หาพันธุ์พืชไปปลูกบริโภค ปัจจุบันมันเทศปลูกกันทั่วไปในประเทศไทยแต่ส่วนใหญ่แหล่งปลูกเป็นจังหวัดในภาคกลาง จังหวัดที่ปลูกมาก ได้แก่ นครศรีธรรมราช พระนครศรีอยุธยา สงขลา นครปฐม เพชรบุรี เชียงใหม่ นครสวรรค์ ตรัง เลย และปทุมธานี (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2523)

การจำแนกมันเทศทางพฤกษศาสตร์

มันเทศถูกลำดับทางพฤกษศาสตร์ดังนี้

วงศ์ (Family) Convolvulaceae

สกุล (Genus) Ipomoea

ชนิด (Species) batatas

มันเทศ (Sweet potato) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ipomoea batatas* L. เป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญอันดับ 7 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าว ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าวบาร์เลย์ และมันสำปะหลัง มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนแถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ มันเทศเป็นพืชเถาเลื้อยราบไปบนพื้นดิน มีรากสะสมอาหารขยายใหญ่เรียกว่าหัวมันเทศมีประโยชน์ในด้านการบริโภคใช้เป็นอาหารของมนุษย์และอาหารสัตว์ได้ทั้งหัว เถา ใบ และยอดอ่อน ในประเทศไทยมันเทศใช้ประกอบอาหารได้หลายชนิด ทั้งคาว หวาน เช่น แกงเลียง แกงคั่ว มันทอด มันเทศสามารถทำเป็นแป้งมันเทศ ส่วนผสมอาหารเด็ก อาหารว่างชนิดต่าง ๆ เส้นก๋วยเตี๋ยวมันเทศ แอลกอฮอล์ สุรามันเทศ และทำเป็นกาว เป็นต้น มันเทศเป็นพืชหัวที่มีคุณค่าอาหารสูง มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงทั้งหัวและใบ โดยเฉพาะในมันเทศเนื้อสีเหลือง หรือสีส้มจะมีสารเบต้าแคโรทีนสูง ช่วยบำรุงสายตา และมันเทศเนื้อสีม่วงมีสารแอนโธไซยานินสูง ซึ่งสารดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้มันเทศยังสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้หลายชนิด เช่น สุกร วัว ควาย แพะ แกะ กระต่าย เป็ด ไก่ และปลา เป็นต้น (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2523)

ส่วนประกอบของต้นมันเทศ

ราก

มันเทศมีระบบรากแบบรากฝอย ซึ่งเกิดจากข้อของลำต้นที่ใช้ปลูก หรือเกิดจากลำต้นที่ทอดไปตามพื้นดิน รากมันเทศจะเป็นที่สะสมอาหารและใช้รับประทานได้

ใบ

ใบเป็นแบบใบเดี่ยว เกิดสลับกันบนข้อของลำต้นมีขนาด และรูปร่างต่างกันความแตกต่างของใบนั้นมิใช่เกิดจากพันธุ์เท่านั้นแม้แต่ในต้นเดียวกันก็อาจมีรูปร่างแตกต่างกันได้บางใบมีขอบใบเรียบบาง ใบมีใบเป็นแฉก และบางใบมีรูปร่างคล้ายหัวใจ เป็นต้น ใบมีขนเล็กน้อยและมักจะมีสีม่วงอยู่ตามเส้นใบ ก้านใบอาจจะยาวหรือสั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์นั้น ๆ

ดอก

มันเทศที่ปลูกในเขตอบอุ่นมักไม่ออกดอก ส่วนการปลูกในเขตร้อนจะออกดอก แต่ไม่ติดเมล็ด ดอกเกิดตามมุมของใบ มีก้านช่อดอก (peduncle) แข็งแรง ซึ่งมักจะยาวกว่า ก้านใบ ดอกมีกลีบเลี้ยง (sepal) 5 กลีบ ซึ่งโดยปกติจะแยกเป็นอิสระซึ่งกันและกัน หรืออาจเชื่อมติดกันที่โคน กลีบดอก (petal) มี 5 กลีบ กลีบดอกเหล่านั้นจะเชื่อมติดกันเป็นรูปกรวย (corolla tube) มีลักษณะคล้ายดอกผักบุ้ง กลีบดอกมีสีชมพูปนม่วง มีเกสรตัวผู้ (stamen) 5 อัน และแยกเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ก้านชูอับเกสรตัวผู้เรียกว่า ก้านอับเกสรมีความยาวไม่เท่ากัน และเชื่อมติดอยู่กับฐานของกลีบดอก รังไข่ มี 2 ส่วนบางดอกอาจจะมี 4 ส่วน แต่ละส่วนจะมีไข่ 1 หรือ 2 ที่รับละอองเกสรตัวผู้ (stigma) มี 2 แฉกอยู่ที่ก้าน (style) เชื่อมติดกับรังไข่

ผล

ผลมีเปลือกแข็งหุ้ม มีลักษณะเป็นแคปซูล (capsule) ภายในเปลือกแข็งมีเมล็ดเล็กสีดำค่อนข้างแบน ด้านหนึ่งของเมล็ดเรียบส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นเหลี่ยมทางด้านเรียบจะเห็นรอยที่เมล็ดติดกับผนังรังไข่เรียกว่า ไฮลัม (hilum) และมีรูเล็กๆเรียกว่า ไมโครไพล์ (micropyle) เปลือกของเมล็ดค่อนข้างหนาและน้ำซึมผ่านได้ยาก

หัว

มันเทศลงหัวในระดับความลึกไม่เกิน 9 นิ้ว หัวมันเทศเกิดจากการขยายตัวของราก ซึ่งเนื้อเยื่อภายในรากที่เรียกว่าพาเรนไคมา (parenchyma) เป็นส่วนที่สะสมแป้ง รากที่ขยายตัวเป็นหัวขึ้นมาอาจเกิดจากรากของลำต้นที่ใช้ปลูกหรือจากรากที่เกิดจากข้อของลำต้นที่เลื้อยไปตามดินก็ได้ ดังนั้นมันเทศต้นหนึ่งๆอาจมีหัวมากกว่า 50 หัว ลักษณะหัวส่วนมากมีรูปร่างทรงกระบอก ด้านหัวท้ายเรียว ตรงกลางป่องออก สีผิวของหัวและสีของเนื้ออาจจะเป็นสีแดง เหลือง ขาว หรือสีนวลแตกต่างกันไปตามพันธุ์ ผิวอาจจะเรียบหรือขรุขระ และมักจะมีรากแขนงเกิดในร่องของหัว หัวมันเทศนอกจากจะให้อาหารจำพวกแป้งแล้ว ยังอุดมสมบูรณ์ไปด้วยวิตามิน เอ (โดยเฉพาะหัวที่มีสีเหลือง) วิตามิน บี และ ซี อีกด้วย (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2523)

1. การเก็บ และรักษาหัวมันเทศ

เมื่อมันเทศมีอายุประมาณ 90-150 วัน ก็อาจเก็บหัวได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปอายุการเก็บหัวมันที่ปลูกในฤดูฝนจะยาวกว่ามันเทศที่ปลูกในฤดูแล้งประมาณ 30-40 วัน เครื่องมือที่ใช้ขุดหัวโดยทั่วไป และได้ผลดีก็คือ จอบ เสียม และไถ การใช้จอบและเสียมนั้นจะต้องขุดทีละหลุม ส่วนการไถนั้นก็คือ ใช้ไถผ่านไประหว่างแถวเพื่อขุดหัวขึ้นมา ผลผลิตของหัว หรือน้ำหนักหัวที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ ดินที่ใช้ปลูก ฤดูปลูก และปัจจัยอื่น ๆ เช่น การใส่ปุ๋ย และการให้น้ำ เป็นต้น การเก็บมันเทศสดไว้ใช้ทำประโยชน์ได้นานพอสมควร ถ้าเก็บไว้ในที่โปร่ง ไม่อับลม และในที่มีอากาศเย็น เช่น ในห้องใต้ถุนบ้าน ควรคัดแยกหัวที่เน่าเสียใช้ไม่ได้ออกเสียก่อน

หลักที่ควรถือปฏิบัติเพื่อให้หัวมันเทศเก็บไว้ได้นานไม่เสื่อมเสียเร็ว มี 4 ประการคือ

1.1 มันเทศที่จะเก็บไว้ได้นาน ต้องขุดเมื่อหัวมันแก่เต็มที่ถึงขนาด หัวอ่อนจะเน่าง่าย

1.2 เวลาขุดต้องระมัดระวังอย่าให้หัวมันช้ำหรือมีบาดแผล ถ้ามีบาดแผลจะเป็นทางนำเชื้อโรคทำให้หัวเน่าง่าย

1.3 ก่อนจะนำเข้าเก็บในที่เก็บรักษาต้องผึ่งหัวมันให้แห้งสนิทอย่าให้เปียกชื้น

1.4 ในห้องที่เก็บหัวมันเทศต้องมีอากาศเย็นอยู่เสมออย่าให้ร้อนจัด หรือเย็นจัดจนเกินไป อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 10-15 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเช่นนี้ช่วยเก็บหัวได้นานถึง 3 ปี โดยหัวไม่งอกและแตกตาออกมา (ไสว พงษ์เก่า และโสภณ สินธุประมา, 2523)

