บทที่ 2
เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ลิ้นจี่ (Lychee)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลิ้นจี่เป็นไม้ผลยืนต้นอยู่ในสกุล Nephelium มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Litchi chinensis* Sonn. และมีชื่อสามัญเป็นภาษาอังกฤษอยู่หลายชื่อ เช่น Litchi, Litchee, Leechee, Laichi และ Lychee แต่ที่นิยมเรียกกันมากคือ Lychee ลิ้นจี่มีถิ่นกำเนิดจากทางตอนใต้ของประเทศจีน ระหว่างเส้นรุ้งที่ 23-27 °N ในพื้นที่ราบเขตกึ่งร้อนของบริเวณมณฑลกวางตุ้ง เสฉวน กวางเจา และยูนาน แล้วแพร่กระจายลงมาทางตอนใต้เข้าสู่ประเทศอินเดีย คาบสมุทรมลายู และไปยังประเทศอื่น ๆ ของโลก สำหรับประเทศไทยมีการสันนิษฐานว่า พันธุ์ลิ้นจี่ถูกนำเข้ามาในช่วงต้น ๆ ของสมัยรัตนโกสินทร์ โดยนำเข้ามาพร้อมกับชาวจีนอพยพ

ลิ้นจี่มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์โดยทั่วไปดังต่อไปนี้

ลำต้น : ลิ้นจี่เป็นไม้ผลชนิดยืนต้น มีความสูงประมาณ 35-40 ฟุต จัดได้ว่าเป็นไม้ผลขนาดใหญ่ ลำต้นแข็งแรง แตกกิ่งก้านสาขากว้างมาก เป็นไม้ผลที่ไม่ผลัดใบ (Evergreen) ทรงพุ่มค่อนข้างทึบ และเป็นทรงที่มีกิ่งค่อนข้างเป็นระเบียบ (Symmetrical) กิ่งแขนงเกิดใกล้ระดับพื้นดิน เปลือกของลำต้นมีสีน้ำตาลอมเทา ผิวเปลือกไม่ขรุขระ มีการเจริญเติบโตช้า แต่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

ใบ : ใบลิ้นจี่จัดเป็นพวกใบประกอบ (Compound leaves) รูปขนนก มีใบตั้งแต่ 2-4 คู่ ใบย่อยแตกออกเป็นคู่ ๆ โดยที่โคนใบและปลายใบค่อนข้างแหลม ใบย่อยอาจจัดเรียงตรงกันข้ามหรือเยื้องกัน การจัดเรียงของใบรวมบนกิ่งเป็นแบบสลับ สีของใบอ่อนมีตั้งแต่สีเขียวซีด สีครีม สีเขียวสด จนกระทั่งสีชมพูปนแดงถึงสีแดงสด ส่วนใบแก่มีสีเขียวเข้มจนถึงดำ ใบค่อนข้างหนา ผิวใบด้านบนมีลักษณะเป็นมันสะท้อนแสง ส่วนผิวใบด้านล่างมีสีเขียวอ่อนและทึบแสง รูปทรงของใบมีตั้งแต่

รูปใบหอก (Lanceolate) หรือรูปใบหอกที่มีด้านกว้างมากขึ้น (Oblong-lanceolate) จนกระทั่งเป็นรูปรี (Elliptic)

ดอก : ลิ้นจี่มีดอกเป็นช่อสีเหลืองอมเขียวอ่อน ช่อดอกอาจจะยาวถึง 1 ฟุต เกิดดอกที่ปลายกิ่งหรือปลายยอด มีกลีบดอกชั้นนอก 4-7 กลีบ คล้ายถ้วยขนาดเล็ก แต่จะไม่มีกลีบดอกข้อนอยู่ชั้นใน เกสรตัวผู้มีอยู่ 5-8 อัน ประกอบด้วยก้านเกสรตัวผู้และอับเรณู ถัดจากนั้นเป็นเกสรตัวเมียออกดอกราว ๆ ต้นเดือนมกราคม แล้วดอกบานติดผลราวปลายเดือนกุมภาพันธ์

ในช่อดอกเดียวกันมีดอกอยู่ 3 ประเภท ซึ่งแบ่งตามระดับการพัฒนาของเกสรของดอกแต่ละชนิด ดังนี้

- ***ดอกตัวผู้ (Type I)*** : มีเกสรตัวผู้อยู่ 4-12 อัน โดยมีส่วนก้าน (Filament) สีขาวค่อนข้างยาว และที่ปลายจะเห็นอับเกสร (Anther) สีเหลือง เมื่อปริแตกออกจะให้ละอองเกสร ส่วนเกสรตัวเมียมีขนาดเล็กและเหี่ยว จึงไม่ผ่านขั้นตอนการผสมเกสร

- ***ดอกกะเทย (Type II)*** : ทำหน้าที่เป็นดอกตัวเมีย ดอกประเภทนี้มีส่วนของเกสรตัวเมีย (Pistil) ที่สมบูรณ์เจริญขึ้นมาชัดเจน ที่ส่วนโคนมองเห็นรังไข่ (Ovary) ที่ประกอบด้วย 2 carpel ต่อเชื่อมกับส่วนก้านเกสรตัวเมียจนถึงส่วนปลายยอดที่แยกออกเป็น 2 แฉก เกสรตัวผู้มีก้านสั้นจำนวน 5-8 อัน ล้อมรอบส่วนของรังไข่ โดยปกติจะไม่มีการปริแตกของอับเกสรเพื่อปล่อยละอองเกสร

- ***ดอกกะเทย (Type III)*** : ทำหน้าที่เป็นดอกตัวผู้ ดอกชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับ Type II โดยที่เกสรตัวเมียอาจมีขนาดเท่ากันหรือเล็กกว่า แต่บริเวณส่วนปลายยอดไม่มีการปริแยกออกเป็น 2 แฉก ก้านเกสรตัวผู้มีลักษณะยาวเช่นเดียวกับดอก Type I อับเกสรมีการปริแตกและสามารถปลดปล่อยละอองเกสรตัวผู้ได้

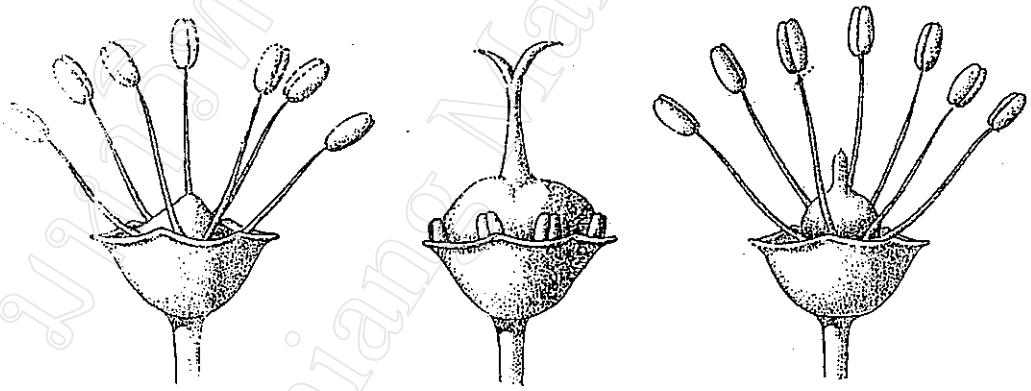
ในช่อดอกเดียวกันการเกิดดอกทั้ง 3 ชนิดนี้ จะไล่เรียงกันเป็นลำดับ และดอกทั้ง 3 ชนิดนี้จะบานไม่พร้อมกัน กล่าวคือ ดอกตัวผู้จะบานก่อน จากนั้นดอกกะเทยที่ทำหน้าที่เป็นดอกตัวเมียจะบานตามมา ส่วนดอกที่บานสุดท้ายคือ ดอกกะเทยที่ทำหน้าที่เป็นดอกตัวผู้ ระยะการบานของดอกตัวผู้จะนานกว่าดอกตัวเมีย

ผล : ลิ้นจี่ออกผลเป็นช่อ ๆ โดยในแต่ละช่ออาจจะมีผลตั้งแต่ 2-30 ผล รูปร่างของผลมีอยู่หลายแบบ เช่น รูปไข่ รูปหัวใจ หรือมีลักษณะกลม ส่วนจะเป็นไปในลักษณะใดนั้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของลิ้นจี่ ผลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1-11/2 นิ้ว ส่วนเปลือกผล (Pericarp) เจริญ

มาจากผนังรังไข่ทั้งหมด ผิวเปลือกของผลขรุขระ เป็นหนามเล็ก ๆ เมื่อผลยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียวแต่เมื่อแก่ก็จะเปลี่ยนสีชมพูปนขาว หรือชมพูปนแดง

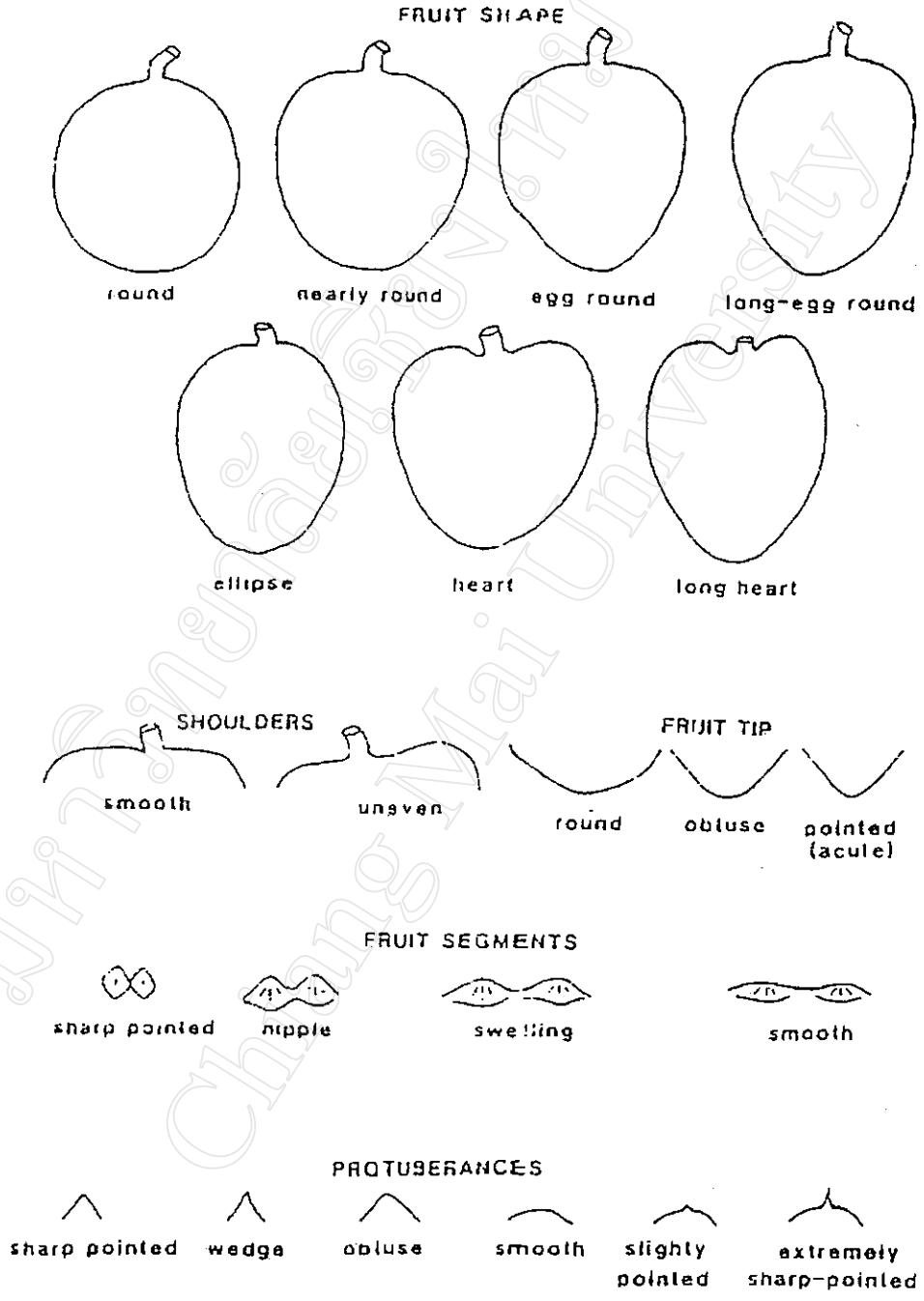
เนื้อ : ส่วนเนื้อเรียกว่า Aril เกิดมาจากเนื้อเยื่อเจริญของก้านเมล็ดและเยื่อหุ้มรังไข่ชั้นนอก เนื้อสีขาวขุ่น หรือขาวนวล มีทั้งเนื้อหนาและบาง เนื้อล่อนไม่ติดเมล็ด ฉ่ำน้ำ รสชาติขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการเพาะปลูก มีทั้งรสหวาน หวานอมเปรี้ยว มีกลิ่นหอม

เมล็ด : เมล็ดมีสีน้ำตาลดำเป็นมัน มีรูปร่างกลมหรือรี ในลิ้นจี่ผลหนึ่งจะมีเพียงเมล็ดเดียวเท่านั้น แต่มีบางสายพันธุ์ที่มีเมล็ดลีบ โดยเฉพาะลิ้นจี่พันธุ์ค่อม ขนาดเมล็ดอาจมีน้ำหนักระหว่าง 10-35 กรัม หรือประมาณร้อยละ 10-18 ของน้ำหนักผลทั้งหมด



Type I	ดอกตัวผู้
Type II	ดอกกระเทยที่ทำหน้าที่เป็นดอกตัวเมีย
Type III	ดอกกระเทยที่ทำหน้าที่เป็นดอกตัวผู้

รูปที่ 2.1 ดอกลิ้นจี่ทั้ง 3 ประเภท



รูปที่ 2.2 ลักษณะต่าง ๆ ของรูปทรงผล ไหล่ผล ปลายผล ตาผล และหนามของลิ้นจี่

พันธุ์ลิ้นจี่

พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งเพาะปลูกดังนี้

พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในภาคกลาง

พันธุ์ค่อม หรือ พันธุ์หอมลำเจียก : เป็นลิ้นจี่ลำต้นเตี้ย ออกดอกติดผลง่าย ให้ผลดก ใบมีขนาดเล็ก ใบด้านบนเรียบมันมีสีเขียวเข้ม ด้านล่างของใบมีสีนวล ก้านใบสีน้ำตาลอมแดง ที่ขอบใบโดยรอบเป็นคลื่น ปลายใบแหลม มีขนาดผลค่อนข้างใหญ่ ลักษณะผลเป็นรูปหัวใจ ไหล่ข้างหนึ่งของผลยกขึ้น มีหนามเล็กสั้นและแหลม มีแฉกเห็นชัดเจน ระหว่างหนามมีสีเขียวอมเหลือง สีของเปลือกเมื่อแก่จะมีสีแดงอมชมพูแก่ถึงสีแดงเข้ม เนื้อผลฉ่ำน้ำ รสหวานอมฝาดเล็กน้อย เมล็ดทรงยาว ขนาดของผล กว้างประมาณ 3.3 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.5 เซนติเมตร

พันธุ์กะโหลกใบยาว : ใบย่อยยาวรี ตรงกลางใบค่อนข้างพองออก ที่ปลายใบแหลม ขอบใบและแผ่นใบเรียบ ใบมีขนาดใหญ่ ใบย่อยส่วนใหญ่จัดเรียงแบบตรงข้ามกัน ใบมีสีเขียวปนน้ำตาลเล็กน้อยและเป็นมัน ก้านใบมีสีน้ำตาล จำนวนใบย่อยในใบรวมประมาณ 3-7 ใบ ลักษณะผลมีขนาดใหญ่ ทรงกลม ที่ฐานและปลายผลจะมน มีหนามห่าง สีเปลือกมีสีแดงคล้ำ ระหว่างหนามมีรอยสีน้ำตาลปรากฏเป็นทางลาย ๆ จากศูนย์กลางหนาม เนื้อหนาใกล้เคียงกับพันธุ์ค่อม รสชาติดีมีรสหวานอมเปรี้ยว เมล็ดไม่ใหญ่ ออกผลง่ายและสม่ำเสมอ

พันธุ์สาแหรกทอง : ใบมีลักษณะยาวรีและเรียว ปลายใบค่อนข้างแหลม แผ่นใบเรียบ ขอบใบบิดเบี้ยวเป็นคลื่น ใบมีสีเขียวอ่อน ก้านใบสีน้ำตาลปนแดง ผลกลมแบนเล็กน้อย ขนาดของผลกว้างประมาณ 3.23 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.20 เซนติเมตร ด้านบนของผลขยายออกมีบางผลคล้ายรูปหัวใจ ส่วนไหล่ของผลยกขึ้นเล็กน้อย ปลายผลมน เปลือกผลมีสีชมพูอมเหลือง มีร่องระหว่างหนามเป็นทรงยาว ด้านข้างของผลมองเห็นคล้ายสาแหรก หนามเล็กสั้นไม่ถี่และชิดกันมากนัก เนื้อของผลมีสีขาวขุ่นและหนา ฉ่ำน้ำ รสชาติหวาน กลิ่นหอม

พันธุ์กระโถนท้องพระโรง : ผลมีขนาดใหญ่ กว้างประมาณ 3.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.8 เซนติเมตร ทรงผลกลมคล้ายรูปหัวใจ ฐานผลราบ ปลายผลมน หนามมีขนาดเล็กและห่าง สีของเปลือกมีสีแดงคล้ำ รอบฐานหนามมีรอยสีน้ำตาลเป็นแฉก ๆ เนื้อผลมีสีขาวขุ่น ฉ่ำน้ำ รสหวานอมเปรี้ยว ฝาดเล็กน้อย เมล็ดโต

นอกจากสายพันธุ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีพันธุ์อื่น ๆ อีกหลายพันธุ์ที่นิยมปลูกในภาคกลาง เช่น พันธุ์ไทยธรรมดา พันธุ์ไทยใหญ่ พันธุ์เขียวหวาน พันธุ์กะโหลกใบไหม้ พันธุ์กะโหลกใบเตา พันธุ์ช่อระกำ พันธุ์สำเภาแก้ว และพันธุ์แห้ว แต่พันธุ์เหล่านี้ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก

พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในภาคเหนือ

พันธุ์ฮงฮวย : เป็นพันธุ์ที่มีการเพาะปลูกกันมากที่สุดทางภาคเหนือ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะเด่น คือ สามารถติดผลได้เกือบทุกปี โตเร็ว ลักษณะประจำพันธุ์คือ มีทรงพุ่มกว้าง แตกกิ่งห่าง ผิวเปลือกของต้นมีสีหม่นตกกระสีขาว มีเปลือกบาง ใบใหญ่ยาวรี โคนใบกว้าง ริมใบเป็นคลื่น ปลายใบไม่แหลมมากนัก แตกยอดอ่อนมีสีเขียวอมแดงชุดละ 6-8 ใบ ทั้งช่อจะมีใบประมาณ 150 ใบ มีก้านดอกยาวประมาณ 20-30 เซนติเมตร ดอกจะบานประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์ ดอกที่ยังไม่บานจะมีสีดำปนน้ำตาลคล้ายเขม่า ช่วงเวลาแตกช่อดอกถึงดอกบานใช้เวลาประมาณ 2 เดือน ดอกที่บานครั้งแรกจะเป็นดอกตัวผู้ บาน 8 ช่วง ๆ ละ 3 วัน ผลจะแก่ประมาณกลางเดือนถึงสิ้นเดือนพฤษภาคม ผลมีสีแดงอมชมพู รูปทรงของผลมีลักษณะกลมรี รูปไข่ ไหล่กว้าง ขนาดผลโตปานกลาง ขนาดผลกว้างประมาณ 3.44 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.83 เซนติเมตร มีน้ำหนักต่อผลประมาณ 25-35 กรัม หนามผลห่าง เมื่อแก่จัดหนามจะเป็นตุ่มสั้นกว่าผลที่ยังไม่แก่ เปลือกของผลมีสีเหลืองแกมชมพูหรือแดง เนื้อมีสีขาวขุ่นและหนา รสหวานอมเปรี้ยว เนื้อตรงบริเวณส่วนที่ติดกับเมล็ดมีลักษณะเป็นเยื่อหุ้มสีน้ำตาลเป็นเส้น มีกลิ่นหอม เมล็ดมีขนาดใหญ่และยาว

พันธุ์โอเฮียะ : เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกรองลงมาจากพันธุ์ฮงฮวย เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีอากาศหนาว ลักษณะประจำพันธุ์ คือ มีทรงพุ่มเตี้ยจนเกือบกลม แผ่กิ่งก้านสาขากว้าง กิ่งเปราะและหักง่าย ใบมีขนาดยาวปานกลาง รูปทรงคล้ายขนมเปียกปูน ปลายใบแหลมเล็ก ส่วนหน้าของใบเป็นมันมีสีเขียวเข้มจนเกือบเป็นสีดำ ใบอ่อนที่แตกยอดใหม่เป็นสีแดงปนน้ำตาลหรือสีแดงเข้ม การแตกของใบอ่อนจะเกิดเป็นครั้งแรก โดยเริ่มหลังจากเก็บเกี่ยวผลไปได้ประมาณ 1 เดือน ก่อนเข้าฤดูฝน และครั้งที่ 2-3 ใบอ่อนจะเกิดขึ้นพร้อมกับตาดอกในช่วงฤดูหนาว ดอกมีขนาดยาวปานกลาง มักมีการออกดอกประมาณกลางเดือนมกราคม เมื่อดอกตูมช่อดอกจะเป็นสีดำ ระยะ

เวลาจากดอกตูมถึงดอกบานประมาณ 1 เดือน จะเห็นได้ว่าลิ้นจี่พันธุ์นี้สามารถออกดอกได้มากเต็มต้น แต่ติดผลได้น้อย ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เป็นเพราะมีดอกเกสรตัวเมียน้อยและมีช่วงการบานของดอกสั้น ผลจะเริ่มแก่ประมาณปลายเดือนพฤษภาคมและมีขนาดโตปานกลาง รูปทรงของผลคล้ายรูปหัวใจ มีขนาดกว้างประมาณ 3.52 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.78 เซนติเมตร น้ำหนักต่อผลประมาณ 20-28 กรัม เปลือกมีสีแดงเข้มและหนา เนื้อของผลมีสีขาวขุ่น นิ่ม และฉ่ำน้ำ มีกลิ่นหอม รสชาติดี

พันธุ์จักรพรรดิ์ : ผลมีขนาดใหญ่มาก ออกดอกประมาณเดือนมกราคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ผลจะเริ่มแก่ประมาณปลายเดือนมิถุนายนถึงเดือนกรกฎาคม รูปทรงของผลคล้ายรูปหัวใจ ปลายผลมน มีขนาดกว้างประมาณ 4.48 เซนติเมตร ยาวประมาณ 4.24 เซนติเมตร น้ำหนักต่อผลประมาณ 40-50 กรัม มีผิวเปลือกหยาบ ขรุขระ และหนา เมล็ดมีขนาดใหญ่

พันธุ์กวางเจา : ลักษณะประจำพันธุ์คือ มีทรงพุ่มกว้าง ใบเล็กยาว เจริญเติบโตช้ากว่าพันธุ์อื่น ๆ ออกดอกประมาณเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม ผลจะแก่ประมาณต้นเดือนมิถุนายน รูปทรงของผลกลม มีหนามไม่แหลม สีของเปลือกเมื่อแก่จัดจะมีสีแดง มีน้ำหนักต่อผลประมาณ 35-40 กรัม

