# บทที่ 2

## วารสารปริทัศน์

ผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปและให้ความร้อนจนสุก พร้อมที่จะบริโภค ส่วนผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูป และให้ความร้อนจนสุกบางส่วน เมื่อจะบริโภคจะต้องผ่านการให้ความร้อนอีกครั้งจนสุก ในปัจจุบัน อาหารเหล่านี้มีอยู่มากทั้งในรูปอาหารแห้งหรืออาหารแช่เยือกแข็ง เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ไส้กรอก รวมถึงผลิตภัณฑ์ชุบแป้งทอดต่างๆ อาหารเหล่านี้ได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการของตลาดมากขึ้น เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันต้องอาศัยเวลาเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้นผู้บริโภคจึงต้องการอาหารที่ หาซื้อได้ง่าย ประหยัดเวลาในการเตรียมเพื่อบริโภค มีรสชาติดี และราคาไม่แพงจนเกินไป

มันฝรั่งทอดแบบก้อนแช่เยือกแข็ง (frozen prefried potato patties) หรือ hash brown potato เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำชิ้นมันฝรั่งขนาดเล็กหลายชิ้นที่ผ่านการไสเป็นเส้น หรือสับเป็น ชิ้นเล็กๆ ขึ้นรูปเป็นชิ้นขนาดใหญ่โดยใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นตัวเชื่อม ทอดและนำไปแช่เยือกแข็ง (Kueneman, Reeve and Weaver, 1975)

### กระบวนการผลิตมันฝรั่งทอดแบบก้อนแช่เยือกแข็ง

กระบวนการผลิตมันฝรั่งทอดแบบก้อนแช่เยือกแข็ง ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ การขึ้นรูป การทอด และการแช่เยือกแข็ง

2.1 <u>การเตรียมวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ</u>

วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอดแบบก้อน ได้แก่ มันฝรั่ง แป้งพรีเจลาติไนซ์ น้ำ และเกลือ วัตถุดิบเหล่านี้มีสมบัติ และมีความเกี่ยวข้องกับขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

2.1.1 <u>มันฝรั่ง</u>

มันฝรั่งมีชื่อสามัญว่า potato หรือ Irish potato มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Solanum tuberosum* เป็นพืชล้มลุกที่ชอบอากาศหนาวเย็น อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 15-20 องศาเซลเซียส (มาโนช ทองเจียม, 2522) หัวของมันฝรั่งเกิดจากการขยายตัวเนื่องจากการสะสมแป้งในส่วนของลำต้นใต้ดิน เรียกว่า ไหล ที่เจริญไปตามแนวนอน โดยปกติหัวจะเกิดขึ้นเมื่อไหลหยุดการเจริญทางความยาว (มัณฑนา นาดเสน, 2536) มันฝรั่งที่เกษตรกรเพาะปลูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้คือ (ธนาคารกสิกรไทย จำกัด, 2535)

ก. มันฝรั่งเพื่อการบริโภคสด ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหาร พันธุ์ที่นิยมปลูก คือ พันธุ์ Spunta ให้ผลผลิตค่อนข้างสูง เนื้อมีสีเหลือง มีน้ำและน้ำตาลในเนื้อมาก จึงไม่เหมาะที่จะใช้แปรรูปเป็นมันแผ่น เพราะนอกจากจะทำให้มันแปรรูปที่ได้มีสีคล้ำไม่สวยแล้ว น้ำหนักมันแผ่นที่ได้ยังลดลงอย่างมากอันเป็นผลจากการระเหยของน้ำในเนื้อเป็นจำนวนมาก

ข. มันฝรั่งเพื่อป้อนโรงงานแปรรูป ทั้งในรูปมันแผ่นและมันทอดแบบแท่ง พันธุ์ที่นิยมปลูกในปัจจุบันมี 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ Kennebec และพันธุ์ Atlantic (กรมวิชาการเกษตร, 2536) เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลและน้ำต่ำกว่าพันธุ์ Spunta เนื้อมีสีขาว เมื่อนำไปแปรรูปจึงให้ผลผลิตสูงกว่าและทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีสวยกว่า

2.1.1.1 <u>องค์ประกอบทางเคมีของมันฝรั่ง</u>

องค์ประกอบทางเคมีของมันฝรั่ง จะแปรไปตามชนิดของพันธุ์ พื้นที่ที่ใช้เพาะปลูก วิธีการเพาะปลูก ความแก่ของมันฝรั่งขณะเก็บเกี่ยว วิธีการเก็บรักษาภายหลังการเก็บเกี่ยว (Talburt, Schwimmer and Burr, 1975)

<u>แป้ง</u> (starch)

เป็นองค์ประกอบของสารอาหารที่ให้พลังงานที่สำคัญที่สุดของมันฝรั่ง โดยจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 65-80 ของน้ำหนักแห้ง (Talburt et al., 1975) ประกอบด้วยอะมิโลส (amylose) และอะมิโลเปคติน (amylopectin) อัตราส่วน 1:3 ขณะที่หัวมันฝรั่งกำลังเจริญเติบโต น้ำตาลจากใบของต้นมันฝรั่งจะเคลื่อนลงมาสู่หัวมันฝรั่งและเปลี่ยนเป็นแป้ง (Badenhutzen and Dutton, 1956) โดยเอนไซม์ ADPG-alphaglucan glucosyltransferase จะต่อ glucosyl unit จาก adenosine diphosphate glucose เกิดเม็ดแป้งในหัวมันฝรั่ง (Recondo and Leloir, 1961) และเมื่ออุณหภูมิของมันฝรั่งเพิ่มสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส น้ำจะเคลื่อนที่ผ่านจากส่วนของ non-starchy ของเซลไปยังเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งบวม แป้งจะเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิในช่วง 63-72 องศาเซลเซียส (Roberts and Proctor, 1955) ปริมาณแป้งที่มีอยู่ในหัวมันฝรั่งจะมีผลต่อคุณภาพของลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น ลักษณะเป็นแป้ง (mealiness) ลักษณะข้นหนืด (consistency) ลักษณะแฉะ (sogginess) มันฝรั่งที่มีปริมาณแป้งสูงเมื่อได้รับความร้อน เซลจะพยายามแยกออกมาเพราะเกิดการบวมเนื่องจากเกิดเจลาติไนซ์ ส่วนมันฝรั่งที่มีปริมาณแป้งต่ำ เมื่อได้รับความร้อน เซลจะพยายามรักษารูปเดิมไว้ ทำให้เกิดลักษณะแฉะ

<u>น้ำตาล</u> (sugar)

ปริมาณน้ำตาลในมันฝรั่งจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ปริมาณน้อยมากจนถึงร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำตาลในมันฝรั่งในช่วงการเก็บหลังการเก็บเกี่ยว (Talburt et al., 1975) คือ

- พันธุ์ มันฝรั่งพันธุ์ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำส่วนใหญ่จะมีการสะสมของน้ำตาลมากกว่ามันฝรั่งพันธุ์ที่มีความถ่วงจำเพาะสูง โดยบริเวณตรงกลางของหัวมันฝรั่งจะมีปริมาณน้ำตาลสูงกว่าส่วนนอก

- อายุหลังเก็บเกี่ยว มันฝรั่งหลังเก็บเกี่ยวใหม่ๆ มักจะมีปริมาณน้ำตาลอยู่น้อยกว่ามันฝรั่งที่เก็บเกี่ยวนานกว่า

- ขนาดของหัวมันฝรั่ง มันฝรั่งที่มีขนาดของหัวเล็กจะมีปริมาณของน้ำตาลสูงกว่ามันฝรั่งที่มีขนาดของหัวใหญ่

- วิธีการเก็บหลังเก็บเกี่ยว หัวมันฝรั่งที่เก็บที่อุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส จะมีการเพิ่มของน้ำตาลรีดิวซ์อย่างช้าๆ แต่ถ้าเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมันฝรั่งที่กำลังงอก จะมีปริมาณน้ำตาลในมันฝรั่งลดลง

non-starch polysaccharides

เป็นส่วนประกอบของผนังเซล และสารเชื่อมระหว่างเซล (intercellular cementing substances) ได้แก่ เส้นใย เซลลูโลส สารประกอบเพคติก (pectic substances) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และโพลีแซคคาไรด์อื่นๆ

- เส้นใย (crude fiber) ประกอบด้วย องค์ประกอบของผนังเซลรวมถึงลิกนิน (lignin) และซูเบอริน (suberin) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเปลือก เส้นใยของมันฝรั่งจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 0.2-3.5 ของน้ำหนักแห้ง จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงเจริญเต็มที่ และช่วงการเก็บหลังเก็บเกี่ยว (Talburt et al., 1975)

- เซลลูโลส (cellulose) มีอยู่ประมาณร้อยละ 10-20 ของ non-starch polysaccharides ที่มีอยู่ในมันฝรั่ง โดยจะอยู่ในผนังเซล มีองค์ประกอบเหมือนกับอะมิโลส คือเกิดจากกลูโคสมาต่อกันเป็นสายยาว แต่ในอะมิโลสจะต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$-1,4 ส่วนในเซลลูโลสจะเป็นพันธะ $\beta$-1,4 (Smith, 1968)

- สารประกอบเพคติก (pectic substances) เป็นโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อของกรดกาแลคทูโรนิค (galacturonic acid) ด้วยพันธะ $\alpha$-1,4 และ $\alpha$-1,6 ซึ่งกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) ในโมเลกุลมักจะเกิดเป็นเอสเทอร์กับเมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol) ในปริมาณต่างๆ กัน (Smith, 1968)

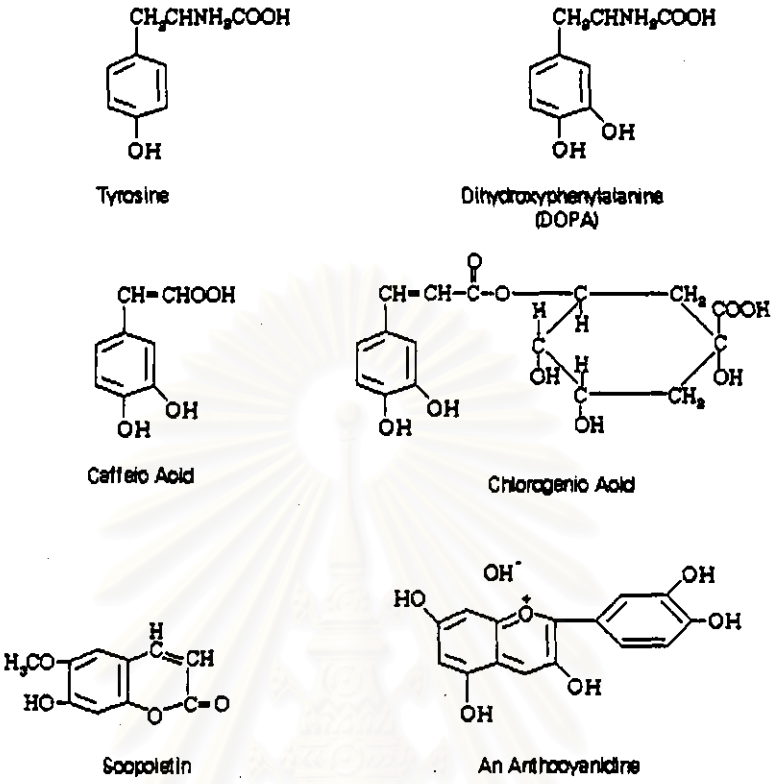
- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นองค์ประกอบของผนังเซล ประกอบด้วยโมเลกุลของ xylose กับ glucoronic acid และ arabinose กับ galacturonic acid ที่ต่อกันด้วย glycosidic chain (Smith, 1968)

