

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หม่อนผลสด

หม่อน (mulberry) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus spp.* เป็นไม้ยืนต้นจำพวกไม้พุ่ม อยู่ในวงศ์ *Maraceae* เช่นเดียวกับปอสา ขนุนและโพธิ์ ปลูกมากทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย ผลหม่อนจัดอยู่ในกลุ่มของผลรวมซึ่งเป็นผลที่เกิดจากช่อดอกทั้งช่อรวมกันเป็น ผลเดียวกันแต่สามารถมองเห็นเป็นผลเล็กๆ แยกกันอยู่บนแกนของช่อผล การพัฒนาการของผล หม่อนเริ่มจากดอกหม่อนจะแตกออกมาพร้อมกับใบ จะบานหลังจากแตกช่อใบพร้อมช่อดอก ประมาณ 8-12 วัน ดอกที่บานเต็มที่ยอดเกสรตัวเมียจะมีลักษณะสีขาวใส เมื่อได้รับการผสมเกสรจะ เปลี่ยนเป็นสีเทาภายใน 3 วัน จากนั้นจะมีการพัฒนาการของผลโดยสีของผลจะเริ่มจากสีเขียว ขาว ชมพู แดง และดำ รวมระยะเวลาหลังจากดอกบานประมาณ 40-45 วัน ผลจะเริ่มสุกและแก่ ลักษณะผลหม่อนจะอวบน้ำ และประกอบไปด้วยน้ำหวานเมื่อผลแก่เต็มที่ จากนั้นผลจะเริ่มนิ่มลง มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และน้ำตาลรีดิซเพิ่มขึ้นถึงระยะประมาณ 56 วัน หลังจากดอกบาน โดยจะมีน้ำตาลรีดิซสูง ถึง 65 กรัมต่อลิตร แต่ปริมาณกรดจะลดลงเรื่อยๆ ผลหม่อนเป็นผลไม้ที่มี สัดส่วนความหวาน (sweetness) กับความเปรี้ยว (tartness) ที่สมดุลกัน ซึ่งรสชาติความเปรี้ยวของ ผลหม่อนจัดได้ว่ามีระดับใกล้เคียงกับผลขององุ่น จากการทดสอบชิมพบว่าผลหม่อนสุกและสุกจัด ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบมากที่สุด โดยทั่วไปต้นหม่อนจะให้ผลผลิตปลายฤดูหนาว แต่ สามารถออกผลนอกฤดูได้หากมีการลิดใบ เค็ดยอด และโน้มกิ่งนิยมขยายพันธุ์หม่อนด้วยการใช้ ท่อนพันธุ์ปักชำ

พันธุ์หม่อนรับประทานผลหรือหม่อนผลสดที่ปลูกในประเทศไทย (วสันต์, 2546)

1) พันธุ์เชียงใหม่ พบว่ามีปลูกในภาคเหนือ ปลูกกระจายทั่วไปทางภาคเหนือตอนบนและ ในหมู่บ้านชาวไทภูเขา เขตภูเขาสูงของภาคเหนือ ต้นหม่อนที่มีอายุ 3 ปี ให้ผลผลิตผลหม่อน ประมาณ 600 – 700 กิโลกรัม/ไร่/ปี และเมื่อต้นหม่อนมีอายุมากขึ้นจะให้ผลผลิตผลหม่อนสูงขึ้น ตามลำดับ นอกจากนั้นในช่วงฤดูฝนจะให้ผลผลิตผลหม่อนไม่ต่ำกว่า 1,000 กิโลกรัม/ไร่/ปี ผล หม่อนพันธุ์เชียงใหม่จะมีลักษณะเด่น คือ มีผลขนาดใหญ่ อวบน้ำ รสชาติหวานกลมกล่อม เหมาะ สำหรับบริโภคสด และการแปรรูป ขยายพันธุ์ได้ง่าย และสามารถกำหนดเวลาในการให้ผลผลิตได้ ด้วยวิธีการบังคับให้ออกดอกติดผลนอกฤดูกาล