พันธุ์กิมเจง : ลักษณะประจำพันธุ์คือ มีทรงพุ่มเตี้ยเกือบแบน มีกิ่งก้านสาขาสั้น แต่กิ่งค่อนข้างเหนียวไม่เปราะ เปลือกของลำต้นมีสีน้ำตาล เจริญเติบโตช้า ใบมีสีเขียวเข้ม ขอบใบด้านข้างมักงอ ปลายใบแหลม แตกยอดอ่อนเป็นสีแดงชีดหรือสีชมพู แตกใบอ่อนอย่างน้อยปีละ 2 ครั้ง ดอกมีขนาดเล็ก ก้านดอกสั้น ช่อดอกมีสีเหลือง ผลจะเริ่มแก่ประมาณกลางเดือนมิถุนายน ลักษณะผลเป็นรูปหัวใจ เปลือกมีสีแดง ขนาดผลค่อนข้างเล็ก มีขนาดผลกว้างประมาณ 3.18 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.12 เซนติเมตร น้ำหนักต่อผลประมาณ 20-25 กรัม เนื้อนิ่ม มีสีขาวขุ่น เมล็ดลีบและมีสีน้ำตาลอ่อน

นอกจากนี้ในแหล่งปลูกลิ้นจี่ทางภาคเหนือยังมีพันธุ์อื่น ๆ อีก เช่น พันธุ์สีรามัญ พันธุ์เปลือกหนา พันธุ์ลูกลาย พันธุ์ฮ่องกง พันธุ์เขียวหวาน พันธุ์กิมจี้ และ พันธุ์บริวสเตอร์ เป็นต้น

ลักษณะและองค์ประกอบโดยทั่วไปของลิ้นจี่

ลิ้นจี่เป็นผลไม้ประเภท Non-climacteric เมื่อเก็บเกี่ยวจากต้นแล้ว จะไม่มีกระบวนการสุกเกิดขึ้น ซึ่งกระบวนการสุกของผลไม้ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมีหลายอย่าง เช่น การหายใจ การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของผนังเซลล์ การอ่อนตัวของเนื้อเยื่อ การเปลี่ยนแปลงสี การเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ เอนไซม์ และวิตามิน รวมทั้งองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ภายในเซลล์ เป็นต้น ดังนั้นผลลิ้นจี่จึงไม่ค่อยพบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมีภายหลังจากการเก็บเกี่ยวดังกล่าวข้างต้นมากนัก

องค์ประกอบทางเคมีของลิ้นจี่

ปริมาณน้ำ (Water content) : น้ำเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของผลไม้ โดยส่วนใหญ่ผลไม้จะมีปริมาณน้ำร้อยละ 75-95 โดยน้ำหนัก น้ำที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์นั้น จะทำให้เซลล์เกิดแรงเต่ง (Turgor pressure) และเป็นตัวทำละลายของสารประกอบภายในเซลล์ ผลไม้แต่ละชนิดมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบมากน้อยแตกต่างกัน จึงทำให้สมบัติของผลไม้ด้านความหนาแน่น จุดเยือกแข็ง และความร้อนจำเพาะแตกต่างกันไปด้วย

ลิ้นจี่มีปริมาณน้ำร้อยละ 77-83 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของลิ้นจี่ด้วย Mathew and Pushpa (1964) ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำในลิ้นจี่ที่เพาะปลูกได้ในประเทศอินเดีย จำนวน 6 สายพันธุ์ พบว่า ลิ้นจี่ทั้ง 6 สายพันธุ์มีปริมาณน้ำโดยเฉลี่ยร้อยละ 83-87

Wenkam and Miller (1965) รายงานว่า ลิ้นจี่สายพันธุ์ Brewster และสายพันธุ์ Kwai Mi มีปริมาณน้ำร้อยละ 81 และ 77.6 ตามลำดับ

ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่มีการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วภายหลังการเก็บเกี่ยว การสูญเสียน้ำเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สีของเปลือกลิ้นจี่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เพราะการสูญเสียน้ำทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenolase เพิ่มขึ้นและชักนำให้เกิดสีน้ำตาลในสภาพที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงทำให้ผลลิ้นจี่มีอายุการเก็บรักษาและอายุการจำหน่ายในลักษณะผลสดลดลง

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) : สารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่พบในลิ้นจี่ มีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส สารประกอบเพคติน น้ำตาล และกรดอินทรีย์ เป็นต้น

เซลลูโลส (Cellulose) : เป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากบริเวณผนังเซลล์ของพืช โดยรวมตัวอยู่กับพวกไซแลน (Xylan) และลิกนิน (Lignin) ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่เซลล์ เซลล์พืชแต่ละชนิด จะมีปริมาณเซลลูโลสต่างกัน โมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส (D-Glucose) มากกว่า 1,000 หน่วย มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลัยโคไซด์ที่ตำแหน่ง β - 1,4 Linkages ในธรรมชาติเซลลูโลสจะอยู่รวมกันเป็นจำนวนมาก มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) ไม่ละลายน้ำหรือในตัวทำละลาย ทนต่อความร้อนได้สูง

เฮมิ-เซลลูโลส (Hemi-Cellulose) : เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ พบมากในบริเวณผนังเซลล์ของพืชเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยรวมอยู่กับลิกนินและเซลลูโลส ทำหน้าที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์ โครงสร้างของเฮมิ-เซลลูโลสจะคล้ายคลึงกับเซลลูโลส ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลตั้งแต่ 2-4 ชนิดขึ้นไป มีทั้งน้ำตาลเฮกโซส และเพนโตส เช่น น้ำตาลไซโลส อะราบิโนส กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส เป็นต้น เฮมิ-เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ สลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่เป็นด่าง ดังนั้นการอ่อนนิ่มของผักและผลไม้เมื่อถูกต้มในน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องจากเกิดการสลายตัวของเฮมิ-เซลลูโลส

สารประกอบเพคติน (Pectic substances) : เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่พบมากบริเวณ Middle lamella ของผนังเซลล์พืช โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกัน และช่วยเสริมความแข็งแรงของพืช สารประกอบเพคตินเป็นโพลีเมอร์สายยาวของกรดกาแลคตูโรนิค (D-galacturonic acid) ต่อกันด้วยพันธะกลัยโคไซด์ที่ตำแหน่ง β-1,4 Linkages โดยหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ในโมเลกุลของกรดกาแลคตูโรนิคบางส่วนจะถูก Esterified ด้วยหมู่เมธิล ($-CH_3$) และมีบางส่วนยังคงเหลือเป็นหมู่คาร์บอกซิลอิสระ นอกจากนั้นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่คาร์บอนตำแหน่ง 2 และ 3 อาจถูก Acetylated ได้ สมบัติในการละลายน้ำของสารประกอบเพคติน จะขึ้นอยู่กับจำนวนของกลุ่มเมธิลที่มีอยู่ในโครงสร้าง และความยาวของโมเลกุลสารประกอบเพคตินนั้น ๆ เป็นสำคัญ ถ้าสารประกอบเพคตินมีจำนวนกลุ่มเมธิลอยู่น้อยและมีโมเลกุลสั้นก็จะละลายน้ำได้ดีขึ้น ในโมเลกุลของสารประกอบเพคตินนอกจากกรดกาแลค-ตูโรนิคแล้ว โครงสร้างของสารประกอบเพคตินยังประกอบด้วยน้ำตาลอีกหลายชนิด เช่น น้ำตาลไซโลส กาแลคโตส อะราบิโนส และแรมโนส โดยโมเลกุลของน้ำตาลจะเกาะอยู่เป็นสายแขนง น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบเพคตินผันแปรอยู่ในช่วงประมาณ 10,000 ถึง 400,000 และมีกรดกาแลคตูโรนิคประมาณ 300-800 หน่วยต่อโมเลกุลของสารประกอบเพคติน

สารประกอบเพคติน เป็นกลุ่มของสารประกอบเชิงซ้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามสมบัติทางกายภาพ ดังนี้คือ

โปรโตเพคติน : เป็นสารประกอบเพคตินที่ไม่ละลายน้ำ พบมากในผลไม้ดิบ มีหมู่เมธอกซิล อยู่ในโมเลกุลประมาณร้อยละ 9-12 ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้โปรโตเพคตินจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์หรือด่าง จะทำให้หมู่เมธิลถูกแยกออกไปบางส่วน ได้เป็นหมู่คาร์บอกซิลอิสระ เรียกว่า กรดเพคตินิค (Pectinic acid) เป็นสารประกอบเพคตินที่ละลายน้ำได้

กรดเพคตินิค : เป็นสารประกอบเพคติน หรือโพลีเมอร์ของกรดกาแลคตูโรนิค ที่มีหมู่เมธิลเอสเตอร์เหลืออยู่บางส่วน และเมื่อถูกไฮโดรไลซ์เอาหมู่เมธิลออกจนหมด จะได้เป็นกรดเพคติค (Pectic acid) สามารถละลายน้ำได้และเกิดเป็นสารละลายคอลลอยด์ กรดกาแลคตูโรนิคที่เป็นส่วนประกอบของกรดเพคตินิคนี้ จะมีจำนวนกลุ่มเมธิลอยู่น้อยกว่าโปรโตเพคติน จึงทำให้กรดเพคตินิคละลายน้ำได้มากกว่าโปรโตเพคติน

เมื่อผลไม้เริ่มสุก เอนไซม์ในกลุ่มเพคทิเนสจะไฮโดรไลซ์กรดเพคตินิคให้เปลี่ยนไปเป็นกรดเพคติคต่อไป

กรดเพคติค : เป็นสารประกอบเพคติน หรือโพลีเมอร์ของกรดกาแลคตูโรนิค ที่ไม่มีหมู่เมธิลเอสเตอร์อยู่ในโมเลกุล หรือมีอยู่น้อยมาก เป็นสารประกอบเพคตินที่ละลายน้ำได้ดี

การเปลี่ยนแปลงของโปรโตเพคตินในผลไม้ดิบไปเป็นกรดเพคตินิคในผลไม้ห่าม และเป็นกรดเพคติคในผลไม้สุกตามลำดับนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพคตินจากสภาพที่ไม่ละลายน้ำไปเป็นสภาพที่ละลายน้ำได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อผลไม้เจริญเข้าสู่ระยะแก่จัดจนถึงสุกจะเกิดการอ่อนตัวของเนื้อเยื่อมากขึ้นตามลำดับ

Fong (1966) รายงานว่า ลิ้นจี่มีปริมาณเพคตินร้อยละ 0.424 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับผลไม้ชนิดอื่น ๆ

น้ำตาล (Sugar) : น้ำตาลที่พบในผลไม้ตามธรรมชาติมีหลายชนิด มีทั้งน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และน้ำตาลโมเลกุลคู่ น้ำตาลที่พบมากในผลไม้โดยทั่วไปนั้น ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลซูโครส

น้ำตาลกลูโคส (Glucose) : เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในผลไม้ทุกชนิด ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็น น้ำตาลผลไม้ (Fruit sugar) โดยธรรมชาตินำตาลกลูโคสถูกสังเคราะห์ขึ้นได้เองในผลไม้โดยตรง หรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของแป้งหรือน้ำตาลซูโครสที่มีอยู่โดยปฏิกิริยา

ของเอนไซม์ในผลไม้นั้น ๆ น้ำตาลกลูโคสมีสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ดังนั้นในระหว่างกระบวนการแปรรูป น้ำตาลกลูโคสจะมีส่วนช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้บ้าง

น้ำตาลฟรุกโตส (Fructose) : เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในผลไม้ทุกชนิด จึงถูกเรียกว่าเป็นน้ำตาลผลไม้เช่นเดียวกับน้ำตาลกลูโคส และมีสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ดังนั้นจึงช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ด้วยเช่นกัน น้ำตาลฟรุกโตสมีทั้ง D- และ L-form แต่ D-form เท่านั้นที่สามารถถูกเมตาบอไลซ์ได้ในร่างกาย และเป็นน้ำตาลคีโตสชนิดเดียวที่มีความสำคัญมากในอาหาร

น้ำตาลซูโครส (Sucrose) : เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ในหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส อย่างละหนึ่งโมเลกุล น้ำตาลซูโครสสามารถเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตสได้ โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่มีอยู่ในผลไม้ หรือโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด

ลิ้นจี่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรูปของน้ำตาลประมาณร้อยละ 12-24 โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาลซูโครส และน้ำตาลรีดิวซ์ ลิ้นจี่ที่เพาะปลูกได้ในประเทศอินเดีย มีปริมาณน้ำตาลโดยเฉลี่ยร้อยละ 10-13 ในขณะที่ลิ้นจี่ที่เพาะปลูกได้ในรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณน้ำตาลโดยเฉลี่ยร้อยละ 12.9-14.12

Miller *et al.*, (1957) รายงานว่า ลิ้นจี่สายพันธุ์ Kwai Mi มีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 20.6 ส่วนสายพันธุ์ Hak Ip มีปริมาณน้ำตาลเพียงร้อยละ 11.8

Chan *et al.*, (1975) พบว่า ลิ้นจี่สายพันธุ์ Brewster ที่เพาะปลูกอยู่ในรัฐฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 16.7 โดยมีปริมาณน้ำตาลซูโครสร้อยละ 8.562 น้ำตาลกลูโคสร้อยละ 5.036 และน้ำตาลฟรุกโตสร้อยละ 3.154

Puall *et al.*, (1984) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total soluble solids) ในผลลิ้นจี่ ส่วนใหญ่เกิดจากเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส

กรดอินทรีย์ (Organic acid) : ในผลไม้มีกรดอินทรีย์อยู่หลายชนิด ซึ่งเป็นกรดที่อยู่ในกระบวนการเมตาบอลิสม์ โดยถูกสร้างขึ้นระหว่างขบวนการหายใจภายในเซลล์โดยการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์จะสะสมอยู่ในส่วนที่เรียกว่า Cell sap แต่ในผลไม้บางชนิดจะพบกรดอินทรีย์อยู่ร่วมกับแอนโธไซยานิน กรดอินทรีย์ที่พบในผลไม้มีทั้งกรดที่ไม่ระเหย (Non-Volatile

acid) เช่น กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) กรดซิตริก (Citric acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดออกซาลิก (Oxalic acid) เป็นต้น และกรดที่ระเหยได้ (Volatile acid) เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดฟูมาริก (Fumaric acid) กรดพรอพิออนิก (propionic acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) เป็นต้น ซึ่งกรดประเภทนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อกลิ่นของผลไม้

ในลิ้นจี่จะพบกรดอินทรีย์ในรูปของกรดมาลิก มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริก ซึ่งปริมาณของกรดอินทรีย์ที่พบนั้น มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับฤดูกาลเพาะปลูก สภาพดินที่ทำการเพาะปลูก ตลอดจนภูมิอากาศในระหว่างการเพาะปลูก พันธุ์ และความสุก-ดิบของผลไม้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในผลลิ้นจี่

ชนิดของกรดอินทรีย์	ปริมาณของ Methyl ester (ml equivalent /100 g)	ปริมาณอนุพันธ์ของ Trimethylsylil (ml equivalent /100 g)
กรดมาลิก	4.16	3.57
กรดซิตริก	0.52	0.04
กรดซักซินิก	0.04	0.25
กรดฟอสฟอริก	-	0.20
กรดกลูตามิก	-	0.04
กรดมาโลนิก	0.02	-
กรดแลคติก	0.02	-
กรดเลวูลินิก	0.10	น้อยมาก
วิตามินซี	0.28	0.28
กรดที่ระเหยได้	0.13	0.13
ปริมาณกรดทั้งหมด	5.18	4.51
ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรทได้	4.60	4.60

ที่มา : Kadam *et al.*, 1995

Chan and Kwok (1974) ศึกษาปริมาณกรดอินทรีย์ในลิ้นจี่สายพันธุ์ Brewster พบว่า ลิ้นจี่พันธุ์ดังกล่าว มีปริมาณกรดอินทรีย์อยู่ประมาณร้อยละ 0.2-0.6 โดยร้อยละ 80 ของปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในลิ้นจี่ เป็นกรดมาลิก ส่วนอีกร้อยละ 20 เป็นกรดซิตริก กรดซักซินิก กรดเลวูลินิก กรดฟอสฟอริค กรดกลูตามิก กรดมาโลนิก และกรดแลคติก

Singh and Singh (1954) รายงานว่า ลิ้นจี่ 12 สายพันธุ์ที่เพาะปลูกได้ในประเทศอินเดีย มีปริมาณกรดอินทรีย์อยู่ร้อยละ 0.20-0.64

โปรตีน (Protein) : ผลไม้ส่วนใหญ่จะมีปริมาณโปรตีนอยู่น้อยมาก โดยทั่วไปจะมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยอยู่น้อยกว่าร้อยละ 2 โปรตีนในผลไม้แม้จะมีปริมาณน้อยแต่ก็มีความสำคัญต่อผลไม้โดยตรง เพราะมีหน้าที่ในการรักษารูปทรงและการจัดเรียงตัวภายในเซลล์ นอกจากนี้โปรตีนที่มีในผลไม้ ส่วนมากจะเป็นโปรตีนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบของเอนไซม์ในเซลล์

มีรายงานการวิจัยหลายฉบับที่กล่าวถึงลิ้นจี่มีปริมาณโปรตีนอยู่น้อยมาก โดยมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 0.8-1.5

ไขมัน (Lipid) : โดยทั่วไปผลไม้จะมีปริมาณไขมันอยู่น้อยมาก ซึ่งปริมาณไขมันที่พบในผลไม้โดยเฉลี่ยจะมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 1 ไขมันในผลไม้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ และไขมันเคลือบผิว

ในตารางแสดงองค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการของลิ้นจี่ Kadam *et al.*, (1995) แสดงปริมาณไขมันที่พบในผลลิ้นจี่ ร้อยละ 0.1 ส่วน Souci *et al.*, (1994) แสดงปริมาณไขมันที่พบในผลลิ้นจี่ ร้อยละ 0.3 โดยปริมาณไขมันที่พบในผลลิ้นจี่นั้นจะมีปริมาณแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์

วิตามิน และแร่ธาตุ (Vitamin and Mineral) : ผลไม้เป็นแหล่งที่สำคัญของวิตามิน และเกลือแร่ ตัวอย่างของวิตามินที่พบในผลไม้ ได้แก่ วิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง วิตามินซี โฟลาซิน และกรดแพนโททีนิก เป็นต้น

วิตามินบีหนึ่ง : วิตามินบีหนึ่ง หรือไธอะมีน เป็นวิตามินที่มีหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ในกระบวนการเมตาบอลิสม์ของคาร์โบไฮเดรต จึงพบวิตามินบีหนึ่งได้ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต วิตามินบีหนึ่ง เป็นวิตามินที่ไม่ค่อยคงตัว ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่างใน

สภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่ไม่ถูกทำลายด้วยแสง โดยส่วนใหญ่ในผลไม้จะพบปริมาณวิตามินบีหนึ่งน้อยกว่าวิตามินชนิดอื่น ๆ

วิตามินบีสอง : วิตามินบีสอง หรือไรโบฟลาวิน เป็นวิตามินที่มีหน้าที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของโคเอนไซม์ฟลาวินโมโนนิวคลีโอไทด์ (FMN) และฟลาวินอะดินีนไดนิวคลีโอไทด์ (FAD) ทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเลคตรอน (Electron carrier) ในปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของน้ำตาล กลูโคส กรดไขมัน กรดอะมิโน และพิวรีน วิตามินบีสองมีความคงตัวต่อออกซิเจน และสภาวะที่เป็นกรด แต่จะไม่คงตัวเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง และถูกทำลายได้ง่ายเมื่อถูกแสง อัตราการถูกทำลายด้วยแสงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

วิตามินซี : วิตามินซี หรือกรดแอสคอร์บิก เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลเฮกโซส ละลายได้ดีในน้ำ จึงถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย และกระจายตัวไปตามเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทั่วร่างกายได้อย่างรวดเร็ว วิตามินซีเป็นวิตามินที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชั่น และเกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างโปรตีนคอลลาเจน ดังนั้นถ้าร่างกายได้รับวิตามินซีไม่เพียงพอจะทำให้การสังเคราะห์โปรตีนคอลลาเจนผิดปกติ มีผลต่อความแข็งแรงของหลอดเลือดต่าง ๆ ทั่วร่างกาย นอกจากนี้วิตามินซียังมีประโยชน์เป็นอย่างมากในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยจะถูกนำมาใช้เป็นสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ หรือใช้เป็นสารต้านออกซิเดชั่นในน้ำมัน วิตามินซีจะพบมากในผลไม้สด โดยเฉพาะผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว ซึ่งผลไม้ส่วนใหญ่จะพบวิตามินซีที่เปลือกมากกว่าในเนื้อ

วิตามินซีเป็น Strong reducing compound ที่มีความคงตัวต่ำสลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกแสง อากาศ และความร้อน ส่วนโลหะหนัก เช่น ทองแดง และเหล็ก จะเร่งการสลายตัวของวิตามินซีให้เกิดเร็วขึ้น วิตามินซีที่อยู่ในรูป L-Ascorbic acid จะมีคุณค่าทางชีวภาพมากกว่าวิตามินซีที่อยู่ในรูป D-Ascorbic acid

กรดโฟลิค : กรดโฟลิค หรือโฟลาซิน เป็นวิตามินที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยเทอริดีน (Pteridine) กรดพาราอะมิโนเบนโซอิค และกรดกลูตามิค กรดโฟลิคมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการรับ-ส่งหมู่ single carbon เช่น หมู่เมธิล หรือหมู่ไฮดรอกซีเมธิลในกระบวนการเมตาบอลิสม์ ในอาหารจะพบกรดโฟลิคอยู่ 2 รูป คือ อยู่ในรูปอิสระ และรูปที่รวมตัวอยู่กับสารอื่น กรดโฟลิคในพืชส่วนใหญ่จะรวมตัวอยู่กับสารอื่น กรดโฟลิคจะไม่คงตัวเมื่อถูกแสงและความร้อน ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปอาหาร จึงมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกรดโฟลิค

กรดแพนโททีนิก : เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของโคเอนไซม์เอ (Co-enzyme A) ซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิสม์ของสารอาหารต่าง ๆ ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงพบกรดแพนโททีนิกได้ในอาหารทุกชนิด

สำหรับแร่ธาตุที่พบในผลไม้ส่วนใหญ่ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของเกลือไนเตรท เกลือฟอสเฟต และเกลือคลอไรด์

แคลเซียม : มีส่วนสัมพันธ์กับโครงสร้างของผนังเซลล์ และกระบวนการเมตาบอลิสม์

ฟอสฟอรัส : เป็นองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน และโมเลกุลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิสม์

โปแตสเซียม : เป็นแร่ธาตุที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับขบวนการรักษาความสมดุลของน้ำ กระตุ้นและส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ

แมกนีเซียม : เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง

วิตามินที่พบมากในลิ้นจี่ คือ วิตามินซี ส่วนวิตามินบีหนึ่ง และวิตามินบีสอง มีปริมาณน้อยมาก (ชินพันธ์, 2539)

มีรายงานการวิจัยกล่าวว่า ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่มีวิตามินซีสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่สายพันธุ์ของลิ้นจี่ด้วย ลิ้นจี่บางสายพันธุ์อาจมีปริมาณวิตามินซีมากถึง 90 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม และปริมาณวิตามินซีในลิ้นจี่จะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ภายใน 4 วัน หลังจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งปริมาณการสูญเสียจะขึ้นอยู่กับวิธีการและอุณหภูมิในการเก็บรักษา (Late and Thompson, 1955)

Wenkam and Miller (1965) พบว่า ลิ้นจี่สายพันธุ์ Kwai Mi และสายพันธุ์ Brewster มีปริมาณวิตามินซีเท่ากับ 40.2 และ 80.8 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ส่วนลิ้นจี่สายพันธุ์ Calcutta Late ซึ่งรายงานโดย Chadha and Rajpoot (1969) มีปริมาณวิตามินซีเท่ากับ 44 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม

สำหรับปริมาณแร่ธาตุในผลลิ้นจี่ Paull *et al.*, (1984) ได้ทำการศึกษาปริมาณแร่ธาตุที่เพิ่มขึ้นในลิ้นจี่สายพันธุ์ Groff หลังจากดอกบานถึงเก็บเกี่ยว พบว่า มีปริมาณของโปแตสเซียมมากที่สุด ส่วนแคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส มีปริมาณไม่แตกต่างกัน

สารที่ให้กลิ่น (Volatile compounds) : ผลไม้แต่ละชนิดจะมีกลิ่นแตกต่างกัน โดยเฉพาะผลไม้สุกจะมีกลิ่นที่เฉพาะ กลิ่นเฉพาะของผลไม้แต่ละชนิดนั้น เกิดจากสารระเหย (Volatiles) ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดในผลไม้ สารระเหยเป็นสารอินทรีย์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น ส่วนใหญ่มีโมเลกุลขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 250 ดาลตัน และมักจะมีปริมาณน้อยกว่า 100 ppm ปริมาณและชนิดของสารระเหยในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของผลไม้จะมีอยู่ไม่เหมือนกัน ส่วนใหญ่จะเป็น Oxygenated compounds เช่น เอสเทอร์ แอลกอฮอล์ กรด อัลดีไฮด์ และคีโตน มีหลายชนิดที่เป็นอนุพันธุ์ของ Terpenoid hydrocarbons โดยปกติเมื่อผลไม้สุกจะมีปริมาณและชนิดของสารระเหยมากขึ้น แต่ชนิดที่ทำให้เกิดกลิ่นเฉพาะของผลไม้นั้นมีเพียงไม่กี่ชนิด

Ong-PKC and Acree-TE (1998) วิเคราะห์สารให้กลิ่นในลิ้นจี่โดยใช้ Gas chromatography/olfactory techniques (GC/O) พบว่า สารให้กลิ่นที่พบในลิ้นจี่มีหลายชนิด เช่น Geraniol, Guaiacol, Vanillin, 2-acetyl-2-thiazoline, 2-phenylethanol, (Z)-2-nonenal, beta-Damascenone, 1-octen-3-ol, Furaneol, Cis-rose oxide, Isobutyl acetate guaiacol, (E)-2-nonenal, Isovaleric acid และ Linalool

เมื่อวิเคราะห์สารให้กลิ่นในลิ้นจี่บรรจุกระป๋อง (Canned lychee) โดยใช้เทคนิคเดียวกันพบว่าสารให้กลิ่นที่วิเคราะห์ได้ในลิ้นจี่บรรจุกระป๋องส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกับที่พบในลิ้นจี่ ได้แก่ Cis-rose oxide, beta-Damascenone, Linalool, Furaneol, Ethyl isobutyrate, (E)-2-nonenal, Ethyl isohexanoate, Geraniol และ delta-Decalactone (Ong-PKC and Acree-TE, 1999)

รงควัตถุ (Pigment) : ผลไม้ในธรรมชาติส่วนใหญ่ จะมีสีที่แตกต่างกันออกไป เช่น สีเขียว สีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วงแดง สีขาว ฯลฯ การที่ผลไม้มีสีแตกต่างกันเช่นนี้ก็เนื่องจากมีรงควัตถุภายในเซลล์ที่แตกต่างกัน รงควัตถุในผลไม้ถูกจำแนกออกเป็น 3 ประเภทที่สำคัญ ดังนี้คือ แคโรทีนอยด์ คลอโรฟิลล์ และฟลาโวนอยด์

แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) : เป็นรงควัตถุที่มีสีส้ม สีแสด สีเหลือง หรือสีส้มแดง โดยทั่วไปจะพบอยู่ในโครโมพลาสต์ และอาจพบในบริเวณใต้ผนังเซลล์ของ Palisade cell ที่อยู่ใต้เซลล์ผิวของพืช แคโรทีนอยด์ เป็นรงควัตถุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ แคโรทีนอยด์แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มแคโรทีน และกลุ่มแซนโธฟิลล์

แคโรทีน (Carotenes) : เป็นแคโรทีนอยด์ที่ละลายได้ดีในปิโตรเลียมอีเทอร์ ตัวอย่าง เช่น α-carotene, β-carotene และχ-carotene เป็นต้น

แซนโธฟิลล์ (Xanthophylls) : เป็นแคโรทีนอยด์ที่ละลายได้ดีในเอธิลแอลกอฮอล์ ในโครงสร้างจะมีกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) เมธอกซิล คาร์บอกซิล คีโต หรืออีพอกซี (Epoxy) รวมอยู่ด้วย ตัวอย่างของแคโรทีนอยด์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คริพโตแซนติน (Cryptoxanthin) และแคพแซนติน (Capsanthin) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ไฮดรอกซี (Hydroxy) อีพอกซี หรือ ออกซี (Oxy) ของแคโรทีน

แคโรทีนอยด์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง ที่โครงสร้างหลักประกอบด้วย Isoprene unit [(CH2 = C (CH3)-CH = CH2) = Diene] จำนวน 8 หน่วย ดังนั้นในแต่ละโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ จึงมีคาร์บอนทั้งสิ้น 40 อะตอม และมี 11 Conjugated double bond ความแตกต่างของแคโรทีนอยด์แต่ละชนิด จะขึ้นกับชนิดและตำแหน่งของกลุ่มที่มาประกอบ (Side chain) ตลอดจนแคโรทีนอยด์บางชนิดอาจจะมี Ring อยู่ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองข้างก็ได้

ในกระบวนการแปรรูป แคโรทีนอยด์จะไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในไขมันหรือน้ำมัน ตลอดจนตัวทำละลายอินทรีย์ ค่อนข้างทนต่อความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้สีของแคโรทีนอยด์เปลี่ยนไป เช่น มีสีคล้ำ หรือซีดจางลง

คลอโรฟิลล์ (Chlorophylls) : เป็นรงควัตถุที่มีสีเขียว ซึ่งจะพบมากในส่วนเปลือกของผลไม้ดิบ คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเธอร์ แอลกอฮอล์ และอาจจะละลายได้บ้างในน้ำเมื่อกลุ่ม ไฟธอล (Phytol) หรือกลุ่มไฟธิล (Phytyll) ถูกแยกออกจากโครงสร้าง คลอโรฟิลล์ที่พบตามธรรมชาตินั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll A) และคลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll B) คลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิดจะมีโครงสร้างหลักที่เหมือนกัน คือ ประกอบไปด้วย Pyrrole ring 4 วง (Tetrapyrrole) ที่ถูกยึดรวมกันด้วยอะตอมของแมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลางของโมเลกุล ในธรรมชาติ ผลไม้จะมีคลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิดปะปนกันอยู่เสมอ แต่ปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ จะน้อยกว่าปริมาณของคลอโรฟิลล์ บี

ในระหว่างกระบวนการแปรรูป คลอโรฟิลล์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยา Pheophytinization โดยแมกนีเซียมที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลจะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนอะตอม จึงทำให้คลอโรฟิลล์ถูกเปลี่ยนไปเป็นฟีโอไฟติน (Pheophytin) ซึ่งมีสีน้ำตาล นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และการปนเปื้อนของอนุมูลโลหะบางชนิด ก็มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ได้เช่นเดียวกัน ทำให้สีเขียวของผลไม้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) : เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่ให้ สีแดง สีน้ำเงิน สีม่วง สีเหลือง สีครีม สีน้ำตาล ฟลาโวนอยด์เป็นรงควัตถุที่ละลายได้ในน้ำ มีโครงสร้างหลักเป็นแบบ C6-C3-C6 (C6C3C6-skeleton) ความแตกต่างของฟลาโวนอยด์ในแต่ละกลุ่ม แต่ละชนิด จะขึ้นกับชนิด จำนวน และตำแหน่งของกลุ่มต่าง ๆ ที่มาเกาะกับโครงสร้างของฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์ถูกจำแนกตามสีที่ปรากฏได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ แอนโธไซยานิน ฟลาโวน หรือแอนโธแซนติน และแทนนิน

แอนโธไซยานิน (Anthocyanins) : เป็นสารประกอบจำพวกไกลโคไซด์ ซึ่งละลายอยู่ในถุงเซลล์ (Cell sap) ให้สีแดง สีน้ำเงิน หรือสีม่วง โมเลกุลของแอนโธไซยานินประกอบไปด้วย แอนโธไซยานิดิน (Anthocyanidin) และน้ำตาล 1-2 โมเลกุล ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่อาจมีคาร์บอนในโมเลกุลจำนวน 5 หรือ 6 อะตอมก็ได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส น้ำตาลแรมโนส หรือน้ำตาลอะราบิโนส เป็นต้น แอนโธไซยานิดินที่พบมากในธรรมชาตินั้น จะมีเพียง 3 ชนิด คือ ไซยานิดิน (Cyanidin) เพลาร์โกนิดิน (Pelargonidin) และ เดลฟินิดิน (Delphinidin)

สีของแอนโธไซยานินถูกควบคุมด้วยปัจจัยที่สำคัญ 2 อย่าง คือ

- โครงสร้างโมเลกุล หากในโครงสร้างวงแหวนฟีนิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมธอกซิล ($-OCH_3$) เพิ่มขึ้น จะมีผลต่อสีของแอนโธไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้น จะทำให้มีสีเข้มขึ้น และสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นด้วย และการเพิ่มหมู่เมธอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น
- ความเป็นกรด-ด่าง เมื่อผลไม้สุก ปริมาณกรดอินทรีย์จะลดน้อยลง ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลทำให้สีของแอนโธไซยานินในผลไม้เปลี่ยนแปลงไปด้วย สีของแอนโธไซยานินจะผันแปรไปตามค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสภาวะที่เป็นกรด แอนโธไซยานินจะมีสีแดง และสีจะจางลงเมื่อความเป็นกรดน้อยลง แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นจนถึงระดับกลาง หรือเป็นด่าง แอนโธไซยานินจะมีสีน้ำเงิน

แอนโธไซยานินที่มีอยู่ในผักและผลไม้ จะถูกทำลายได้ง่ายในกระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การใช้อุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของน้ำตาล ความเป็นกรด-ด่าง กรดอะมิโน กรดแอสคอร์บิก และสภาวะที่มีออกซิเจน จะช่วยเร่งอัตราการสลายตัวของแอนโธไซยานินให้เกิดเร็วขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยา Condensation ของแอนโธไซยานินกับสารประกอบเหล่านี้

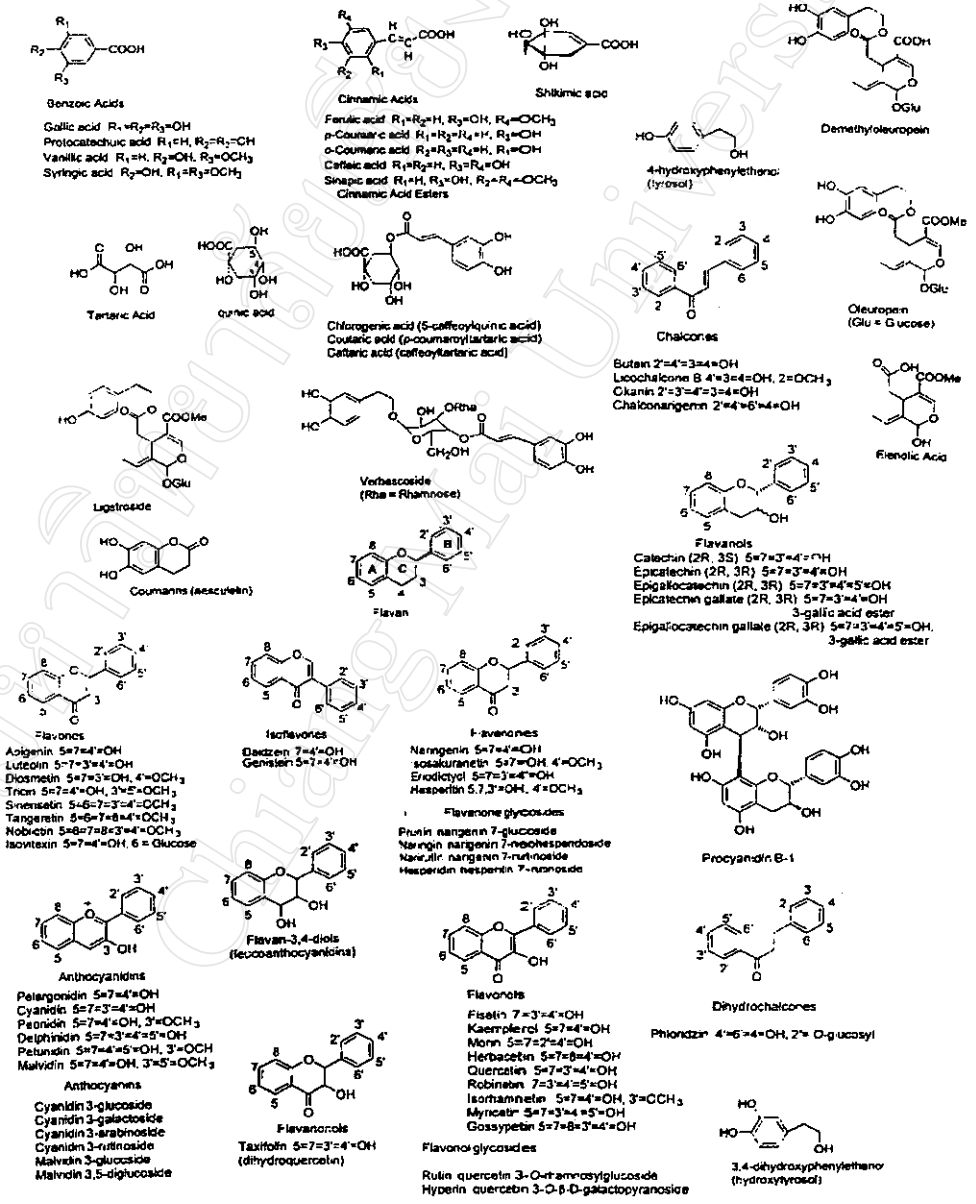
ฟลาโวน หรือ แอนโธแซนติน (Flavones or Anthoxanthins) : เป็นรงควัตถุในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ที่ให้สีขาว สีครีม หรือสีเหลืองอ่อน เป็นส่วนใหญ่ และอาจพบแอนโธแซนตินที่มีสีเหลือง-ส้มได้ในธรรมชาติ แต่จะมีอยู่น้อยมาก แอนโธแซนตินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ โมเลกุลประกอบไปด้วยฟลาโวน หรืออนุพันธุ์ของฟลาโวน เช่น ฟลาโวนอล (Flavonol) ฟลาวาโนนอล (Flavanonol) และไอโซฟลาโวน (Isoflavone) ซึ่งสารประกอบฟลาโวนเหล่านี้จะมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกาะอยู่ 1-2 โมเลกุล

แทนนิน (Tannins) : เป็นรงควัตถุที่ตามธรรมชาติจะไม่มีสี แต่สามารถเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลแดงได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สารประกอบที่เป็นอนุพันธุ์ของแทนนิน ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ได้แก่ ลิวโคแอนโธไซยานิน (Leucoanthocyanins) แคทิชิน (Catechin) และกรดไฮดรอกซี (Hydroxy acid) บางชนิด เช่น กรดแคเฟอิก (Caffeic acid) กรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)

ฟลาโวนอยด์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีความคงตัวต่อความร้อน และปฏิกิริยาออกซิเดชั่น แต่สามารถเปลี่ยนสีได้ง่ายเมื่อรวมตัวกับโลหะ เช่น เมื่อรวมตัวกับเหล็ก จะให้สีน้ำเงินหรือสีเขียว นอกจากนี้สารประกอบฟลาโวนอยด์ยังเป็นสารเริ่มต้นสำหรับปฏิกิริยา Enzymic browning จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ในอาหารได้

รงควัตถุที่สำคัญที่พบในลิ้นจี่ คือ แอนโธไซยานิน โดยเฉพาะไซยานิดิน และเพลาร์โกนิดิน แอนโธไซยานิน เป็นสารประกอบฟีนอลที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกลิ้นจี่ ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นในระหว่างกระบวนการสุก เมื่อผลไม้เข้าสู่ระยะแรกของกระบวนการสุก คลอโรฟิลล์จะสลายตัว ทำให้สีเขียวหายไป ต่อจากนั้นจะเกิดการสังเคราะห์รงควัตถุที่ให้สีชนิดอื่น ๆ เช่น แคโรทีนอยด์ และแอนโธไซยานิน Paull *et al.*, (1984) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลลิ้นจี่ ซึ่งพบว่าในช่วงการพัฒนาการของผลลิ้นจี่สายพันธุ์ Groff, Shui-Dong, Gui-wei และ Mei คลอโรฟิลล์จะเริ่มลดลงแบบอนุกรมเลขคณิต ในขณะที่การสร้างแอนโธไซยานินจะเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการเจริญเติบโตของผล

ลิ้นจี่ เป็นผลไม้ที่เกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีน้ำตาลได้อย่างรวดเร็วภายหลังจากการเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกลิ้นจี่ เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของแอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอล นอกจากนี้การสูญเสียน้ำก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สีของเปลือกลิ้นจี่เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอล

สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) : เป็นสารประกอบที่มีฟีนอลเป็นองค์-ประกอบสำคัญ และอาจมีหมู่เคมีอื่น ๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น Cinnamic acid, Caffeic acid, Chlorogenic acid, Flavonoids, Anthocyanins และ Tannin สารประกอบฟีนอลเป็นสารที่พบมากในพืช โดยเฉพาะในผลไม้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ ortho-diphenolic สารประกอบฟีนอลจะมีผลต่อการเกิดสี และรสชาติของผลไม้ ซึ่งเชื่อกันว่าสารประกอบฟีนอลเป็นสารที่เรียกว่า Secondary metabolite

ความสำคัญของสารประกอบฟีนอล สามารถประมวลได้ 3 ประการดังนี้

การต้านทานโรค : สารประกอบฟีนอลหลายชนิด เช่น Catechol, Chlorogenic acid สามารถป้องกัน หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิดได้

ความฝาด : ความฝาดของผลไม้หลาย ๆ ชนิด พบว่า ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในผล เมื่อผลไม้สุก ปริมาณสารประกอบฟีนอลจะลดลง นอกจากนี้ความฝาด ยังขึ้นอยู่กับการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ (Polymerization) ของสารประกอบฟีนอลด้วย ช่วงน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลที่ให้ความฝาดนั้นอยู่ในช่วง 500-3,000 ดาลตัน ซึ่งสามารถที่จะรวมตัวกับโมเลกุลของโปรตีนได้ เมื่อผลไม้สุกเต็มที่ การรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ของฟีนอลจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จากโมเลกุลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ และในขณะเดียวกันก็จะทำให้ความฝาดลดลง

สี : นอกจากฟลาโวนอยด์ และแอนโธไซยานิน ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลที่ให้สีกับผลไม้แล้ว สารประกอบฟีนอลอื่น ๆ เช่น แทนนิน ซึ่งปกติไม่มีสี ก็อาจทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นได้ เมื่อเซลล์ของผลไม้ได้รับการกระทบกระเทือน เช่น เมื่อปอกเปลือกผลไม้ทิ้งไว้สักพัก เนื้อของผลไม้มักจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลจากการทำงานของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO) โดยเปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลไปเป็น Quinone แล้วรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น และมีสีน้ำตาล

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบและคุณค่าทางโภชนาการของลิ้นจี่สด ลิ้นจี่ในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง และลิ้นจี่แช่แข็ง ในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

องค์ประกอบ	ลิ้นจี่สด	ลิ้นจี่ในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง *	ลิ้นจี่แช่แข็ง**
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	79.69	81.40	-
โปรตีน (กรัม ต่อ 100 กรัม)	0.90	0.40	-
ไขมัน (กรัม ต่อ 100 กรัม)	0.30	0.30	-
คาร์โบไฮเดรต	-	17.50	16.97
กลูโคส (กรัม ต่อ 100 กรัม)	5.00	-	-
ฟรุกโตส (กรัม ต่อ 100 กรัม)	3.20	-	-
ซูโครส (กรัม ต่อ 100 กรัม)	8.60	-	-
กรดอินทรีย์ (กรัม ต่อ 100 กรัม)	0.26	-	0.31
เส้นใย (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	160	400	-
วิตามิน			
Thiamin (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	0.11	-	-
Riboflavin (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	0.04	-	-
Niacin (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	0.30	-	-
บี 1 (ไมโครกรัม ต่อ 100)	50.00	trace	-
บี 2 (ไมโครกรัม ต่อ 100)	50.00	0.07	-
ซี (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	39.20	68.00	-
แร่ธาตุ			
แคลเซียม (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	9.30	7.00	-
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	33.00	8.00	-
โปแตสเซียม (มิลลิกรัม ต่อ 100	182.00	-	-
กรัม)	2.50	-	-
โซเดียม (มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม)	350.00	700.00	-
เหล็ก (ไมโครกรัม ต่อ 100)	-	-	-
พลังงาน (กิโลจูล)	74.28	67.00	-

* เฉพาะเนื้อลิ้นจี่ (Drained weight)

** ลิ้นจี่สายพันธุ์จักรพรรดิ์

ที่มา : Souci *et al.*, 1994, กองโภชนาการ, 2535 และบุญส่ง, 2543

ระบบภูมิคุ้มกัน (Immune System)

คือ ระบบที่ทำหน้าที่คุ้มกันร่างกาย ประกอบด้วยสาร น้ำ และเซลล์หลายกลุ่มทำหน้าที่ร่วมกัน เซลล์ดังกล่าวคือ ลิมโฟซัยท์ (Lymphocyte) เซลล์พลาสมา (Plasma cell) ฟาโกซัยท์ (Phagocyte) ซึ่งได้แก่ นิวโตรฟิล (Neutrophil) อีโอสิโนฟิล (Eosinophil) โมโนซัยท์ (Monocyte) มาโครฟาจ (Macrophage) เซลล์มาสท์ (Mast cell) เบโซฟิล (Basophil) ในภาวะปกติเซลล์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะอยู่ใน Lymphoid Tissue เลือด น้ำเหลือง (Lymph) และไขกระดูก (Bone marrow) ยกเว้นเซลล์พลาสมา ซึ่งไม่พบในเลือด

ภาวะภูมิไวเกิน (Hypersensitivity or Allergy)

เป็นการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของร่างกายต่อแอนติเจน (Antigen) แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อของตนเอง เกิดพยาธิสภาพและทำให้เกิดโรคได้ ซึ่งเรียกโรคที่เกิดจากภาวะภูมิไวเกินนี้ว่า โรคภูมิแพ้ (Allergic disease) โรคภูมิแพ้อาจแบ่งเป็นโรคหลาย ๆ กลุ่ม ซึ่งมีลักษณะจำเพาะของปฏิกิริยาทางภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแอนติเจนที่เข้าสู่ร่างกาย อาการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในภาวะภูมิไวเกิน เกิดจากปฏิกิริยาทางภูมิคุ้มกันโดยตรงไม่เกี่ยวข้องกับฤทธิ์หรือคุณสมบัติของสารก่อภูมิแพ้ นอกจากนี้อาการที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นได้ทุกอวัยวะของร่างกาย หรืออาจจะมีอาการเฉพาะที่ ปฏิกิริยาทางภูมิคุ้มกันที่เกิดขึ้น เกิดได้ทั้งจากการตอบสนองโดยอาศัยแอนติบอดี (Humoral mediated immune response) และจากการตอบสนองชนิดอาศัยเซลล์ (Cellular mediated immune response) ซึ่ง Gell และ Coombs (1975) ได้จำแนกภาวะภูมิไวเกินออกได้เป็น 4 ชนิด ตามกลไกการเกิดพยาธิสภาพที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกภาวะภูมิไวเกินตามกลไกการเกิดพยาธิสภาพ โดย Gell และ Coombs (1975)