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic substances)

สารประกอบฟีนอลิกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมันฝรั่ง สารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ lignin , coumarins , anthocyanins , flavones , tannins , monohydric phenols และ polyhydric phenols (polyphenols) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย






**รูปที่ 1** โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก (Talburt et al., 1975)

- ลิกนิน (lignin) มีอยู่ปริมาณน้อยในบริเวณเนื้อเยื่อลำเลียง (vascular tissues) ซึ่งเนื้อเยื่อบริเวณนี้แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ไซเลม (xylem) และโฟลเอม (phloem) ที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหารตามลำดับ (Talburt et al., 1975)

- คูมาริน (coumarin) เป็นอนุพันธ์ของแลคโตนของ o-hydroxy cinnamic acid อนุพันธ์ของ coumarin มักจะรู้จักในรูปของ scopoletin และ esculetin (Talburt et al., 1975)

- ไทโรซีน (tyrosine) เป็น monohydric phenol อยู่ในบริเวณด้านในของหัวมันฝรั่ง มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.1-0.3 ของน้ำหนักแห้งของหัวมันฝรั่ง สามารถแยกออกจากมันฝรั่งโดยการสกัดด้วยสารละลายแอลกอฮอล์ ไทโรซีนจะถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์ไทโรซิเนส (tyrosinase) ซึ่งเป็น copper containing enzyme เกิดเป็นสารสีน้ำตาลที่ไม่ละลายในน้ำ เรียกว่า เมลานิน (melanin) (Patil and Zucker,1965)

- คลอโรจีนิกแอซิด (chlorogenic acid) เป็น polyhydric phenol มีอยู่มากบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก โดยเฉพาะชั้นเพอริเดอร์มและคอร์เท็กซ์

ไนโตรเจน

ปริมาณไนโตรเจนในหัวมันฝรั่งจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยโปรตีนซึ่งมีอยู่ 1/3 ถึง 1/2 ของไนโตรเจนทั้งหมด กรดอะมิโนอิสระ 2/3 ของไนโตรเจนทั้งหมด และสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งจะมีพันธะเปปไทด์ที่สั้นกว่าโปรตีน ได้แก่ glutathione, proteoses, peptones เมื่อหัวมันฝรั่งเจริญเติบโตเต็มที่จะมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าหัวมันฝรั่งที่ยังเจริญไม่เต็มที่ โปรตีนที่พบในมันฝรั่งจะประกอบด้วย globulin ร้อยละ 60-70 และ glutelin ร้อยละ 20-40 ในช่วงเจริญเติบโตเต็มที่ ปริมาณ globulin และ glutelin จะแตกต่างกัน glutelin จะประกอบด้วย cystine, aspartic acid, proline และ tryptophane มากกว่า globulin (Smith, 1968)

2.1.1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่างๆ ของมันฝรั่งในระหว่างกระบวนการแปรรูป และระหว่างการเก็บรักษา

การผลิตผลิตภัณฑ์มันฝรั่งมีปัญหาสำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพทางกายภาพหรือเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาดังนี้ (Smith, 1975)

ก. การเกิดสีน้ำตาล (browning reaction)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล เป็นผลของปฏิกิริยาต่อเนื่อง สามารถจำแนกตามการใช้และไม่ใช้เอนไซม์ได้ 2 ประเภท คือ

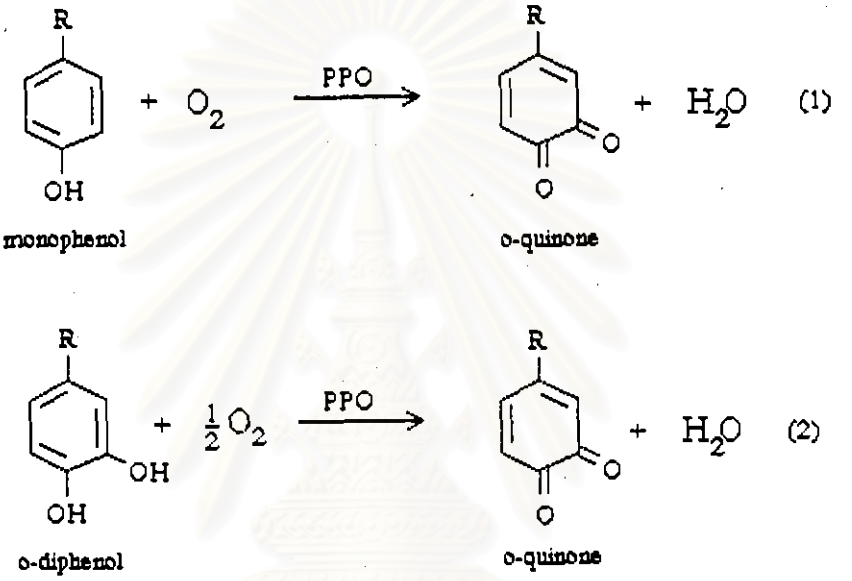
1. การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยา enzymatic browning

ปฏิกิริยา enzymatic browning เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยมีเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น ทั้งนี้มักเกิดขึ้นกับผักและผลไม้เป็นส่วนใหญ่ (Wong, 1989) ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

เนื้อเยื่อของผักและผลไม้ฉีกขาด เนื่องจากการปอก หั่น ตัด หรือทำให้ช้ำ (peeling, cutting หรือ bruising) เพราะภายในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้ ตามปกติมีเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) อยู่แยกกันจากสารประกอบฟีนอลิค เมื่อเนื้อเยื่อของผักผลไม้เกิดการฉีกขาด เอนไซม์ PPO จะเร่งปฏิกิริยา oxidation ของสารฟีนอลิคทั้งประเภท monophenols และ o-diphenols ดังรูปที่ 2 เป็นผลให้เกิดสารที่มีสีต่างๆ ตั้งแต่ ม่วง ชมพู ถึงสีน้ำตาลในบริเวณที่เนื้อเยื่อถูกตัด (Mayer and Harel, 1979)

เอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) พบทั่วไปในผักและผลไม้ เป็น copper-containing enzyme ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ (รูปที่ 2) เร่งปฏิกิริยา hydroxylation ของ monophenol ไปเป็น o-diphenol ซึ่งมักจะตามด้วยการเกิดปฏิกิริยา oxidation ของ o-diphenol ไปเป็น o-quinone และเร่งปฏิกิริยา oxidation ของ o-diphenol ไปเป็น o-quinone สารประกอบ o-quinone ที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยา polymerization ต่อไปทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะมีช่วง pH ที่เหมาะสมกับการทำงานต่างกันตามชนิดและพันธุ์ของผัก ผลไม้ แต่โดยทั่วไปแล้ว pH ที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ PPO อยู่ในช่วง 6.0-7.0 (Langdon, 1987) การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จะมีผลป้องกันการเกิด enzymatic browning ได้ เช่น การใช้

ความร้อนทำให้เอนไซม์สูญเสียสภาพธรรมชาติ ปรับสภาพ pH ให้ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์โดยปรับ pH ให้ต่ำกว่า 3 ซึ่งจะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ (Hutchings, 1994) หรือใช้สารเคมีซึ่งจะมาเกาะกับเอนไซม์ PPO ที่ active site ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาต่อไปได้




**รูปที่ 2** ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) และไฮดรอกซิเลชั่น (hydroxylation) ของ monophenol และ o-diphenol โดยเอนไซม์ PPO

<u>ชนิดของสารประกอบฟีนอลิค (phenolic compounds)</u> ซึ่งเป็น secondary plant metabolites ที่พบในผักและผลไม้ตามธรรมชาติ ประกอบด้วย phenolic acid และ flavonoids โดยชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิคในผักผลไม้แต่ละชนิด พันธุ์ จะแตกต่างกันออกไป สารประกอบฟีนอลิดเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิด enzymatic browning เนื่องจากเป็น substrate ของเอนไซม์ PPO โดยสารฟีนอลิดที่มีบทบาทสำคัญคือ o-quinone สารตัวนี้โดยธรรมชาติมีสีเล็กน้อย แต่เป็น reactive intermediate ที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป สาร o-quinone ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นตัวการสำคัญในการทำให้เกิดพวกสารประกอบที่มีสีเพราะ o-quinone สามารถทำปฏิกิริยาโพลี-เมอไรเซชันกับสาร o-diphenol เป็นผลให้เกิดสารโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น (รูปที่ 3,a) จาก dimer เป็น trimer, tetramer เป็นต้น และมี double bond conjugation เพิ่มขึ้นในโมเลกุล ทำให้เกิดสี และ o-quinone สามารถทำปฏิกิริยากับพวกกรดอะมิโนต่างๆ และโปรตีน โดยเกิดปฏิกิริยา addition กับ o-quinone ที่เกิดขึ้นได้ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่าง amino group ของกรดอะมิโน หรือโปรตีนกับ o-quinone (รูปที่ 3,b) สำหรับกรดอะมิโน lysine และ cysteine หรือโปรตีนที่มีกรดอะมิโน 2 ตัวนี้ ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ $\varepsilon$-$NH_2$ และ -SH group ของกรดอะมิโนตามลำดับ ผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสีได้

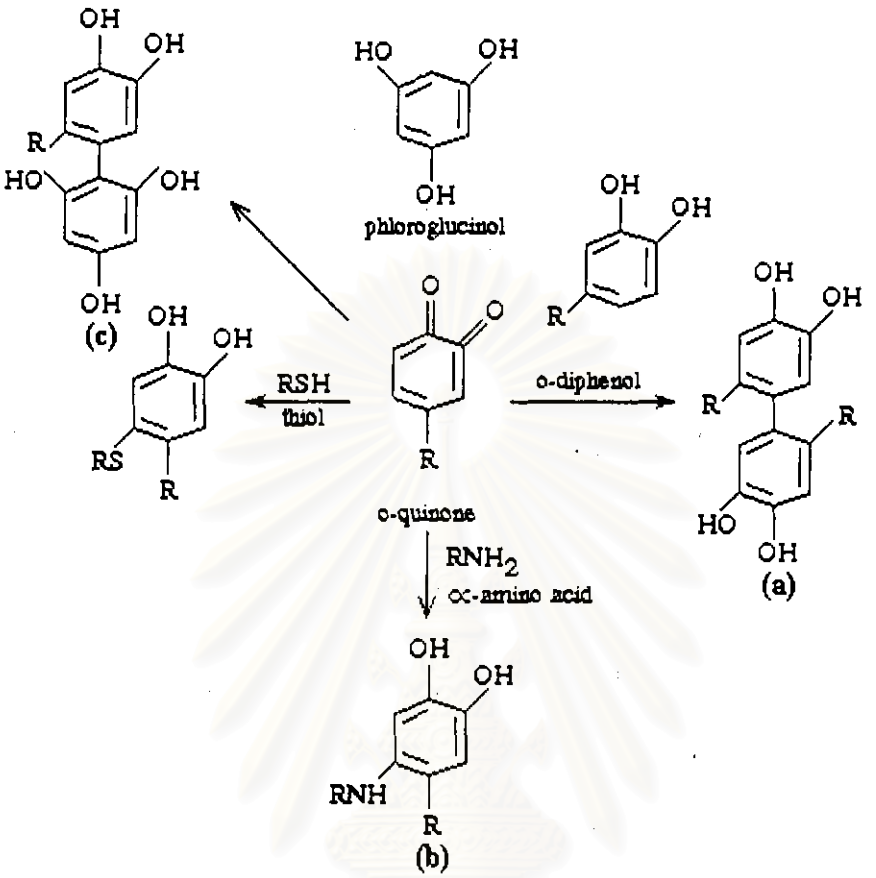
ต่าง ๆ เช่น แดง ม่วงแดง น้ำตาลแดงถึงน้ำตาลดำในผัก ผลไม้ ทั้งนี้พบว่าสีที่เกิดขึ้นจะแปรตามชนิดของกรดอะมิโนและสารฟีนอลิค (Pierpoint, 1969)