2) พันธุ์บุรีรัมย์ 60 เป็นพันธุ์หม่อนที่ปรับปรุงพันธุ์ โดยใช้หม่อนพื้นเมืองของไทยผสมกับหม่อนพันธุ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ คือพันธุ์จีนเบอร์ 44 ให้ผลผลิตใบหม่อนประมาณ 3,500 กิโลกรัม /ไร่ /ปี และให้ผลผลิตผลหม่อนไม่ต่ำกว่า 500 กิโลกรัม /ไร่ /ปี ใบหม่อนมีลักษณะนุ่มหนาปานกลาง เนื้อขาว และทนทานต่อโรคราแป้ง

3) พันธุ์ศรีสะเกษ 33 เป็นหม่อนลูกผสมเปิดของหม่อนพันธุ์ Jing Mulberry จากประเทศจีน มีคุณลักษณะด้านทนต่อโรคใบด่างได้ดีกว่าหม่อนพันธุ์อื่น ๆ มีผลค่อนข้างใหญ่สามารถนำผลมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดี และให้ผลผลิตใบหม่อนประมาณ ปีละ 1,500 กิโลกรัม/ไร่

ดัชนีการเก็บเกี่ยวของหม่อนผลสดพันธุ์เชียงใหม่ ในและนอกฤดูการเก็บเกี่ยว พบว่า ดัชนีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของผลหม่อนสำหรับรับประทานผลสดคือ ต้นหม่อนที่ติดผลในฤดู (กุมภาพันธ์ - เมษายน) จะมีดัชนีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมสำหรับเก็บผลหม่อนเพื่อบริโภคสดคือ หลังจากดอกบาน 29 – 32 วัน ส่วนต้นหม่อนที่ติดผลนอกฤดู (ตุลาคม - ธันวาคม) จะมีดัชนีการเก็บเกี่ยวผลหม่อนเพื่อบริโภคสดคือ หลังจากดอกบาน 50 – 56 วัน ต้นหม่อนที่ติดผลในฤดูจะสุกเร็วกว่าและมีช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่สั้นกว่าต้นหม่อนที่ติดผลนอกฤดู และผลหม่อนในฤดูมีลักษณะคุณภาพดีกว่าผลหม่อนนอกฤดู เนื่องจากมีผลขนาดใหญ่ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีไม่เลอะง่ายจึงเหมาะสมในการบริโภคสด (ปัทมาภรณ์, 2546) หม่อนผลสดพันธุ์เชียงใหม่ที่สุกเต็มที่สามารเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อบริโภคได้ไม่เกิน 2 วัน (วิดิพันธ์, 2549)

2.1.1 คุณค่าทางโภชนาการ

ในหม่อนผลสด ยังมีสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรต วิตามินบีหนึ่ง และวิตามินบีหก (วสันต์, 2546) ในทางการแพทย์โบราณของจีนถือว่าผลหม่อนเป็นยาบำรุงกำลัง บำรุงประสาท แก้ไอ ขับเสมหะ และลดอาการอักเสบลำคอ (พจนัน, 2545) นอกจากนี้ผลหม่อนยังมีสรรพคุณรักษาโรคท้องผูก บำรุงโลหิต ขับลม บำรุงสายตา ทำให้ดวงตาสว่างมีประโยชน์ต่อโรคไขข้อ บำรุงผมให้หม่นดำแก้พิษสุรา เป็นต้น (อานวยและวิโรจน์, 2548) ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อนซึ่งมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันไปตามแหล่งเพาะปลูกที่ต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อนสุกจากแหล่งเพาะปลูกที่ต่างกัน (ต่อน้ำหนักสด 100 กรัม)

ส่วนประกอบ	ผลหม่อนสุก (เชียงใหม่) ^{1/}	ผลหม่อนสุก (ตุรกี) ^{2/}
โปรตีน (กรัม)	1.68	- ^{3/}
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	21.35	-
ไขมัน (กรัม)	0.47	1.10
เส้นใย (กรัม)	2.03	-
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	0.21	1.52
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	0.07	24.7
เหล็ก (มิลลิกรัม)	43.48	4.2
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	25	22.4
วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	50.65	-
วิตามินบีหนึ่ง (มิลลิกรัม)	3.66	-
วิตามินบีสอง (มิลลิกรัม)	930.10	-
วิตามินบีหก (มิลลิกรัม)	6.87	-
กรดโฟลิก (มิลลิกรัม)	3.42	-
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.90	5.60
ความชื้น	72.91	71.5