ภาวะภูมิไวเกินชนิดที่	การตอบสนอง
Type I hypersensitivity	Immediate type or IgE mediated or Anaphylactic hypersensitivity
Type II hypersensitivity	Cytotoxic hypersensitivity
Type III hypersensitivity	Circulating immune complex hypersensitivity
Type IV hypersensitivity	T cell mediated or Delayed type hypersensitivity (DTH)

ที่มา : กำจร, 2539

การแพ้อาหาร (Food Allergy)

การแพ้อาหาร เป็นอาการผิดปกติของร่างกายที่เกิดจากปฏิกิริยาทางอิมมูน (Immune) ซึ่งเป็นผลมาจากการรับประทานอาหาร สิ่งปนเปื้อน หรือสารปรุงแต่งอาหาร โดยส่วนใหญ่เกิดจากการได้รับสารโปรตีนแปลกปลอม อาหารทุกประเภทอาจทำให้เกิดการแพ้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละบุคคล

การแพ้อาหารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางอิมมูน อาจจะเกิดได้ทุกแบบตามการจำแนกของ *Gell* และ *Coombs* แต่ส่วนมากจะเกิดจากร่างกายสร้างอิมมูโนโกลบูลิน (Immunoglobulin E : IgE) ขึ้นเพื่อตอบสนองต่อสิ่งแปลกปลอมหรือแอนติเจนที่ได้รับ (Type I hypersensitity) IgE หรือแอนติบอดี (Antibody) ที่เกิดจากการกระตุ้นของสิ่งแปลกปลอมหรือแอนติเจนที่ได้รับในครั้งแรกจะไปเกาะอยู่บนผิวของเบโซฟิล (Basophil) และเซลล์มาสท์ (Mast cell) ซึ่งเซลล์ทั้งสองตัวนี้มีหน้าที่ในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมในระบบภูมิคุ้มกัน (วิบูลย์ศรี, 2537) ต่อมาถ้าได้รับแอนติเจนตัวเดิมเข้าไปอีกแอนติเจนจะไปจับกับส่วน Fab[1] (Antigen-binding fragment) ของ IgE ที่เกาะอยู่บนผิวของเบโซฟิลดังกล่าว (ทัศนีย์, 2537) ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีหลายอย่างภายในเซลล์ กระตุ้นให้เซลล์หลั่งสารต่าง ๆ (Pharmacologically active mediator) เช่น ฮีสตามีน (Histamine) หรือ Leukotriene ที่อยู่ในแกรนูลของเบโซฟิลให้ออกมานอกเซลล์ สารต่าง ๆ เหล่านี้จะมีฤทธิ์ทำให้เกิดการอักเสบในเนื้อเยื่อขึ้น เช่น เกิดการบวม หายใจลำบาก เนื่องจากกล้ามเนื้อหลอดลมหดเกร็ง ความดันโลหิตลดต่ำลง และทำให้กล้ามเนื้อเรียบหดตัว ถ้าหากมีการออกฤทธิ์ที่อวัยวะส่วนใด ก็จะเกิดอาการของโรคภูมิแพ้ที่อวัยวะนั้น (ประพันธ์, 2526)

สารก่อภูมิแพ้ (Allergen)

สารก่อภูมิแพ้หรือแอนติเจน มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Immunogen เป็นสารที่สามารถชักนำให้ร่างกายสร้างแอนติบอดีหรือที-ลิมโฟซัยท์[2](T-Lymphocyte) **ชนิดจำเพาะ** (Specific sensitized T-lymphocyte) และสามารถทำปฏิกิริยาจำเพาะกับแอนติบอดีหรือลิมโฟซัยท์นั้น ๆ ได้ ดังนั้นสารก่อภูมิแพ้จึงมีคุณสมบัติ 2 ประการคือ

---

[1] Antigen-binding Fragment : เป็นส่วนที่อิมมูโนโกลบูลินใช้จับกับแอนติเจน แต่ไม่สามารถทำให้แอนติเจนตกตะกอนได้

[2] เป็นเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน มีหน้าที่ทำลายแอนติเจนแปลกปลอมและควบคุมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในกระแสเลือด

Immunogenicity : ความสามารถตามธรรมชาติที่จะชักนำให้เกิดการสร้างแอนติบอดี และที-ลิมโฟซัยท์ ชนิดจำเพาะ

Specific reactivity : แอนติเจนสามารถทำปฏิกิริยาจำเพาะกับแอนติบอดีหรือที-ลิมโฟซัยท์ที่ทำให้เกิดขึ้นได้

สารก่อภูมิแพ้ส่วนใหญ่จะมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน แต่มีเพียงส่วนเล็ก ๆ บางส่วนบนผิวของมันเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างจำเพาะกับ Combining site ของแอนติบอดี หรือ Receptor บนลิมโฟซัยท์ ซึ่งเรียกบริเวณเหล่านี้ว่า Epitoes หรือ Antigenic determinant

Epitope หรือ Antigenic determinant คือ ตำแหน่งย่อย ๆ บนแอนติเจนที่สามารถทำปฏิกิริยากับแอนติบอดี หรือ ที-ลิมโฟซัยท์ที่จำเพาะ Epitope แต่ละตำแหน่งจะประกอบด้วยกรดอะมิโน หรือ Mono-saccharide (Sugar residues) 4-6 หน่วย กรดอะมิโนที่รวมกันเป็นแต่ละ Epitope นั้น อาจเรียงติดต่อกันอยู่บนสาย Peptide เป็น Continuous หรือ Sequential epitope หรือเป็นกรดอะมิโนที่อยู่ห่างกันบนสาย Peptide แต่เข้ามาใกล้กันได้จากการม้วนพับของสาย Peptide ใน Globular protein ต่าง ๆ และรวมกันเป็น Epitope ขึ้น โดยทั่วไปแอนติเจนแต่ละชนิดจะประกอบด้วย Epitope หลายชนิดบนโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งจะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของสารนั้น โดยเฉพาะแอนติเจนที่เป็นโปรตีนขนาดใหญ่มักจะมี Epitope มากมายกระจายอยู่บนผิวของโปรตีนทั้งโมเลกุล Epitope เหล่านี้สามารถกระตุ้นให้มีการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันได้

สารก่อภูมิแพ้เป็นสิ่งแปลกปลอมที่ชักนำให้ร่างกายเกิดการตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน ซึ่งโดยปกติจะไม่พบอยู่ในร่างกาย หรืออาจเป็นสารที่มีอยู่ในร่างกาย โดยตัวมันเองไม่สามารถกระตุ้นให้ร่างกายเกิดปฏิกิริยาตอบสนองทางภูมิคุ้มกันได้ แต่เมื่อรวมหรือ Conjugate กับสารอื่นที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ก็สามารถชักนำให้เกิดการสร้างแอนติบอดีขึ้นได้ เรียกสารนี้ว่า *Hapten* เช่น morphine, digitalis, ฮอร์โมน testosterone, nucleotide, ไขมัน (lipid) และสารสังเคราะห์ขนาดเล็ก เช่น dinitrophenyl เป็นต้น (อรวดี, 2539) โดยทั่ว ๆ ไปสารก่อภูมิแพ้หรือแอนติเจนจะเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น Protein, lipoprotein, polypeptide, polysaccharide, lipopolysaccharide, glycoprotein, nucleic acid, เกสรหญ้าและดอกไม้, ฝุ่นบ้าน, ขนสัตว์ และสารสังเคราะห์อื่น ๆ เป็นต้น ส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10,000 ดาลตัน (Daltons : Da) ขึ้นไป เพราะถ้ายิ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่ก็จะสามารถกระตุ้นให้เกิดการตอบสนอง

ทางภูมิคุ้มกันได้มาก และถ้าสารก่อภูมิแพ้มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน (Complex) ก็จะสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันได้ดีเช่นเดียวกัน โปรตีนบางชนิดที่เป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ (Monomer) จะไม่กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน แต่ถ้าโปรตีนนั้นประกอบด้วยโมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุลมาเรียงต่อกัน (Polymer) หรือมีการเกาะกลุ่ม (Aggregate) ก็จะสามารถชักนำให้ร่างกายสร้างแอนติบอดีได้ นอกจากนี้สารก่อภูมิแพ้บางชนิด เมื่อกระตุ้นให้ร่างกายสร้างแอนติบอดีที่จำเพาะขึ้นแล้ว แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง แอนติบอดีชนิดเดิมที่สร้างขึ้นมานั้นจะไม่สามารถจับกับแอนติเจนที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ได้ เช่น โปรตีน เมื่อเกิดการเสียสภาพ (Denaturation) โครงสร้างเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้นก็จะสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันให้สร้างแอนติบอดีชนิดใหม่ได้อีก (ทัศนีย์, 2537)

โปรตีน (Protein) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต โมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน โปรตีนบางชนิดมีฟอสฟอรัสบ้างเล็กน้อย หน่วยที่เล็กที่สุดในโมเลกุลของโปรตีนเรียกว่า กรดอะมิโน (Amino acid) ดังนั้นโปรตีนจึงเป็นโพลีเมอร์ของกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) เป็นสายยาวเรียกว่า สายโพลีเปปไทด์ (Polypeptide chain) กรดอะมิโนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่โมเลกุลประกอบด้วยหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) อย่างละ1หมู่ และมีหมู่ Side chain (R) ต่ออยู่กับคาร์บอนอะตอม ซึ่งหมู่ R จะแตกต่างกันไปตามชนิดของกรดอะมิโน (นิธิยา, 2539) โปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลาย ๆ โมเลกุล เป็นสารก่อภูมิแพ้หรือแอนติเจนที่ดี เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีประจุในโมเลกุลพอเหมาะและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น albumin และ globulin เป็นต้น จากการทดลองพบว่า Tyrosine และ Aromatic amino acids เป็นตัวช่วยทำให้โปรตีนมีความสามารถในการกระตุ้นให้ร่างกายสร้างภูมิคุ้มกัน (สิชล, 2536)

มีรายงานการศึกษาสารก่อภูมิแพ้ที่พบในผักและผลไม้บางชนิดหลายฉบับ อาทิเช่น

Vieths *et al.*, (1995) รายงานว่า สารก่อภูมิแพ้ที่มีชื่อว่า Mal-d-1 เป็นโปรตีนที่พบในแอปเปิล มีน้ำหนักโมเลกุล 18 kDa ซึ่งเป็นสารก่อภูมิแพ้หลักและมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับสารก่อภูมิแพ้หลักในเกสรของต้น birch ที่มีชื่อว่า Bet-v-1 นอกจากนี้มีรายงานว่าความสามารถในการทำให้เกิดการแพ้ยังขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแอปเปิลด้วย (Vieths *et al.*, 1994 b)

แอปเปิลได้ชื่อว่าเป็นผลไม้ที่ทำให้เกิดอาการแพ้มากที่สุด (Aulepp and Vieths, 1992) โดยเฉพาะสายพันธุ์ *Granny smith* และ *Golden delicious* ส่วนสายพันธุ์ *Gloster* และ *Boskoop* มีความสามารถทำให้เกิดการแพ้น้อยมาก เนื่องจากมี Mal-d-1 ต่ำ นอกจากความเกี่ยวข้องทางด้านสายพันธุ์แล้ว ยังมีระดับความสุกด้วย สายพันธุ์ *Golden delicious* และ *Boskoop* เป็นสายพันธุ์ที่สามารถทำให้เกิดการแพ้ได้มาก ซึ่งอาการแพ้จะมากหรือน้อยขึ้นกับระดับความสุกของแอปเปิล (Vieths *et al.*, 1993)

Dreborg and Foucard (1983) ใช้วิธีทดสอบทางผิวหนังกับสารก่อภูมิแพ้ในแอปเปิลภายหลังจากการให้ความร้อน ซึ่งพบว่าทำให้เกิดอาการแพ้ลดลง เช่นเดียวกับการทดสอบในแอปเปิลที่ผ่านการโฮโมจิไนส์แล้ว และผลการทดลองโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟก็ให้ผลเช่นเดียวกัน (Vieths *et al.*, 1994 a)

Kinder *et al.*, (1999) รายงานว่า มะม่วงสายพันธุ์ *Eden, Ngowe, Osteen* และ *Tommy Atkins* มีสารก่อภูมิแพ้อย่างน้อย 5 ชนิด ซึ่งมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 14, 30, 40, 43 และ 63 kDa และมีความสามารถในการทำให้เกิดภูมิแพ้ (Allergenic potency) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในมะม่วงทั้ง 4 สายพันธุ์ มะม่วงมีกลิ่นที่ดีมาก สีเข้ม และมีปริมาณ β-carotene สูง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์พิวรี (Puree) จากมะม่วงมีความสำคัญเพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้เป็นส่วนประกอบในโยเกิร์ตและผลิตภัณฑ์ขนมอบ รวมทั้งใช้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (Intermediate product) ในการผลิตน้ำมะม่วงแบบเนคต้าร์ (Nectar) น้ำผลไม้รวม และอาหารทารก อย่างไรก็ตามการแปรรูปผลไม้ชนิดนี้ยังค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากการสุกของมะม่วงเป็นไปในลักษณะไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระจายของเอนไซม์ Polygalacturonase ในผลมะม่วง (Zhou *et al.*,1996, Mitcham and McDonald, 1992)

Moller *et al.*, (1997) ได้ทำการแยกและตรวจสอบหาสารก่อภูมิแพ้หลักในผลกีวีฟรุต ด้วยวิธี SDS-PAGE [3] และ Imminoblotting [4] พบว่า กีวีฟรุตมีสารก่อภูมิแพ้หลักที่มีชื่อว่า Act-c-2 มีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 43 kDa และเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างของสารก่อภูมิแพ้ พบว่า สารก่อภูมิแพ้ในกีวีฟรุตนั้น เป็นโปรตีนที่มีการเรียงลำดับของกรดอะมิโน (N-terminal amino acid) ไม่เหมือนกับสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้จากเกสรของต้น Birch แอปเปิล หรือโปรตีนจากผักและผลไม้ชนิดอื่น ๆ

---

[3] Sodium dodecylsulfate-polyacrylamide gel electrophoresis

[4] เป็นขั้นตอนของการตรวจหาสารก่อภูมิแพ้ที่จำเพาะกับแอนติบอดีของผู้ป่วยที่มีอาการแพ้บนแผ่น Nitrocellulose membrane

สำหรับข้อมูลการศึกษาทางด้านคลีนิคของการแพ้ลิ้นจี่ มีรายงานว่า สารก่อภูมิแพ้จากเกสรของต้น Birch ที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุล 35 kDa มีความสัมพันธ์กับโปรตีนในลิ้นจี่ และผลไม้เขตร้อนอื่น ๆ เนื่องจากมีโครงสร้างของโปรตีนที่คล้ายคลึงกัน (Wellhausen *et al.*, 1996)

สำหรับโรคภูมิแพ้ที่มีสาเหตุมาจากการบริโภคผักนั้น มีผลจากการศึกษาทางด้านคลีนิคพบว่าร้อยละ 13.2 ของผู้ทดสอบมีอาการแพ้แครอท (Wuthrich and Schmid-Grendelmeier, 1995) ในแครอทดิบ พบสารก่อภูมิแพ้อย่างน้อย 3 ชนิด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 42, 31 และ 23 kDa นอกจากนี้มีผลงานวิจัยหลายฉบับที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของโปรตีนในแครอทมีความสัมพันธ์กับเกสรของต้น Birch และเกสรของต้น Mugwort ที่มีชื่อว่า Art-v-1 (Santiago *et al.*, 1997)

ในมันฝรั่ง Castell *et al.*, (1986) พบโปรตีนจำนวนมากที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 14-40 kDa สามารถกระตุ้นให้เกิดการตอบสนองต่อระบบภูมิคุ้มกันได้ และมีรายงานที่กล่าวถึงความสัมพันธ์กับเกสรของต้น Birch ด้วย

Celery เป็นผักที่ทำให้เกิดการแพ้มากที่สุด มีการศึกษาทางด้านคลีนิคจากผู้ป่วยที่มีอาการแพ้อาหาร จำนวน 402 คน พบผู้ป่วยจำนวน 172 คนที่มีอาการแพ้ Celery (Wuthrich and Scmid-Grendelmeier, 1995) และผู้ป่วยเกือบทุกคนที่มีอาการแพ้ Celery ก็จะแสดงอาการแพ้เกสรของต้น Birch และ/หรือ เกสรของต้น Mugwort ด้วย

จากการศึกษาของ Vallier *et al.*, (1988) พบว่า จากกลุ่มคนที่ผ่านการทดสอบหาสารก่อภูมิแพ้ พบผู้ทดสอบร้อยละ 88 มีปฏิกิริยาทางบวกต่อเกสรของต้น Birch นอกจากนี้ยังพบผู้ทดสอบร้อยละ 59 ที่มีผลทางบวกต่อเกสรของต้น Mugwort ด้วย Bauer *et al.*, (1996) ได้อธิบายถึงโครงสร้างที่เหมือนกันระหว่างโปรตีนใน Celery ที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลช่วง 46-60 kDa กับสารก่อภูมิแพ้หลักที่มีในเกสรต้น Birch (Bet-v-1) และ สาร Profilin ในเกสรของต้น Birch รวมทั้งโปรตีนที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกันที่มีในเกสรของต้น Mugwort อีกด้วย

Wuthrich *et al.*, (1990) อธิบายเกี่ยวกับเกสรของต้น Birch ว่า มีสารทำให้เกิดภูมิแพ้ซึ่งไม่ทนต่อความร้อน ส่วนเกสรของต้น Mugwort มีสารก่อภูมิแพ้ที่มีความเสถียรต่อความร้อน

Jankiewicz *et al.*, (1996,1998) ทำการทดลองกับ Celery โดยนำไปผ่านความร้อนภายใต้สภาวะควบคุม พบว่า มีสารก่อภูมิแพ้ที่มีชื่อว่า Apig-1 ซึ่งเป็นสารก่อภูมิแพ้ที่เป็นตัวหลักอยู่ใน Celery และเป็นสารที่ไม่ทนต่อความร้อน แต่ Profilin ใน Celery มีคุณสมบัติทนความร้อนมากกว่า อย่างไรก็ตาม ได้มีการทดลองกระบวนการต่าง ๆ โดยใช้เทคโนโลยีหลายอย่างเพื่อการศึกษาเรื่องนี้ใน Celery เช่น การใช้ความร้อนดังเช่นวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไป (Conventional heating)

การใช้ไมโครเวฟ (Micro-wave treatment) การใช้กระแสไฟฟ้าแรงสูงเช่นเดียวกับที่ใช้ในการผลิตน้ำผัก-ผลไม้ (High electric impulse treatment) การใช้ความดันสูง (High pressure) การหมัก (Fermentation) การฉายรังสี (Irradiation) และการแช่เยือกแข็ง (Freezing) ร่วมด้วย ผลก็คือ สารก่อภูมิแพ้ถูกลดความรุนแรงลง ในขณะที่สาร Profilin นั้นมีคุณสมบัติทนความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า ภายหลังจากการให้ความร้อนต่อ Celery อีกก็พบสารก่อภูมิแพ้ปรากฏให้เห็นเป็นแถบ (Allergen bands) ซึ่งมีค่าน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 30-45 kDa ซึ่งยังไม่ได้มีการตรวจสอบอีกด้วย (Jankiewicz *et al.*,1995)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดและน้ำหนักโมเลกุลของสารก่อภูมิแพ้ที่พบในเกสรดอกไม้ ผัก และผลไม้

แหล่งของสารก่อภูมิแพ้	ชื่อของสารก่อภูมิแพ้	น้ำหนักโมเลกุล (kDa)	คุณสมบัติของสารก่อภูมิแพ้	อ้างอิงจาก (Reference)
เกสรต้น Birch	Bet-v-1	14, 16 และ 35	ไม่ทนความร้อน	Bauer *et. al.*, 1996 ; Claudio *et al.*, 1993 ;
Birch				Vieths *et al.*, 1995 ; Wellhausen *et al.*, 1996
Birch Profilin	Bet-v-2	-	ไม่ทนความร้อน	Bauer *et. al.*, 1996
เกสรต้น Mugwort	Art-v-1	60-65	ทนต่อความร้อน	Sanitago *et al.*, 1997
กล้วย	-	34 , 32, 40, 52, 58, 88 และ 94	-	Sanchez *et al.*, 1999 ; Moller *et al.*, 1998
กีวีฟรุต	Act-c-2	43	-	Moller *et al.*, 1997
ลูกพีช	-	12.8 และ 20	-	Claudio *et al.*, 1993
มะม่วงสายพันธุ์ *Eden, Ngowe,*	-	14, 30, 40, 43 และ 63	-	Kinder *et al.*, 1999
Osteen และ *Tommy Atkins*				
แอปเปิล	Mal-d-1	18	ไม่ทนความร้อน	Jankiewicz *et al.*, 1995 ; Vieths *et al.*, 1995
แครอท	-	42, 31 และ 23	-	Sanitago *et al.*, 1997
มันฝรั่ง	-	14-40	-	Castells *et al.*, 1986
ลิ้นจี่	-	16	-	Faeh *et al.*, 1995
Avocado	-	27, 43, 52, 58, 65, 75 และ 88	-	Moller *et al.*, 1998
Celery	Apig-1	46-60	ไม่ทนความร้อน	Bauer et al., 1996 ; Jankiewicz *et al.*, 1995, 1998
Celery Profilin	-	-	ทนต่อความร้อน	Jankiewicz *et al.*, 1995, 1998

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

การตรวจสอบสารก่อภูมิแพ้ (Detection of Allergen)

ในปัจจุบันการตรวจสอบเพื่อวินิจฉัยโรคภูมิแพ้หลาย ๆ ชนิดในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์และห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์แขนงต่าง ๆ เป็นวิธีการตรวจสอบที่อาศัยหลักของการตรวจหาแอนติเจนหรือแอนติบอดี โดยใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อกัน ซึ่งแอนติเจนสามารถทำปฏิกิริยากับแอนติบอดี โดยอาศัยการรวมตัวระหว่าง Antigentic determinant ของแอนติเจนกับ Combining site ของแอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อกัน โดยส่วนประกอบทั้งสองนี้จะต้องเข้ากันได้อย่างลงตัว (Complementary) ทั้งในส่วนของกลุ่มอะตอม (Atomic group) รูปร่าง (Configuration) จึงจะสามารถทำปฏิกิริยากันได้ดี ซึ่งปฏิกิริยานี้อาจเกิดได้ทั้งภายในและภายนอกร่างกาย

การตรวจสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการตรวจหาแอนติเจนและแอนติบอดี
(Laboratory Methods for Detection of Antigens and Antibodies)

การทำปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดีในห้องปฏิบัติการ บางกรณีจะก่อให้เกิดผลที่สามารถมองเห็นได้ เช่น มีตะกอน หรือมีการเกาะกลุ่มของแอนติเจนที่เป็นเซลล์เกิดขึ้น แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องติดฉลากแอนติเจนหรือแอนติบอดีด้วยสารบางชนิดเสียก่อน จึงจะทำให้ทราบได้ว่ามีปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดีเกิดขึ้น ดังนั้นจากหลักการของปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดี จึงสามารถแบ่งการตรวจสอบออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้คือ