การเกิดของปฏิกิริยาพวก secondary nonenzymatic reactions ที่สืบเนื่องมาจาก o-quinone สามารถจะอธิบายได้ดังรูปที่ 3 จากความไวต่อปฏิกิริยาของสาร o-quinone ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดการ regenerate สารฟีนอลิคขึ้นใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้อีก เมื่อโมเลกุลใหญ่ขึ้นก็จะถูกออกซิไดซ์มากขึ้น ประกอบกับการทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนและโปรตีนในผักและผลไม้ได้ จึงทำให้การศึกษาและการหาโครงสร้างสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก

<u>โลหะ</u> ซึ่งทำหน้าที่เป็น co-factor ของเอนไซม์ PPO คือ $Cu^{2+}$ หากไม่มี $Cu^{2+}$ เอนไซม์ก็จะไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นการเติมสารเคมีที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับ $Cu^{2+}$ ได้ก็จะเป็นการป้องกันการเกิด enzymatic browning ได้ (Langdon, 1987)

<u>ออกซิเจน</u> เนื่องจากการเกิด enzymatic browning เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา oxidation ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นหากมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในระบบมากขึ้น อัตราการเกิด oxidation จะสูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น (Hutchings, 1994)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 3 ปฏิกิริยา secondary nonenzymatic จาก o-quinone (วรรณา ตุลยชัญ, 2528)

2. <u>การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยา non-enzymatic browning</u>

เป็นการเกิดปฏิกิริยา browning ที่พบมากในอาหารที่ได้ผ่านกระบวนการผลิตมาแล้ว เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในองค์ประกอบของอาหาร แต่มิได้มีเอนไซม์เข้ามามีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา มีผลทำให้เกิดสีน้ำตาล มีกลิ่นไหม้ และทำให้คุณค่าทางอาหารลดลง ซึ่งสามารถแยกประเภทของปฏิกิริยาได้อีก 3 ประเภทคือ (Wong, 1989)

<u>Maillard reaction</u> พบว่า สารตั้งต้นของปฏิกิริยานี้คือสารประเภท amine , amino acids หรือโปรตีน กับสารที่มี carbonyl group เช่น reducing sugar, aldehyde และ ketone ดังนั้นจึงอาจเรียกปฏิกิริยานี้ว่า carbonyl-amine reaction การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดจากการรวมกัน (condensation) ระหว่างสารที่มี α-amino group กับสารที่มี carbonyl group แล้วเกิดการ cyclization ได้เป็นสารที่อยู่ในรูปของ enol form และ keto form แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงจนได้ melanoidins ซึ่งเป็นสารที่ให้สีน้ำตาล ผลของ Maillard reaction ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ คือทำให้สี รสชาติของอาหาร เปลี่ยนแปลงไป ลดคุณค่าทางโภชนาการของโปรตีน เพราะจะเกิดการสูญเสีย

amino acids เช่น lysine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็น และเกิดการสูญเสียของ ascorbic acid ด้วย (Wong,1989)

Caramelization เป็นปฏิกิริยา non-enzymatic browning ที่เกี่ยวข้องกับการเกิด degradation ด้วยความร้อน การ fragmentation และการ polymerization ของสารประกอบคาร์บอนโดยเฉพาะน้ำตาล และไม่เกี่ยวข้องกับ amine เมื่อสารได้รับความร้อนประมาณ 200 $^{\circ}$ C จะเกิดการหลอมเหลว แล้วให้สารที่มีสีน้ำตาล จึงใช้หลักของปฏิกิริยานี้ในการเคี่ยวน้ำตาลหรือ syrup ในอุตสาหกรรมโคดาโคลา เบียร์ ซ้อส และการทำลูกกวาด เป็นต้น น้ำตาลที่ใช้ต้องเป็นซูโครส กลูโคส หรือคอร์นไซรัป เท่านั้น (Wong,1989)

Ascorbic acid oxidation ทำให้เกิด non-enzymatic browning โดยสาร carbonyl compound ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับ amine, protein และ amino acid ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น (Wong,1989)

ข. การเกิดสีคล้ำในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งหลังจากการทำให้สุก (after cooking darkening)

จะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสีคล้ำขึ้นซึ่งอาจเกิดขึ้นทันทีเลยในช่วงทำให้เย็น แล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีสีเกิดขึ้น มักเกิดในมันฝรั่งกระป๋อง มันฝรั่งแท่งที่ลวกในน้ำมัน สีดำที่เกิดขึ้นไม่ใช่เมลานิน แต่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ ferric iron ($Fe^{***}$) กับ chlorogenic acid หรือ o-dihydroxyphenol ในมันฝรั่งที่สุกใหม่ๆ จะมีสารประกอบเชิงซ้อน ที่ไม่มีสีของ chlorogenic acid-$Fe^{**}$ และเมื่อถูกออกซิไดซ์ในอากาศจึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ chlorogenic acid-$Fe^{***}$ ขึ้นและทำให้มีสีคล้ำ (Smith, 1975)

2.1.1.3 การป้องกันการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง

2.1.1.3.1 การป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction)

เนื่องจากปัญหาของการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้ส่วนใหญ่ เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ดังนั้นความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าว ก็จะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ที่ได้มีคุณภาพดีเป็นที่ต้องการและยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุด ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากเอนไซม์ PPO มีหลายวิธี แต่วิธีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการแปรรูปผักและผลไม้ คือ

การใช้ความร้อน

การใช้ความร้อนสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารจำพวกโปรตีน เมื่อได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่ง จะเกิดการสูญเสียสภาพ (protein denature) จึงมีผลยับยั้งการทำงาน (Luh and Woodroof, 1975) เอนไซม์ในมันฝรั่งมีอยู่หลายชนิด และส่วนใหญ่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาลในมันฝรั่ง ได้แก่ catecholase, polyphenol oxidase, tyrosinase, phenolase, peroxidase แต่เอนไซม์ peroxidase (E.C.1.11.1.7) เป็นเอนไซม์ที่สามารถทนความร้อนได้ (Reed, 1966) ดังนั้นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ จะ

พิจารณาได้โดยหาเวลาที่ต่ำที่สุดในการยับยั้งการทำงานของ peroxidase โดยการลวก วิธีลวกที่นิยมใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมี 2 วิธีคือ

- การลวกด้วยไอน้ำ (steam blanching) โดยให้ชิ้นอาหารสัมผัสกับไอน้ำที่ความดันบรรยากาศหรือภายใต้ความดันต่ำ เหมาะกับอาหารขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมาก เนื่องจากสูญเสียสารอาหารน้อยกว่าการลวกด้วยน้ำร้อน และต้องทำความสะอาดวัตถุดิบอย่างดีก่อนหรือหลังการลวก ความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนในชิ้นอาหารจะต่ำกว่า ถ้าวัตถุดิบกองสูงเกินไป ส่วนที่อยู่ด้านในจะไม่ได้รับความร้อน และประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนจะต่ำกว่าการใช้น้ำร้อน (Fellows, 1990)

- การลวกด้วยน้ำร้อน (hot water blanching) โดยให้ชิ้นอาหารสัมผัสกับน้ำร้อนซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 70-100 $^{\circ}$C ตามเวลาที่ต้องการ วิธีนี้ทำได้สะดวกรวดเร็ว ใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิด ทุกขนาดและรูปร่าง เครื่องมือที่ใช้มีราคาถูก ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนดีกว่าการลวกด้วยไอน้ำ สามารถใช้สารเคมีร่วมไปกับการลวกได้ แต่จะสูญเสียสารอาหารบางส่วนที่สามารถละลายไปกับน้ำ เช่น วิตามิน แร่ธาตุ และน้ำตาล (Fellows, 1990) Lisinska and Leszczynski (1989) กล่าวว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการลวกมีผลต่อปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยพบว่าการลวก french fries ในน้ำที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 นาที จะมีการดูดซับน้ำมันน้อยกว่าการลวกในน้ำที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}$C เป็นเวลา 15 นาที

<u>การใช้สารเคมี</u>

สารเคมีที่ใช้ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสารประกอบซัลไฟต์ ซึ่งนิยมใช้ทั้งในผัก ผลไม้สดและผลิตภัณฑ์ โดยมีคุณสมบัติเป็นสาร non-specific reducing agent ซึ่งสามารถป้องกันการเกิด enzymatic browning และ non-enzymatic browning ได้โดยไปทำให้สารที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโนอยู่ในรูปที่คงตัวขึ้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารกันหืน และสารฟอกสีด้วย ซึ่งคุณสมบัติการเป็นวัตถุกันหืนของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะช่วยลดการสูญเสียของกรดแอสคอร์บิก ดาโรทีน และสารชีวภาพที่ออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้การใช้กรดซัลฟุรัสเพื่อรักษาสีและทำลายจุลินทรีย์นั้นได้ใช้ควบคู่กับการควบคุมการเปลี่ยนสีและการเกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการในระหว่างการแปรรูปอีกด้วย กลไกการยับยั้ง enzymatic browning นั้น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะไปลดปริมาณออกซิเจนและสามารถเกิดปฏิกิริยา addition กับ o-quinone เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี แต่เนื่องจากพบว่า ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินกว่าที่มีการกำหนดไว้ในประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 84 จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการใช้ไขมันและโปรตีนในร่างกาย และทำลายวิตามินบีในอาหาร และเมื่อผู้ป่วยโรคหอบหืดบริโภคอาหารที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือซัลเฟตเข้าไป ทำให้อาการของโรครุนแรงขึ้นและหลอดลมตีบได้ (Koening, Pierson and Frank, 1980) ดังนั้นจึงได้มีการค้นคว้าหาสารเคมีชนิดอื่นมาใช้แทนได้แก่ กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก เป็นต้น ในกรณี enzymatic browning กรดซิตริกจะสามารถ chelate $Cu^{2+}$ และลด pH ได้ ส่วนกรดแอสคอร์บิก จะมีผลในการเป็น reducing agent โดยลดรูป o-quinone ไปเป็นรูปเดิมคือ o-dihydroxy compound กรณี non-enzymatic browning การเพิ่มกรดจะสามารถ protonate กลุ่มอะมิโนจึงทำให้ free amino nitrogen ลดลง ดังนี้

$$RNH_2 + H^+ \longrightarrow RNH_3^{\oplus}$$

จึงทำให้ไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับ -CHO ได้ต่อไป (Smith, 1968) Langdon (1987) ศึกษาการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลโดยพัฒนา treatment-packaging combination เพื่อให้มันฝรั่งมีอายุการเก็บในตู้เย็นที่ 4 $^{\circ}$ C ได้นานกว่า 14 วัน โดยไม่ใช้ sulfiting agent พบว่าการใช้สารเคมีร่วมกับการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมโดยนำชิ้นมันฝรั่งแช่ในสารละลายที่มี citric acid และ ascorbic acid นาน 1 นาทีและบรรจุในถุง polyolefin multilayer ปิดผนึกแบบสุญญากาศ จะมีกลิ่น สี และเนื้อสัมผัสเหมือนกับมันฝรั่งสด และมีความขาวไม่แตกต่างกับมันฝรั่งที่ treat ด้วย sodium metabisulfite