2. ประโยชน์ของหัวมันเทศ

หัวมันเทศมีแป้ง โปรตีน ไขมัน และ วิตามินต่าง ๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงใช้เป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ได้เป็นอย่างดี คุณค่าอาหารของหัวมันเทศเมื่อมีน้ำหนัก 100 กรัม จะมีคุณค่าดังต่อไปนี้

น้ำ	70	กรัม
แคลอรี	100	
แป้ง	25	กรัม
โปรตีน	1.7	กรัม
ไขมัน	0.3	กรัม
เถ้า	1	กรัม
แคโรทีน	2,000-5,000	หน่วย

ในมันเทศเนื้อสีเหลือง

วิตามินบี 1	0.1	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.05	มิลลิกรัม
ไนอาซีน	0.7	มิลลิกรัม
วิตามินซี	25	มิลลิกรัม

3. ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มันเทศ

3.1 มันเทศบรรจุกระป๋อง บรรจุในรูปแบบต่าง ๆ เช่น รูปลูกบาศก์ แท่งสี่เหลี่ยมยาว ทั้งหัว แผ่น อาจมีส่วนผสมเป็นน้ำเกลือหรือน้ำเชื่อม

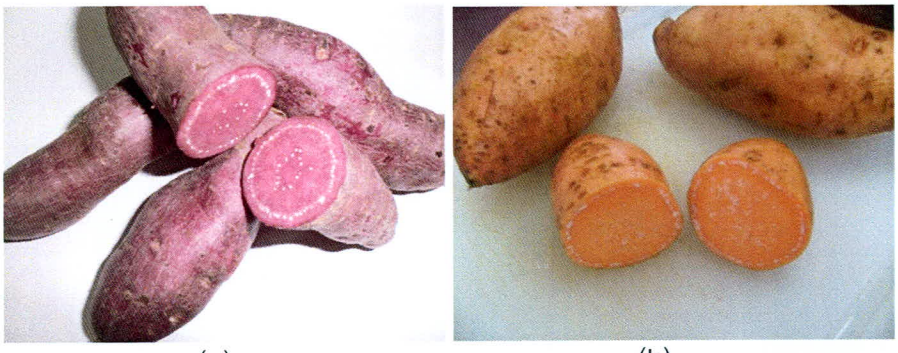
3.2 การสกัดแป้งจากมันเทศ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น นำมาเป็นสารให้ความข้นหนืด และสารให้ความคงตัว ในเกรวี่ ซุป พุดดิ้ง น้ำสลัด เป็นต้น หรือการนำแป้งมันเทศมาใช้ทดแทนแป้งสาลี หรือแป้งข้าวโพดในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมอบ โดยใช้เป็นส่วนประกอบของขนมปัง บิสกิต เค้ก อาหารขบเคี้ยวและเส้นก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น เป็นต้น

3.3 ผลิตภัณฑ์มันเทศทอดที่ทำออกมาในลักษณะเฟรนฟรายส์ โดยใช้มันเทศแทนมันฝรั่ง หรืออาจจะใช้แป้งมันเทศมาขึ้นรูปใหม่เป็นแผ่นบางทอดกรอบ

3.4 ผลิตภัณฑ์มันเทศแช่แข็งจะเป็นหัวมันเทศที่ผ่านกระบวนการลวก, นึ่งที่ความดัน 10 psi. (116 °C) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากเอนไซม์ (Woodroof and Atkinson, 1944)

3.5 Teangpook, et al. (2012, pp. 353-359) ศึกษาการพัฒนาเครื่องดื่มที่มีการเติมมันเทศ 3 สายพันธุ์ (สีม่วง สีส้ม และสีขาว) ที่ผสมกับน้ำองุ่นและข้าวหมัก (ข้าวขาว และข้าวดำ) โดยใช้ส่วนผสมเนื้อมันเทศ 44.98 % ทำการบรรจุใส่ขวด แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เก็บตัวอย่าง 3 เดือนที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส ความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ลดลงเล็กน้อย ค่าสีและปริมาณแอนโธไซยานินลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการเก็บมากขึ้น

4. พันธุ์มันเทศที่ใช้ในงานวิจัย



(a) (b)

ภาพ 1 พันธุ์มันเทศที่ใช้ในงานวิจัย; (a) **มันเทศเนื้อสีม่วงพันธุ์ พจ. 65-3 และ** (b) **มันเทศเนื้อสีส้มพันธุ์** T101

4.1 มันเทศเนื้อสีม่วงพันธุ์ พจ. 65-3 หัวรูปทรงแบบยาวรี หัวมีผิวสีแดง เนื้อสีม่วง ขนาดของหัวเฉลี่ย กว้าง 3.5 เซนติเมตร ยาว 13.6 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยว 90-110 วัน ผลผลิตเฉลี่ย 2,100 กิโลกรัมต่อไร่

4.2 มันเทศเนื้อสีส้มพันธุ์ T101 หัวรูปทรงแบบยาวรี หัวมีผิวสีแดง เนื้อสีส้มเข้มขนาดของหัวเฉลี่ย กว้าง 6.0 เซนติเมตร ยาว 16.7 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยว 90-120 วัน ผลผลิตเฉลี่ย 2,990 กิโลกรัมต่อไร่

องค์ประกอบในมันเทศ

องค์ประกอบของมันเทศและมันฝรั่งแช่แข็งไม่ปรุงรสดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบมันฝรั่งแช่แข็งไม่ปรุงรส และมันเทศแช่แข็งไม่ปรุงรส

Nutrient	Unit	Potato	Sweet potato
		Value per 100 grams	Value per 100 grams
Proximates			
Water	g	79.3	74.89
Energy	kcal	78	96
Protein	g	2.38	1.71
Total lipid (fat)	g	0.16	0.18
Carbohydrate, by difference	g	17.47	22.22
Fiber, total dietary	g	1.2	1.7
Sugars, total	g	0.78	-
Minerals			
Calcium, Ca	mg	8	37
Iron, Fe	mg	1.01	0.53
Magnesium, Mg	mg	13	22
Phosphorus, P	mg	32	45
Potassium, K	mg	346	365
Sodium, Na	mg	25	6
Zinc, Zn	mg	0.3	0.31
Vitamins			
Vitamin C, total ascorbic acid	mg	14.2	13.3
Thiamin	mg	0.154	0.067
Riboflavin	mg	0.031	0.051
Niacin	mg	1.68	0.597
Vitamin B-6	mg	0.256	0.177
Folate, DFE	µg	13	21

ตาราง 1 (ต่อ)

Nutrient	Unit	Potato	Sweet potato
		Value per 100 grams	Value per 100 grams
Vitamin B-12	µg	0	0
Vitamin A, RAE	µg	0	518
Vitamin A, IU	IU	2	10367
Vitamin E (alpha-tocopherol)	mg	0.01	-
Vitamin D (D2 + D3)	µg	0	0
Vitamin D	IU	0	0
Vitamin K (phylloquinone)	µg	1.9	-
Lipids			
Fatty acids, total saturated	g	0.041	0.039
Fatty acids, total monounsaturated	g	0.003	0.007
Fatty acids, total polyunsaturated	g	0.067	0.08
Cholesterol	mg	0	0
Other			
Caffeine	mg	0	-

หมายเหตุ: Nutrient data for 11400, Potatoes, frozen, whole, unprepared

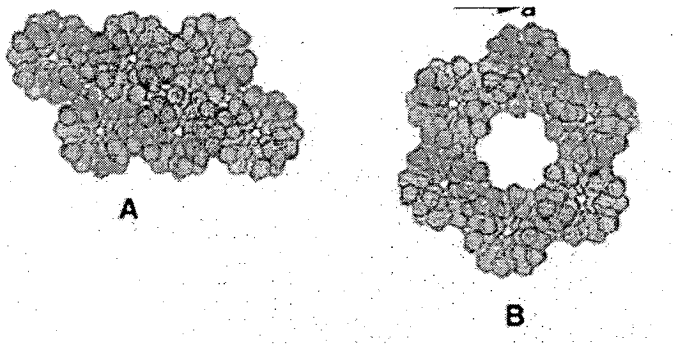
Nutrient data for 11516, Sweet potato, frozen, unprepared

ที่มา: USDA National Nutrient Database for Standard Reference

หัวมันเทศสดประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 18-35 หรือร้อยละ 80-90 ของของแข็งทั้งหมด คาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่เป็นแป้งและน้ำตาล นอกจากนั้นยังมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน และมีโปรตีนร้อยละ 1-2 ซึ่งนับว่าต่ำมาก ปริมาณแป้งและน้ำตาลในหัวมันเทศขึ้นอยู่กับพันธุ์ วิธีการปลูก การเก็บและการบ่ม พันธุ์หวานจะมีน้ำตาลสูงแต่มีแป้งต่ำ ในขณะที่พันธุ์ธรรมดามีแป้งสูงน้ำตาลต่ำ (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2538)

องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญคือแป้ง ประกอบด้วยอะมิโลส อะมิโลเพคติน ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของอะมิโลส อะมิโลเพคติน จะทำให้คุณสมบัติของแป้งมันเทศมีลักษณะแตกต่างจากแป้งชนิดอื่น ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำแป้งมาทำให้เกิดเจลาทิไนซ์ด้วยความร้อน แล้วนำมาแช่แข็งและละลาย พบว่าแป้งเกิดรีโทรเกรเดชั่นขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำ

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวม ๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังภาพ 2 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชราก) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



ภาพ 2 โครงสร้างการเรียงตัวของอะมิโลส ชนิด A และชนิด B

ที่มา: Wu and Sarko, 1978a, p. 7; Wu and Sarko, 1978b, p. 27

ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกในแป้งแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 2 แป้งมันฝรั่งมีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวของอะมิโลสแบบ B ในขณะที่แป้งจากมันเทศมีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวของอะมิโลสแบบ C

ตาราง 2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (°C)	ปริมาณอะมิโลส (%)
โครงสร้าง A			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
โครงสร้าง B			
Amylomaize	15 – 22	86.0	55 – 75
สาคู	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	**38**	**70.0**	**20**
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

ที่มา: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html

มันเทศมีองค์ประกอบที่เป็นเอนไซม์ Polyphenoloxidase (PPO) ซึ่งพบในพืชผักหลายชนิด และมีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา enzymatic browning reaction ในอาหาร (Lillia, et al., 1997, pp. 681-686) เมื่อนำมันเทศมาปอกเปลือก หั่นหรือตัดจะเกิดสีน้ำตาล เนื่องจากเนื้อเยื่อมันเทศสัมผัสกับอากาศ สารประกอบฟีนอลิกที่มีจะเปลี่ยนเป็นเมลานินถูกออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนในอากาศ และมีเอนไซม์ PPO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในมันเทศจึงเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ทั้ง enzymatic browning และ non- enzymatic browning (Woodoof, 1975, p. 210)

อนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระ

1. **อนุมูลอิสระ** (Free Radicals)

อนุมูลอิสระ หมายถึง สารหรือโมเลกุล ซึ่งมีอิเล็กตรอนที่ขาดคู่อยู่ในวงรอบของอะตอม โมเลกุลที่ไม่เสถียรเนื่องจากขาดอิเล็กตรอนจึงจำเป็นต้องใฝ่หาอิเล็กตรอนเพื่อมาทำให้เกิดความเสถียร ดังนั้นจึงไปแย่งอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพื่อมาทดแทน สารอื่นที่ถูกแย่งอิเล็กตรอนมาต้องไปแย่งอิเล็กตรอนจากสารอื่นมาทดแทนเช่นกัน ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้น อนุมูลอิสระมีอายุสั้นมาก จึงจัดเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียรและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี โมเลกุลดังกล่าว เป็นตัวก่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในร่างกาย (อนันต์ สกุลกิม, 2551, หน้า 28-33)

ตัวอย่างของอนุมูลอิสระ (Free radicals) และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายเนื่องจากออกซิเจน Reactive oxygen species (ROS) มีดังนี้

Superoxide anion radical	$O^{\bullet}_2$
Hydroxyl radical	$HO^{\bullet}$
Peroxide radical	$ROO^{\bullet}$
Peroxyl radical	$LOO^{\bullet}$
Hydrogen peroxide	H_2O_2
Ozone	O_3
Singlet oxygen	$^1O_2$
Hydrogen radical	$H^{\bullet}$
Methyl radical	$CH^{\bullet}_3$

1.1 **แหล่งกำเนิดอนุมูลอิสระ** (Sources of free radical)

ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพจะมีอนุมูลอิสระของออกซิเจนเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาการเกิดอนุมูลอิสระเหล่านี้มีสาเหตุมาจากปัจจัยทั้งภายในและภายนอกร่างกายดังนี้

1.1.1 **ปัจจัยภายในร่างกาย**

ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตจะมีปฏิกิริยามากมายที่เกี่ยวข้องกับทั้งการสร้างและการสลายโมเลกุลของสารที่เรียกว่ากระบวนการเมทาบอลิซึม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิด อนุมูลอิสระ ตัวอย่างปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ได้แก่

1) **ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเอง** (Auto-oxidation) เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระยะ (Nawar, 1996, pp. 210-243) คือ

a) ระยะเหนี่ยวนำเริ่มต้น (Initiation) เป็นระยะที่กรดไขมันแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระโดยมีแสงหรืออุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ

$$RH + initiator \text{ ---------> } R^{\cdot} + H^{\cdot} \quad (1)$$

b) ระยะเพิ่มจำนวน (Propagation) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซี (peroxy radical) (สมการ 2.1) ซึ่งทำปฏิกิริยาต่อกับกรดไขมันเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro peroxide) และอนุมูลอิสระ (สมการ 2.2) ซึ่งถ้ามีแสงและความร้อนเป็นตัวเร่งก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อทำให้อนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นแล้วอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใหม่ได้ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ดังสมการ

$$R^{\cdot} + O_2 \text{ ---------> } ROO^{\cdot} \quad (2.1)$$

$$ROO^{\cdot} + RH \text{ ---------> } ROOH + R^{\cdot} \quad (2.2)$$

c) ระยะสิ้นสุด (Termination) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นรวมตัวกันกลายเป็นโมเลกุลที่เสถียร ดังสมการ

$$R^{\cdot} + R^{\cdot} \text{ ---------> } RR \quad (3.1)$$

$$ROO^{\cdot} + ROO^{\cdot} \text{ ---------> } ROOR + O_2 \quad (3.2)$$

2) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีเอ็นไซม์เป็นตัวเร่ง

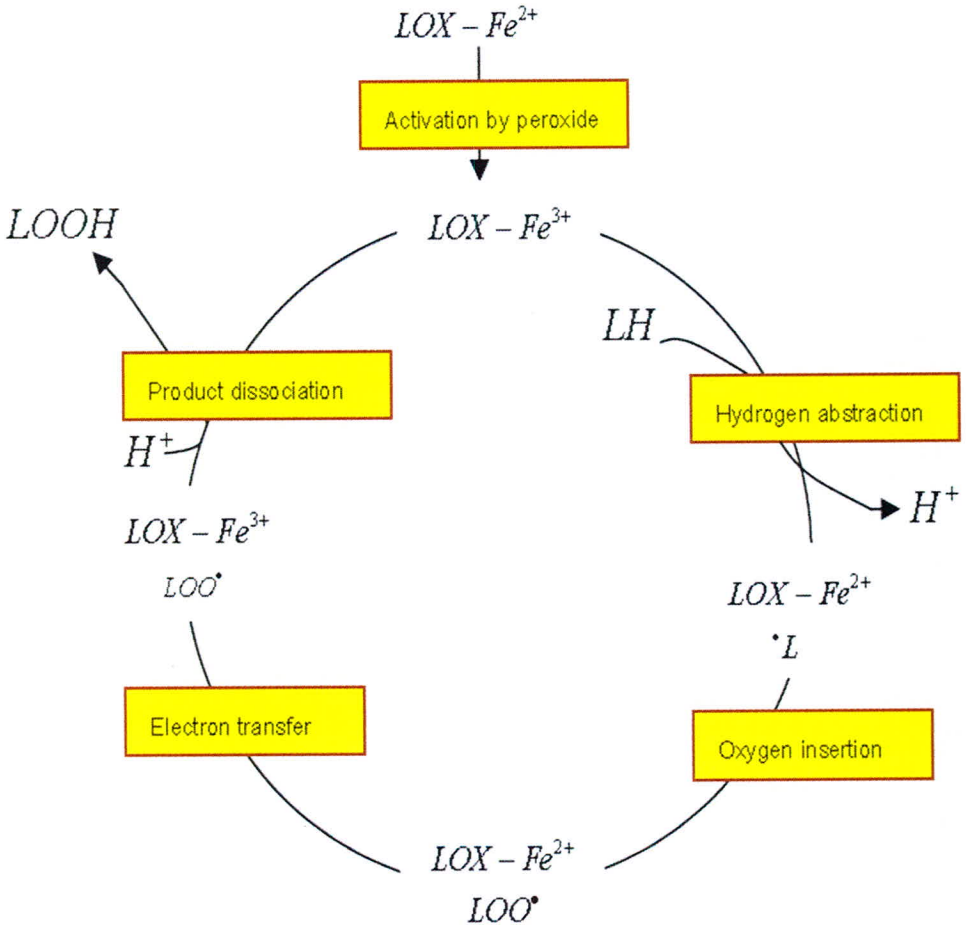
การทำงานของเอ็นไซม์สำคัญ 2 ชนิด ที่มีผลกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระภายในร่างกายได้แก่ (Halliwell, et al., 1995, pp. 601-617)

a) เอ็นไซม์แซนธีนออกซิเดส (xanthine oxidase; XO) ทำหน้าที่สำคัญในกระบวนการสลายเบสพิวรีน (purine) โดยเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนไฮโพแซนธีน (hypoxanthine) เป็นแซนธีน (xanthine) และแซนธีนเป็นกรดยูริก (uric acid) พร้อม ๆ กับเคลื่อนย้ายอิเล็คตรอนให้ออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot -}$) ดังสมการ

$$hypoxanthine + O_2 + H_2O \text{ ---------> } xanthine + H_2O_2 + O_2^{\cdot -} \quad (4.1)$$

$$xanthine + O_2 + H_2O \text{ ---------> } uric\ acid + H_2O_2 + O_2^{\cdot -} \quad (4.2)$$

b) เอ็นไซม์ไลโพออกซีจีเนส (lipoxygenase; LOX) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (polyunsaturated fatty acid) ภายในโมเลกุลของเอ็นไซม์นี้มีเหล็ก (Fe^{2+}) เป็นส่วนประกอบอยู่ ทำหน้าที่ดึงอะตอมไฮโดรเจนจากกรดไขมันและเติมออกซิเจนให้กับกรดไขมันเกิดเป็นไฮโดรเพอรอกไซด์ ซึ่งจะสลายตัวเป็นอนุมูลของกรดไขมันต่อไป ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 การทำงานของเอ็นไซม์ Lipoxygenase (LOX) **ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน**