การตรวจสอบที่ใช้ปฏิกิริยาการตกตะกอน (Precipitation) : แอนติเจนที่อยู่ในรูปของสารละลาย เช่น โปรตีน หรือ Polysaccharide เมื่อรวมกับแอนติบอดีที่จำเพาะในสัดส่วนที่พอเหมาะจะทำปฏิกิริยาและเกิดการตกตะกอนให้เห็นได้ อัตราส่วนระหว่างแอนติบอดีและแอนติเจนที่ใช้ในปฏิกิริยามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดตะกอนของ Antigen-antibody complex ซึ่งอธิบายได้โดยอาศัย Lattice theory กล่าวคือ แอนติบอดีหนึ่งโมเลกุลสามารถจับกับแอนติเจนได้หลายโมเลกุล และแอนติเจนหนึ่งโมเลกุลก็สามารถจับกับแอนติบอดีได้มากกว่า 1 โมเลกุล ดังนั้นถ้าแอนติเจนและแอนติบอดีมีปริมาณพอเหมาะกัน ก็สามารถจับกันในลักษณะที่ต่อเป็นสายยาวได้ ยิ่งแอนติเจนและแอนติบอดีที่จับกันนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าไร ก็จะยิ่งละลายได้น้อยและสามารถตกตะกอนให้เห็นได้ชัดเจน นอกจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณแอนติเจนและแอนติบอดีแล้ว ยังมี

ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการตกตะกอนของ Antigen-antibody complex เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของเกลือ (Ionic strength) อุณหภูมิ ฯลฯ

การตรวจสอบที่ใช้ปฏิกิริยาการลบล้างฤทธิ์ (Neutralization) : คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของแอนติบอดี คือ ความสามารถในการลบล้างฤทธิ์ของแอนติเจน ปฏิกิริยาการลบล้างฤทธิ์ใช้เป็นหลักของการตรวจสอบหาแอนติบอดีต่อเชื้อจุลชีพ หรือสารพิษของเชื้อจุลชีพหลายชนิด เพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคติดเชื้อ โดยการนำสิ่งที่ต้องการตรวจ เช่น เซรุ่มมาทำปฏิกิริยากับแอนติเจน หลังจากนั้นตรวจดูฤทธิ์ของแอนติเจนว่ายังคงอยู่หรือไม่ ถ้าในเซรุ่มมีแอนติบอดีที่สามารถลบล้างฤทธิ์ของแอนติเจนดังกล่าวได้ ก็จะไม่สามารถตรวจพบฤทธิ์ของแอนติเจนนั้น

การตรวจสอบที่ใช้ปฏิกิริยาการรวมกลุ่ม (Agglutination) : ปฏิกิริยาการรวมกลุ่มจะแตกต่างจากปฏิกิริยาการตกตะกอน กล่าวคือ แอนติเจนไม่ได้อยู่ในสภาพที่เป็นสารละลาย แต่เป็น Particulate antigen โดยแอนติเจนนี้จะอยู่บนผิวของเซลล์หรือ Insoluble particle เช่น แอนติเจนบนผิวของเม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว บัคเตรี เป็นต้น เมื่อทำปฏิกิริยากับแอนติบอดีที่จำเพาะต่อกัน แอนติบอดีจะเป็นตัวเชื่อมโยงแอนติเจนหลาย ๆ ตัว ซึ่งอยู่ใกล้กันเข้าหากัน มี Cross-linking เกิดการรวมกลุ่มกันขึ้น การเกิดปฏิกิริยาการรวมกลุ่มนั้น ถ้าแอนติบอดีมีปริมาณมากเกินไป Antigen determinant บนผิวของแอนติเจนจะถูกจับโดยแอนติบอดีหมด ทำให้ไม่มีการเชื่อมโยงให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มเช่นเดียวกับในปฏิกิริยาการตกตะกอน

การตรวจสอบที่ใช้ปฏิกิริยาการตรึงคอมพลีเมนต์ (Complement fixation test) : คอมพลีเมนต์เป็นกลุ่มของสารโปรตีนในน้ำเหลือง ซึ่งจะถูกกระตุ้นและใช้ไปเมื่อมีปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดีเกิดขึ้น และนำไปสู่การแตกสลายของเซลล์ หลักการนี้ได้นำไปใช้ในการตรวจหาแอนติบอดีและแอนติเจน โดยให้แอนติเจนทำปฏิกิริยากับแอนติบอดีที่จำเพาะต่อกันแล้วเติมคอมพลีเมนต์ที่ทราบปริมาณลงไปด้วย ปฏิกิริยาในชุดนี้เรียกว่า Test system ซึ่งไม่สามารถอ่านผลได้ จะต้องใช้ Indicator system ซึ่งประกอบด้วย แอนติเจนและแอนติบอดีอีกชุดหนึ่งที่ใช้คอมพลีเมนต์ในการแสดงปฏิกิริยาให้เห็นได้ชัดเจน ดังนั้นวิธีการตรวจสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน เช่น ถ้าต้องการทดสอบหาแอนติบอดีในเซรุ่ม ขั้นตอนแรกจะเป็นการผสมเซรุ่มกับแอนติเจนที่ทราบชนิดและปริมาณ โดยใส่คอมพลีเมนต์จำนวนจำกัดลงไปด้วย ถ้าในเซรุ่มนั้นมีแอนติบอดีที่จำเพาะกับแอนติเจนซึ่งใช้ในการทดสอบ แอนติบอดีจะทำปฏิกิริยากับแอนติเจนและ

กระตุ้นคอมพลีเมนต์ ทำให้คอมพลีเมนต์ถูกใช้ไป หรืออาจเรียกว่าถูกตรึง (Fix) ส่วนขั้นตอนที่สอง คือ Indicator system เมื่อเติมเม็ดเลือดแดงของแกะที่ได้ทำปฏิกิริยากับแอนติบอดีที่จำเพาะต่อเม็ดเลือดแดงนั้นอยู่แล้วลงไป ถ้าในเซรุ่มมีแอนติบอดีมากพอ คอมพลีเมนต์จะถูกใช้ไปจนเหลือไม่เพียงพอที่จะทำให้เม็ดเลือดแดงของแกะเกิดการแตกสลาย (Hemolysis) ได้ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการทำหน้าที่ของคอมพลีเมนต์ จึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้ได้มาตรฐานอยู่เสมอในการตรวจสอบแต่ละครั้ง ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ปริมาณของเม็ดเลือดแดงที่ใช้ ปริมาณและคุณภาพของแอนติบอดี เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความเป็นกรด-ด่าง Ionic strength ความเข้มข้นของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ

การตรวจสอบโดยใช้แอนติเจนหรือแอนติบอดีที่ติดฉลาก (Method with labelled antigen or labelled antibody) : ในการตรวจสอบซึ่งอาศัยหลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดีนั้น อาจใช้สารบางอย่างเป็นเครื่องช่วยบ่งชี้ว่ามีปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้น โดยการนำสารนั้นไปติดฉลากแอนติเจน หรือแอนติบอดี การตรวจสอบส่วนใหญ่จะใช้การติดฉลากแอนติบอดี สารที่นำมาใช้ติดฉลาก คือ สารกัมมันตภาพรังสี (Radioactive substance) เอนไซม์ สารเรืองแสง (Fluorescent substance หรือ Fluorochrome) และ Ferritin หลังจากติดฉลากแล้วแอนติเจนหรือแอนติบอดีที่ใช้ยังคงมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาเหมือนเดิม และสารที่นำมาติดฉลากก็ยังคงมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจสอบและใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ปฏิกิริยาได้ วิธีการทดสอบซึ่งอาศัยหลักการดังกล่าวนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ Immunohistochemical technique และ Immunoassay

Immunohistochemical technique : วิธีการตรวจสอบนี้ ใช้สำหรับการตรวจหาแอนติเจน หรือแอนติบอดีที่อยู่ในเนื้อเยื่อ แอนติเจนของเซลล์ หรือแอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อแอนติเจนในเนื้อเยื่อ หรือจำเพาะต่อแอนติเจนของเซลล์ เช่น เชื้อบัคเตรี เม็ดเลือด เป็นต้น วิธีการตรวจสอบในกลุ่มนี้อาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการตรวจหาตำแหน่งของแอนติเจนหรือแอนติบอดีนั้น ตัวอย่างวิธีการตรวจสอบที่ใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ Immunofluorescence วิธีการตรวจสอบซึ่งใช้แอนติบอดีติดฉลากด้วยเอนไซม์ หรือ Ferritin และ Autoradiography

Immunoassay : เป็นวิธีการตรวจสอบแอนติบอดี หรือหาแอนติเจนในสิ่งส่งตรวจ ซึ่งเป็นของเหลว เช่น ในเซรุ่ม สารที่นิยมนำมาติดฉลากแอนติเจนหรือแอนติบอดีเพื่อใช้ในวิธีการตรวจสอบนี้ คือ สารกัมมันตภาพรังสี และเอนไซม์ นอกจากนี้อาจจะใช้สารเรืองแสงได้ด้วย

ตัวอย่างวิธีการตรวจสอบที่ใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ Radioimmunoassay (RIA), Enzyme immunoassay, Avidin-Biotin system และ Immunoblotting

การตรวจสอบโดยใช้วิธี Immunoblotting : เป็นการตรวจสอบเพื่อช่วยวินิจฉัยโรคบางชนิด นอกจากจะดูว่ามีแอนติเจนหรือแอนติบอดีที่สงสัยหรือไม่แล้ว บางครั้งอาจจำเป็นต้องแยกแยะลงไปถึงขั้นการตรวจหาโปรตีนจำเพาะในส่วนประกอบของสารก่อภูมิแพ้นั้น ๆ ซึ่งทำได้โดยวิธี Immunoblotting หรือ Western blot technique เป็นวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Southern blot ซึ่งใช้ศึกษาเกี่ยวกับ DNA

วิธีการของ Immunoblotting แบ่งเป็นขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้ดังนี้คือ

1. การแยกส่วนประกอบของโปรตีนด้วยกระแสไฟฟ้าบนวุ้นแยกโปรตีนชนิดต่าง ๆ เช่น SDS-Polyacrylamide gel, Isoelectric focusing gel หรือ Peptide mapping gel ซึ่งจะแยกโปรตีนออกเป็นส่วนต่าง ๆ

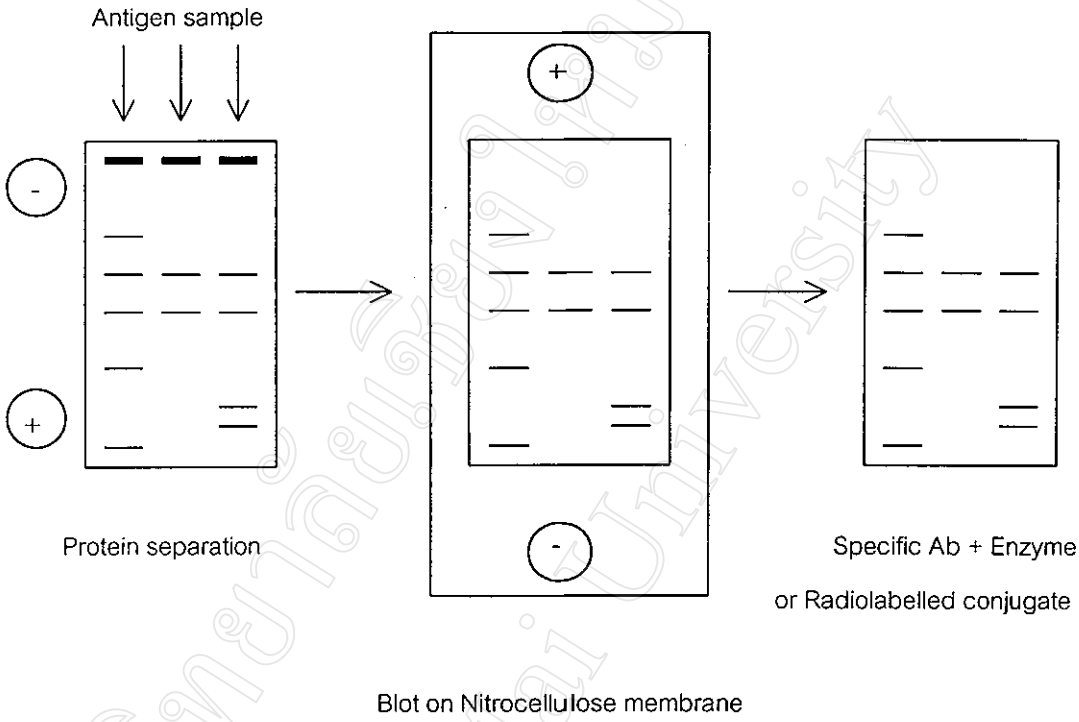
2. การ blot หรือถ่ายซับโปรตีนที่แยกได้จากวุ้นลงบน Nitrocellulose membrane โดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrophoretic transfer)

3. เติมแอนติบอดีซึ่งจำเพาะต่อแอนติเจนที่ต้องการตรวจหาลงไป เพื่อทำปฏิกิริยากับแอนติเจนบน Nitrocellulose membrane

4. หลังจากล้างเอาส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกไปแล้ว เติม Anti-immunoglobulin ซึ่งติดฉลากด้วยสารกัมมันตรังสี หรือเอนไซม์ลงไป หรืออาจจะใช้ Staphytococus protein A ที่ติดฉลากด้วยสารกัมมันตรังสีไอโอดีน (I^{125}) ซึ่งสามารถจับกับ IgG ได้อย่างแน่นหนา

5. ขั้นต่อไปเป็นการตรวจดูแถบ (Band) ของโปรตีนที่เกิดขึ้นโดยการ Autoradiography บนฟิลม์เอ็กซเรย์ในกรณีที่ใช้สารติดฉลากกัมมันตรังสี ส่วนในกรณีที่ใช้เอนไซม์ดูการเกิดสี โดยการเติม Substrate ตรวจดูแถบที่เกิดขึ้นบน Nitrocellulose membrane อ่านผลเทียบกับ Control

Immunoblotting มีความไวและความจำเพาะสูงมาก จึงมีประโยชน์มากในการช่วยวินิจฉัย หรือช่วยยืนยันผลการตรวจสอบอื่น ๆ เช่น ในการศึกษาผู้เป็นโรคภูมิคุ้มกันบกพร่อง (AIDS) การตรวจหาแอนติบอดีต่อ HIV ซึ่งเป็นไวรัสก่อโรค โดยทั่วไปจะใช้วิธี ELISA ซึ่งบางครั้งอาจให้ผลบวกเทียมก็ได้ ดังนั้นในผู้ที่ให้ผลบวกจึงจำเป็นต้องยืนยันผลการตรวจสอบโดยการทำ Immunoblotting เพื่อตรวจหาแอนติบอดีต่อโปรตีนที่จำเพาะของ HIV ต่อไป



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของเทคนิค Immunoblotting หรือ Western blot

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

กระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อน (Thermal Process)

การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูป หมายถึง การใช้อุณหภูมิสูง เพื่อช่วยให้อาหารมีความคงตัว ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการถนอมอาหาร เนื่องจากอาหารเสื่อมเสียได้ง่ายจากจุลินทรีย์และเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวอาหารเอง ปัจจุบันได้มีการพัฒนากรรมวิธีการถนอมอาหารด้วยความร้อนให้ดีขึ้น เพื่อให้คงคุณค่าทางอาหาร ประหยัด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการเลือกใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูป ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ได้แก่

การต้ม (Cooking) : เป็นการทำลาย หรือลดจำนวนจุลินทรีย์ และทำลายเอนไซม์ที่มีอยู่ในอาหาร นอกจากนี้ยังทำลายสารพิษที่มีอยู่หรือที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น เกิดการเปลี่ยนสี เปลี่ยนรส เนื้อสัมผัส และยังอาจทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหาร และรสชาติที่ต้องการ

การลวก (Blanching) : เป็นขั้นตอนที่ใช้กับผักและผลไม้ เพื่อสะดวกในการบรรจุ นอกจากนี้ยังทำลายเอนไซม์ที่มีอยู่ และอาจทำลายจุลินทรีย์บางชนิด ก่อนที่จะผ่านไปยังกระบวนการแปรรูปวิธีอื่น ๆ โดยเฉพาะกระบวนการแปรรูปโดยการบรรจุกระป๋อง

การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) : เป็นการใช้ความร้อน เพื่อทำลายจุลินทรีย์เพียงบางส่วนในอาหาร คือ ทำลายแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคกับมนุษย์ (Pathogenic) และไม่สร้างสปอร์ หรือทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย ทั้งนี้จะต้องเก็บอาหารไว้ในสภาพที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้น้อยที่สุด ร่วมกับวิธีการแช่เย็น การเติมสารเคมี เป็นต้น อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์จะขึ้นกับความต้านทานของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคกับมนุษย์และเซลล์ (Vegetative cell) ที่ต้องการทำลาย และยังขึ้นอยู่กับคุณค่าทางอาหารที่เหลืออยู่หลังจากได้รับความร้อนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์คงคุณภาพดีที่สุด

การสเตอริไลซ์ (Sterilization) : เป็นการใช้ความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์รวมทั้งสปอร์ของจุลินทรีย์ให้หมดไป แต่การเลือกใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหารโดยวิธีนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นั้น ไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากการสเตอริไลซ์จะใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน ซึ่งผลจากการใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานนี้ นอกจากจะทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ทั้งหมดในอาหารแล้ว ยังทำให้คุณค่าทางอาหารสูญเสียไปด้วย ดังนั้นจึงมีการให้ความร้อนในระดับที่เรียกว่าการสเตอริไลซ์แบบการค้า (Commercial sterilization) คือ การใช้ระดับความร้อนที่เพียงพอที่จะ

ทำลายจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อนให้มากที่สุด รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโทษ นอกจากนี้ยังทำให้จุลินทรีย์อื่น ๆ รวมทั้งสปอร์ที่อาจหลงเหลืออยู่ไม่สามารถเติบโตได้ในสภาวะการเก็บ โดยทั่วไปอาหารที่ผ่านการสเตอริไลซ์แล้ว มักจะบรรจุในภาชนะปิดสนิทเพื่อป้องกันการปนเปื้อนในภายหลัง ซึ่งการให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อในระดับที่เป็นการสเตอริไลซ์แบบการค้านี้ พบว่า อาหารนั้นอาจจะไม่พบเชื้อเจริญเติบโต ทั้ง ๆ ที่มีสปอร์และเซลล์ที่มีชีวิต (Viable) อยู่ จนกว่าจะถ่ายอาหารนั้นมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารครบถ้วนแล้ว จึงจะเจริญเติบโต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาว่าในอาหารดังกล่าวจะมีเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตได้ในปริมาณเท่าใด จึงจะปลอดภัยต่อการบริโภค โดยทั่วไป ได้กำหนดระดับความร้อนที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารแล้วทำให้อาหารปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์นั้น ควรสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อ *Clostridium botulinum* สายพันธุ์ที่ทนต่อความร้อนได้สูงสุดเท่านั้นในอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ

การแบ่งกลุ่มอาหารตามความเป็นกรด-ด่าง

มีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ชนิดทนความร้อน ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการแปรรูปอาหารโดยใช้ความร้อน คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่างจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศ (Obligate anaerobes) หรือที่ต้องการอากาศเพียงเล็กน้อยในการเจริญเติบโต (Facultative anaerobes) สำหรับสปอร์บางชนิดที่ทนความร้อนได้สูงมากนั้น จะไม่สามารถเจริญ และก่อให้เกิดอันตรายในอาหารที่มีความเป็นกรด ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์และสปอร์บางชนิด ที่ทนความร้อนในอาหารที่มีความเป็นกรด Cammeron and Esty (1940) ได้แบ่งอาหารออกเป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้

กลุ่มอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ : คือ อาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 5.0 ถึง 6.8 ได้แก่ อาหารจำพวกเนื้อสัตว์ สัตว์ปีก สัตว์น้ำ ผลิตภัณฑ์นม และผลิตภัณฑ์ผักบางชนิด

กลุ่มอาหารที่มีความเป็นกรดปานกลาง : อาหารกลุ่มนี้จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 4.5 ถึง 5.0 ได้แก่ อาหารจำพวกซุป ผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ เป็นต้น

กลุ่มอาหารที่มีความเป็นกรด : จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 3.7 ถึง 4.5 ได้แก่ สับประรด มะเขือเทศ ส้ม ลูกท้อ และผลไม้บางชนิด

กลุ่มอาหารที่มีความเป็นกรดสูง : มีค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 3.7 ลงมา ได้แก่ อาหารจำพวก ผักดอง อาหารหมักดอง แยม เจลลี่ และน้ำผลไม้บางชนิด

จากการแบ่งอาหารออกเป็นกลุ่ม ๆ เช่นนี้ ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหารได้อย่างเหมาะสม โดยอาหารที่มีความเป็นกรด หรือมีความเป็นกรดสูง สามารถใช้ความร้อนเพียง 90 องศาเซลเซียส หรือต้มให้เดือดแล้วทำให้เย็นก็เพียงพอแล้วสำหรับการทำลายจุลินทรีย์ แต่ถ้าเป็นอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงถึง 116 องศาเซลเซียส หรือ 121.1 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาหนึ่ง

การส่งผ่านความร้อนเข้าไปในอาหารกระป๋อง

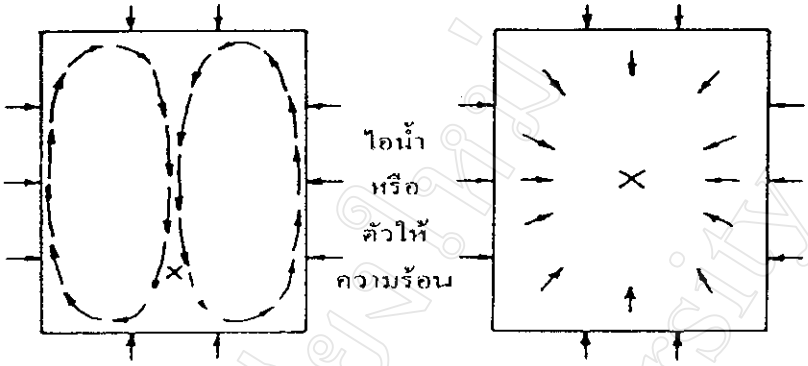
วิธีการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในภาชนะบรรจุนั้น สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีการพาความร้อน : ความร้อนจะถูกพาเข้าไปในอาหารกระป๋อง โดยโมเลกุลของสารละลายที่สามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ และเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ เช่น อาหารในน้ำเกลือ

การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีการนำความร้อน : เป็นการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในกระป๋อง โดยความร้อนจะผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง ผลิตภัณฑ์อาหารชนิดนี้จะได้รับความร้อนช้า และส่วนมากจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง

การส่งผ่านความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสี : เป็นลักษณะการถ่ายเทพลังงานความร้อน เช่น แสงจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่า พลังงานความร้อนจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน คือ จากส่วนที่ร้อนไปสู่ส่วนที่เย็น จนในที่สุดจะเกิดความสมดุล

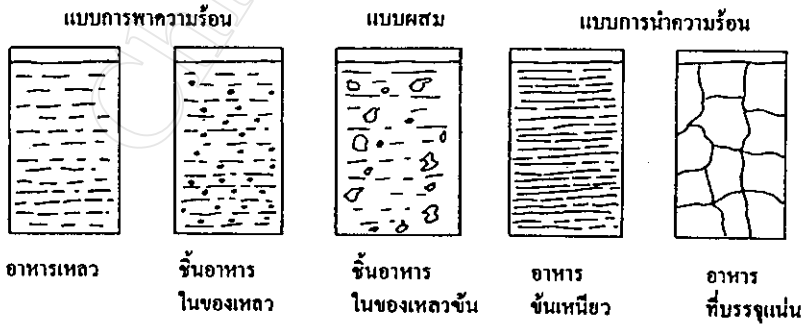
วิธีการส่งผ่านความร้อนดังกล่าวข้างต้น ทำให้เกิดจุดที่ความร้อนเข้าถึงช้าที่สุด (Cold point) ซึ่งจะเกิดในที่ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการส่งผ่านความร้อน



การส่งผ่านความร้อนแบบการพา การส่งผ่านความร้อนแบบการนำ

จุด X เป็นจุดที่ความร้อนเข้าถึงช้าที่สุด

รูปที่ 2.5 แสดงจุดที่ความร้อนเข้าถึงช้าที่สุดของแต่ละวิธีการส่งผ่านความร้อน



รูปที่ 2.6 แบบการส่งผ่านความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหาร

หลังจากที่กระป๋องอาหารถูกปิดสนิท แล้วนำไปฆ่าเชื้อในหม้อฆ่าเชื้อที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยการใช้ไอน้ำเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ความร้อนจะถ่ายเทจากไอน้ำไปยังกระป๋อง ซึ่งในขั้นนี้การส่งผ่านความร้อนจะเป็นวิธีการนำความร้อน ส่วนการถ่ายเทความร้อนจากตัวกระป๋องไปยังอาหารที่บรรจุอยู่ในกระป๋อง และการถ่ายเทความร้อนภายในตัวอาหารเองจะเป็นวิธีการพา หรือวิธีการนำความร้อน หรือจะเป็นทั้งสองแบบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารที่บรรจุอยู่ และลักษณะของการบรรจุ

แบบการส่งผ่านความร้อนของผลิตภัณฑ์ในอาหารกระป๋องนี้ Jackson (1940) ได้แบ่งแบบการส่งผ่านความร้อนออกเป็นหลายแบบตามลักษณะการบรรจุดังนี้

- ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการส่งผ่านความร้อนแบบการพาความร้อนตลอดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ ได้แก่ ผลไม้ที่บรรจุในน้ำเชื่อม หรือน้ำเกลือ ผักที่บรรจุในน้ำเกลือ น้ำผลไม้ และน้ำผักเกือบทุกชนิด เนื้อสัตว์ และสัตว์น้ำที่บรรจุในน้ำเกลือ ถ้าชิ้นของอาหารมีขนาดใหญ่ การส่งผ่านความร้อนภายในอาหารอาจจะช้าลงเล็กน้อย
- ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการส่งผ่านความร้อนแบบการพาความร้อนอย่างช้า ๆ การส่งผ่านความร้อนของอาหารในกลุ่มนี้จะช้ากว่าในกลุ่มแรก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ หรือเนื้อสัตว์ที่บรรจุแน่นขึ้น ทำให้มีน้ำ ซึ่งเป็นตัวพาความร้อนลดลง
- ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการส่งผ่านความร้อนแบบการพาความร้อน แล้วเปลี่ยนเป็นแบบการนำความร้อนในระหว่างการฆ่าเชื้อ ได้แก่ อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ ซุปผัก ผลิตภัณฑ์จำพวกก๋วยเตี๋ยว น้ำผักและผลไม้บางชนิด เช่น น้ำมะเขือเทศ
- ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการส่งผ่านความร้อนแบบการนำความร้อนตลอดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ ได้แก่ ผักและผลไม้ที่มีลักษณะการบรรจุอย่างอัดแน่นโดยไม่มีของเหลวอยู่เลย เช่น ผักปั่น ฟักทอง ซุปข้าวโพด แยม เนื้อสัตว์ สัตว์น้ำ หรือผักที่บรรจุในซอส ซุปครีม ซุปข้น ผักและเนื้อสัตว์ในซอสข้น อาหารจำพวกแป้งที่บรรจุอย่างอัดแน่น
- ผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งเริ่มต้นจะเป็นแบบการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อน แล้วเปลี่ยนเป็นแบบการพาความร้อน ซึ่งปกติจะไม่ค่อยเกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากการเสียโครงสร้างของเจล เช่น อาหารจำพวกของหวานข้น หรือน้ำมะเขือเทศบางชนิด

กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง (Canning Process)

กระบวนการผลิตอาหารกระป๋องมีหลักการสำคัญ คือ การบรรจุอาหารที่สะอาดลงในกระป๋องที่สะอาด ปิดฝาให้สนิทจนกระทั่งไม่มีสิ่งใดผ่านเข้าออกได้ แล้วจึงนำไปผ่านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และทำลายเอนไซม์ด้วยความร้อน

ขั้นตอนในการผลิตอาหารกระป๋องมีหลายขั้นตอน กล่าวคือ เมื่อมีการรับและตรวจคุณภาพวัตถุดิบแล้ว วัตถุดิบจะถูกนำมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก หรืออาจจะมีการตัดแต่งวัตถุดิบให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ จากนั้นทำการลวกวัตถุดิบ เพื่อทำลายหรือยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และทำให้วัตถุดิบเกิดการอ่อนตัวเพื่อง่ายต่อการบรรจุกระป๋อง ในขั้นตอนของการบรรจุกระป๋อง จะมีเติมน้ำเชื่อมหรือน้ำเกลือลงในกระป๋องด้วย เพื่อช่วยควบคุมแรงดันออสโมติกของเซลล์ให้คงที่ จึงทำการไล่อากาศ ปิดผนึกกระป๋อง ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้เย็น ติดฉลาก และการเก็บรักษา ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียมวัตถุดิบ : ขั้นตอนนี้จะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เริ่มจากการทำความสะอาด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม จากนั้นจึงทำการคัดขนาด และคัดแยกตำหนิหรือส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ตลอดจนคัดแยกความอ่อนแก่ของวัตถุดิบเพื่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนนี้อาจจะมีการตัดแต่งวัตถุดิบให้มีขนาดและรูปร่างตามความต้องการ

การลวก (Blanching) : วัตถุดิบบางชนิด เช่น ผักและผลไม้ ควรจะผ่านการลวกก่อนการบรรจุลงกระป๋อง เพื่อทำลายเอนไซม์และลดปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ รวมทั้งกำจัดอากาศหรือน้ำบางส่วนที่มีในเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นการช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้ขั้นตอนการลวกยังจะทำให้วัตถุดิบเกิดการอ่อนตัว ช่วยลดความเสียหายในระหว่างการบรรจุได้ดี

การบรรจุ (Filling) : สิ่งที่ต้องพิจารณาในการบรรจุวัตถุดิบลงกระป๋องมีหลายประการ ได้แก่ ชนิดและขนาดของกระป๋องที่ใช้ในการบรรจุ ปริมาตรการบรรจุ การเติมน้ำเชื่อมหรือน้ำเกลือ และการเหลือช่องว่างในกระป๋อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

ชนิดของกระป๋องที่ใช้ในการบรรจุ : โดยทั่วไปกระป๋องที่ใช้ในการผลิตอาหารกระป๋อง มี 2 ประเภท คือ กระป๋องชนิดธรรมดา (Plain can) และชนิดเคลือบอีนาเมล (Enamel can) กระป๋องทั้ง 2 ประเภทนี้ มีโครงสร้างเป็นเหล็กที่ผิวภายในจะถูกเคลือบด้วยโลหะ หรือสารประกอบคล้ายยางไม้ (Resin) เพื่อป้องกันปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ เช่น การบวม การเกิดคราบดำ หรือจุดดำที่ผิวกระป๋องด้านในการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ภายใน เป็นต้น

ขนาดของกระป๋องที่ใช้ในการบรรจุ : ขนาดกระป๋องมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ กล่าวคือ วัตถุดิบชนิดเดียวกัน แม้จะผ่านกรรมวิธีการแปรรูปเช่นเดียวกัน แต่ถ้าขนาดของกระป๋องที่ใช้ในการบรรจุต่างกันแล้ว ระยะเวลาของการฆ่าเชื้อก็จะต่างกันด้วย กระป๋องขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการฆ่าเชื้อยาวนานกว่ากระป๋องขนาดเล็ก และผลจากการใช้ความร้อนสูงเป็นเวลานานเกินควร จะทำให้เกิดความเสียหายกับวัตถุดิบที่อยู่ภายในกระป๋องได้ง่าย เช่น การนิ่มและลักษณะสีซีดจางเนื่องจากรงควัตถุที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ตลอดจนการเกิดสีน้ำตาลคล้ำในผักสีเขียวบางชนิด ดังนั้น จึงไม่ควรบรรจุวัตถุดิบที่เสียหายได้ง่ายเนื่องจากความร้อนในกระป๋องขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการเลือกขนาดกระป๋องเพื่อบรรจุอาหารชนิดใดชนิดหนึ่งนั้น จะต้องคำนึงถึงปริมาณการใช้งานในแต่ละครั้งของผู้บริโภคด้วยเช่นกัน

ปริมาตรการบรรจุ : เนื่องจากการผลิตอาหารบรรจุกระป๋องเป็นการผลิตอาหารที่บรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 69 (พ.ศ. 2525) ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดน้ำหนักเนื้ออาหาร (Drained weight) ที่บรรจุในกระป๋อง ตัวอย่างเช่น ผลไม้กระป๋องชนิดแว่นหรือชิ้น จะต้องมีเนื้อผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของน้ำหนักสุทธิ ผลไม้กระป๋องชนิดทั้งผลจะต้องมีเนื้อผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของน้ำหนักสุทธิ เป็นต้น น้ำหนักเนื้ออาหาร หมายถึง น้ำหนักที่ตรวจสอบจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งน้ำหนักเนื้ออาหารโดยเฉพาะผักและผลไม้ จะมีน้ำหนักลดต่ำกว่าน้ำหนักบรรจุเล็กน้อย เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำและสารอาหารบางส่วนออกจากเนื้อเยื่อในระหว่างการฆ่าเชื้อและการเก็บรักษา

นอกจากข้อพิจารณาด้านกฎหมายแล้ว ปริมาตรของอาหารที่บรรจุในกระป๋องยังมีผลต่อแบบแผนการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยเช่นกัน การบรรจุอาหารลงในกระป๋องที่มากเกินควร จะทำให้มีการอัดตัวของเนื้ออาหารแน่นขึ้น การถ่ายเทความร้อนภายในกระป๋อง โน้มเอียงไปในแนวทางของการนำความร้อนมากยิ่งขึ้น เป็นเหตุให้ต้องใช้เวลาในการฆ่าเชื้อนานกว่าปกติ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการบรรจุจะต้องควบคุมปริมาตรของอาหารในแต่ละกระป๋องให้เหมาะสม

การเติมน้ำเชื่อมหรือน้ำเกลือ : ในกระบวนการผลิตอาหารกระป๋องนั้น จะมีการเติมน้ำเชื่อม หรือน้ำเกลือลงในกระป๋องด้วย เพื่อช่วยควบคุมแรงดันออสโมติกของเซลล์ให้คงที่ เป็นผลให้อาหารนั้น ๆ สามารถคงรูปร่างที่ดีเอาไว้ได้ และเพื่อเป็นการปรุงแต่งรสชาติและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

- น้ำเกลือ : ส่วนใหญ่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตผักบรรจุกระป๋อง เกลือที่ใช้ในการเตรียมน้ำเกลือโดยทั่วไป คือ เกลือแกง (โซเดียมคลอไรด์ : NaCl) แต่ถ้าต้องการเพิ่มคุณค่าทางอาหาร อาจจะใช้เกลือโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ร่วมกับเกลือแกง ในขั้นตอนของการเตรียมน้ำเกลือ เกลือที่ใช้ควรมีความบริสุทธิ์สูง ปราศจากการปนเปื้อนของอนุมูลโลหะ เนื่องจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาคีเลชั่น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของผักได้ง่าย

- น้ำเชื่อม : ส่วนใหญ่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตผลไม้บรรจุกระป๋อง น้ำตาลที่ใช้ในการเตรียมน้ำเชื่อมนั้น อาจใช้น้ำตาลได้หลายชนิด เช่น กลูโคส ฟรุกโตส น้ำตาลอินเวิรท์ (Invert) น้ำตาลทราย ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของความหวานที่ต้องการ คุณสมบัติในการช่วยรักษาสีและการแทรกซึมผ่านเนื้อเยื่ออาหารของน้ำตาล ตลอดจนความหนืดและความสามารถในการตกผลึก แต่โดยมากน้ำตาลที่นิยมใช้ในการเตรียมน้ำเชื่อมเพื่อการบรรจุกระป๋องคือ น้ำตาลทราย เนื่องจากหาได้ง่าย มีราคาค่อนข้างต่ำกว่าน้ำตาลชนิดอื่น ๆ ถึงแม้ว่าน้ำตาลทรายจะเป็น Di-saccharide ซึ่งมีประสิทธิภาพการแทรกซึมผ่านเนื้อเยื่ออาหารต่ำกว่ากลูโคส หรือฟรุกโตส แต่เมื่อผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนโดยมีกรดร่วมด้วย จะทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำตาลทรายบางส่วน (Acid hydrolysis) ไปเป็นน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส ดังนั้นประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันออสโมติก และการช่วยรักษาสีของอาหารจึงเกิดขึ้นได้ น้ำตาลทรายที่ใช้ในการเตรียมน้ำเชื่อมนี้ ควรเป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้น้ำเชื่อมที่ใส และปราศจากตะกอน

การเหลือช่องว่างในกระป๋อง (Head space) : ในการบรรจุอาหารลงกระป๋องมีข้อควรคำนึงว่า น้ำเชื่อมหรือน้ำเกลือที่เติมลงไปนั้นจะต้องท่วมอาหารที่มีอยู่ และจะต้องคงเหลือที่ว่างเหนือผิวของสารละลายประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตรของกระป๋อง ซึ่งที่ว่างนี้จะเรียกว่า Head space ของกระป๋อง ซึ่งจำเป็นจะต้องมีเพื่อเป็นที่อยู่ของเนื้ออาหารที่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการฆ่าเชื้อและการไล่อากาศออกจาก Head space ในขั้นตอนต่อไปจะช่วยให้เกิดสภาวะสุญญากาศขึ้นในกระป๋อง ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ และช่วยให้การปิดผนึกฝากระป๋องสนิทขึ้น

การไล่อากาศ (Exhausting) : ก่อนที่จะทำการปิดผนึกฝากระป๋องนั้น จำเป็นจะต้องมีการไล่อากาศออกจากกระป๋อง เพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่อาจเกิดขึ้นภายใน ซึ่งนอกจากจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลงแล้ว การทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับเหล็กที่เป็นโครงสร้างของกระป๋องจะทำให้เกิด เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO) หรือ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีสีดำและสีแดงตามลำดับ โดยจะติดเป็นคราบที่ตัวกระป๋อง ทำให้กระป๋องเกิดตำหนิ ไม่เป็นที่ต้องการ ความสำคัญของขั้นตอนการไล่อากาศ นอกจากจะช่วยรักษาคุณภาพของอาหารแล้ว ยังช่วยป้องกันการบวมของกระป๋อง เนื่องจากอากาศขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนในระหว่างการฆ่าเชื้ออีกด้วย

วิธีการไล่อากาศออกจากกระป๋อง มีหลายวิธี เช่น การบรรจุอาหารขณะร้อน (Hot-Filling) การใช้อุโมงค์ไล่อากาศ (Exhaust box) การปั๊มอากาศออกขณะปิดฝา (Vacuum closing) เป็นต้น แต่วิธีการที่นิยมปฏิบัติกันมากที่สุด คือ การใช้อุโมงค์ไล่อากาศ ซึ่งทำได้โดยการฉีดพ่นไอน้ำร้อนลงในกระป๋องที่เคลื่อนไปตามรางไล่อากาศ วิธีการนี้อากาศจะขยายตัวเนื่องจากความร้อน มีน้ำหนักเบาขึ้นและเคลื่อนออกจากกระป๋องไปในที่สุด วิธีการไล่อากาศอย่างเหมาะสมโดยมากจะกำหนดโดยอุณหภูมิของอาหารภายใน (Initial temperature) ซึ่ง Cruess (1958) กล่าวว่า การใช้อุณหภูมิของอุโมงค์ไล่อากาศประมาณ 180-205 องศาฟาเรนไฮต์ ในการไล่อากาศจนกระทั่งอุณหภูมิของอาหารเป็น 170-180 องศาฟาเรนไฮต์ นับว่าเป็นการไล่อากาศที่เหมาะสมและเพียงพอ เพื่อทำให้เกิดสภาพสุญญากาศในกระป๋องอยู่ระหว่าง 10-20 นิ้วของปรอท

การปิดฝากระป๋อง (Can closing) : เมื่อไล่อากาศเสร็จแล้ว ควรทำการปิดฝากระป๋องทันที เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศย้อนกลับเข้าสู่กระป๋อง การปิดฝากระป๋องจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Can closing machine หรือ Can seamer ซึ่งการปิดฝานี้จะต้องปิดให้สนิทอย่างแท้จริง มิฉะนั้นแล้วผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะเกิดความเสียหายในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ การกัดกร่อนภายใน การบวมของกระป๋อง รวมทั้งการเกิดสนิมบนตัวกระป๋อง ประสิทธิภาพของการปิดผนึกฝากระป๋อง จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของกระป๋อง ประสิทธิภาพของสารช่วยปิดฝา บริเวณฝาของกระป๋อง (Can sealing compound) และประสิทธิภาพของเครื่องปิดฝาเป็นสำคัญ

การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน : การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนในการผลิตอาหารกระป๋อง นับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง ผู้ผลิตจะต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ซึ่งจะสัมพันธ์กับขนาดของกระป๋อง ปริมาตรการบรรจุ และอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารที่อยู่ในกระป๋อง

อุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ : เป็นปัจจัยที่บอกถึงประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อ กล่าวคือ ถ้าใช้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อสูง ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์และสปอร์ก็จะสูงด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนในอาหารที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 หรือสูงกว่าจะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์รวมทั้งสปอร์ที่มีอยู่ เนื่องจากอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 หรือสูงกว่านั้น มักจะมีแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ที่ทนต่อความร้อนเจริญอยู่ จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำลาย แต่ถ้าอาหารที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 4.5 สามารถจะใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่านี้เล็กน้อยเพื่อทำลายจุลินทรีย์จำพวก รา และยีสต์ที่ปะปนมาได้

ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ : เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจะต้องนานพอเพื่อที่จะสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารให้ลดลงในระดับที่ต้องการ ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร ปริมาตรการบรรจุ และขนาดของกระป๋อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงนั้นจะดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เพราะจะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อสั้นลง สำหรับอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร ซึ่งวัด ณ บริเวณที่ความร้อนเข้าถึงได้ช้าที่สุดของกระป๋อง (Cold spot) ก็มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารสูง ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อก็จะสั้นกว่าอาหารที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ ส่วนปริมาตรการบรรจุจะมีผลต่อแบบแผนการถ่ายเทความร้อนในกระป๋อง การบรรจุที่มากเกินไปจะทำให้การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเอียงไปเป็นแบบการนำความร้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อยาวนานกว่าการพาความร้อน

วิธีการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน : ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส สามารถใช้อุณหภูมิน้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศปกติเพื่อการฆ่าเชื้อได้ แต่ในกรณีที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะต้องใช้หม้อฆ่าเชื้อ (Retort) ซึ่งส่วนมากหม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมจะใช้หม้อกำเนิดไอน้ำ (Boiler) เป็นแหล่งกำเนิดไอน้ำเพื่อให้พลังงานความร้อน หม้อกำเนิดไอน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารควรเป็นแบบที่สามารถให้ไอน้ำได้ไม่ต่ำกว่า 90 psi ตลอดระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน ถ้ากำลังไอน้ำต่ำเกินควร จะทำให้ระยะเวลาที่อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Coming Up Time : CUT) เป็นเวลานานเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อฆ่าเชื้อที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อให้คงที่ ณ ระดับที่ต้องการได้ตลอดระยะเวลาของการฆ่าเชื้อ

หม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนมากจะเป็นแบบอากาศนิ่ง (Still air) มีระบบการทำงานเป็นชุด ๆ (Batch type) ซึ่งอาจเป็นหม้อฆ่าเชื้อในแนวตั้ง (Vertical retort) หรือแนวนอน (Horizontal retort) ก็ได้ แต่ที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะนิยมใช้หม้อฆ่าเชื้อแบบแนวนอน แต่ไม่ว่าหม้อฆ่าเชื้อจะเป็นแบบใดก็ตามล้วนประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

- ท่อนำไอน้ำและท่อกระจายไอน้ำ (Steam inlet and Steam spreader) : ซึ่งอาจมีจำนวนมากกว่า 1 ท่อ เพื่อกระจายไอน้ำในหม้อฆ่าเชื้อให้สม่ำเสมอและทั่วถึง เพื่อช่วยให้อุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อคงที่และสม่ำเสมอ ณ ระดับที่ต้องการ ตลอดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ
- หน่วยควบคุมไอน้ำ (Steam controllor) : หม้อฆ่าเชื้อจะต้องมีหน่วยควบคุมไอน้ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในฆ่าเชื้อ ไม่ให้คลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจเป็นการควบคุมปริมาณไอน้ำที่เข้าสู่หม้อฆ่าเชื้อ หรือเป็นการระบายไอน้ำส่วนเกินออกไปเป็นระยะ ๆ ก็ได้
- ท่อทางลัดไอน้ำ (Steam by pass) : เป็นท่อนำไอน้ำออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำเข้าสู่หม้อฆ่าเชื้อ ซึ่งท่อนี้สามารถปิด-เปิดได้เองโดยผู้ควบคุม ส่วนใหญ่จะเปิดท่อนี้เมื่อต้องการเร่งให้อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อเร็วขึ้น ซึ่งนับเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับหม้อฆ่าเชื้อที่มีขนาดใหญ่ แต่มีข้อควรระวังคือ จะต้องควบคุมท่อทางลัดของไอน้ำนี้อย่างเข้มงวดตลอดระยะเวลาการทำงาน เพราะถ้าเปิดทิ้งไว้นานเกินควรจะทำให้ปริมาณไอน้ำ และความดันในหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนอาจก่อให้เกิดอันตรายได้
- วาล์วนิรภัย (Safety valve) : เป็นลิ้นในท่อที่สามารถเปิดออกได้โดยอัตโนมัติ เมื่อความดันในหม้อฆ่าเชื้อสูงเกินไป และเมื่อวาล์วนิรภัยเปิดออก ไอน้ำในหม้อฆ่าเชื้อจะถูกระบายออกไป ทำให้ความดันในหม้อฆ่าเชื้อลดลงอย่างรวดเร็วถึงจุดที่ต่ำกว่าจุดอันตราย ดังนั้นในการใช้หม้อฆ่าเชื้อในแต่ละครั้ง ควรตรวจสอบวาล์วนิรภัยนี้ว่ามีสภาพพร้อมที่จะทำงานได้ตามปกติหรือไม่
- ท่อระบายอากาศ (Ventilation valve) : เป็นท่อระบายอากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อก่อนเริ่มทำการฆ่าเชื้อ ซึ่งเมื่อไล่อากาศออกไปแล้ว ภายในหม้อฆ่าเชื้อจะอิ่มตัวด้วยไอน้ำอย่างแท้จริง ซึ่งประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัวจะสูงกว่าไอน้ำที่มีอากาศปนอยู่ด้วย ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อสั้นลง
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) : เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในการปฏิบัติงาน ช่วยบอกอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อในระหว่างการฆ่าเชื้อ การบันทึกอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อในระหว่างการฆ่าเชื้อ ควรเป็นการบันทึกโดยอัตโนมัติบนแผ่นกราฟตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะในทางทฤษฎี อุณหภูมิ

ของหม้อฆ่าเชื้อจะต้องคงที่ ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้สำหรับการฆ่าเชื้อตลอดเวลา ถ้าเกิดมีการลดลงของอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อในขณะใดขณะหนึ่ง ก็จะต้องเริ่มต้นนับเวลาในการฆ่าเชื้อใหม่ทั้งหมด

- หน้าปัดวัดความดัน (Pressure gauge) : เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในการใช้งานของหม้อฆ่าเชื้อ ช่วยบอกความดันภายใน ซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำในหม้อฆ่าเชื้อในขณะนั้น