2.1.1.3.2 <u>การป้องกันการเกิดสีคล้ำในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งหลังจากการทำให้สุก</u>

สาเหตุของการเกิด after-cooking darkening เกิดจากการได้รับความร้อนจนมันฝรั่งสุก และเกิด non-enzymatic oxidation ทำให้มีสีเกิดขึ้น สีที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ ferric iron ($Fe^{***}$) กับ chlorogenic acid หรือ o-dihydroxyphenol ซึ่งปกติมันฝรั่งที่สุกใหม่ๆ นั้น ferrous ions ($Fe^{**}$) จะจับกับ chlorogenic acid หรือ o-dihydroxyphenol เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีสี เมื่อถูกออกซิไดซ์ในอากาศจะเกิดสารประกอบที่มีสีของ chlorogenic acid-$Fe^{***}$ ดังนั้นการป้องกันการเกิด after-cooking darkening ทำได้โดยการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติ sequestering หรือ chelating กับ iron (Smith, 1968) ได้แก่

- ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) และเกลือของ EDTA เพื่อให้อยู่ในรูป non-ionizable และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ o-dihydroxyphenol หรือ chlorogenic acid ต่อได้อีก แต่การใช้ EDTA และเกลือของ EDTA จะทำให้อายุการเก็บของมันฝรั่งสั้นลง (Anderson, Esselen, and Fellers, 1954)

- การใช้กรด เช่น citric acid, acetic acid เพื่อเพิ่มความเป็นกรดในเนื้อเยื่อของมันฝรั่ง ก่อนหรือระหว่างการ cooking และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันกับ chlorogenic acid ในการจับกับโลหะ iron (Smith, 1975) แต่การลด pH ของน้ำที่ใช้แช่หรือลวกมันฝรั่งให้ต่ำกว่า 5.8-6.0 จะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส โดยจะทำให้เกิดลักษณะ glassiness หรือ rind formation ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Wager, 1955)

- การใช้ disodium pyrophosphate หรือ sodium acid pyrophosphate (SAPP) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง สามารถใช้ได้แม้ว่า pH ของน้ำที่ใช้แช่หรือลวกจะเป็น 4.5-5.5 โดยไม่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส โดย SAPP จะเกิด hydrolysis เปลี่ยนเป็น orthophosphoric acid ซึ่งจะจับกับ ferric iron เป็น orthophosphato-ferric complexes Smith and Davis (1962a) ศึกษาการป้องกันการเกิดสีคล้ำในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งที่ลวกในน้ำมัน (oil blanched french fries) โดยลวกชิ้นมันฝรั่งในน้ำที่มี SAPP เป็น 1 2 3 และ 5 % พบว่าน้ำที่ใช้ลวกที่มี SAPP 2% จะป้องกันการเกิด after cooking darkening ได้ดีที่สุด โดยไม่มีกลิ่นรสเปลี่ยนแปลง Smith and Davis (1962b) ได้ศึกษาการป้องกันการเกิดสีคล้ำอันเนื่องมาจาก after-cooking darkening โดยใช้ SAPP ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ potato flake โดยนำมันฝรั่งที่หั่นเป็นแผ่น ลวกในน้ำที่มีและไม่มี SAPP 2% (w/w) ที่อุณหภูมิ 85-90 $^{\circ}$ C เป็นเวลา 3 นาที ทำให้เย็นใน

น้ำที่มีและไม่มี SAPP 2% ที่อุณหภูมิ 21 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 นาที นำไปทำให้สุกโดยใช้ไอน้ำเป็นเวลา 20-25 นาที นำไปบดและผ่าน drum dryer เพื่อทำเป็น flake โดยลดความชื้นจาก 80% เป็น 5% ในเวลา 20 วินาที พบว่าการเติมสารละลาย SAPP 2% ในระหว่างการลวกและการ cooling จะป้องกันการเกิดสีคล้ำใน potato flake ได้ และพบว่าเมื่อเติมสารละลาย SAPP ที่มีความเข้มข้น 2% ปริมาณต่างๆ ทันทีก่อนทำแห้งจนมันฝรั่งบดมีความเข้มของ SAPP เท่ากับ 0.052% ก่อนทำแห้ง จะทำให้ได้ potato flake ที่มีสีสว่างขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากใช้อัตราเร็วในการทำแห้งสูงเกินไป การป้องกันการเปลี่ยนสีจึงเกิดไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าเติม SAPP จนมันฝรั่งบดมีความเข้มข้นของ SAPP มากกว่า 0.052% จะทำให้ได้ reconstituted flake ที่มีกลิ่นรสของกรดมากเกินไป

2.1.2 <u>สารประกอบฟอสเฟต</u>

บทบาทของสารฟอสเฟตที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ คือ (Furia, 1972)

- ยับยั้งการเน่าเสียของผักผลไม้ โดยทำหน้าที่เป็นเหมือน detergents ในการทำจัดสิ่งต่างๆ ที่ติดอยู่ที่ผิวของผักผลไม้ ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากสารประกอบฟอสเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลโลหะ (metallic ion) ซึ่งจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

- ช่วยยืดอายุการเก็บของอาหารหรือช่วยชลอปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดการหืนในผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นส่วนประกอบให้เกิดช้าลง เนื่องจากสารประกอบฟอสเฟตมีคุณสมบัติในการเป็น sequestering agent จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของโลหะลดลง

- ช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้คงตัว เนื่องจากเหล็กที่มีอยู่ในผักผลไม้ จะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบ o-diphenol ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์หลังการทำให้สุก โดยจะทำปฏิกิริยากับเหล็กเกิดเป็นสารเชิงซ้อนได้

- ช่วยเพิ่มแร่ธาตุในอาหาร เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิต ดังนั้นการเติมลงในอาหารจึงเป็นการช่วยเพิ่มคุณค่าของอาหารให้กับผลิตภัณฑ์

2.1.3 <u>แป้งพรีเจลาติไนซ์</u> (pregelatinized starch)

เป็นแป้งดัดแปรสภาพที่ได้จากการนำน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นเหมาะสมผ่านเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryer) ความร้อนที่ได้จากไอน้ำที่ผิวหน้าของลูกกลิ้ง จะทำให้น้ำแป้งดิบเกิดเจลาติไนซ์ และขณะที่ลูกกลิ้งหมุน จะมีการระเหยน้ำพร้อมไปด้วย แป้งที่ได้จะฉาบอยู่ที่ผิวหน้าลูกกลิ้งและถูกขูดออกโดยใบมีด แล้วจึงนำแป้งที่ได้ไปบดเป็นผง แป้งพรีเจลาติไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติต่างไปจากแป้งดิบ คือ สามารถละลายและกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ดูดซับน้ำและให้ความหนืดสูงทันที ในการผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์สามารถใช้ทั้งแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรสภาพ หรือแป้งที่ผ่านการดัดแปรสภาพทางเคมี มาผลิตเป็นแป้งพรีเจลาติไนซ์ ซึ่งถ้าใช้แป้งที่ดัดแปรสภาพทางเคมีคุณสมบัติที่ได้จากการดัดแปรสภาพทางเคมีก็จะยังคงมีอยู่ในแป้งพรีเจลาติไนซ์ เช่น การมีเสถียรภาพต่อสภาวะแช่เยือกแข็งและการทำละลายน้ำแข็ง ขณะที่แป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรสภาพจะเกิดการคืนตัว (retrogradation) (Bemiller and Whistler, 1996) ในอุตสาหกรรมอาหารจะใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์เพื่อ

- เป็นส่วนผสมของอาหารที่ผลิตเพื่อให้บริโภคได้ง่าย เพียงนำเอาผลิตภัณฑ์มาผสมกับน้ำหรือน้ำนม คนให้เข้ากันโดยไม่ต้องใช้ความร้อน เช่น instant pudding, instant soup, instant beverage (Bemiller and Whistler, 1996)

- ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (binder) เพื่ออุ้มน้ำและรักษาความชุ่มชื้นในผลิตภัณฑ์เนื้อ (Furia, 1972)

- เพิ่มการเกาะติดกับอาหารในผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์ผสมลงไปในแป้งชุบทอด (Furia, 1972)

2.1.4 เกลือ

มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งสารปรุงแต่งรสอาหารโดยเป็นสารให้รสเค็มและสารเคมีถนอมอาหาร เนื่องจากเกลือทำให้อาหารเกิดแรงดันออสโมติกสูงขึ้น ทำให้เซลเหี่ยวตายได้โดยเกลือจะแตกตัวให้ $Na^+$ และ $Cl^-$ ซึ่ง $Cl^-$ จะทำลายจุลินทรีย์ (ศิวาพร ศิวเวชช, 2529)

2.2 การทอด

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้น้ำมัน ซึ่งจะเปลี่ยนคุณภาพของอาหาร โดยความร้อนจะทำลายจุลินทรีย์ ยับยั้งเอนไซม์ และลดปริมาณน้ำที่ผิวของอาหาร เมื่ออาหารถูกปล่อยลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แนวการระเหยของน้ำจากชิ้นอาหารจะเริ่มจากที่ผิวแล้วค่อยๆ เลื่อนเข้าด้านในและเกิดเปลือกแข็งขึ้น อุณหภูมิที่ผิวของอาหารจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมัน อุณหภูมิภายในชิ้นอาหารจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นถึง 100 $^{\circ}$C อย่างช้าๆ การทอดโดยทั่วไปจะมี 2 วิธี ซึ่งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่างกัน คือ (Fellows, 1990)

2.2.1 การทอดโดยใช้น้ำมันน้อย (shallow หรือ contact frying) เหมาะกับอาหารที่มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไข่ การถ่ายเทความร้อนสู่ชิ้นอาหารส่วนใหญ่เกิดจากการนำความร้อนจากพื้นผิวกระทะที่ร้อนผ่านชั้นบางๆ ของน้ำมันเข้าสู่ชิ้นอาหาร ความหนาของชั้นน้ำมันจะต่างกันไปไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากผิวของอาหารจะไม่เรียบและฟองที่เกิดจากการระเหยของน้ำในระหว่างการทอด จะช่วยดันชิ้นอาหารขึ้นจากพื้นผิวกระทะเป็นครั้งคราว ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นอาหารไม่สม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด เกิดสีน้ำตาลที่ผิวไม่สม่ำเสมอ

2.2.2 การทอดน้ำมันท่วม (deep fat frying) จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในน้ำมัน และการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นอาหาร ผิวอาหารทุกจุดจะได้รับความร้อนสม่ำเสมอ เกิดการระเหยของน้ำบางส่วน สีและลักษณะปรากฏที่ผิวของชิ้นอาหารจึงสม่ำเสมอมากกว่า เหมาะกับอาหารที่มีรูปร่างทุกแบบ อุณหภูมิที่ใช้ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ อยู่ในช่วง 177 ถึง 190 $^{\circ}$C และอุณหภูมิที่ใช้กันส่วนใหญ่คือ 190 $^{\circ}$C (Smith and David, 1968) Reeve and Neel (1960) พบว่า deep fat frying มีความสำคัญในการทำให้อาหารสุกและการระเหยของน้ำ ซึ่งแป้งที่มีอยู่ในเซลจะเกิดเจลาติไนซ์ และเกิดการระเหยน้ำทำให้น้ำที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อจะถูกแทนที่ด้วยน้ำมัน และพบว่าโครงสร้างของเซลและผนังเซลแทบจะไม่ถูกทำลายในช่วง deep fat frying