ที่มา: Donnell, 1999

โดย *LH* คือ โมเลกุลของกรดไขมัน, $^{\bullet}L$ คือ อนุมูลของกรดไขมัน และ $LOO^{\bullet}$ คืออนุมูลเปอร์ออกซีของกรดไขมัน

3) กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของเม็ดเลือดขาว

ขั้นตอนการทำลายสิ่งแปลกปลอมโดยเฉพาะเชื้อโรคที่ถูกกลืนกินเข้ามาภายในร่างกาย เซลล์เม็ดเลือดขาวจะมีการดึงโมเลกุลออกซิเจน (O_2) มาใช้เป็นจำนวนมาก เพื่อผลิตเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) โดยการทำงานของเอ็นไซม์ NADPH ออกซิเดส (NADPH oxidase) ที่อยู่บนเยื่อบุชั้นนอก (outer membrane) ของเม็ดเลือดขาว (Konstan and Berger, 1993, pp. 219-276) ดังสมการ

$$2O_2 + NADPH \text{ ---------> } 2O_2^{\cdot-} + NADP^+ + H^+ \qquad (5)$$

นอกจากนี้ในเม็ดสี (granule) ของเม็ดเลือดขาวยังมีเอ็นไซม์ไมอีโลเทอรอกซีเดส (myeloperoxidase) ทำให้เกิดอนุมูลไฮ-โปคลอรัส (hypochlorus, $HOCl^{\cdot}$) ซึ่งเป็นสารที่ทำลายจุลชีพได้ ดังสมการ

$$H_2O_2 + Cl^- \text{----------}>HOCl^{\cdot} + OH^- \qquad (6)$$

4) โลหะทรานสิชัน (Transition metal)

โลหะทรานสิชัน 2 ชนิดคือเหล็ก (Fe^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ที่มีอยู่ทั่วไปในร่างกายสามารถเร่งการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลจากซูปเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) ในปฏิกิริยา Fenton (Fenton's reaction) (Halliwell, 1999, pp. 261-272) ดังสมการ

$$H_2O_2 + O_2^{\cdot-} + Fe^{2+} + / Cu^{2+} \text{ ---------> } OH^{\cdot} + OH^- + O_2 \qquad (7)$$

1.1.2 ปัจจัยภายในร่างกาย

1) ยารักษาโรค

ยาบางชนิดที่รับประทานเข้าไปในร่างกายสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยาในกลุ่มต้านจุลชีพและต้านมะเร็ง เช่น บลีโอไมซิน (bleomycin), แอนทราไซคลินส์ (antracyclines) (Voest, et al., 1994, pp. 490-499) และเมโธทรีเสต (methotrexate) (Gressier, et al., 1994, pp. 679-681) เนื่องจากมีฤทธิ์เสริมปฏิกิริยาออกซิเดชัน (pro-oxidation)

2) **รังสี**

การใช้รังสีรักษาโรค เช่น รังสีเอกซ์ (X-ray), รังสีแกมมา (γ-ray) อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในร่างกาย จากการถ่ายทอดพลังงานให้กับน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาขั้นต่อไป (secondary reaction) กับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในเซลล์นั้นได้อนุมูลอิสระเกิดขึ้น (Halliwell, et al., 1995, pp. 601-617)

3) **ควันบุหรี่**

ควันบุหรี่มีส่วนประกอบของไนตริกออกไซด์ (NO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และเพอรอกซีไนไตรท์ ($ONOO^-$) รวมทั้งสารมลพิษ ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และคาร์บอนเตรตตะคลอไรด์ (CCl_4) ซึ่งจะถูกกำจัดออกจากร่างกายโดยการทำงานของเอ็นไซม์ไซโทโครม P-450 ไฮดรอกซีเลส (cytochrome P-450 hydroxylase) ที่มีอยู่มากในเซลล์ตับ และพบได้บ้างในเซลล์ปอดและลำไส้เล็กทำให้เป็นสาเหตุของการสร้างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ภายในเซลล์ดังกล่าว (Bast, et al., 1991, pp. 2-13)

4) **โอโซน**

โอโซนไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแต่จัดเป็นสารออกซิไดส์แรงสูงซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้จากการกระตุ้นของคลื่นแสง (Valacchi, et al., 2004, pp. 673-681)

2. **สารต้านอนุมูลอิสระ** (Antioxidant)

สารต้านอนุมูลอิสระเป็นสารพวกเอนไซม์ หรือสารอื่นที่สามารถชะลอหรือป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเริ่มต้นคือ สารที่สามารถทำปฏิกิริยาในเซลล์ ซึ่งรวมถึงสารเกือบทุกชนิดในร่างกายเช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ดีเอ็นเอ แต่ถ้าในบางสภาวะที่มีปริมาณอนุมูลอิสระมากจนระบบสารต้านอนุมูลอิสระทำงานไม่ทันจะเกิดสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงมาก (Oxidative Stress) จะส่งผลกระทบต่อเซลล์เช่น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีเอ็นเอ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเกิดการทำลายโมเลกุลที่มีพันธะซัลฟ์ไฮดริล และเยื่อหุ้มเซลล์ ก่อเกิดผลเสียต่อเซลล์และการทำลายเซลล์ทำให้เกิดความแก่ และรุนแรงไปถึงการเกิดเป็นโรค เช่น เส้นเลือดตีบ โรคเกี่ยวกับภูมิคุ้มกัน และโรคมะเร็ง (อนันต์ สกุลกิม, 2551, หน้า 28-33)

2.1 **สารต้านอนุมูลอิสระ มี 2 กลุ่ม คือ**

2.1.1 กลุ่มที่ร่างกายสร้างขึ้นได้เอง

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่พบในร่างกายและจัดเป็นเอนไซม์ ได้แก่ Superoxide dismutase (SOD), Catalase (CAT), Glutathione peroxidase (GPX), Glutathione reductase (GR) และ Glutathione S-transferase (GST)

ส่วนสารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่พบในร่างกาย แต่ไม่จัดเป็นเอนไซม์ได้แก่ Glutathione, Lipoic acid, Ceruloplasmin, Albumin, Transferrin, Haptoglobin, Hemopexin, Uric acid, Bilirubin และ Cysteine

2.1.2 กลุ่มที่ได้จากนอกร่างกาย

วิตามินเอ, เบต้าแคโรทีน, วิตามินซี, วิตามินอี, กลูตามีน, ฟลาโวนอยด์, ชา, สมุนไพร บางชนิด, Trolox, BHT และ BHA เป็นต้น

2.2 สารต้านอนุมูลอิสระ แบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด ได้แก่

2.2.1 สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ (Synthetic antioxidants)

สารประกอบฟีนอลิคสังเคราะห์มี 5 ชนิด ได้แก่ propyl gallate, 2-butylated hydroxyanisole, 3-butylate hydroxyanisole, BHT (butylated hydroxytoluene) และ tertiary butylhydroquinone เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน อันเป็นสาเหตุให้อาหารมีกลิ่นสี และรสชาติที่เปลี่ยนไป สารสังเคราะห์เหล่านี้มีประสิทธิภาพและความคงตัวสูงกว่าสารสกัดจากธรรมชาติแต่มีข้อจำกัดของการใช้เนื่องจากปัญหาด้านความปลอดภัยในการบริโภค (Yang, et al., 2000, pp. 1646-1649; Pokorny, et al., 2001)

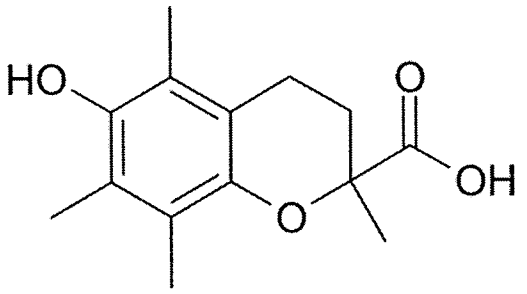
2.2.2 สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural antioxidants)