ที่มา: 1/ วสันต์, 2546

2/ Ercisli and Orhan, 2007

3/ - หมายถึง ไม่มีการรายงาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 การศึกษาคุณภาพของผลหม่อนสุกได้มีการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ ในประเทศไทย
 ได้มีรายงานว่าผลหม่อนสุกพันธุ์บุรีรัมย์ 60 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้
 ทั้งหมด ปริมาณสารแอนโทไซยานิน และปริมาณสารแอนติออกซิแดนซ์ สูงกว่าผลหม่อนสุกพันธุ์
 เชียงใหม่ และผลหม่อนสุก (สีม่วงดำทั้งผล) มีปริมาณสารต่าง ๆ ดังกล่าวสูงกว่าผลหม่อนห้าม (สี
 แดงร้อยละ 50 และสีม่วงดำร้อยละ 50) (สุรินทร์, 2548) นอกจากนี้ยังพบว่าผลหม่อนสุกพันธุ์
 เชียงใหม่ มีสารประกอบฟีนอลทั้งหมด สารแอนโทไซยานินทั้งหมด สารเคอร์ซีทิน และดัชนี
 สารต้านอนุมูลอิสระ เพิ่มขึ้นตามระยะความสุกที่เพิ่มขึ้น ผลหม่อนสุก (สีม่วงดำทั้งผล) พบสาร

กลุ่มนี้มีปริมาณสูงสุด ($3,654.97 \pm 7.59$; $2,512.40 \pm 11.32$; 1.81 ± 1.00 ไมโครกรัมต่อกรัม และ 6.89 ± 0.53 ตามลำดับ) (สมชาย และคณะ, 2550)

จินตนาภรณ์ และคณะ (2551) ได้ศึกษาฤทธิ์ของผลหม่อนต่อการเรียนรู้และความจำ ตลอดจนการตายของเซลล์ประสาทในสมองส่วนฮิปโปแคมปัสในภาวะปกติและในแบบจำลองของโรคสมองเสื่อม หนูขาวเพศผู้จะได้รับการป้อนผลหม่อนแห้งในขนาด 2, 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว วันละครั้ง ทั้งในภาวะปกติและภาวะความจำบกพร่องที่จำลองโรคสมองเสื่อมพบว่า ผลหม่อนมีศักยภาพในการเพิ่มการเรียนรู้และความจำทั้งในภาวะปกติและในภาวะที่มีความจำบกพร่อง โดยผลหม่อนขนาด 2 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัวจะมีฤทธิ์เพิ่มการทำงานของ Scavenger Enzymes ทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระลดลงและทำให้ความหนาแน่นของเซลล์ประสาทในสมองส่วน Hippocampus เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลหม่อนขนาด 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว จะมีฤทธิ์ลดการทำงานของเอนไซม์ Acetylcholinesterase ทำให้ปริมาณ Acetylcholine เพิ่มขึ้นและเพิ่มการเรียนรู้

สุภาพร และคณะ (2551) ได้ศึกษาฤทธิ์ของผลหม่อนต่อความบกพร่องการเรียนรู้และความจำ ตลอดจนการตายของเซลล์ประสาทในสมองส่วนฮิปโปแคมปัสในหนูที่ถูกเหนี่ยวนำภาวะพิษสุราเรื้อรัง แล้วป้อนผลหม่อนแห้งในขนาด 2 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัววันละครั้งเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าผลหม่อนทุกขนาดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถลดความบกพร่องในเรื่องการเรียนรู้และความจำ และลดการตายของเซลล์ในฮิปโปแคมปัสที่เกิดจากพิษสุราได้