2.3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการทำมันฝรั่งทอด

2.3.1 ปริมาณผลผลิตของมันฝรั่งทอด

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของมันฝรั่งทอด ได้แก่ (Lisinska and Leszczynski, 1989)

2.3.1.1 คุณภาพของวัตถุดิบในแง่ความสม่ำเสมอของขนาด ความเรียบของผิวมันฝรั่ง ความตื้นลึกของตาและรอยช้ำของมันฝรั่ง เนื่องจากจะมีการสูญเสียไปในขั้นตอนการปอกเปลือกและตัดแต่ง

2.3.1.2 ความถ่วงจำเพาะของมันฝรั่ง (specific gravity) หรือปริมาณของแข็งภายในหัวมันฝรั่ง (dry matter content) Whiteman and Wright (1949) พบว่า ปริมาณผลผลิตของมันฝรั่งทอดขึ้นกับความถ่วงจำเพาะของหัวมันฝรั่ง โดยผลผลิตของมันฝรั่งทอดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถ่วงจำเพาะของหัวมันฝรั่งเพิ่มขึ้น Brown (1960) พบว่า มันฝรั่งที่เหมาะสมในการนำมาทอดควรมีความถ่วงจำเพาะไม่ต่ำกว่า 1.070 Grewal and Uppal (1989) ศึกษาผลของความถ่วงจำเพาะ ปริมาณของแข็งแห้ง (dry matter) ต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งทอด และสีของมันฝรั่งทอด พบว่ามันฝรั่งที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีปริมาณของแข็งแห้งสูง มันฝรั่งที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1.0782 จะให้ปริมาณผลผลิตของมันฝรั่งทอดสูงกว่าและมีปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งต่ำกว่า มันฝรั่งทอดที่ได้จะมีสีที่ดีกว่าโดยมีค่าความสว่างสูงกว่ามันฝรั่งที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.0599

2.3.2 สีของมันฝรั่งทอด

ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี พันธุ์ของมันฝรั่ง และความเหมาะสมในการเลือกวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตดังนี้ (Lisinska and Leszczynski, 1989)

- พันธุ์ ในการผลิตมันฝรั่งแช่เยือกแข็ง (french fried) นิยมใช้พันธุ์ที่มีเนื้อสีขาว มีน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำหรือไม่มีเลย ไม่นิยมพันธุ์ที่มีเนื้อสีเหลือง เนื่องจากเมื่อนำไปทอดสีจะเข้มมากเกินไป

- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในหัวมันฝรั่งแต่ละพันธุ์จะมีความแตกต่างกัน และถ้าปลูกในที่ต่างกัน สภาพแวดล้อมต่างกัน ก็ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่างกัน น้ำตาลรีดิวซ์มีผลต่อการเปลี่ยนสภาพหลังการทอด เพราะน้ำตาลรีดิวซ์ทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนหรือโปรตีนที่มีอยู่ในหัวมันฝรั่งเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction โดยมีความร้อนจากการทอดเป็นตัวเร่ง (Smith, 1975) ในการผลิต french fries วัตถุดิบที่ใช้ควรมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ได้ในปริมาณต่ำกว่า 0.5% ส่วนมันฝรั่งทอดแบบแผ่น (potato chip) ควรมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ต่ำกว่า 0.25%

- อุณหภูมิในการเก็บรักษามันฝรั่ง จุดประสงค์ของการเก็บรักษาหัวมันฝรั่ง เพื่อจะให้อยู่ในสภาพที่เหมาะแก่การรับประทาน และเก็บไว้ใช้ได้ตลอดปีโดยไม่เน่าเสีย และไม่งอก Smith (1975 ) กล่าวว่า การเก็บรักษามันฝรั่งไว้ที่อุณหภูมิในช่วง 40-50 องศาฟาเรนไฮต์หรือต่ำกว่า จะมีการงอกบ้างเล็กน้อย แต่จะมีปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาฟาเรนไฮต์ เขาได้สรุปว่า มันฝรั่งที่จะใช้ทำมันฝรั่งทอดให้สีเป็นที่พอใจ ควรเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาฟาเรนไฮต์

2.3.3 ปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งทอด

ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในมันฝรั่งเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งต่อคุณภาพมันฝรั่งทอด ถ้ามีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับสูง ทำให้กลิ่นและรสเสื่อมเสียได้เร็วขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอด

2.3.3.1 ความถ่วงจำเพาะหรือปริมาณของแข็งแห้งภายในหัวมันฝรั่ง

Whiteman and Wright (1949) พบว่า เมื่อความถ่วงจำเพาะของหัวมันฝรั่งเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับจะลดลง Kunkel, Gregory, and Binkley (1951) ศึกษาผลของความถ่วงจำเพาะของหัวมันฝรั่งต่อปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับ โดยแยกมันฝรั่งตามความถ่วงจำเพาะเป็น 2 กลุ่มคือ พวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูง (ประมาณ 1.0916) และพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ (ประมาณ 1.0777) เมื่อนำมาทำมันฝรั่งทอด พบว่าพวกที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับอยู่ร้อยละ 32.64 ส่วนพวกที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับอยู่ร้อยละ 37.05

2.3.3.2 การทำให้ชิ้นมันฝรั่งแห้งก่อนทอด

จะช่วยให้ปริมาณน้ำมันในชิ้นมันฝรั่งทอดลดต่ำลง (Smith, 1975) เนื่องจากจะทำให้ปริมาณความชื้นลดลง ปริมาตรภายในชิ้นอาหารที่จะถูกแทนที่โดยน้ำมันในระหว่างการทอดลดลง เวลาที่ใช้ในการทอดลดลง มันฝรั่งที่มีความชื้นต่ำจะมีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับในชิ้นมันฝรั่งทอดต่ำ ชิ้นมันฝรั่งที่หั่นแล้วนำไปทำแห้ง 10 นาทีหรือมากกว่าจนมีความชื้นลดลงร้อยละ 25 เมื่อนำมาทอดจะมีปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับน้อยลงประมาณร้อยละ 6-8 แต่ขณะเดียวกันปริมาณผลผลิตของมันฝรั่งทอดก็จะลดลงด้วย Lulai and Orr (1979) พบว่า การดูดซับน้ำมันจะเกิดขึ้นขณะที่ความชื้นที่อยู่ในอาหารเคลื่อนที่และระเหยเป็นไอน้ำในระหว่างการทอด ยิ่งมีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมาก จะทำให้มีปริมาณไขมันในอาหารเพิ่มมากขึ้น

2.3.3.3 ความหนาของชิ้นมันฝรั่ง

ความหนาของชิ้นมันฝรั่งมีผลต่อปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งทอด (Smith, 1975) Johnson (1957) พบว่า เมื่อความหนาของชิ้นมันฝรั่งลดลง การดูดซับน้ำมันจะเพิ่มขึ้นดังนี้

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ความหนาของชิ้นมันฝรั่ง (มิลลิเมตร) | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.3 | 1.1 |
| ร้อยละของน้ำมันที่ถูกดูดซับ (%) | 43.85 | 44.68 | 46.81 | 47.61 | 49.93 |

การดูดซับน้ำมันที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวหน้าที่สัมผัสกับน้ำมันต่อน้ำหนักมากกว่า (Saguy and Pinthus, 1995)

2.3.3.4 ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอดมันฝรั่ง

Vandervet (1968) กล่าวว่า น้ำมันที่เหมาะในการทอด (deep fat frying) ควรเป็นน้ำมันที่ใช้เพื่อการหุงต้ม มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวน้อยและใช้เพื่อการทอดโดยตรง น้ำมันที่ใช้เพื่อการทอดที่ดีที่สุดควรจะเป็นน้ำมันพืชที่ไฮโดรจิเนตแล้ว (hydrogenated vegetable oil) Ong, Choo and Ooi (1995) กล่าวว่า น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นน้ำมันที่เหมาะสมที่จะใช้ทอด เมื่อเทียบกับน้ำมันข้าวโพด และน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจากมีปริมาณกรดลิโนเลนิก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชันในปริมาณที่ต่ำกว่า และน้ำมันปาล์มยังมีวิตามินอี (tocopherols) เป็นสารกันหืนตาม

ธรรมชาติ ทำให้อาหารที่ทอดในน้ำมันปาล์ม มีอายุการเก็บยาวนานกว่า นอกจากนี้ King et al. (1936) ทดลองทอดมันฝรั่งด้วยน้ำมันพืชหลายชนิด เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดฝ้าย พบว่าการดูดซับน้ำมันในชิ้นมันฝรั่งทอดจะอยู่ในปริมาณใกล้เคียงกัน

2.3.3.5 <u>อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอดมันฝรั่ง</u>

ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอดมันฝรั่งสูง จะทำให้การดูดซับน้ำมันในชิ้นมันฝรั่งต่ำ (Smith, 1975) เพราะขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของน้ำมันจะลดลง ดังนั้นจึงมีน้ำมันส่วนน้อยที่จะถูกดูดซับไว้ได้ในเวลาจำกัด อุณหภูมิในการทอดมันฝรั่งอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตามปริมาณน้ำตาลในหัวมันฝรั่ง ถ้าหัวมันฝรั่งมีปริมาณน้ำตาลสูง ช่วงของอุณหภูมิในการทอดจะแคบและลดต่ำลง

2.3.3.6 <u>ระยะเวลาที่ใช้ในการทอดมันฝรั่ง</u>

เวลาที่ใช้ในการทอดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด เมื่อมันฝรั่งที่ใช้ทอดอยู่ในน้ำมันเป็นเวลานาน ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับจะมากกว่าการทอดโดยใช้ระยะเวลาสั้น ถ้าใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำจะต้องใช้เวลาทอดนาน จึงทำให้มีน้ำมันอยู่ในชิ้นมันฝรั่งมาก (Smith, 1975)

2.3.3.7 <u>แรงตึงผิวที่หน้าสัมผัสเริ่มต้น</u> (initial interfacial tension)

เมื่อ interfacial tension มีค่าต่ำ จะทำให้การดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้น น้ำมันที่ใช้แล้วจะมีค่า interfacial tension ต่ำกว่าน้ำมันใหม่ เมื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางให้ความร้อน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำมันมากกว่า และถ้าพื้นผิวผลิตภัณฑ์ถูกทำให้มีค่า interfacial tension สูงกว่าน้ำมัน โดยทำให้พื้นผิวมีลักษณะเป็น hydrophilic จะทำให้ % oil uptake ลดลงขณะที่ทำการทอด (Pinthus and Saguy, 1994)

2.3.3.8 <u>ความเป็นรูพรุน</u> (porosity)

ความเป็นรูพรุนจะมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน โดยพบว่า เมื่อผลิตภัณฑ์มี initial porosity สูงหรือมี bulk density ต่ำ จะทำให้การดูดซับน้ำมันสูงขึ้นในช่วงแรกของการทอด (Pinthus, Weinberg and Saguy, 1995)