สารกลุ่มนี้ได้รับความสนใจ และมีการค้นคว้าอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากความเชื่อมั่นว่ามีความปลอดภัยในการบริโภคมากกว่าสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ สารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้พบได้ทั้งในจุลชีพสัตว์และพืชซึ่งมีทั้งที่เป็นวิตามินเช่น วิตามินซี วิตามินอี เบต้าแคโรทีน และสารที่ไม่ให้คุณค่าทางโภชนาการ (non-nutrient) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสารประกอบฟีนอลิค โดยเฉพาะกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenols) เช่น แซนโธน (xanthone) และฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะบนวงเบนซีน (aromatic hydroxyl) ตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป หมู่ฟังก์ชั่น (functional group) เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการดักจับอนุมูลอิสระไม่ให้ไปกระตุ้นหรือก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยการให้อนุมูล $H^{\cdot}$ แก่อนุมูลอิสระเหล่านั้น นอกจากนี้สารประกอบโพลีฟีนอลที่มีโครงสร้างของ ortho-dihydroxyl phenol อยู่ในโมเลกุลยังสามารถยับยั้งการเกิดอนุมูล $OH^{\cdot}$ ในปฏิกิริยาที่มีอนุมูลโลหะทรานซิชั่นคือ Fe^{2+} และ Cu^{2+} เป็นตัวเหนี่ยวนำได้โดยการเข้าจับกับโลหะดังกล่าวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex) (Sanchez-Moreno, et al., 2000, pp. 941-953)

3. **ตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระ**

3.1 **โทรล็อก** (Trolox)

โทรล็อก หรือ 6-hydroxy-2, 5, 7, 8- tetramethylchroman-2-carboxylic acid มีสูตรโมเลกุลทางเคมีคือ $C_{14}H_{18}O_4$ เป็นอนุพันธ์ของวิตามินอีที่ดัดแปลงโครงสร้างโดยการเปลี่ยนสายอัลเคนเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกมีสูตรโครงสร้างทำให้มีความสามารถละลายได้ดีในน้ำ แต่เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำได้ดีจึงทำให้การออกฤทธิ์เร็วกว่าวิตามินอี โดยวิตามินต้องใช้เวลานานเป็นชั่วโมงหรือเป็นวันในขณะที่โทรล็อกออกฤทธิ์เกือบจะทันที ในวิธีการตรวจสอบหลายวิธีในการวิจัยนิยมใช้โทรล็อกเป็นสารมาตรฐานในการตรวจสอบกิจกรรมต้านออกซิเดชัน (โอภา วัชระคุปต์ และคณะ, 2549)

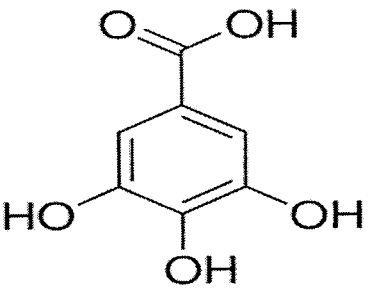


ภาพ 4 โครงสร้างทางเคมีของโทรล็อก

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Trolox

3.2 **กรดแกลลิก** (Gallic acid)

กรดแกลลิก หรือ 3, 4, 5-hydroxybenzoic acid เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลทางเคมี คือ $C_7H_6O_5$ กรดแกลลิกเป็นส่วนประกอบของแทนนิน พบมากในองุ่น ใบชา เปลือกไม้โอ๊ค และพืชอื่นๆ โดยทั่วไปจะใช้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมทางยา คุณสมบัติของกรดแกลลิก คือ สามารถยับยั้งเชื้อรา เชื้อไวรัส และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันได้ดี (Reynolds and Wilson, 1991)

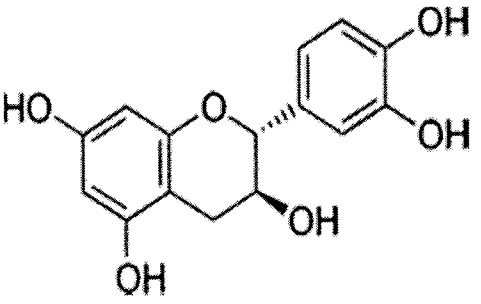


ภาพ 5 โครงสร้างทางเคมีของกรดแกลลิก

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid

3.3 **คาเทชิน** (Catechin)

คาเทชิน มีสูตรโมเลกุลทางเคมีคือ $C_{15}H_{14}O_6$ เป็นสารประกอบฟีโนลิก (phenolic compound) ประเภทโพลีฟีนอล (polyphenol) ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoid) ที่พบมากในใบชา (tea) ที่มีศักยภาพในด้านประโยชน์กับสุขภาพมาก (functional food) ฤทธิ์ของสารพวกนี้ คือ เป็น antioxidant ที่จับกับอนุมูลอิสระ และเป็น chelating agent ที่รวมตัวกับ ions ของโลหะหนัก



ภาพ 6 โครงสร้างทางเคมีของคาเทชิน

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Catechin

4. สารต้านอนุมูลอิสระในมันเทศ

จากการศึกษาของ Dini, et al. (2006, pp. 8733-8737) วิเคราะห์แป้งมันเทศในประเทศเปรู พบสารประกอบฟีนอลิก 4 ชนิด ได้แก่ 4,5-di-O-caffeoyldaucic acid, 4-O-caffeoylquinic acid, 3,5-di-O- caffeoylquinic acid, 1,3-di-O-caffeoylquinic acid และวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical และวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) reagent ทั้ง 2 วิธี พบว่าสาร 4,5-di-O-caffeoyldaucic acid มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่ากรดแอสคอร์บิก, BHT และกรดแกลลิก

จากการศึกษามันเทศในประเทศญี่ปุ่น Oki, et al. (2002, pp. 1752–1756) พบว่ามันเทศพันธุ์ Ayamurasaki และพันธุ์ Kyushu-132 มีความโดดเด่นในด้านความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และอุดมไปด้วยสารแอนโธไซยานิน เช่น พีโอนิดิน (peonidin) และอะไกลโคน (aglycone) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ในขณะที่มันเทศพันธุ์ Miyanou-36, พันธุ์ Bise และพันธุ์ Tanegashimamurasaki พบสารประกอบฟีนอลิก เช่น กรดคลอโรจีนิก และมีสารแอนโธไซยานิน เช่น ไซยานิดิน (cyanidin) และอะไกลโคน (aglycone)

Huang, et al. (2006, pp. 529-538) ศึกษามันเทศ 6 พันธุ์ในประเทศไต้หวัน ได้แก่ มันเทศเนื้อสีเหลืองพันธุ์ TNG57, มันเทศเนื้อสีแดงพันธุ์ TNG66, มันเทศเนื้อสีม่วงแดงพันธุ์ TNG68, มันเทศเนื้อสีม่วงพันธุ์ TYY1, มันเทศเนื้อสีขาวพันธุ์ RP และมันเทศเนื้อสีเหลืองสว่างพันธุ์ WP พบว่ามันเทศทั้ง 6 พันธุ์มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ และแอนโธไซยานิน ($r = 0.71$, 0.67 และ 0.68 ตามลำดับ)

ฟลาโวนอยด์เป็นสารในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก และมีสารแอนโทไซยานินเป็นกลุ่มย่อยของฟลาโวนอยด์ เป็นสารที่พบมากในพืชผักและผลไม้เป็นรงควัตถุที่ให้สีม่วง สีม่วงแดง และสีน้ำเงิน มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยมันเทศเนื้อสีม่วงอุดมไปด้วยสารแอนโธไซยานิน เมื่อสังเกตจากสีม่วงที่เข้มขึ้นเกิดจากการสะสมสารแอนโธไซยานินเพิ่มมากขึ้น (Terahara, et al., 2004, pp. 279-286) ส่วนในมันเทศสีส้ม Bengtsson, et al. (2009, pp. 9693-9698) ศึกษาเบต้าแคโรทีนในมันเทศพันธุ์สีส้ม พบว่าสามารถใช้มันเทศพันธุ์นี้เพื่อเป็นแหล่งของเบต้าแคโรทีนในการผลิตวิตามินเอ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิต เช่นการให้ความร้อน ระยะเวลาในการเก็บ และแสง ส่งผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง มันเทศเป็นวัตถุดิบที่มีปลูกในประเทศไทยเป็นพืชที่ปลูกได้ง่ายในทุกพื้นที่อีกทั้งยังมีคุณประโยชน์ทางโภชนาการสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

แทนมันฝรั่ง เพื่อเป็นอีกทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค สามารถรับประทานพร้อมอาหารจานหลัก หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารอื่น ๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์จากมันเทศ

การแช่แข็ง

การแช่แข็งเป็นกรรมวิธีการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็ง โดยส่วนของน้ำจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็ง การตรึงน้ำกับน้ำแข็ง และผลจากการเข้มข้นขึ้นของตัวละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัวทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ของอาหารลดลง จึงถือเป็นการถนอมอาหารโดยการลดอุณหภูมิ ถ้าใช้วิธีการแช่แข็งและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเหมาะสม อาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโภชนาการ และประสาทสัมผัสน้อยมาก (วิไล รังสาดทอง, 2546, หน้า 390-421)