สำหรับในต่างประเทศ ได้มีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลหม่อนขาว (*Morus alba* L.) ผลหม่อนแดง (*Morus rubra* L.) และผลหม่อนดำ (*Morus nigra* L.) ที่ปลูกในบริเวณทางตะวันออกเฉียงของประเทศตุรกี พบว่าสารประกอบฟีนอลและสารเคอร์ซีทินเพิ่มสูงขึ้นตามระยะความสุก โดยมีในผลหม่อนดำสูงสุด (14.22 และ 2.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) ส่วนผลหม่อนขาวมีไขมันทั้งหมดมากที่สุด (ร้อยละ 1.10) รองลงมาเป็นผลหม่อนสีดำ (ร้อยละ 0.95) และผลหม่อนแดง (ร้อยละ 0.85) ตามลำดับ สำหรับกรดไขมันที่พบมากในผลหม่อน คือ กรดลิโนเลอิก (ร้อยละ 54.20) กรดปาล์มมิติก (ร้อยละ 19.80) และกรดโอเลอิก (ร้อยละ 8.41) ตามลำดับ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีอยู่ในช่วง 15.90-20.40 องศาบริกซ์ ปริมาณกรดทั้งหมดมีอยู่ในช่วงร้อยละ 0.25-1.40 ค่าความเป็นกรด-ด่างมีอยู่ในช่วงร้อยละ 3.52-5.60 และปริมาณวิตามินซีมีอยู่ในช่วง 0.19-0.22 มิลลิกรัมต่อกรัม (Ercisli and Orhan, 2007)

2.2 อนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระในอาหาร

2.2.1 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radical) คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจรของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลนั้นไม่เสถียร จึงพยายามจับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลข้างเคียงให้มีอิเล็กตรอนครบคู่เพื่อความเสถียร เมื่อโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงถูกดึงอิเล็กตรอนออกไป ต้องไปจับเอาอิเล็กตรอนจากอะตอมหรือโมเลกุลข้างเคียงตัวอื่นต่อไป เป็นอย่างนี้ต่อเนื่องไปไม่มีที่สิ้นสุด และถ้าหากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ 2 ตัวจับคู่กันพอดี เช่น อนุมูลไฮโดรเจน (hydrogen radical; H[•]) อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical; HO[•]) และอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (superoxide anion radical; O₂^{-•}) เป็นต้น จะเปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่เสถียร

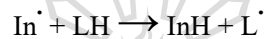
อนุมูลอิสระแบ่งได้เป็น 4 ชนิด (สุวดี, 2549) ได้แก่

1. ซูเปอร์ออกไซด์ (super oxide) อนุมูลอิสระชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อไมโทคอนเดรียในเซลล์นำออกซิเจนมาใช้เป็นพลังงาน
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) เป็นสารที่มีความเสถียรพอประมาณ คือมากกว่าซิงเกิลออกซิเจน และไฮดรอกซิล เรดิคัล จึงปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเป็นสารพิษต่อเซลล์
3. ซิงเกิลออกซิเจน (singlet oxygen) เป็นอนุมูลอิสระที่สามารถก่อปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรง เกิดขึ้นได้ในร่างกายเมื่อได้รับรังสีเอ็กซ์ และรังสีอัลตราไวโอเล็ต แล้วจะเกิดซิงเกิลออกซิเจน จำนวนมาก
4. ไฮดรอกซิล เรดิคัล (hydroxyl radical) เป็นอนุมูลอิสระที่มีฤทธิ์ก่อปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรงที่สุด ทำให้ร่างกายแก่เร็ว เกิดโรคมะเร็ง

เนื่องจากอนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่อยู่ในโมเลกุล จึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในร่างกาย อนุมูลอิสระมีผลมากในการทำให้เกิดสถานะเสื่อม ทำให้ระดับเซลล์เสียหายได้หลายรูปแบบ เช่น อาจช่วยกระตุ้นให้สารก่อมะเร็งมีฤทธิ์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อ ทำลายโครงสร้างทางเคมีของ DNA หรือ โครโมโซม ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (mutation) และการแบ่งเซลล์ผิดปกติ เป็นสาเหตุของโรคหัวใจ โรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน โรคความจำเสื่อม โรคมะเร็ง ต้อกระจก และเกิดริ้วรอยเหี่ยวย่นบนใบหน้า รอบดวงตา ผิวพรรณ อนุมูลอิสระมีที่มาจากแหล่งภายนอกในร่างกาย ได้แก่ มลพิษในอากาศ โอโซน ไนโตรซออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ฝุ่น คาร์บอนหริ้ อาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว แสงแดด ความร้อน รังสีแกมมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ยาบางชนิด สารปรุงแต่งอาหาร เป็นต้น (Gutteridge, 1993)