2.3.4 <u>กลิ่นและกลิ่นรสของมันฝรั่งทอด</u>

มันฝรั่งทอดจะต้องมีกลิ่นและกลิ่นรสที่ดี เป็นที่พอใจของผู้บริโภค Smith (1968) กล่าวว่า กลิ่นและกลิ่นรสของมันฝรั่งทอดเป็นเรื่องยุ่งยากซับซ้อนที่จะวิเคราะห์และอธิบายมากกว่ากลิ่นรสของมันฝรั่งอบ (baked potatoes) หรือมันฝรั่งบด (mashed potato) Mookherjee, Deck, and Chang (1965) พบว่า carbonyl compound เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดกลิ่นและกลิ่นรสของมันฝรั่งทอด และได้ศึกษาต่อมาพบว่า 2,4-decadienal ซึ่งได้จากกรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ในน้ำมันที่ใช้ทอด เป็นสารประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดกลิ่นในมันฝรั่งทอดที่ทอดเสร็จใหม่ๆ เพราะมีปริมาณสูงสุด และสารประกอบ 2,5-dimethyl pyrazine และ methional อาจจะก่อให้เกิดกลิ่นรสในมันฝรั่ง ต่อมาพบว่า สารประกอบ 2,5-dimethyl pyrazine เพียงชนิดเดียวที่ทำให้เกิดกลิ่นในมันฝรั่ง โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนในหัวมันฝรั่ง ต่อมา Deck, Pokorny, and Chang (1973) แยกสารประกอบ 53 ชนิดที่ทำให้เกิดกลิ่นรสในมันฝรั่งทอดที่ดี ประกอบด้วย สารประกอบที่มีไนโตรเจน 8 ชนิด

สารประกอบที่มีซัลเฟอร์ 2 ชนิด ไฮโดรคาร์บอน 14 ชนิด อัลดีไฮด์ 13 ชนิด คีโตน 2 ชนิด อัลกอฮอล์ 1 ชนิด ฟีนอล 1 ชนิด เอสเทอร์ 3 ชนิด อีเทอร์ 1 ชนิด กรด 4 ชนิด โดยพบว่า สาร alkyl-substituted pyrazine; 2,4-dienals; phenylacetaldehyde และ furyl methyl ketone จะส่งผลร่วมกัน ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ดีของมันฝรั่งทอด

2.3.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสของมันฝรั่งทอด (french fries) ประกอบด้วยเนื้อสัมผัสภายนอกมีความกรอบ (crispness) ไม่แข็งหรือเหนียว ขณะที่ภายในมีลักษณะเป็นแป้ง (mealiness) เหมือนมันฝรั่งต้มหรือมันฝรั่งอบ (Lisinska and Leszczynski, 1989) ปัจจัยที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสได้แก่

- ปริมาณแป้ง มันฝรั่งที่มีปริมาณแป้งสูง จะให้เนื้อสัมผัสภายนอกกรอบ ภายในนุ่มเหมือนมันฝรั่งต้ม

- อัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเปคติน จะมีผลต่อความหนืดของแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ จึงมีผลต่อการเกิดเนื้อสัมผัสที่นุ่มเป็นแป้งเหมือนมันฝรั่งต้ม

- ปริมาณโปรโตเพคติน (protopectin) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเซลในเนื้อเยื่อพืช มันฝรั่งที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ จะมีแคลเซียมเพคติเนตและเพคตินสูง เนื่องจากการสลายตัวของโปรโตเพคตินสูง ทำให้มีแคลเซียมอิสระสูง พันธะระหว่างเซลอ่อนตัวลง เมื่อได้รับความร้อนจากการทอด ทำให้ได้มันฝรั่งทอดที่มีเนื้อสัมผัสไม่ดี

2.4 การอบ

การอบเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้ความร้อน เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร เพื่อให้อาหารสุกสามารถบริโภคได้ ความร้อนที่อาหารได้รับจะช่วยทำลายเอนไซม์และจุลินทรีย์ ลดความชื้นในอาหารลง จึงสามารถยืดอายุการเก็บไปได้อีกระยะหนึ่ง เมื่อใส่อาหารในเตาอบ ความชื้นที่ผิวของอาหารจะระเหยออกไปเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ ความชื้นภายในชิ้นอาหารจะเคลื่อนที่ออกมาสู่ผิวนอก ความชื้นที่ผิวจะระเหยออกไปตลอดเวลา อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะขึ้นกับลักษณะธรรมชาติของอาหารและอัตราการให้ความร้อน ช่วงแรกของการให้ความร้อน แนวการระเหยของน้ำจะอยู่ที่ผิวของชิ้นอาหาร เมื่ออบต่อไปอัตราการระเหยของน้ำจากชิ้นอาหารจะมากกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในออกมาด้านนอก จึงทำให้แนวการระเหยของน้ำค่อยๆ เคลื่อนเข้าสู่ด้านในของชิ้นอาหาร ผิวของชิ้นอาหารจะแห้งและอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ (110-240 $^{\circ}$C ) และเกิดเปลือกแข็งขึ้น เนื่องจากการอบจะทำที่ความดันบรรยากาศ และการระเหยของน้ำจากอาหารสามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระตลอดเวลา อุณหภูมิภายในชิ้นอาหารจึงไม่เกินจุดเดือดของน้ำ คือ 100 $^{\circ}$C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนขององค์ประกอบที่ผิวของชิ้นอาหาร ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสดีขึ้นและช่วยรักษาความชื้นในชิ้นอาหารไว้ การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสเนื่องจากการอบจะขึ้นกับลักษณะธรรมชาติของอาหาร คือ ความชื้น ปริมาณไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นโครงสร้าง ได้แก่ เซลลูโลส สตาร์ช และเพคติน และขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบ ลักษณะอาหารอบที่มาจากสตาร์ชทั่วไป ด้านนอกจะเป็นเปลือกแข็ง เนื่องจากสตาร์ชที่ผิวเกิดเจลาติไนซ์และถูกทำให้แห้ง ส่วนภายในเป็นเนื้ออาหารที่มี

ความชื้นสูง การให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว จะช่วยทำให้เกิดเปลือกแข็งรอบชิ้นอาหารอย่างรวดเร็ว ซึ่งเปลือกแข็งนี้ (Fellows, 1990) จะช่วยกักเก็บความชื้นและไขมันไว้ภายใน ป้องกันการถูกทำลายของสารให้กลิ่นรส และวิตามินในอาหาร

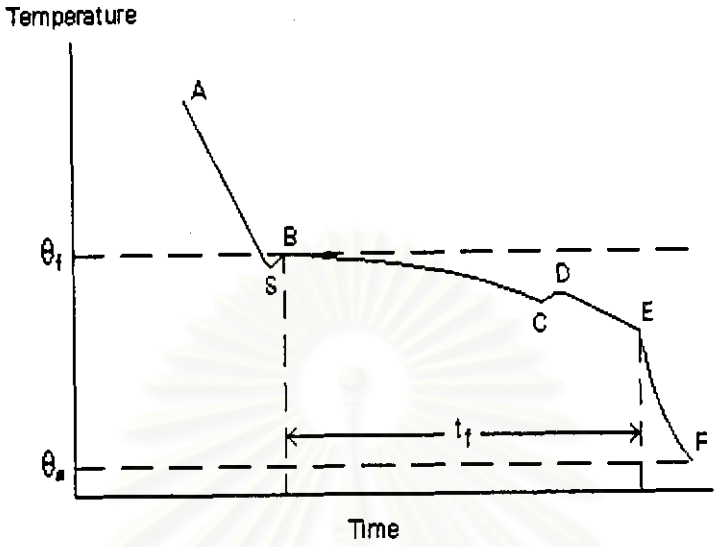
2.5 การแช่เยือกแข็ง

เป็นวิธีที่ใช้เก็บอาหาร ซึ่งสามารถรักษากลิ่นรส สี และคุณค่าทางอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสได้ปานกลางและอาจทำให้เกิดผลเสียกับอาหารได้ ซึ่งความรุนแรงจะขึ้นกับลักษณะของกระบวนการแช่เยือกแข็งและลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Fellows, 1990)
Berne (1994) ได้กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บของอาหารแช่เยือกแข็งที่สำคัญคือ อัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นการทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดที่มีการลดอุณหภูมิช้าที่สุดในชิ้นอาหารหรือจุดศูนย์กลางของอาหารกับเวลา จะได้ดังรูปที่ 4

2.5.1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง

เมื่อลดอุณหภูมิของระบบจนต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของระบบ โมเลกุลของน้ำจะรวมตัวอย่างมีระเบียบเกิดนิวเคลียสเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นจะมีโมเลกุลอื่นไปเกาะที่นิวเคลียส ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นผลึก การแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งเร็ว จะเกิดนิวเคลียสในปริมาณมาก ซึ่งจะโตขึ้นได้ในขนาดที่จำกัดทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กปริมาณมากกระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอทั้งภายในและภายนอกเซล การเคลื่อนที่ของน้ำออกมาภายนอกเซลมีน้อย เซลจะมีรูปร่างไม่แตกต่างจากเซลก่อนแช่เยือกแข็ง คุณภาพของอาหารจะดีกว่าอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ส่วนการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งช้า อุณหภูมิของอาหารจะอยู่ที่อุณหภูมิสมดุลของน้ำและน้ำแข็ง หรือใกล้เคียงอุณหภูมิสมดุลนี้ ทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนน้อย นิวเคลียสนี้จะค่อยๆ โตขึ้น ผลึกน้ำแข็งจึงมีขนาดใหญ่จำนวนน้อยภายนอกเซล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในส่วนที่ยังคงเป็นของเหลวจะเพิ่มขึ้น ความดันไอจะค่อยๆ ลดลง ถ้าผลึกน้ำแข็งภายนอกไม่สามารถเติบโตผ่านผนังเซลเข้าไปภายในได้ ของเหลวภายในเซลจะอยู่ในสภาพเย็นยิ่งยวด (super cooled) ทำให้มีความดันไอสูงกว่าของเหลวภายนอก ความดันต่างที่เกิดขึ้นทำให้น้ำภายในเซลซึมผ่านผนังเซลออกมารวมตัวเป็นผลึกน้ำแข็งภายนอกเซล เมื่อทำการแช่เยือกแข็งต่อไป เซลจะหดตัว ผลึกน้ำแข็งภายนอกจะมีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ คุณภาพของอาหารจะต่ำลง เนื่องจากเซลมีรูปร่างแตกต่างจากเซลก่อนแช่เยือกแข็ง (Fellows, 1990)




**รูปที่ 4** การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชิ้นอาหารระหว่างการแช่เยือกแข็ง (Fellows, 1990)

จากกราฟสามารถแบ่งช่วงกราฟออกเป็น 6 ช่วงคือ

AS อาหารจะถูกลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ($\theta_f$) ซึ่งอุณหภูมินี้สำหรับอาหารจะมีค่าต่ำกว่า 0 °C ที่จุด S น้ำจะยังคงมีสถานะเป็นของเหลว โดยยังไม่มีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ เรียกว่า จุดเย็นยิ่งยวด (super cooling) โดยปกติจะไม่ต่ำกว่า -10 °C

SB อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเยือกแข็ง อาหารจะปลดปล่อยความร้อนเนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง (latent heat of crystallization) ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็ง คือ เกิดจุดเยือกแข็งขึ้น