หลักพื้นฐานในการแช่แข็งคือ การลดอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์นั้นให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตนั้นไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ ตามปกติจุลินทรีย์ที่มีปนเปื้อนอยู่ในอาหารนั้นก็ชะงักการเจริญเติบโต และหยุดกระบวนการทางเมแทบอลิซึมลง แต่เนื้อเยื่อของอาหารจะยังคงลักษณะอยู่ได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ซึ่งหลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสภาวะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำสามารถทำหน้าที่ต่างๆในปฏิกิริยาเคมี และไม่เป็นสารตั้งต้นให้กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารได้ แต่การแช่แข็งไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีได้ (สายสนม ประดิษฐดวง, 2549, หน้า 155)

1. **การแช่แข็งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ**

1.1 **การแช่แข็งแบบช้า** (slow freezing) เป็นการแช่แข็งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้นเยือกแข็งโดยอาจใช้เวลาตั้งแต่ 3-72 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส การแช่แข็งจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ โดยเกิดจากภายนอกเข้าไปสู่ภายในของผลิตภัณฑ์ น้ำที่อยู่ภายนอกเซลล์ (extracellular water) จะแข็งตัวเร็วกว่าน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ เนื่องจากน้ำภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำกว่า ทำให้เกิดเกล็ดน้ำแข็ง การทำให้อาหารแข็งตัวอย่างช้า ๆ น้ำค่อย ๆ แยกตัวออกจากเซลล์รวมตัวเป็นเกล็ดน้ำแข็ง น้ำแข็งจะเป็นผลึกใหญ่ และมีขนาด ไม่สม่ำเสมออยู่ระหว่างเซลล์ ในบริเวณที่มีน้ำอิสระมากน้ำที่ขยายตัวเมื่อแข็งอาจดันให้เซลล์แตกได้ เมื่อนำเอาอาหารแช่แข็งประเภทนี้มาละลาย น้ำจะไหลออกจากอาหาร ถ้าเซลล์แตกจำนวนมาก สารอาหารต่าง ๆ ก็จะไหลออกมามาก รสชาติของอาหารจะด้อยลงและมีลักษณะแข็ง

1.2 **การแช่แข็งแบบเร็ว** (Quick Freezing) เป็นวิธีการแช่แข็งโดยทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารทั้งชิ้นเยือกแข็งภายในระยะเวลา 30 นาที หรือน้อยกว่า อุณหภูมิอาจอยู่ในระหว่าง -40 ถึง -18 องศาเซลเซียส การแช่แข็งแบบนี้อุณหภูมิของตัวอย่างที่นำมาแช่แข็งนั้นจะลดต่ำลง

อย่างรวดเร็ว เกล็ดน้ำแข็ง เล็ก ๆ จะเกิดขึ้นอย่างเป็นระเบียบ ทั้งภายในและภายนอกเซลล์ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกล็ดน้ำแข็งเล็ก ๆ ไม่สามารถเพิ่มขนาดขึ้นได้ จึงได้น้ำแข็งเล็ก ๆ ที่มีขนาดสม่ำเสมอและอยู่ภายในเซลล์เป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำให้อาหารแช่แข็งละลาย น้ำแข็งผลึกเล็ก ๆ ย่อมละลายอย่างรวดเร็วและน้ำยังคงอยู่ภายในเซลล์ จึงถูกดูดกลับเข้าไปโดยโมเลกุลของโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ไม่ออกจากอาหาร ทำให้อาหารมีความสูญเสียน้อย และมีคุณภาพดี

2. **การเกิดผลึกน้ำแข็ง**

จุดเยือกแข็งของอาหาร คือ อุณหภูมิที่มีผลึกน้ำแข็งเล็ก ๆ ในปริมาณที่สมดุลกับน้ำที่อยู่รอบ ๆ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นจะต้องมีนิวเคลียส (nucleus) ของโมเลกุลน้ำก่อน จึงมีการเกิดนิวเคลียสหรือที่เรียกว่านิวคลีเอชัน (nucleation) ก่อนการเกิดผลึกน้ำแข็ง

ระยะเวลาของการเย็นยิ่งยวดขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร และอัตราการกำจัดความร้อนออกไป อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงนี้จะทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมาก โมเลกุลน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียสที่มีอยู่เพื่อสร้างนิวเคลียสขึ้นมาใหม่ การแช่แข็งอย่างรวดเร็งจึงทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ๆ (วิไล รังสาดทอง, 2546, หน้า 392)

3. **การเปลี่ยนแปลงในอาหารแช่แข็ง**

ผลกระทบของการแช่แข็งต่อคุณภาพอาหาร คือ เกิดความเสียหายเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น การแช่แข็งมีผลต่อสี กลิ่น รส หรือคุณค่าทางโภชนาการน้อยมาก แม้ว่าโปรตีนอาจตกตะกอนจากสารละลายได้

3.1 **ความชื้นลดลง** เนื่องจากการระเหยน้ำจากผิวหน้าของอาหาร โดยเฉพาะในอาหารที่ไม่ได้บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทำให้เกิดลักษณะไม่น่ารับประทาน เนื้อมีสีคล้ำแห้ง และรสชาติเปลี่ยนแปลงลักษณะเช่นนี้เรียกว่า "freezer burn" ซึ่งอาจป้องกันได้โดยการบรรจุอาหารให้สนิท

3.2 **การเจริญของจุลินทรีย์** จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่เจริญที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและถูกทำลายได้มากที่อุณหภูมิในช่วง -4 ถึง -10 องศาเซลเซียส ยกเว้นสปอร์ของแบคทีเรียบางชนิดที่ไม่ถูกทำลายที่อุณหภูมิแช่แข็ง และอาจเจริญได้ในช่วงการทำละลายอาหารแช่แข็ง

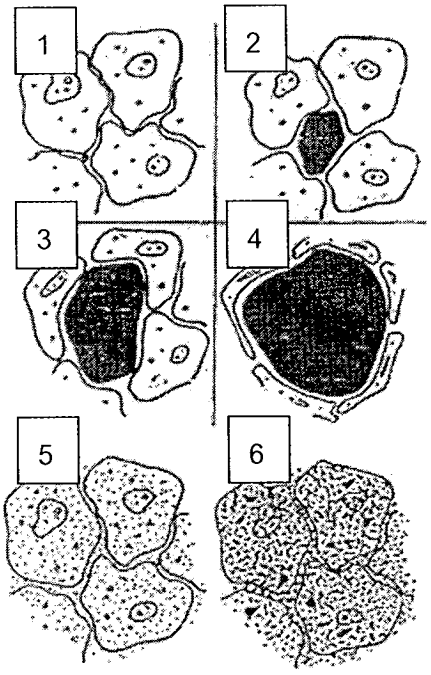
3.3 **การเปลี่ยนแปลงทางเคมี** ซึ่งเกิดขึ้นในขณะเก็บผักในสภาพแช่เยือกแข็งจะทำให้สีและกลิ่นของผักเสียไป การเปลี่ยนของสีเกิดภายใน 2-3 เดือนหลังจากแช่แข็งผัก ที่มีสีเขียวของคลอโรฟิลล์จะเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลของฟีโอไฟติน (pheophytin) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของกลิ่น (กลิ่นหืน) เกิดขึ้นจากออกซิเดชันของไขมันซึ่งยังคงเกิดได้อย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ อาหารที่มี

ไขมันประเภทไม่อิ่มตัวอยู่มากจะเกิดการหืนได้ดีกว่าอาหารที่มีไขมันประเภทอิ่มตัว การป้องกันการเกิดออกซิเดชันของไขมัน โดยการบรรจุอาหารในบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน

3.4 **ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น** และมีการเคลื่อนที่ของผลึกน้ำแข็ง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษามีผลทำให้เกิดการละลายและการเยือกแข็งซ้ำของน้ำในอาหาร ในระหว่างที่ผลึกน้ำแข็งละลายความดันไอของน้ำจะทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกมานอกชิ้นอาหาร และเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขึ้นการควบคุมอุณหภูมิแช่แข็งที่ดีจะช่วยลดปัญหานี้ได้