การทำให้เย็น (Cooling) : เมื่อลำเลียงกระป๋องออกจากหม้อฆ่าเชื้อแล้ว จะต้องนำไปทำให้เย็นลงทันที ขั้นตอนของการทำให้กระป๋องเย็นนี้ นิยมใช้น้ำสะอาดหล่อเลี้ยงกระป๋องเพื่อให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่กระป๋องมีขนาดใหญ่ หรือผลิตภัณฑ์ภายในเป็นอาหารจำพวกที่เสียหายได้ง่ายเนื่องจากความร้อน ควรใช้ระบบความดันต่ำร่วมด้วย เพื่อให้อุณหภูมิของกระป๋องลดลงอย่างรวดเร็วขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของกระป๋องลดลงอยู่ระหว่าง 95-105 องศาฟาเรนไฮต์ แล้วจึงเช็ดกระป๋องให้แห้ง เพื่อป้องกันการเกิดสนิม การทำให้กระป๋องเย็นลงช้าเกินไป นอกจากจะทำให้เนื้ออาหารนิ่มเละแล้ว ยังอาจทำให้เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถเจริญได้ในช่วงอุณหภูมิสูงสามารถ (Thermophiles) เจริญได้ง่าย

อุณหภูมิสุดท้ายของการทำให้เย็น นับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องมีการควบคุมให้เป็นไปอย่างเหมาะสม การที่อุณหภูมิสุดท้ายของกระป๋องสูงเกินไป นอกจากจะทำให้เกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อแล้ว ยังจะเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่เจริญได้ในอุณหภูมิสูงที่อาจจะหลงเหลืออยู่บ้าง อันเป็นสาเหตุของการเน่าเสียในอาหารกระป๋อง แต่ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายของกระป๋องในขณะที่ทำให้เย็นต่ำเกินไป ก็จะทำให้น้ำที่เกาะอยู่โดยรอบกระป๋อง ไม่สามารถระเหยออกไปได้ เป็นสาเหตุให้กระป๋องเกิดสนิมได้

การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ : เมื่อกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง เสร็จสิ้นทุกขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นแล้ว ก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปปิดฉลาก หรือเก็บรักษา เพื่อการจำหน่ายต่อไปนั้น โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมจะทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนทุกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่ามีคุณภาพตามที่ต้องการและปลอดภัยต่อผู้บริโภค ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะมีการตรวจสอบสภาพทั้งภายนอกและภายในกระป๋อง

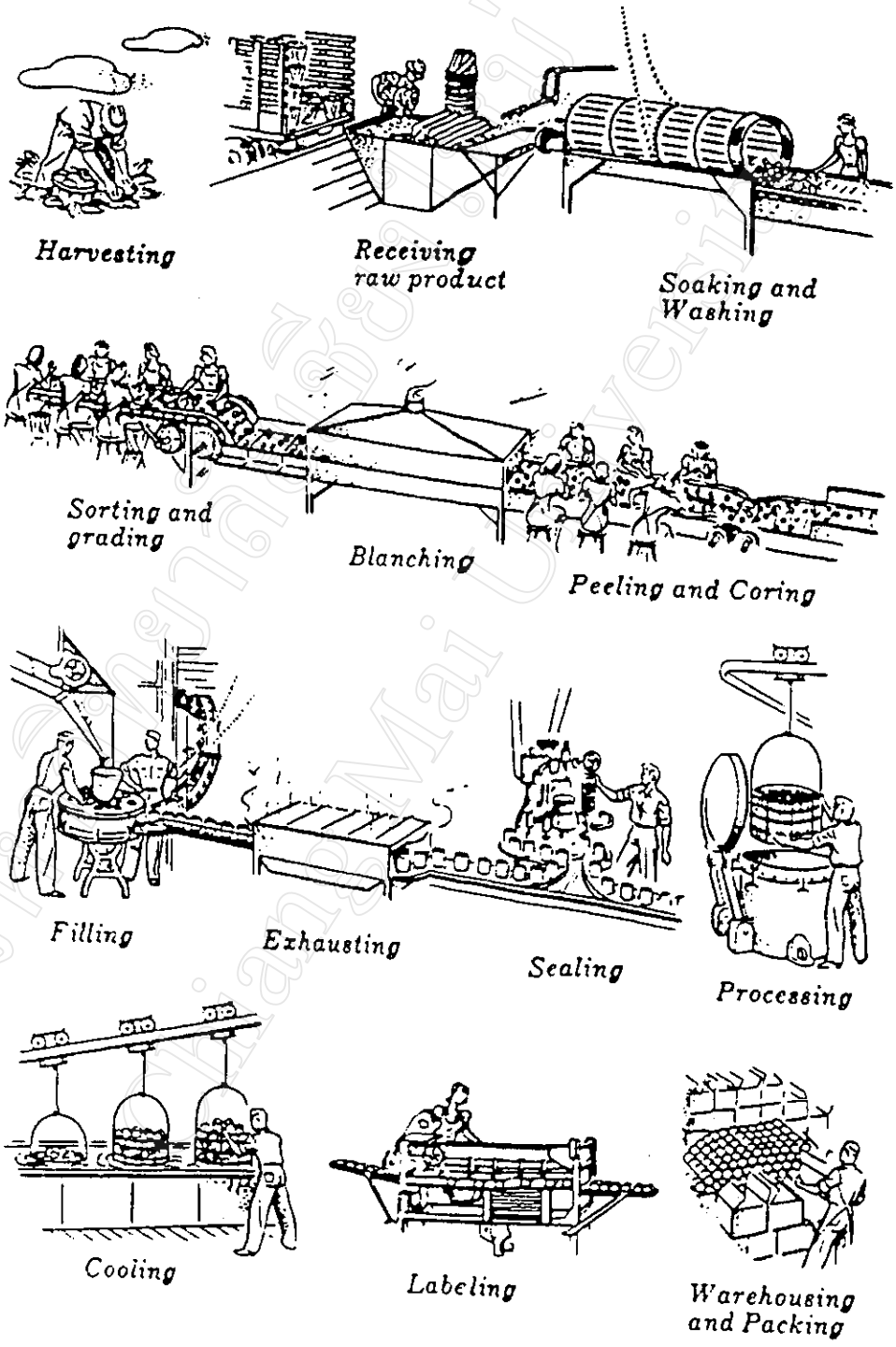
การตรวจสอบสภาพภายนอกกระป๋อง : เช่น การบุบ การบวม การเกิดสนิม และรูปร่างของกระป๋อง การตรวจสอบน้ำหนักสุทธิและน้ำหนักเนื้ออาหารที่มีอยู่ภายใน ความเป็นสุญญากาศภายในกระป๋อง ปริมาตรของช่องว่างในกระป๋อง รวมทั้งสภาพของตะเข็บฝากระป๋อง

การตรวจสอบสภาพภายในกระป๋อง : ส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบอาหารที่บรรจุอยู่ภายในกระป๋อง เช่น สภาพความข่นของน้ำเกลือหรือน้ำเชื่อม สภาพด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ สิ่งแปลกปลอมของผลิตภัณฑ์ ค่าความเข้มข้นสมดุล (Cut out strength) ต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น ค่าความเข้มข้นสมดุลของกรด น้ำตาล เกลือ และค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมทั้งการตรวจสอบการเสื่อมเสียที่อาจจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี จุลินทรีย์ และการปฏิบัติงานด้วย

การติดฉลาก (Labeling) : ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 69 (พ.ศ. 2525) ได้กำหนด ให้อาหารกระป๋องเป็นอาหารควบคุมเฉพาะ ซึ่งต้องแสดงฉลากตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ดังนี้คือ ชื่ออาหาร เลขทะเบียนตำรับอาหาร ชื่อและที่ตั้งของผู้ผลิต ปริมาณและน้ำหนักเนื้ออาหารเป็นระบบเมตริก ส่วนประกอบที่สำคัญเป็นร้อยละของน้ำหนักโดยประมาณ วัน เดือน ปี ที่ผลิตหรือวันหมดอายุ

การติดฉลากเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต ก่อนที่จะจำหน่ายผลิตภัณฑ์ไปสู่ผู้บริโภคต่อไป

การเก็บรักษา (Storage) : อาหารกระป๋องทุกชนิด ควรจะเก็บไว้ในที่เย็นและแห้ง กล่าวคืออุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่ควรสูงกว่า 90 องศาฟาเรนไฮต์ ทั้งนี้เพื่อลดปฏิกิริยาเคมีที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และเพื่อป้องกันการเกิดสนิมของกระป๋อง อาหารกระป๋องที่ผ่านกระบวนการผลิต และการเก็บรักษาอย่างเหมาะสม สามารถเก็บไว้ได้นานถึง 2 ปี โดยที่ยังคงคุณภาพดีอยู่



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง

ผลของกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหาร เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านโภชนาการและทางด้านประสาทสัมผัส ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้ความร้อนในขั้นตอนของการฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง โดยความร้อนที่ใช้นั้นเป็นความร้อนในระดับที่เรียกว่า สเตอริไลซ์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น ลดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโภชนาการ และคุณภาพทางด้านการบริโภค ดังนั้นผลจากการใช้ความร้อนในระดับดังกล่าว จึงส่งผลกระทบต่ออาหารดังต่อไปนี้

สี : รงควัตถุตามธรรมชาติหลายชนิดจะถูกทำลายได้โดยความร้อนที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแปรรูป ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของอาหารที่บรรจุในกระป๋อง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ในกระบวนการแปรรูป

ในผักและผลไม้ คลอโรฟิลล์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นฟีโนไฟติน (Phenophytin) ที่มีสีน้ำตาล ส่วนแคโรทีนอยด์จะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ โดยโครงสร้างโมเลกุลจะถูกเปลี่ยนจาก 5,6-epoxide ไปเป็น 5,8-epoxide ซึ่งมีสีอ่อนกว่า และแอนโธไซยานิน จะถูกเปลี่ยนไปเป็นรงควัตถุที่มีสีน้ำตาล นอกจากนี้การเปลี่ยนสีของอาหารในระหว่างการเก็บรักษา อาจเกิดจากอนุมูลของโลหะ เช่น เหล็กและดีบุก ที่ใช้ในการผลิตกระป๋องบรรจุ ทำปฏิกิริยากับแอนโธไซยานิน ได้เป็นสารสีม่วง หรืออาจเกิดจากสารลูโคแอนโธไซยานิน (Leucoanthocyanin) ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีสี ถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่มีสีชมพูของสารประกอบแอนโธไซยานินเชิงซ้อน (Anthocyanin complex) การเปลี่ยนแปลงนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับสาลี่ ลิ้นจี่ และ Quinces บางสายพันธุ์

กลิ่นและรสชาติ : กลิ่นและรสชาติของอาหารบรรจุกระป๋อง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากปฏิกิริยาไพโรไลซิส การขจัดหมู่อามีน (Deamination) หรือหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน (Decarboxylation) การสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตโดยปฏิกิริยา Maillard browning หรือปฏิกิริยา Caramelization ไปเป็น Furfural และ Hydroxymethylfurfural ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น และปฏิกิริยาการขจัดหมู่คาร์บอกซิลของไขมัน การทำปฏิกิริยากันระหว่างองค์ประกอบเหล่านี้จะทำให้เกิดสารประกอบที่ให้กลิ่นมากกว่า 600 ชนิด

ในผักและผลไม้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของการสลายตัว การรวมตัวกัน และการเปลี่ยนไปเป็นสารระเหย (Volatilisation) ของ อัลดีไฮด์ คีโตน น้ำตาล แลคโตน กรดอะมิโน และกรดอินทรีย์

ลักษณะเนื้อสัมผัส : การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารประกอบเพคติน การเกิดเจลของแป้ง และการละลายของเฮมิ-เซลลูโลส รวมทั้งการสูญเสียแรงเต่งของเซลล์ (Turgor pressure) จึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้นิ่มลง

คุณค่าทางโภชนาการ : การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหาร เป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางโภชนาการของอาหาร การให้ความร้อนในระดับสเตอริไลซ์กับอาหารที่บรรจุในกระป๋อง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของคาร์โบไฮเดรต และไขมัน แต่ยังคงคุณค่าทางโภชนาการของสารเหล่านี้อยู่ โปรตีนจะเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ และมีการสูญเสียกรดอะมิโนประมาณร้อยละ 10-20 เนื่องจากถูกทำลายด้วยความร้อน ตัวอย่างเช่น การสูญเสียกรดอะมิโนไลซีน ซึ่งอัตราการสูญเสียจะผันแปรตามอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิต แต่ส่วนใหญ่ไม่เกินร้อยละ 25 นอกจากนี้ผลจากการใช้ความร้อนจะทำให้คุณค่าทางชีวภาพของโปรตีนลดลงประมาณร้อยละ 6-9 สำหรับวิตามิน โดยเฉพาะวิตามินที่ไม่ทนต่อความร้อน เช่น วิตามินบีหนึ่งจะเกิดการสูญเสียมากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 50-75 กรดแพนโททินิกจะเกิดการสูญเสียประมาณร้อยละ 20-35 ผักและผลไม้จะเกิดการสูญเสียวิตามินที่ละลายน้ำได้มากที่สุดโดยเฉพาะวิตามินซี

ตารางที่ 2.5 การสูญเสียวิตามินในผักและผลไม้บรรจุกระป๋อง เนื่องจากการใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูป โดยรวมการสูญเสียในระหว่างขั้นตอนการเตรียมและการลวก

ผลิตภัณฑ์	ร้อยละของการสูญเสียวิตามิน								
	แคโรทีน	วิตามิน B1	วิตามิน B2	ไนอาซิน	วิตามินซี	กรดแพนโทธินิก	วิตามิน B6	กรดโฟลิค	ไบโอติน
แครอท	0-9 (6)	67	38-60	32	75	54	80	59	40
ถั่วลันเตา	22-52	62	54-63	40	79	61	50	57	-
ผักโขมฝรั่ง	0-32 (9)	80 (84)	45 (47)	50 (50)	72 (79)	78	75	35	67
มะเขือเทศ	0 (2)	17 (22)	25 (59)	0 (1)	26 (26)	30	10	54	55
แอปเปิล	0-4	31	48	-	74	15	0	-	-
เชอรี่	40	57	64	46	68	-	6	-	-
ลูกพีช	65 (70)	49 (57)	39	39 (38)	56 (58)	71	21	-	-
ลูกแพร์	-	45	45	0	73	69	18	-	-
สับปะรด	25	7 (10)	30	0	57 (57)	12	-	-	-

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการสูญเสียวิตามินหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส

ที่มา : วิไล, 2543

กระบวนการแปรรูปโดยวิธีการแช่เยือกแข็ง (Freezing Process)

อุตสาหกรรมแช่เยือกแข็ง เป็นอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารที่ได้รับความนิยมมากเป็นอันดับสองรองจากอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง ทั้งนี้เนื่องจากสภาพของอาหารแช่เยือกแข็งมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพของอาหารสด สามารถรักษาสี กลิ่นและรสชาติ ตลอดจนคุณค่าทางอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ถ้ามีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในระดับที่เหมาะสม

หลักการของการแช่เยือกแข็งจะเน้นในด้านการยืดอายุการเก็บรักษาโดยตรง ไม่มีขั้นตอนใดในกระบวนการแปรรูปที่สามารถจะปรับปรุง รสชาติ กลิ่น หรือสีของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นได้อย่างเด่นชัด ดังนั้นคุณภาพของวัตถุดิบที่จะนำมาแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องมีคุณภาพดี

กลไกของการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นได้หลายอย่าง เมื่อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเสื่อมเสียเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลงอย่างมาก รวมทั้งปฏิกิริยาทางเคมีอื่น ๆ อันเนื่องมาจากเอนไซม์และออกซิเดชั่น นอกจากนี้การเกิดผลึกน้ำแข็งภายในผลิตภัณฑ์ จะทำให้น้ำที่เหลือที่จะทำปฏิกิริยามีปริมาณน้อยลง จึงทำให้อัตราการเสื่อมเสียลดลงด้วย

การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็ง เป็นการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าระดับที่เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญหรือดำเนินกิจกรรมที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหารได้ โดยทั่วไปเมื่อลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียสแล้ว เชื้อจุลินทรีย์ทุกชนิดที่มีในอาหารจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ดังนั้นในการแช่เยือกแข็งอาหาร จึงนิยมลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าระดับดังกล่าว ส่วนใหญ่จะลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำ และสารละลายในอาหาร จึงช่วยลดการเสื่อมเสียของอาหารอันเนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีได้เป็นอย่างมาก แต่การลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ -18 องศาเซลเซียสนั้น อาจจะทำให้อาหารที่นำมาแช่เยือกแข็งเกิดความเสียหายทางด้านกายภาพได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อสัมผัสจะถูกทำลาย เนื่องจากการขยายตัวของน้ำเมื่อแข็งตัว และการเกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ ถ้าไม่มีการควบคุมกระบวนการแช่เยือกแข็งให้เหมาะสม

จุดเยือกแข็งของอาหาร (Freezing Point of Food)

หมายถึง อุณหภูมิที่สามารถทำให้ความดันไอของของแข็งและของเหลวที่มีในอาหารนั้น เกิดความสมดุลกัน น้ำบริสุทธิ์จะมีจุดเยือกแข็งที่ 0 องศาเซลเซียส ณ ความดัน 1 บรรยากาศ แต่ถ้าน้ำนั้นมีตัวถูกละลายชนิดที่ไม่ระเหยรวมอยู่ด้วย จุดเยือกแข็งของสารละลายนั้น จะลดต่ำลง เนื่องจากความดันไอของสารละลายนั้นลดต่ำลง ด้วยสาเหตุดังกล่าวจุดเยือกแข็งของอาหารทุกชนิดจึงต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งในการแช่เยือกแข็ง คือ การที่จุดเยือกแข็งนั้นอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้เพราะน้ำในอาหารจะขยายตัว และมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เซลล์ และเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะเนื้อเยื่อของผักและผลไม้

การตกผลึกของน้ำในอาหาร

กระบวนการตกผลึก เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการแช่เยือกแข็ง การเก็บผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง หรือการละลายของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง กระบวนการตกผลึกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะด้วยกัน คือ ระยะการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) และระยะที่ผลึกขยายขนาดเพิ่มขึ้น (Crystal growth)

การเกิดนิวเคลียสผลึก : การเกิดนิวเคลียสผลึกเริ่มขึ้นเมื่อสภาวะเอื้ออำนวยให้โมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุลมาจับตัวกันเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีระเบียบ ซึ่งเรียกว่า นิวเคลียสผลึก จนมีขนาดโตพอที่สามารถจะอยู่ได้ และสามารถเป็นจุดตั้งต้นสำหรับการเพิ่มขนาดของผลึกต่อไป

แบบของการเกิดนิวเคลียสผลึก สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) และการเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อผสม (Heterogeneous nucleation) ถ้าน้ำมีความบริสุทธิ์มาก ๆ จัดเป็นแบบการเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกัน การเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกัน เกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุลจำนวนหนึ่งเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีระเบียบ การเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกันจะไม่เกิดที่ 0 องศาเซลเซียส แต่จะเกิดที่อุณหภูมิใกล้ -41 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะว่าที่อุณหภูมิ -41 องศาเซลเซียส ถือว่าเป็นอุณหภูมิจำกัดที่น้ำอยู่ในสภาวะ Super cooling การเกิดนิวเคลียสผลึกของสารเนื้อเดียวกันมักไม่ค่อยพบในทางปฏิบัติ ส่วนการเกิดนิวเคลียสผลึกของสารผสมจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของน้ำมาจับตัวกันบนอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ๆ หรืออนุภาคแปลกปลอม การเกิด

นิวเคลียสผลึกของสารเนื้อผสมจะไม่เกิดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส แต่จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าของอุณหภูมิของสารเนื้อเดียวกัน

การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารส่วนใหญ่จะเกิดแบบ Heterogeneous nucleation โดยเฉพาะในระหว่างสภาวะ Super cooling ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูง จะทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมาก ดังนั้นการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และอัตราการโตของผลึกน้ำแข็งจะถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อน โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผลึกน้ำแข็งที่กำลังโตขึ้น ขณะเดียวกันความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนืด และ Redox potential ของของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัว ขณะที่อุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ ตัวถูกละลายแต่ละชนิดอาจถึงจุดอิ่มตัวและบางชนิดก็อาจตกผลึกได้ อุณหภูมิที่เกิดผลึกน้ำแข็งของตัวถูกละลายแต่ละชนิดสมดุลกับของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัวและส่วนที่เป็นน้ำแข็ง เรียกว่า Eutectic temperature

ในอาหารแต่ละชนิดมีตัวถูกละลายผสมอยู่หลายชนิดทำให้การหาค่า Eutectic temperature ที่แน่นอนเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงกำหนดเป็นค่า Final eutectic temperature ซึ่งก็คือค่า Eutectic temperature ที่ต่ำที่สุดของตัวถูกละลายในอาหารชนิดนั้น ๆ ดังนั้นการเกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณมากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารมีอุณหภูมิถึง Final eutectic temperature ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป การแช่เยือกแข็งจะไม่มีการกระทำถึงอุณหภูมินี้ จึงทำให้มีน้ำบางส่วนเหลืออยู่ในอาหารในรูปของของเหลวหรือส่วนที่ไม่แข็งตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง

น้ำบริสุทธิ์ เมื่อแข็งตัวจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 9 ทำให้อาหารที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น อัตราการขยายตัวของอาหารแต่ละชนิด จะขึ้นอยู่ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่

- **ปริมาณความชื้นในอาหาร** อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากจะขยายตัวได้มาก
- **การเรียงตัวของเซลล์** เซลล์พืชจะมี Intercellular air space ซึ่งจะช่วยทำให้ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
- **ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย** หากตัวถูกละลายมีความเข้มข้นสูงจะลดจุดเยือกแข็งให้ต่ำลง ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการแช่เยือกแข็งทางการค้า อาจจะทำให้อาหารยังไม่แข็งตัวหรือขยายตัว
- **อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง**

การขยายตัวของผลึก : การขยายตัวของผลึก จะมีลักษณะตรงข้ามกับการเกิดนิวเคลียสผลึก กล่าวคือ การขยายตัวของผลึกพร้อมจะเกิดที่อุณหภูมิใกล้ ๆ กับจุดเยือกแข็ง อัตราการขยายตัวของผลึกของน้ำบริสุทธิ์ ขึ้นกับปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป

อุณหภูมิ : อัตราการขยายตัวของผลึกจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง โดยปัจจัยภายนอกอื่น ๆ อยู่ในสภาวะคงที่ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความหนืด ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

อัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป : อัตราการขยายตัวของผลึกน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวหน้าของผลึกน้ำแข็งกับอุณหภูมิของส่วนที่ยังไม่แข็งตัวมีค่ามาก ฉะนั้นถ้าทำให้เกิดสภาวะ Super cooling เร็วขึ้น หรือการนำพลังงานความร้อนออกอย่างรวดเร็ว จะทำให้อัตราการขยายตัวของขนาดผลึกน้ำแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การตกผลึกใหม่ (Re - Crystallization)

การควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งค่อนข้างจะเป็นเรื่องง่าย ถ้าผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีความคงตัว แต่ในความเป็นจริง ผลึกน้ำแข็งเหล่านี้จะไม่คงตัว โดยเฉพาะในช่วงของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนรูป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การตกผลึกใหม่

การตกผลึกใหม่ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับจำนวนขนาด รูปร่าง การจัดเรียงตัว หรือความสมบูรณ์ของผลึกหลังจากที่ได้ผ่านการกลายเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์ในครั้งแรกแล้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง

การตกผลึกใหม่พบได้ในอาหารหลาย ๆ ชนิด เช่น ไอศกรีม น้ำผลไม้แช่เยือกแข็ง เป็นต้น รวมทั้งน้ำแข็งบริสุทธิ์ อัตราการเกิดการตกผลึกใหม่นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและธรรมชาติของอาหาร อัตราการตกผลึกใหม่ของน้ำแข็งจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงหรือปริมาณของส่วนประกอบที่ไม่ใช่ของเหลวเพิ่มขึ้น การตกผลึกใหม่ในอาหารแบ่งเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

การตกผลึกใหม่แบบ Isomass : เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวหน้า หรือโครงสร้างภายใน ทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรลดต่ำลง

การตกผลึกใหม่แบบ Accretive : ผลึกน้ำแข็งที่อยู่ใกล้กันจะรวมตัวกัน ทำให้เกิดผลึกที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นจำนวนผลึกทั้งหมดในอาหารจึงลดลง

การตกผลึกใหม่แบบ Migratory : เป็นการเพิ่มขนาดเฉลี่ย และลดจำนวนเฉลี่ยของผลึก ทั้งนี้เนื่องจากการเติบโตของผลึกใหญ่ขึ้นในขณะที่ผลึกขนาดเล็กกว่ามีจำนวนน้อยลง

การตกผลึกใหม่แบบ Migratory เป็นการตกผลึกใหม่ที่สำคัญที่สุดในอาหาร ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ถ้ามีความร้อนเข้าไปในห้องเย็น ผิวหน้าของอาหารที่สัมผัสกับความร้อนจะอุ่นขึ้นเล็กน้อย เป็นสาเหตุให้ผลึกน้ำแข็งละลายเป็นบางส่วน ผลึกที่ใหญ่กว่าจะเล็กลง และผลึกที่เล็ก ๆ จะหายไป ผลึกน้ำแข็งที่ละลายอยู่นี้จะทำให้ความดันไอน้ำเพิ่มขึ้น ความชื้นจึงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่า เป็นผลให้อาหารที่สัมผัสกับความร้อนนั้นแห้ง เพราะเกิดการสูญเสียน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดลงอีก ไอน้ำจะไม่สร้างนิวเคลียสใหม่ แต่จะรวมเข้าด้วยกันกับผลึกที่มีอยู่แล้ว มีผลทำให้ผลึกนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งลดลง

อัตราการแช่เยือกแข็ง (Rate of Freezing)

อัตราการแช่เยือกแข็ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา หรือ เวลาที่ผ่านไปในช่วงอุณหภูมิกำหนดหนึ่ง ๆ หรืออาจหมายถึงอัตราการคายความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งการแช่เยือกแข็ง ตามอัตราเร็วของการลดอุณหภูมิของอาหารได้เป็น 2 แบบ คือ

การแช่เยือกแข็งแบบช้า (Slow freezing) : หมายถึง วิธีการแช่เยือกแข็งวิธีใดก็ตามที่ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของอาหารทั้งหมดลดลงผ่าน Zone maximum ice crystal formation[5] ได้ภายใน 30 นาที หรือไม่สามารถทำให้อาหารนั้นแข็งตัวได้เกินระยะทาง 0.3 เซนติเมตร / นาที

การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Quick freezing) : หมายถึง วิธีการแช่เยือกแข็งวิธีใดก็ตามที่สามารถทำให้อุณหภูมิของอาหารทั้งหมดลดลงผ่าน Zone maximum ice crystal formation ได้ภายใน 30 นาที หรือสามารถทำให้อาหารนั้นแข็งตัวได้เกินระยะทาง 0.3 เซนติเมตร / นาที

---

[5] Zone of maximum ice crystal formation หมายถึง ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 32 ถึง 25 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 0 ถึง –3.8 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำแข็งได้เร็วที่สุด เป็นผลให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียดมากที่สุด

เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง (Freezing Time)

เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้ระบบการแช่เยือกแข็ง เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่เหมาะสม เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง จะเป็นตัวบ่งบอกความจุ (Capacity) ของระบบ และยังมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง

ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งหรืออัตราการแช่เยือกแข็ง ได้แก่

- ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอาหารกับสารให้ความเย็นหรือความร้อน
- วิธีการส่งผ่านความร้อน เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสี
- แบบ ขนาด และรูปร่างของภาชนะบรรจุ
- ขนาดรูปร่างและคุณสมบัติทางด้านความร้อนของผลิตภัณฑ์

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดผลึกน้ำแข็ง

ในระหว่างการตกผลึกของน้ำในอาหาร จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในหลายด้าน ซึ่งที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอาหาร และความเข้มข้นของสารละลายที่มีในอาหาร

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอาหาร : การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง เป็นผลมาจากน้ำบริสุทธิ์ที่ 0 องศาเซลเซียส เกิดการขยายตัวประมาณร้อยละ 9 เมื่อเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง อาหารส่วนใหญ่มีการขยายตัวในระหว่างการแช่เยือกแข็งเหมือนกัน แต่จะน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ ยกเว้นสำหรับสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง ๆ

จุดสำคัญของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการแช่เยือกแข็ง คือ ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะบริสุทธิ์ แม้ว่าผลึกน้ำแข็งนี้จะมาจากระบบเชิงซ้อนก็ตาม เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าการขยายตัวนั้นมีค่าประมาณร้อยละ 9 ของปริมาตรน้ำที่แข็งตัว เมื่ออุณหภูมิของอาหารลดต่ำลงถึงจุดเยือกแข็ง น้ำจะขยายตัว ในขณะเดียวกันตัวถูกละลายในอาหารกลับหดตัว ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอาหารไม่สม่ำเสมอ มีบางพื้นที่จะขยายตัว และบางพื้นที่จะหดตัว พร้อมกับมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดความเสียหายทางด้านเนื้อสัมผัสของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ซึ่งมักจะเกิดกับเนื้อเยื่อพืชมากกว่าเนื้อเยื่อของสัตว์

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่มีในอาหาร : เนื่องจากน้ำที่เป็นองค์-ประกอบของสารละลายในอาหารจะตกผลึก เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็ง ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในอาหารเพิ่มสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรด ความเข้มข้นของไอออน ความหนืด จุดเยือกแข็ง แรงตึงผิว ของอาหารเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกขับออกจากสารละลายด้วย โครงสร้างของน้ำและปฏิกิริยาระหว่างน้ำและตัวถูกละลายก็จะเปลี่ยนไป และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในอาหารเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในที่สุดสารละลายนั้นจะถึงจุดอิ่มตัวและเกิดการตกผลึกของตัวถูกละลาย (Eutectic point) ซึ่งเรียกว่าเป็นจุดสมดุลของการแช่เยือกแข็งอาหารนั้น ๆ

ระบบแช่เยือกแข็งและเครื่องแช่เยือกแข็ง (Freezing Systems and Freezers)

เมื่อต้องการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อกำจัดความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของการหลอมเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ อันมีผลทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์นั้นลดลง และน้ำภายในเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ดังนั้นตัวกลางที่ให้ความเย็นจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอย่างมาก เพื่อให้กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นไปโดยใช้เวลาสั้นที่สุด

กระบวนการแช่เยือกแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบสัมผัสโดยตรง (Direct-contact system) และระบบสัมผัสโดยอ้อม (Indirect contact system) การจะเลือกใช้ระบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ระบบการสัมผัสโดยตรง (Direct-contact system)

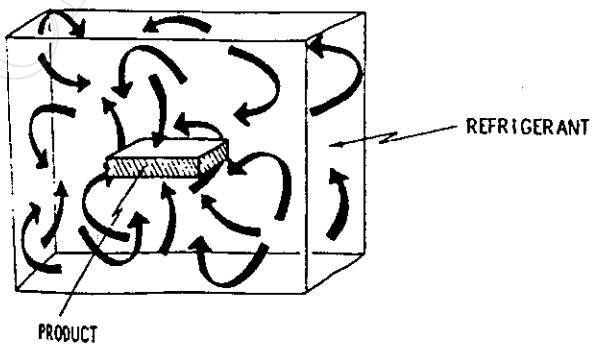
เครื่องแช่เยือกแข็งอาหารหลายชนิดมักทำงานโดยการสัมผัสโดยตรงระหว่างสารทำความเย็นและผลิตภัณฑ์ ทำให้ระบบทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่มีสิ่งใดกั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและผลิตภัณฑ์ สารทำความเย็นในระบบนี้อาจจะเป็นลมเย็นอุณหภูมิต่ำมากและมีความเร็วสูง หรือสารทำความเย็นที่เป็นของเหลว ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะเมื่อสัมผัสกับผิวอาหาร อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวนี้จะออกแบบเพื่อให้เกิดการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว (Rapid freezing) ที่เรียกว่า IQF (Individual quick freezing)

การใช้ลมเป่า (Air-blast) : การใช้ลมเย็นอุณหภูมิต่ำความเร็วสูงสัมผัสกับอาหารขนาดเล็กเป็นลักษณะหนึ่งของการให้ความเย็นแบบ IQF โดยหลักการจะใช้ลมเย็นอุณหภูมิต่ำมาก มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนสูง และรูปร่างของผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กจึงทำให้เวลาในการแช่เยือกแข็งสั้น หรือเกิดการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว

ในการแช่เยือกแข็งแบบนี้ ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนผ่านบริเวณที่เป็นลมความเร็วสูงบนสายพานซึ่งสามารถควบคุมเวลา (Residence time) ได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาแช่เยือกแข็งด้วยลักษณะเช่นนี้จะต้องมีลักษณะสัณฐานที่เหมาะสมและต้องการการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

การจุ่ม (Immersion) : การแช่เยือกแข็งโดยวิธีนี้ มีอัตราการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์เร็วมาก อุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในสารทำความเย็นเหลว ถ้าผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กมาก กระบวนการแช่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หรือเกิดภายใต้สภาวะ IQF ในผลิตภัณฑ์บางชนิด เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจะน้อยกว่าระบบที่ใช้ลมเป่า

ผลิตภัณฑ์จะถูกนำเข้าไปในอ่างที่บรรจุสารทำความเย็นเหลว และเคลื่อนผ่านของเหลวดังกล่าวในขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ โดยดูดความร้อนจากผลิตภัณฑ์ สารทำความเย็นที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และฟรีออน สารประกอบเหล่านี้จะมีจุดเดือดต่ำและมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอค่อนข้างสูง วิธีการแช่เยือกแข็งโดยใช้สารทำความเย็นจะมีการสูญเสียน้ำน้อย ออกซิเจนจะถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายในระหว่างการแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 2.8 ระบบการสัมผัสโดยตรงในกระบวนการแช่เยือกแข็ง

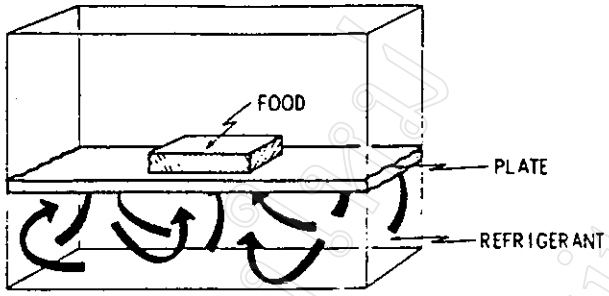
ระบบการสัมผัสโดยอ้อม (Indirect contact system)

มีระบบการแช่เยือกแข็งหลายชนิดที่ผลิตภัณฑ์และสารทำความเย็นถูกแยกออกจากกันโดยมีตัวกั้น (Barrier) ตลอดกระบวนการแช่เยือกแข็ง ซึ่งตัวกั้นนี้จะรวมถึงภาชนะบรรจุที่ห่อหุ้มด้วย ทำให้ไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างผลิตภัณฑ์และสารทำความเย็น เครื่องแช่เยือกแข็งในระบบนี้ได้แก่

เครื่องแช่แข็งแบบแผ่นทำความเย็น (Plate freezers) : เครื่องแช่แข็งประเภทนี้ประกอบด้วยแผ่นโลหะหลาย ๆ แผ่นจัดเรียงกันเป็นชั้น ๆ ผลิตภัณฑ์จะถูกแช่เยือกแข็งขณะที่วางอยู่ระหว่างแผ่นทำความเย็นสองแผ่น ซึ่งจะคงอุณหภูมิแช่เยือกแข็งที่ต้องการ ทำให้การแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เครื่องแช่แข็งแบบนี้ถูกออกแบบให้แผ่นทำความเย็นสัมผัสกับสารทำความเย็นซึ่งระเหยในเครื่องระเหยของระบบทำความเย็น โดยทั่วไปตัวกั้นอาจจะเป็นแผ่นทำความเย็นอย่างเดียว หรือแผ่นทำความเย็นกับภาชนะบรรจุก็ได้ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกั้นอาจเพิ่มขึ้นได้โดยใช้ความดัน เพื่อลดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกั้น วิธีการแช่เยือกแข็งโดยใช้แผ่นโลหะเย็น สามารถถ่ายเทความร้อนได้ค่อนข้างดี เพราะผลิตภัณฑ์สัมผัสกับแหล่งให้ความเย็นโดยตรง แต่ก็เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน จึงอาจมีประสิทธิภาพด้อยกว่าวิธีการแช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเป่าเล็กน้อย แต่สามารถป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้ดีเพราะไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ อย่างไรก็ตามการแช่เยือกแข็งโดยใช้แผ่นโลหะเย็นนี้จะใช้ได้ดีเมื่อผลิตภัณฑ์มีความหนาสม่ำเสมอกันเท่านั้น

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเป่า (Air-blast freezers) : เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าแบบง่าย ๆ ได้แก่ ห้องเย็น (Refrigerated room) โดยผลิตภัณฑ์จะวางอยู่ในห้อง และอากาศเย็นจะหมุนเวียนอยู่ภายในห้องรอบ ๆ ผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลาแช่เยือกแข็ง วิธีการแช่เยือกแข็งแบบนี้จะใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งนานมาก เนื่องจากอากาศเคลื่อนตัวผ่านผลิตภัณฑ์ด้วยความเร็วต่ำ

ดังนั้นเครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเป่าจึงนิยมใช้เป็นแบบต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์จะวางอยู่บนสายพานที่เคลื่อนที่ผ่านกระแสลมเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วลม 0.5 ถึง 8 เมตร/วินาที ความเร็วและความยาวของสายพาน จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 2.9 ระบบการสัมผัสโดยอ้อมในกระบวนการแช่เยือกแข็ง

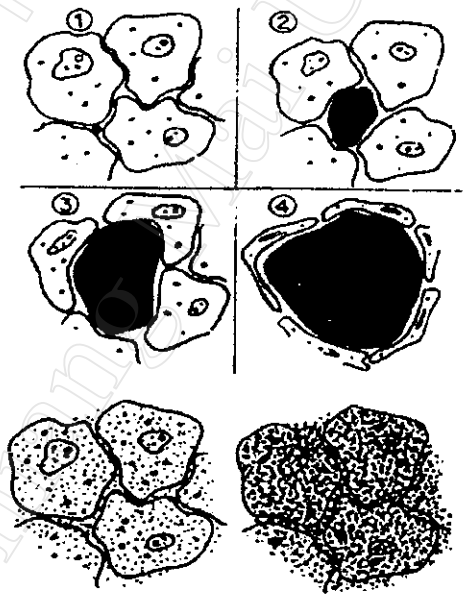
ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
(Effect of Freezing Process on Product Quality)

การแช่เยือกแข็งมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยตรง คือ ทำให้เซลล์ของเนื้อเยื่อถูกทำลาย เนื่องจากเกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ กระบวนการแช่เยือกแข็งจะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์น้อยมาก แต่ก็อาจมีการสูญเสียได้บ้างในระหว่างการเตรียมวัตถุดิบหรือระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

ผัก และผลไม้ จะมีความทนทานต่อการเสียหายจากกระบวนการแช่เยือกแข็งได้น้อยกว่าเนื้อสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อและเซลล์มีความแตกต่างกัน เนื้อเยื่อสัตว์มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นมากกว่าทำให้ขยายตัวออกได้ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง ขณะที่เซลล์ของเนื้อเยื่อพืชจะแตกออกเมื่อน้ำภายในเซลล์กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ความเสียหายของเซลล์พืชจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น และอัตราเร็วของการถ่ายเทความร้อน หรืออัตราการแช่เยือกแข็ง

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีอิทธิพลต่อเนื้อเยื่อพืช กล่าวคือ กระบวนการแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการแช่เยือกแข็งแบบช้านั้น จะทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดโตขึ้นในช่องว่างระหว่างเซลล์ ซึ่งทำให้เซลล์สูญเสียรูปร่างและทำให้เซลล์ที่อยู่รอบ ๆ มีโครงสร้างเปลี่ยนไป โดยทำลายผนังเซลล์ที่อยู่ข้างเคียง นอกจากนี้ผลึกน้ำแข็งยังมีความดันไอน้ำต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ ทำให้น้ำเคลื่อนย้ายจากภายในเซลล์ออกมายังผลึกน้ำแข็ง ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นในช่องว่างระหว่างเซลล์

เซลล์จึงสูญเสียน้ำ และได้รับความเสียหาย เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น ดังนั้น ในการละลายน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง เซลล์จะมีรูปร่างและความแข็งแรงผิดไปจากเดิม กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์จะนิ่ม และสารต่าง ๆ ภายในเซลล์ จะไหลออกจากเซลล์ที่เสียหาย ส่วนกระบวนการแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้น ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีขนาดเล็ก จึงเกิดความเสียหายต่อผนังเซลล์น้อยมาก และไม่เกิดความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำ เซลล์จึงเกิดการสูญเสียน้ำเพียงเล็กน้อย ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จึงยังคงเหมือนเดิม ทำให้ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่ได้มีคุณภาพดี



รูปที่ 2.10 ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อเยื่อพืช

(ก) รูปบน : การแช่เยือกแข็งแบบช้า

(ข) รูปล่าง : การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งสามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเวลานานโดยยังคงมีคุณภาพดีถ้ามีการเก็บรักษาอย่างถูกวิธี ซึ่งการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งนั้น จะเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา

อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา : โดยหลักการ ถ้าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งไว้ที่อุณหภูมิต่ำมากเท่าใดก็จะทำให้อายุการเก็บรักษา และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ จะช่วยรักษาสภาพความสมดุลของการแช่เยือกแข็งได้ดี สามารถระงับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีที่อาจจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงได้

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา : การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษามีผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างได้ง่าย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น ผลึกน้ำแข็งบางส่วนจะละลาย และจะถูกดึงให้เกาะติดกับผลึกน้ำแข็งในส่วนที่ไม่ละลาย และเมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาลดลงอีกครั้งหนึ่ง ก็จะทำให้ผลึกน้ำแข็งในส่วนที่ละลายแข็งตัวใหม่ ทำให้เกิดการเพิ่มขนาดและเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์จะผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาอย่างถูกวิธีแล้วก็ตาม แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา ก็จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ทั้งหมด ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่แตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้คงที่ตลอดเวลา จึงนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ผลของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ถ้าลดอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้ต่ำลง อัตราการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางชีวเคมีก็จะลดต่ำลงเช่นกัน ถึงแม้ว่ากระบวนการแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่แข็งนี้ ไม่ได้ทำลายเอนไซม์ หรือเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ก็ตาม

การเก็บรักษาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง คือ ระหว่าง -4 องศาเซลเซียส หรือ -10 องศาเซลเซียส จะมีผลในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มีความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำต่างกัน เซลล์ของยีสต์ รา และแบคทีเรียแกรมลบ เช่น Coliforms และ *Salmonella* species ส่วนใหญ่จะถูกทำลายได้เกือบทั้งหมด ส่วนแบคทีเรียแกรมลบ เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Enterococci sp.* สปอร์ของเชื้อรา จะมีความทนทานมากกว่า อุณหภูมิต่ำไม่มีผลต่อสปอร์ของแบคทีเรีย โดยเฉพาะ *Bacillus* species, *Clostridium* species เช่น *Clostridium botulinum*

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งโดยทั่วไป คือ ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จะเกิดการสูญเสียคุณภาพทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และเกิดจากการทำงานของเอนไซม์บางชนิด การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายรอบ ๆ ผลึกน้ำแข็งสูงขึ้น ทำให้ Water activity ลดลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง และ Redox potential ด้วย และเมื่อผลึกน้ำแข็งทำให้เซลล์เมมเบรนฉีกขาด เอนไซม์ที่ไม่ได้ถูกยับยั้งก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลายที่เข้มข้นขึ้นได้มากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ได้แก่

การเสื่อมสลายของรงควัตถุ : ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งประเภทผักที่มีสีเขียว คลอโรฟิลล์จะค่อย ๆ สลายตัวอย่างช้า ๆ เปลี่ยนไปเป็นฟีโอไฟทิน (Pheophytin) ซึ่งมีสีน้ำตาล ถึงแม้ผักนั้นจะผ่านการลวกแล้วก็ตาม ส่วนในผลไม้อาจมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากของเหลวภายในเซลล์มีความเข้มข้นมากขึ้น และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลต่อสีของแอนโธไซยานิน นอกจากนี้อาจมีการตกตะกอนของเกลือจากสารบางชนิดเกิดขึ้นด้วย

การสูญเสียวิตามิน : วิตามินที่ละลายน้ำได้ เช่น วิตามินซี และกรดแพนโททีนิก จะเกิดการสูญเสียที่อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็ง หากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะมีการสูญเสียวิตามินซีเพิ่มขึ้นเป็น 6-20 เท่าในผัก และ 30-70 เท่าในผลไม้

กิจกรรมของเอนไซม์ที่เหลืออยู่ : ผักและผลไม้ที่ไม่ผ่านการลวกเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อย่างเพียงพอ ทำให้มีเอนไซม์หลงเหลืออยู่ โดยเฉพาะเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทำให้คุณภาพของผักและผลไม้ลดลง

ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของไขมัน : ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จึงทำให้กลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งผิดแปลกไปจากเดิม

ตารางที่ 2.6 การสูญเสียวิตามินในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

ผลิตภัณฑ์	ร้อยละการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 องศาเซลเซียส						
	วิตามินซี	วิตามิน B1	วิตามิน B2	ไนอาซิน	วิตามิน B6	กรดแพนโททีนิก	แคโรทีน
เมล็ดถั่วลันเตา	52	0-32	0	0	0-21	53	0-23
ถั่ว	11	0-16	0-8	0-8	7	29	0-4
สเต็กเนื้อ [a]		-	9	9	24	22	-
เนื้อหมู [a]		± 18	0-37	± 5	0-8	18	-
ผลไม้ [b]							
ค่าเฉลี่ย	18	29	17	17	-	-	37
ช่วงข้อมูล	0-50	0-66	0-67	0-67	-	-	0-78

[a] เก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน

[b] ค่าเฉลี่ยที่ได้จากทดลองของแอปเปิล แอปปริคอท บลูเบอรี่ น้ำส้มเข้มข้นนำมาเจือจาง พีช ราสเบอรี่ และสตรอเบอรี่ โดยไม่ได้ระบุเวลาในการเก็บรักษา

ที่มา : วิไล, 2543

การเกิดการตกผลึกใหม่ : เป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งไม่คงที่

Freeze burn : เป็นลักษณะตำหนิอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่มีภาชนะบรรจุไม่เหมาะสม โดยลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เป็นรอยแห้ง หรือรอยไหม้ มีสีน้ำตาล ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษามีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ จึงทำให้ความชื้นจากผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ระเหยออกไป ในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิ - 22 องศาเซลเซียส จะมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 95 ซึ่งมีผลทำให้เกิด Freeze burn ได้อย่างมากภายในระยะเวลาที่เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ประมาณ 2-3 เดือน แต่ถ้าปรับความชื้นในห้องเย็นให้อยู่ประมาณร้อยละ 98-100 จะสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้เป็นเวลา 20 เดือน โดยไม่เกิดตำหนิของ Freeze burn

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University