BC ความร้อนจะถูกดึงออกจากอาหารด้วยอัตราเร็วเท่าเดิม ความร้อนจากการเกิดผลึกน้ำแข็งจะถูกดึงออกไป น้ำในอาหารเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งโดยอุณหภูมิจะคงที่ตลอด จุดเยือกแข็งของอาหารจะลดลงเนื่องจากตัวถูกละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นกราฟลาดเอียงลงเล็กน้อย

CD ตัวถูกละลายตัวหนึ่งจะมีความเข้มข้นอิ่มตัวและเริ่มตกผลึก มีการคายความร้อนจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิยูเทคทิค (eutectic) ของตัวถูกละลายนั้น

DE การตกผลึกของน้ำและตัวถูกละลายจะดำเนินต่อไป เวลารวม ($t_f$) ขึ้นกับอัตราการดึงความร้อนออกจากระบบ

EF อุณหภูมิของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



2.5.2 วิธีการแช่เยือกแข็ง

สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นและตัวกลางให้ความเย็น ดังนี้ (Fennema, Powrie and Marth, 1973; Fellows, 1990)

2.5.2.1 การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (air blast freezing)

นำอาหารที่บรรจุหีบห่อหรือไม่บรรจุมาสัมผัสกับอากาศเย็นที่มีอุณหภูมิ -18 ถึง -40 °C ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน น้ำภายในอาหารจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศเย็นคือ

- การแช่เยือกแข็งแบบอากาศนิ่ง (still air freezing หรือ sharp freezing) อาศัยอากาศเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อย่างช้าๆ หรือไม่มีการหมุนเวียนเลย จึงไม่นิยมใช้เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนออกช้า จึงใช้เวลานาน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้แช่เยือกแข็งคือ -15 ถึง -29 °C (Fennema, Karel and Lund, 1975)

- การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (air blast freezing) อาศัยอากาศเย็นที่เคลื่อนที่ด้วยพัดลมเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ นำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ อากาศเย็นที่ใช้จะมีอุณหภูมิ -18 ถึง -40° C ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศเย็นที่เหมาะสมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของเครื่องมือ อุณหภูมิของอากาศเย็น และความหนาของชิ้นอาหาร ความเร็วของอากาศที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 18 เมตร/วินาที แต่ใช้ 2 ถึง 7 เมตร/วินาที อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งจะขึ้นกับความเร็วลม อุณหภูมิของลมเย็น และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็ง (Fennema et al., 1975)

- การแช่เยือกแข็งในสภาวะอาหารลอยตัว (fluidized-bed freezing) อาศัยอากาศเย็นเป่าผ่านชั้นของตะแกรงที่วางอาหารขึ้นมาด้วยอัตราเร็วเพียงพอที่จะยกให้ชิ้นอาหารลอยตัว อาหารที่จะนำมาแช่เยือกแข็งด้วยวิธีนี้ต้องเป็นของแข็งขนาดเล็ก รูปร่างสม่ำเสมอ เช่น ถั่วลันเตา สตรอเบอรี่ อากาศเย็นที่ใช้จะมีอุณหภูมิในช่วง -25 ถึง -35 °C ความเร็วลม 2-5 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงกว่าการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า การสูญเสียน้ำของอาหารจึงเกิดขึ้นน้อยกว่า (Fennema et al., 1975)

2.5.2.2 การแช่เยือกแข็งโดยใช้แผ่นโลหะเย็น (plate freezing) อาศัยการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของโลหะ โดยนำผลิตภัณฑ์ประกบด้วยแผ่นโลหะเย็นที่มีสารทำความเย็นไหลอยู่ภายใน อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง -10 ถึง -30 °C (Fennema et al., 1975)

2.5.2.3 การแช่เยือกแข็งโดยสัมผัสกับของเหลวที่เป็นตัวทำความเย็น (liquid immersion freezing) โดยนำอาหารที่ต้องการแช่เยือกแข็งที่บรรจุหีบห่อหรือยังไม่บรรจุก็ได้จุ่มลงในของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางทำความเย็นโดยตรงหรือพ่นตัวกลางลงบนอาหาร ของเหลวที่ใช้ต้องไม่เป็นพิษ ไม่แพง ความหนืดต่ำ จุดเยือกแข็งต่ำ มีความสามารถในการนำความร้อนดี ตัวกลางที่นิยมใช้คือ โซเดียมคลอไรด์ กลีเซอรอล โพรไพลีนไกลคอล แต่พบปัญหาด้านการกัดกร่อนอุปกรณ์ที่เป็นโลหะของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่วนโพรไพลีนไกลคอลจะมีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สูญเสียไปกับผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทความร้อนทำได้ไม่สะดวก ราคาแพง จึงทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับวิธีแช่เยือกแข็งวิธีอื่น (Fennema et al., 1975)

2.5.2.4 การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิค (cryogenic freezing) เป็นการแช่เยือกแข็งที่ใช้อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่ำมาก จึงทำให้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งสูง Sebranek (1982) ได้กล่าวถึงการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคว่า เป็นการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -60 °C หรือต่ำกว่า โดยใช้ไนโตรเจนเหลวหรือใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็งเป็นสารทำความเย็น ผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่เยือกแข็งจะบรรจุในภาชนะที่เป็นวัสดุชนิดแผ่นฟิลม์บางหรือไม่บรรจุในภาชนะก็ได้ นำมาสัมผัสกับสารทำความเย็น สารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวหรือของแข็งเป็นก๊าซ ซึ่งต้องใช้ความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นสารทำความเย็นจึงดึงความร้อนออกมาจากอาหาร ทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว สารทำความเย็นที่นิยมใช้ในกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคได้แก่ ไนโตรเจนเหลวและคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในรูปของเหลวและของแข็ง (Fellows, 1990)

2.5.2.4.1 ไนโตรเจนเหลว

ไนโตรเจนเหลวมีจุดเดือดที่ต่ำมากคือ -196 °C (Fellows, 1990) เมื่อนำมาใช้เป็นสารทำความเย็นจะทำให้การแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วสูงมาก และนิยมใช้มากที่สุด (Berne, 1994) ลักษณะการใช้งานแบ่งเป็น 3 แบบคือ การจุ่มอาหารลงในไนโตรเจนเหลว การพ่นไนโตรเจนเหลวลงบนชิ้นอาหาร และการเป่าก๊าซไนโตรเจนที่เย็นจัดลงบนอาหาร โดยทั่วไปนิยมใช้การพ่นไนโตรเจนเหลวลงบนอาหาร

- การจุ่มไนโตรเจนเหลว (liquid immersion freezing) โดยการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในไนโตรเจนเหลว ทำให้มีอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งสูง คือ มากกว่า 1000 °C ต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 5-10 วินาที จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึง -18 °C

- การฉีดพ่นไนโตรเจนเหลวลงบนชิ้นอาหาร (a spray of liquid nitrogen) อาหารจะถูกพ่นด้วยไนโตรเจนเหลวที่มีจุดเดือด -196 °C เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของไนโตรเจนเหลวกลายเป็นก๊าซ

- การเป่าก๊าซไนโตรเจนที่เย็นจัดลงบนอาหาร (circulation of very cold nitrogen vapors over the product) ไนโตรเจนเหลวจะไม่สัมผัสโดยตรงกับอาหาร ไอของไนโตรเจนจะพัดผ่านหมุนเวียนด้วยความเร็วสูงอยู่เหนือผลิตภัณฑ์อาหาร และนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร (Desrosier and Tressler, 1977)

ข้อดีของวิธีการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคด้วยไนโตรเจนเหลว คือ มีความสามารถในการนำความร้อนออกจากอาหารได้มากกว่าเมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Fennema et al., 1975) มีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเนื่องจากไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบหลักของอากาศจึงไม่เป็นพิษ มีความหนาแน่นน้อยกว่าบรรยากาศ ทำให้ระบายออกได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่เกิดการรั่วไหลออกสู่ภายนอก ไม่ทำให้ pH ของผลิตภัณฑ์ต่ำลง อาหารมีการสูญเสียความชื้นน้อยมาก คือน้อยกว่า 1% ลดการสัมผัสของออกซิเจนกับอาหาร คุณภาพอาหารที่ได้ดีมาก เครื่องมือไม่สลับซับซ้อน ไม่ใช้เนื้อที่มาก มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง คือสามารถปรับตามปริมาณการผลิตหรือขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน แต่มีข้อเสียเนื่องจากค่าใช้จ่ายยังค่อนข้างสูงเนื่องจากไนโตรเจนมีราคาแพง

2.5.2.4.2 <u>คาร์บอนไดออกไซด์</u>

การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการให้ความเย็นแก่อาหารทำได้ 2 วิธีคือ พ่นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวลงบนอาหาร โดยใช้แรงดันสูงผ่านหัวฉีด จะเกิดเกล็ดคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$ snow) บนอาหาร และให้ความเย็นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง โดยให้อาหารสัมผัสโดยตรงกับคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง

ข้อเสียของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์คือ carbondioxide consumption จะสูงกว่าไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดกค้างในอาหาร อาจทำให้สมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหารเปลี่ยนไป เช่น เกิด carbonic taste เป็นต้น (Fellows, 1990)

Hoeft, Bates and Ahmed (1973) ศึกษาคุณภาพของมะเขือเทศที่หั่นเป็นแผ่นหนา 6 มิลลิเมตร แช่เยือกแข็งด้วย liquid nitrogen immersion freezing ที่ -195 °C เทียบกับการแช่เยือกแข็งในห้องทำความเย็นที่ใช้ลมเป่าที่อุณหภูมิ -34 °C และมะเขือเทศสด พบว่ามะเขือเทศที่แช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลวจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสดีกว่ามะเขือเทศที่แช่เยือกแข็งแบบช้า

Sebranek et al. (1978) ศึกษาคุณภาพของเนื้อบดก้อน (ground beef patties) ที่แช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคโดยใช้ไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์เหลวในอุโมงค์ที่อุณหภูมิ -74 °C และแช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเป่าที่อุณหภูมิ -29 °C พบว่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการแช่เยือกแข็ง (%freezing shrink, weight loss during freezing) การสูญเสียน้ำหนักหลังการทำให้สุก (% cooking shrink, weight loss during cooking) TBA value ของเนื้อบดก้อนที่ผ่านการแช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเป่ามีค่าสูงกว่าเนื้อบดก้อนที่แช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคโดยใช้ไนโตรเจนเหลว ส่วนคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัส ความชุ่มน้ำ พบว่ามีคะแนนต่ำกว่า และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิคโดยใช้ไนโตรเจนเหลว และคาร์บอนไดออกไซด์เหลวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นความแตกต่างของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน โดยเมื่อแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งต่ำ จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่นอกเซลกล้ามเนื้อมากกว่าภายใน น้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะสูญเสียไปได้ง่ายในระหว่างการละลาย และการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะทำลายเนื้อเยื่อมาก ทำให้ความสามารถในการจับน้ำของเนื้อเยื่อลดลง เมื่อนำผลิตภัณฑ์มาละลายน้ำแข็ง weight loss จึงสูงกว่า