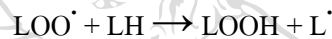
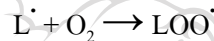
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (free radical chain reaction) ระหว่างไขมันชนิดไม่อิ่มตัวและออกซิเจน การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวถูกเร่งให้เร็วขึ้นได้โดยตัวกระตุ้น (initiator) ได้แก่ ไอออนของโลหะ (metal ion) สารที่ไวต่อแสง (photosensitizers) แสงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet light) และเอนไซม์จำเพาะ กลไกทั้งหมดของปฏิกิริยาออกซิเดชันมี 3 ขั้นตอน (Chaiyasit *et al.*, 2007) คือ

1. ขั้นการเกิดอนุมูลอิสระ (Initiation)



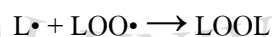
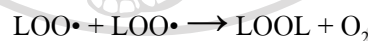
ขั้นตอนนี้เป็นการเกิดอนุมูลอิสระของกรดไขมันหรืออนุมูลแอลคิล (alkyl radical; L^\bullet) ซึ่งเกิดจากการที่ไฮโดรเจนแตกออกจากกรดไขมัน (LH) ในสภาวะที่มีตัวกระตุ้น (In)

2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ (Propagation)



ขั้นตอนนี้เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนกับอนุมูลอัลคิล เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซิล (peroxyl radical; LOO^\bullet) ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอนุมูลอัลคิล ดังนั้นอนุมูลเปอร์ออกซิลจึงสามารถดึงเอาไฮโดรเจนมาจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวอื่นมาเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide; LOOH) และเกิดอนุมูลอัลคิลใหม่

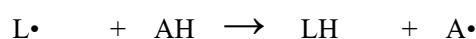
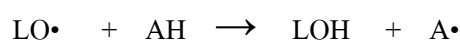
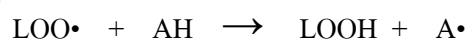
3. ขั้นการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระ (Termination)



ขั้นตอนนี้เกิดจากการที่อนุมูลอิสระ 2 ตัวทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาที่จะหยุดลง

2.2.2 สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) คือ สารที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (มลศิริ, 2540) และจะไปหยุดยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระทำให้คงตัว และหยุดการก่อตัวใหม่ มีกลไกการทำงานดังนี้



สารต้านอนุมูลอิสระ (AH) จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นสารที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ และอนุมูลสารต้านอนุมูลอิสระที่เสถียร (A•) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระหรือปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสารจากธรรมชาติ (natural antioxidants) มักพบในอาหารจำพวกผักและผลไม้ ได้แก่ phenolic compounds, amino acid, ascorbic acid, carotenoids, flavonoids, melanoidin, organic acids, reductions, peptides, tannins, quercetin และ tocopherols เป็นต้น (Huang *et al.*, 1992) และสารสังเคราะห์ (synthetic antioxidant) ได้แก่ tert-butyl-4-hydroxyanisole (BHA), tert-butyl-4-hydroxytoluene (BHT) และ tert-butylhydroquinone (TBHQ) เป็นต้น มีรายงานการวิจัยว่าสารต้านอนุมูลอิสระมีศักยภาพในการทำให้การเรียนรู้และความจำในภาวะสมองเสื่อม ดีขึ้น (Auddy *et al.*, 2003) สารต้านอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1) primary antioxidant ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ได้แก่ สารประกอบฟีนอล (phenolic substance) ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังรวมถึงสารโทโคฟีรอลจากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์

2) oxygen scavenger สารกลุ่มนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเป็นการช่วยกำจัดออกซิเจนในระบบปิดได้ ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก หรือวิตามินซี, ascorbyl palmitate, erythorbic acid (isoascorbic acid) และ sodium erythorbate เป็นต้น

3) secondary antioxidant ทำหน้าที่สลายโมเลกุลของ lipid hydroperoxide ให้เป็นสารที่มีความเสถียร ได้แก่ dialcyl thiopropionate และ thiopropionic acid

4) enzymic antioxidant ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจน หรืออนุพันธ์ของออกซิเจน โดยเฉพาะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้แก่ เอนไซม์ต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเป็น primary antioxidant enzyme และ ancillary antioxidant enzyme

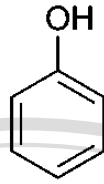
5) chelating agent หรือ sequestrant ทำหน้าที่ไปจับกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก และทองแดง ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่ส่งเสริม และเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร ได้แก่ กรดซิตริก กรดอะมิโน และ ethylenediaminetetra-acetic acid (EDTA) เป็นต้น