เซลล์พืช และเซลล์สัตว์มีความทนทานต่อความเสียหายจากการแช่แข็งต่างกัน เซลล์สัตว์มีโครงสร้างเส้นใยที่ยืดหยุ่นกว่าเซลล์พืชจึงจะแยกออกจากกันมากกว่า และจะแตกในระหว่าง แช่แข็ง เซลล์สัตว์จึงไม่เกิดความเสียหายรุนแรง โครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรง เช่น ผักและผลไม้จะได้รับความเสียหายจากผลึกน้ำแข็ง และอัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการแช่แข็งต่อเซลล์เนื้อเยื่อพืชในระหว่างการแช่แข็งอย่างช้า ผลึกน้ำแข็งจะเติบโตขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างทำให้เซลล์สูญเสียรูปร่าง และเซลล์ใกล้เคียงแตก ในการละลายน้ำแข็งในอาหารนี้เซลล์จะไม่กลับมามีรูปร่าง และความแข็งแรงเหมือนเดิม อาหารจะนิ่มและสารต่าง ๆ ในเซลล์จะไหลออกจากเซลล์เสียหายหรือที่เรียกว่าน้ำไหลซึม (Drip) ดังแสดงในภาพ 7(1-4) ส่วนการแช่แข็งอย่างรวดเร็วผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นทั้งในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีขนาดเล็กจึงเกิดความเสียหายทางกายภาพเพียงเล็กน้อยและไม่เกิดความแตกต่างของความดันเซลล์จึงสูญเสียน้ำน้อยมากเนื้อสัมผัสของอาหารจึงยังคงดีอยู่ดังแสดงในภาพ 7 (5-6) ดังนั้น การแช่แข็งในอัตราที่ยิ่งเร็วเท่าไหร่ก็ยิ่งดีขึ้นเท่านั้น



ภาพ 7 ผลกระทบของการแช่แข็งต่อเนื้อเยื่อพืช (1-4) การแช่แข็งแบบช้า (5-6) การแช่แข็งแบบเร็ว

ที่มา: Meryman (1963, p. 81)

4. ความเสียหายจากการสูญเสียน้ำในอาหารแช่แข็ง

ในการแช่เยือกแข็งจะเกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซลล์ และเกิดมากยิ่งขึ้นในกรณีการแช่เยือกแข็งแบบช้า น้ำที่ซึมผ่านออกจากเซลล์นี้ส่วนใหญ่จะไม่ซึมกลับเข้าไปในเซลล์อีก และน้ำส่วนนี้จะไหลออกมาจากผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งหลังการละลายที่เรียกว่า การสูญเสียน้ำ จะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง จะมีการละลายและการแข็งตัวของน้ำในผลิตภัณฑ์ การระเหิดของน้ำในระหว่างการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งในห้องเก็บรักษาเกิดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำมีปริมาณไอน้ำในบรรยากาศน้อย น้ำจะระเหิดออกจากผลิตภัณฑ์ ความสูญเสียนี้อาจลดลงได้ หากนำผลิตภัณฑ์บรรจุลงในภาชนะบรรจุที่เหมาะสม (สมโภชน์ โกมลมณี, 2542)

5. **การคืนตัวของผลิตภัณฑ์แช่แข็ง** (Thawing of frozen products)

การคืนตัวของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง หมายถึง กระบวนการตรงข้ามกับการแช่เยือกแข็ง จัดเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งเพื่อทำให้ผลึกน้ำแข็งละลายกลับคืนสู่สภาพเดิม ก่อนนำไปบริโภค หรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป ตามปกติอัตราการคืนตัวที่อุณหภูมิห้องจะใช้เวลานานโดยเฉพาะอาหารที่มีขนาดใหญ่ ชิ้นหนา ทำให้เสียเวลาและเปลืองพื้นที่ที่ต้องใช้เพื่อการคืนรูปดังกล่าว โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาคืนรูปด้วย เพราะเมื่อใช้เวลานานจะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้บริเวณผิวด้านนอกของอาหาร เป็นผลให้มีจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อกระบวนการแปรรูปในขั้นต่อไป และยังอาจทำให้คุณภาพด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัส และสีเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นควรเร่งอัตราการคืนตัวให้เร็วขึ้นสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ (สายสนม ประดิษฐดวง, 2549, หน้า 184-186)

5.1 **ใช้การหมุนเวียนของน้ำเย็น**

กระทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาแช่ลงในภาชนะที่มีน้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส โดยทำให้น้ำมีการหมุนเวียนตลอดเวลา เพื่อช่วยให้การถ่ายเทความร้อนมีอัตราเร็วขึ้น และช่วยรักษาอุณหภูมิของผิวหน้าอาหารไม่ให้สูงมากเกินไป แต่วิธีนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารบางชนิดที่สามารถละลายได้ในน้ำ

5.2 **ใช้เตาอบ**

วิธีนี้นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านวิธีการหุงต้ม โดยการอบให้สุกไปพร้อมกับการคืนตัวแล้วพร้อมที่จะนำไปรับประทานได้ทันที

5.3 **การใช้กระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นขั้วไฟฟ้า**

ทำได้โดยการนำอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งไปแช่ลงในของเหลวที่เป็นตัวกลาง ซึ่งมักจะเป็นน้ำ โดยมีแผ่นขั้วไฟฟ้า 2 แผ่นจุ่มอยู่ ต่ออยู่กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักดิ์ 380 โวลต์ มีสวิตท์ปิดเปิดอัตโนมัติเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความร้อนสูงเกินไป และอัตราการคืนตัวจะเร็วกว่าวิธีแรก 3 เท่า

5.4 **การใช้ไมโครเวฟ**

เป็นการอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นจากช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับไมโครเวฟ วิธีนี้ประหยัดเวลา และเนื้อที่ได้มาก สามารถจัดทำเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ดี การสูญเสียในรูปของน้ำที่ไหลเยิ้มออกมาน้อยที่สุด ผลิตภัณฑ์ไม่ต้องสัมผัสกับของเหลวอื่นที่ทำให้สูญเสียคุณค่า แต่เป็นวิธีที่ต้องลงทุนสูง

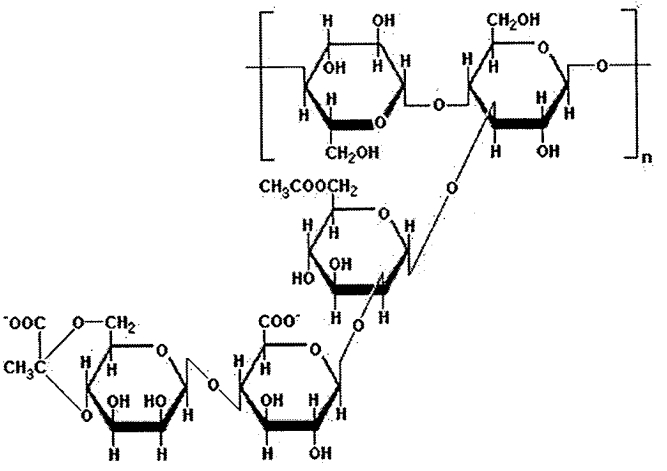
สารไครโอโพรเทกแทนต์

ไครโอโพรเทกแทนต์ (Cryoprotectants) คือ สารที่ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็ง ป้องกันการสูญเสียคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง สารประกอบใดๆที่สามารถป้องกันการสูญเสียคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง จึงมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มอายุการเก็บของอาหารแช่เยือกแข็ง (จักรี ทองเรือง, 2544)

1. **แซนแทนกัม** Xanthan Gum (XG)

แซนแทนกัม เป็นกัม (gum) เป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) แซนแทนกัม สกัดได้จากเมือก (slime) ที่สร้างโดย แบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ซึ่งมักพบในกะหล่ำปลี กระหล่ำดอก โมเลกุลของแซนแทนกัมเป็น โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ประเภท heteropolysaccharide ที่เป็นสายโพลิเมอร์ของ β-D-glucose มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลสแต่ทุก ๆ 2 โมเลกุลของกลูโคส (glucose) เชื่อมต่อกับกิ่งของ trisaccharide ที่เกิดจากน้ำตาลแมนโนส (mannose) 2 โมเลกุลและ กรดกลูคูโรนิค (glucuronic acid) 1 โมเลกุล โมเลกุลของแมนโนสที่อยู่ติดกับสายหลักมีเอสเทอร์ของกรดอะซิติกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และ แมนโนส ที่ตำแหน่งปลายของ trisaccharide มีกรดไพโรวิคเชื่อมต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 และ 6

สมบัติทางกายภาพของแซนแทนกัมละลายน้ำได้ดี ให้ความหนืด แบบ non newtonian fluid โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบ shear thinning fluid แซนแทนกัมไม่เกิดเจล (gel) เนื่องจากโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (brancing) แต่จะเกิดเจลได้เมื่อใช้ร่วมกับกัมบางชนิด เช่น โลคัสบีนกัม (locust bean gum) กัวกัม (guar gum)



ภาพ 8 โครงสร้างของแซนแทนกัม (Xanthan Gum; XG)

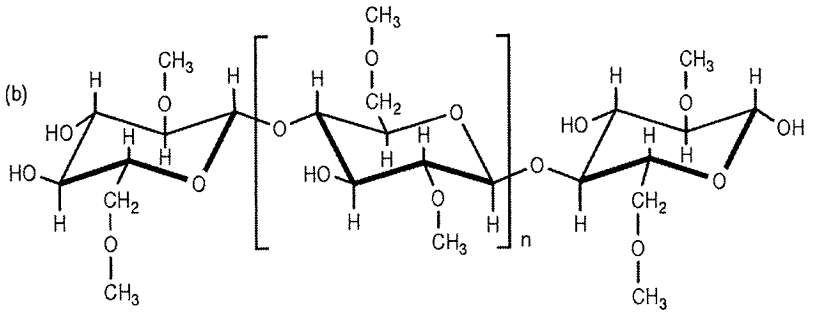
ที่มา: http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/1112/xanthan-gum