Kock et al. (1995) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็ง potato chips โดยวิธี cryogenic freezing และ air blast freezing ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ โดยนำมันฝรั่งแผ่นมาทอดเพียงเล็กน้อย (partially fried) และนำไปแช่เยือกแข็งแบบ cryogenic ใน batch freezer โดย potato chips จะถูกแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -75 °C จนมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น -18 °C หรือต่ำกว่า ภายในเวลา 5-6 นาที แบบ mechanical โดยใช้ air blast freezer แช่เยือกแข็ง potato chips จนมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น-6 °C หรือต่ำกว่า ในเวลา 2-2.5 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีการเปลี่ยนสภาวะของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ พบว่าอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีผลต่อ yield ที่ได้ ทันทีหลังจากแช่เยือกแข็ง potato chips แบบ cryogenic จะได้ yield สูงกว่า air blast freezing อาจเป็นเพราะในช่วงการแช่เยือกแข็งแบบ cryogenic จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของน้ำ (dehydration losses) น้อยมาก แต่การใช้ air blast freezing จะมีการระเหยของน้ำออกไปมากเนื่องจากการเคลื่อนที่

ของอากาศ หลังจากการเก็บที่ -18 °C เป็นเวลา 4 สัปดาห์ yield ของ potato chips ที่แช่เยือกแข็งแบบ cryogenic จะไม่แตกต่างกับ yield ของ potato chips ที่ได้ทันทีหลังจากการแช่เยือกแข็ง ขณะที่การใช้ air blast freezing ทำให้ yield มีค่าลดลง เพราะการแช่เยือกแข็งอย่างช้าๆ เซลจะถูกทำลายมากกว่า ทำให้น้ำภายในเซลเคลื่อนที่ไปที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาเซลของผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็งแบบ mechanical หรือ air blast freezing จะเห็นว่าเซลจะถูกทำลายมาก เมื่อเทียบกับเซลของผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็งแบบ cryogenic ซึ่งเซลจะไม่ถูกทำลายทั้งหมด

2.6 <u>การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษา</u>

โดยทั่วไปการเก็บผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งจะเก็บที่อุณหภูมิ -18 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโต และการทำงานของเอนไซม์ลดลง การสูญเสียคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาจึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ ดังนี้ (Ciobanu et al., 1976)

2.6.1 การเกิด recrystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นของผลึกน้ำแข็ง เป็นสาเหตุให้คุณภาพของอาหารลดลง การเกิด recrystallization ที่เกิดขึ้นในอาหารที่สำคัญที่สุดเรียกว่า migratory recrystallization โดยจะทำให้ขนาดของผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้น และจำนวนผลึกน้ำแข็งลดลง ทำให้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นโดยการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาไม่คงที่ เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเปิดประตูหรืออากาศร้อนภายนอกเข้าไปในเครื่องแช่เยือกแข็ง พื้นผิวหน้าของอาหารที่ใกล้แหล่งให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกน้ำแข็งบางส่วนจะละลาย ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดเล็กลง ส่วนผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กที่สุด (น้อยกว่า 2 ไมโครเมตร) จะละลายเป็นน้ำ ทำให้มีความดันไอน้ำเพิ่มขึ้น จึงเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่า ทำให้อาหารส่วนที่ใกล้แหล่งให้ความร้อน มีความชื้นลดลง และเมื่ออุณหภูมิลดลงอีกครั้ง จะไม่เกิดนิวเคลียสใหม่ แต่จะรวมตัวกับผลึกน้ำแข็งที่เหลืออยู่ทำให้ขนาดผลึกน้ำแข็งเพิ่มขึ้น (Fellows, 1990)

2.6.2 การสูญเสียน้ำในระหว่างการเก็บรักษา น้ำบริเวณผิวหน้าของอาหารสูญเสียได้โดยการระเหิดของน้ำแข็งหรือการระเหยของน้ำ ทำให้ชิ้นอาหารหดตัวและแข็งขึ้น ทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง การสูญเสียน้ำโดยการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้มีการหักเหของแสงผิดแปลกไปจากบริเวณอื่น สีของชิ้นอาหารจึงผิดแปลกไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า freezer burn สามารถควบคุมได้โดยบรรจุอาหารในภาชนะบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เก็บให้คงที่ ( ± 1.5 °C ) ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการเกิด recrystallization แล้ว ยังช่วยลดการสูญเสียน้ำด้วย เพราะการที่อุณหภูมิแปรปรวนจะช่วยเร่งการระเหิดของน้ำแข็งจากผิวอาหาร และเมื่อบรรจุควรให้ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งนั้นแนบสนิทติดกับภาชนะ (Mallett, 1993)

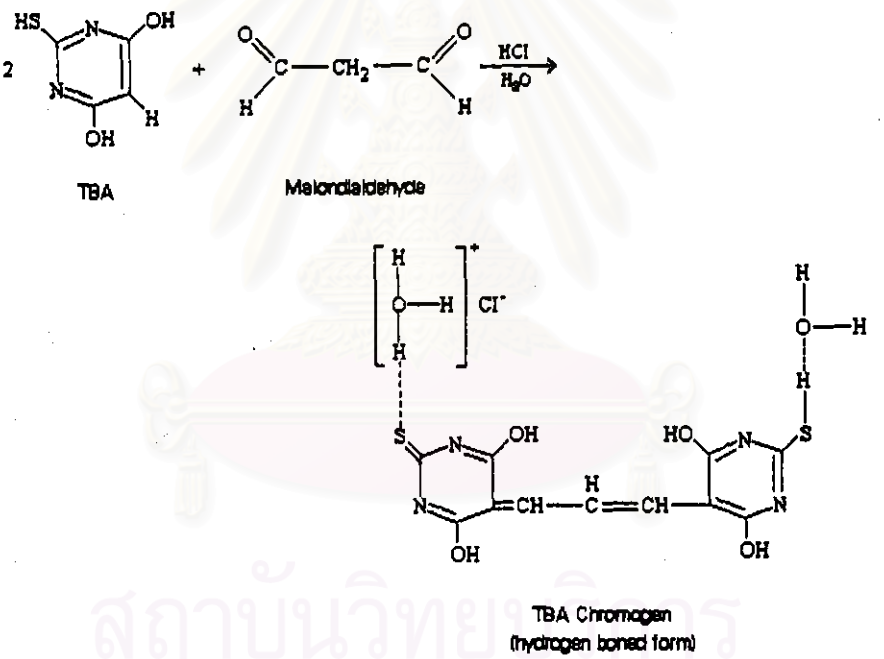
2.6.3 การเกิด oxidation ของไขมันหรือน้ำมัน เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นที่ไม่ดีของอาหาร การเกิดกลิ่นหืนเกิดจากปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ (Nawar, 1996)

- lipolysis เป็นปฏิกิริยาการเกิด hydrolysis ของไขมันโดยมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปลดปล่อยกรดไขมันอิสระออกมา และเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดแบบ deep fat frying เนื่องจากน้ำปริมาณมากจากอาหาร และอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการทอด เมื่อมีกรดไขมัน

อิสระมากขึ้น จะทำให้จุดเกิดควันต่ำลงและความตึงผิวของน้ำมันลดลง ซึ่งจะทำให้คุณภาพของอาหารต่ำลงด้วย

- ปฏิกิริยา autoxidation หรือ oxidative rancidity เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระที่ถูกเร่งด้วยแสง NaCl รวมทั้งอิออนของโลหะ เช่น ทองแดง เหล็ก สารเคมีบางชนิด ทำให้เกิดสารประเภท aldehyde และ ketone ที่เปลี่ยนกลิ่นรสให้เปลี่ยนไป สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 ได้โดยการลดอุณหภูมิในการเก็บรักษา

การตรวจสอบและติดตามการเกิด rancidity นั้น อาจใช้วิธีการ thiobarbituric acid (TBA) test ซึ่ง TBA จะทำปฏิกิริยากับ malondialdehyde ซึ่งเป็น secondary oxidation product ของ aldehyde ที่ไม่อิ่มตัว ให้สารสีแดงดังรูปที่ 5 วัดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นโดยใช้ spectrophotometer ข้อดีของวิธีนี้ คือสามารถใช้กับอาหารได้ทั้งชิ้น (Schultz, 1962)




**รูปที่ 5** proposed TBA reaction (Allen and Hamilton, 1983)

2.7 <u>ภาชนะบรรจุ</u>

การบรรจุผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งทำได้ทั้งก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนการแช่เยือกแข็งมีความสำคัญ เพราะการบรรจุจะไม่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีขึ้น แต่ถ้าบรรจุไม่ดีหรือไม่ถูกต้อง จะทำให้คุณภาพด้อยลง อายุการเก็บสั้นลง และมูลค่าทางเศรษฐกิจลดลง

ภาชนะบรรจุเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ป้องกันผลิตภัณฑ์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ไม่ต้องการ ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของภาชนะบรรจุที่ใช้ การเลือกใช้ภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ภาชนะที่เลือกใช้จะต้องมีสมบัติดังนี้ (Tressler, Vanarsoal, and Copley, 1968 )

- ไม่ปริแตกหรือรั่วระหว่างการละลายน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ เป็นภาชนะที่ยืดหยุ่นได้ (flexible) เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวเมื่อนำมาแช่เยือกแข็ง โดยมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้นถึง 10%ของปริมาตรเดิม

- ทนต่ออุณหภูมิแช่เยือกแข็งและเก็บที่สภาวะแช่เยือกแข็งได้

- สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ไอน้ำ และออกซิเจนได้ดี เนื่องจากถ้าเกิดการสูญเสียน้ำมากและเป็นเวลานาน อาจเกิดภาวะที่เรียกว่า freezer burn ทำให้ลักษณะปรากฏ และคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้อยลง และถ้ามีการซึมผ่านของออกซิเจน จะเร่งการเกิด lipid oxidation ของไขมันทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นหืน โดยปกติอาหารแช่เยือกแข็งจะต้องนำมาละลายก่อนบริโภค บรรจุภัณฑ์จึงควรจะป้องกันการเข้าออกของของเหลวในระหว่างการละลาย

- ไม่เป็นพิษหรือให้สารปนเปื้อนที่เป็นพิษ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอาหารที่บรรจุอยู่ภายใน

- ไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรสชาติที่ผิดปกติแก่ผลิตภัณฑ์ ป้องกันผลิตภัณฑ์จากกลิ่นแปลกปลอมต่างๆ ได้

- ราคาไม่แพง

ถุง Nylon ที่ laminate กับ LLDPE (Nylon/LLDPE) เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่พัฒนาขึ้นโดยใช้วิธี lamination (Tressler et al., 1968) ซึ่งจะใช้พลาสติก 2 ชนิดหรือมากกว่ามารวมกันโดยอาศัยความร้อนและความดัน เนื่องจาก Nylon หรือ Polyamides เป็นพลาสติกที่มีราคาสูงกว่า แต่สามารถป้องกันการผ่านเข้าออกของน้ำและอากาศได้ดี เมื่อนำมา laminate กับ LLDPE ซึ่งราคาถูกกว่า ทำให้ได้บรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านต่างๆ ตามต้องการ และราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับการใช้ Nylon เพียงอย่างเดียว คุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิดที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ (Frank, 1992)

| Plastic material | Density ($kg/m^2$) | Water absorption (24h) (%) | Water vapour transmission rate ($38^{\circ}C$, 90%r.h.) ($g/25\ \mu m/m^2\ d$) | Oxygen transmission rate ($23/25^{\circ}C$, 50%r.h.) ($cm^2/25\ \mu m/m^2\ d$ atoms) |
|---|---|---|---|---|
| LDPE/LLDPE | 900-930 | 0.01 | 16-24 | 7100-7800 |
| Polyamides (Nylon) | 1010-1190 | 0.3-2.8 | 63-340 | 40-1400 |