2.3 สารต้านอนุมูลอิสระในผลหม่อน

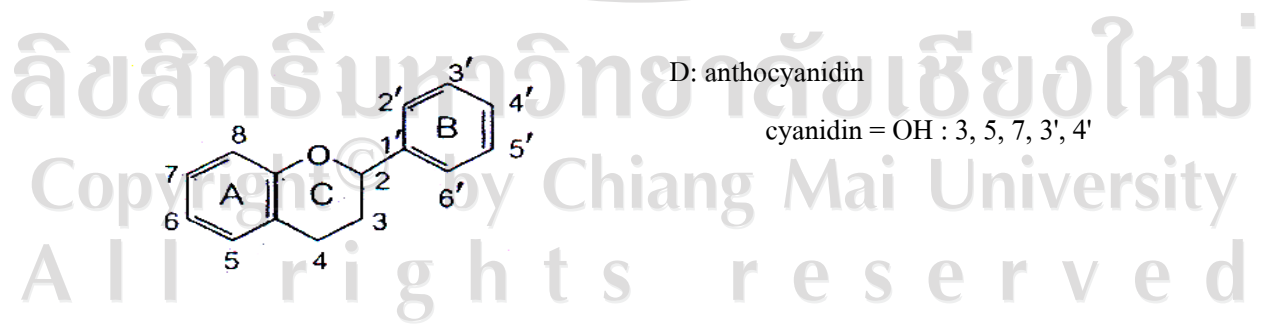
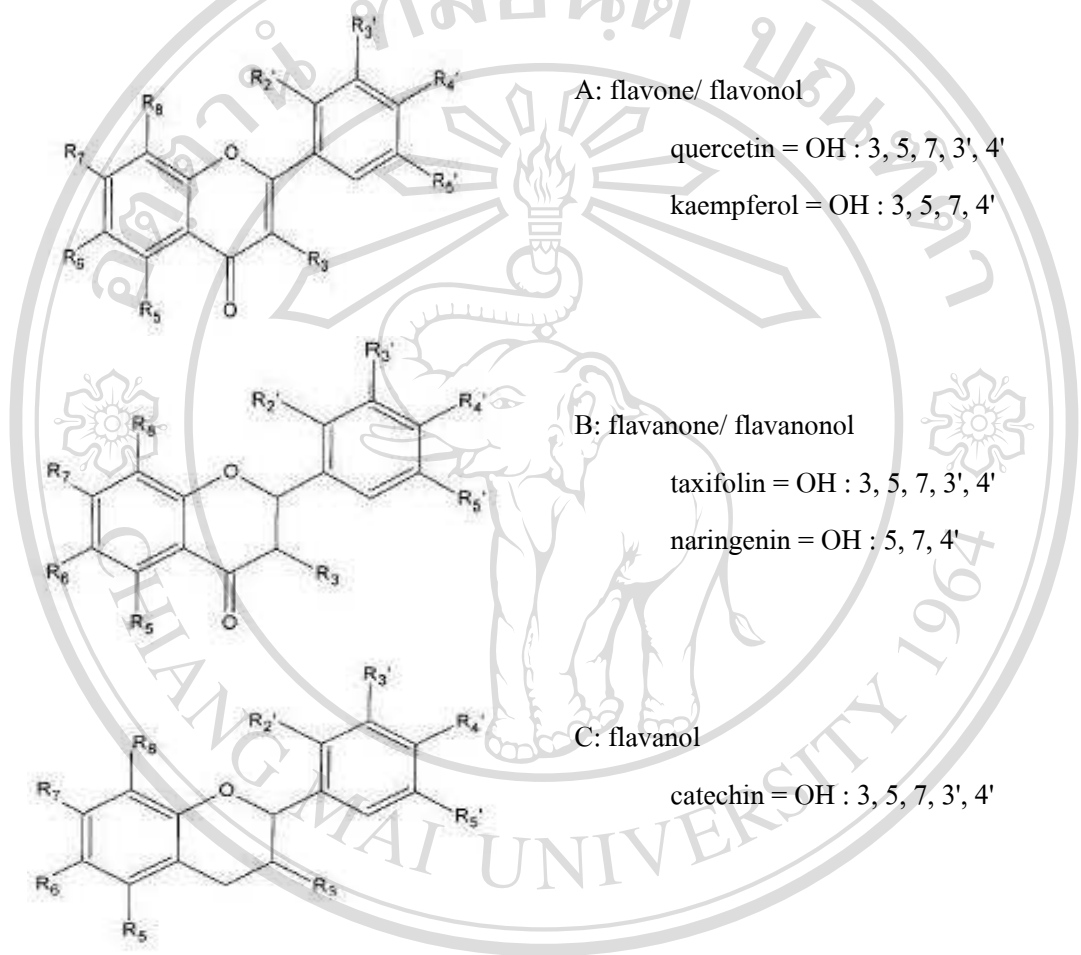
ในผลหม่อนมีสารประกอบฟีนอลซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ มีฤทธิ์ต่อต้านอาการอักเสบ และอาการเส้นเลือดโป่งพอง ช่วยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและไวรัล (Duthie *et al.*, 2000) มีการวิจัยพบว่าในผลหม่อนมีสารเคอร์ซีทิน (quercetin) ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ โดยมีในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสด 34.20 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีในผลหม่อนสุกที่เป็นผลแห้ง 176.40 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งสารนี้ก็มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระด้วยเช่นกัน มีคุณสมบัติลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง และป้องกันการเกิดลิ่มเลือดในหลอดเลือด (Manach, 2005) ผลหม่อนสุกจะมีสารสี (pigment) ในกลุ่มของแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสดอยู่ในช่วง 258.41- 2,512.40 ไมโครกรัมต่อกรัม (สมชาย และคณะ, 2550) ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน และโรคมะเร็ง (Lazze *et al.*, 2004)