แซนแทนกัมใช้ในอาหารเพื่อเป็นวัตถุเจือปนอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็น thickening agent ทำให้อาหารมีความข้น ความหนืด (viscosity) ทนความร้อนได้สูง
2. ทำให้อาหารคงรูป (stabilizer) น่ารับประทาน มีความมันวาว
3. ใช้แซนแทนกัม ผสมกับ กัวกัม (guar gum) เพื่อเพิ่มความหนืด ดีกว่าใช้เพียงชนิดเดียว
4. ใช้ทดแทนไขมัน (fat replacer) ในอาหารแคลอลีต่ำ
5. ใช้เป็นสารก่อโฟม (foaming agent)
6. ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่แข็ง

2. **เมธิลเซลลูโลส** Methycellulose (MC)

สมบัติของเมธิลเซลลูโลส Methycellulose (MC) ละลายได้ในน้ำเย็น และให้ผลผลิตที่มีความสม่ำเสมอ (Smooth) ซึ่งจะเป็นสารละลายที่ไม่ขุ่น สารละลายของเมธิลเซลลูโลส มีความเสถียรในช่วง pH ที่กว้างคือตั้งแต่ pH 2 ถึง 12 และมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อย แต่อย่างไรก็ตามสารละลายของเมธิลเซลลูโลส สามารถตกตะกอนหรือเกิดเป็นกลุ่มก้อนที่มีลักษณะเหนียวหนืดได้โดยไอออนพวก Sulphate Phosphate และ Carbonate โดยเกิดการตกตะกอนแม้ไอออนจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย



ภาพ 9 โครงสร้างของเมธิลเซลลูโลส (Methycellulose; MC)

ที่มา: http://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files

หน้าที่ในอาหารของเมธิลเซลลูโลส

1. สารให้ความหนืด (Thickening agent)
2. อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)
3. ตัวช่วยกระจาย (Dispersing agent)
4. เป็นกาว (Adhesive agent)

3. การใช้สารไครโอโพรเทกแทนต์ในผลิตภัณฑ์แช่แข็ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกับการศึกษาผลของการใช้ไครโอโพรเทกแทนต์ ในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งแช่แข็ง เช่น Downey (2002, pp. 869-877) การศึกษาการเติมสารไครโอโพรเทกแทนต์ คือ แซนแทนกัม กัวร์กัม เพคติน คาร์ราจีแนน โซเดียมเคซีเนท และเวย์โปรตีนในในมันฝรั่งบดแช่แข็ง และผักแช่แข็ง พบว่า มันฝรั่งบดแช่แข็งที่เติมแซนแทนกัม 0.5% (w/w) หรือกัวร์กัม 0.5% (w/w) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันการสูญเสียน้ำของมันฝรั่งบดแช่แข็ง และการเติมแซนแทนกัม 0.5% (w/w) สามารถช่วยลดค่าแรงต้านทานการเจาะของมันฝรั่งบดแช่แข็งได้

Downey (2003, pp. 857-868) ศึกษาการผสมสารไครโอโพรเทกแทนต์ในมันฝรั่งบดที่ผ่านการแช่แข็งและละลาย พบว่าเมื่อเติม แซนแทนกัม คาร์ราจีแนนเพคติน และโซเดียมเคซีเนท ส่งผลทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีค่าแรงต้านการเจาะ และค่าการสูญเสียน้ำลดลง โดยไม่มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์

Fernandez, et al. (2008, pp. 1381-1395) พบว่าการใช้คาร์ราจีแนน และแซนแทนกัมมีศักยภาพในการรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสมันฝรั่งบดแช่แข็งที่ผ่านการทำละลาย โดยใช้ไมโครเวฟ และการเติมแซนแทนกัม 0.05-0.15% (w/w) ในมันฝรั่งบดแช่แข็งและละลาย พบว่า มันฝรั่งบด ให้ความรู้สึกในปาก (mouthfeel) และมีลักษณะเนื้อเป็นครีม

Alvarez, et al. (2009, pp. 2115-2127) ทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ ในมันฝรั่งบดแช่แข็งที่ผ่านการทำละลาย พบว่าการเติมแคปป้าคาร์ราจีแนน 0.088 % (w/w) และแซนแทนกัม 0.15 % (w/w) ให้ความรู้สึกนุ่มในปาก และมีลักษณะเนื้อเป็นครีมมากที่สุด ไม่แตกต่างจากการเติมแซนแทนกัม 0.15 % (w/w) เพียงอย่างเดียว และการทดสอบการยอบรับโดยรวมด้วยวิธี 9 - point hedonic scale พบว่าการเติมแคปป้าคาร์ราจีแนน และแซนแทนกัมอย่างละ 0.15 % (w/w) ในมันฝรั่งบดแช่แข็งที่ผ่านการทำละลายเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

Alvarez, et al. (2010, pp. 55-70) ศึกษามันฝรั่งบดสด และมันฝรั่งบดแช่แข็งที่ผ่านการทำละลาย พบว่าการเติมแซนแทนกัมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสนุ่มกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัม แต่ตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัม 0.05 และ 0.15% (w/w) มีค่าการยอมรับมากกว่ามันฝรั่งบดสดควบคุม (ไม่เติมแซนแทนกัม) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ให้ความรู้สึกในปากเป็นครีม

Alvarez, et al. (2011, pp. 66-76) ศึกษาการใช้สารไครโอโพรเทกแทนต์ คือ แคปป้าคาราจีแนน และแซนแทนกัม ร่วมกับอินนูลินในมันฝรั่งบดแช่แข็ง พบว่ามีส่วนช่วยในด้านความคงตัวของโครงสร้างและเนื้อสัมผัสมันฝรั่งบดแช่แข็งที่ผ่านการทำละลาย

Lee, et al. (2002, pp. 345-352) ได้ศึกษาผลของการใช้สารไครโอโพรเทกแทนต์ในเจลจากแป้งมันเทศที่ผ่านการแช่แข็งและละลาย พบว่าการใช้โซเดียมอัลจิเนต กัวร์กัม และแซนแทนกัม มีประสิทธิภาพที่ดีในการลดการแยกน้ำ ซึ่งแซนแทนกัมที่ความเข้มข้น 0.3% (w/w) ส่วนกัวร์กัมที่ความเข้มข้น 0.6% (w/w) สามารถได้ผลดีในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งมันเทศ พบว่าโซเดียมอัลจิเนตให้ผลดีกว่าการใช้แซนแทนกัม และกัวร์กัม

Truong and Walter (1994, pp. 1175-1180) ได้ศึกษามันเทศบดแช่แข็ง มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง โดยต้มมันเทศ ปอกเปลือก หั่นชิ้นเล็ก นำมานึ่ง แล้วบดเก็บใส่ถุงพอลิเอทิลีน (PE) เก็บตัวอย่างแบบแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส นำมันเทศบดที่เตรียมไว้มาผ่านความร้อนด้วยการอบ แล้วนำมาผสมกับเมธิลเซลลูโลส หรือไฮดรอกซีโพรพิลเมธิลเซลลูโลส เก็บตัวอย่างแบบแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวิธี การทดสอบเชิงพรรณนาแบบประเมินเค้าโครงทางด้านเนื้อสัมผัส (Texture profile) และการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture profile analysis; TPA) โดยตัวอย่างมันเทศบดที่เติมเมธิลเซลลูโลส หรือไฮดรอกซีโพรพิลเมธิลเซลลูโลส 0.25-0.50% (w/w) มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิง (มันเทศบดที่นำมาผ่านความร้อนด้วยการอบและไม่ผ่านการแช่แข็ง) และผลการทดสอบการยอบรับโดยรวมด้วยวิธี 9 - point hedonic scale โดยผู้ที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน ตัวอย่างมันเทศบดที่เติมเมธิลเซลลูโลส 0.25% (w/w) หรือไฮดรอกซีโพรพิลเมธิลเซลลูโลส 0.25% (w/w) มีค่าการยอมรับโดยรวมมากกว่าตัวอย่างอ้างอิง

ในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งบด การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งในมันฝรั่งบดมีส่วนสำคัญในการสร้างโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของมันฝรั่งบด เมื่อนำมันฝรั่งบดมาผ่านการแช่แข็งและทำให้ละลาย พบว่าโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดอะมิโลสและอะมิโลเพคตินรีโทรเกรเดชั่นที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ เกิดการสูญเสียน้ำ (Eliasson and Kim, 1992, pp. 279-295)

องค์ประกอบของมันเทศโดยเฉพาะแป้งมีความสัมพันธ์กับการลดลงของคุณภาพในมันเทศบดแช่แข็ง และจากความสำคัญขององค์ประกอบ และประโยชน์ของสารต้านอนุมูลอิสระในมันเทศ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษามันเทศอย่างน้อย 2 พันธุ์ที่มีสีแตกต่างกัน โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และสารต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของมันเทศบดที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น และแช่แข็ง