สารต้านอนุมูลอิสระที่มีความสำคัญ และพบในผลหม่อน คือ สารประกอบฟีนอล สารเคอร์ซีทิน และสารแอนโทไซยานิน

1) สารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) เป็นสารที่พบได้ในผักและผลไม้ทั่วไปมีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ที่มีจำนวน hydroxyl group อย่างน้อยหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งหมู่ในโมเลกุล (ภาพที่ 2.1) ส่วนมากสารประกอบฟีนอลมักเชื่อมอยู่กับ mono- และ polysaccharides เกิดเป็นโครงสร้างที่หลากหลาย สารประกอบฟีนอลในธรรมชาติจึงมีอยู่หลายชนิด สามารถละลายได้ในน้ำ ส่วนใหญ่สารประกอบฟีนอลมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลยังอาจรวมกับสารประกอบอื่นอีกหลายชนิด เช่น hydroxycinnamic acid อาจพบรวมกับ organic acids, amino groups, lipids, terpenoids, phenolics และกลุ่มอื่นๆ นอกเหนือจากน้ำตาล สารประกอบฟีนอลหลายชนิดมีสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนต์ เช่น ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก และลิกนิน เป็นต้น นอกจากนั้นปริมาณสารประกอบฟีนอลของพืชยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายใน เช่น สกฤต ชนิด และพันธุ์ และปัจจัยภายนอก เช่น สภาพแวดล้อม วิธีการเก็บเกี่ยว และการเก็บรักษา ประโยชน์ของสารประกอบฟีนอลในการรักษาโรค เช่น มีฤทธิ์ต่อต้านอาการอักเสบ และอาการเส้นเลือดโป่งพอง ช่วยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและไวรัล (Duthie *et al.*, 2000)



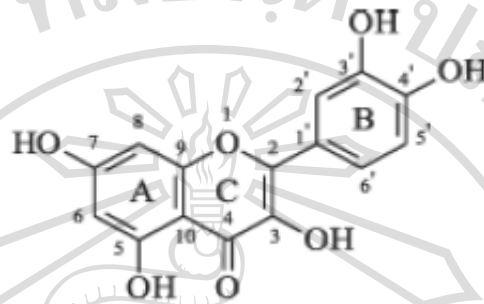
Phenol



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลบางชนิด

ที่มา: Dzyubak, 2007

2) สารเคอร์ซีทิน (quercetin) เป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ ในกลุ่มของฟลาโวนอล (flavonol) เกิดจากการที่สารประกอบฟลาโวนมีการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 3 (ภาพที่ 2.2) มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่พบในหัวหอม แอปเปิล ไข่ขาว และผลไม้ตระกูลเบอร์รี่

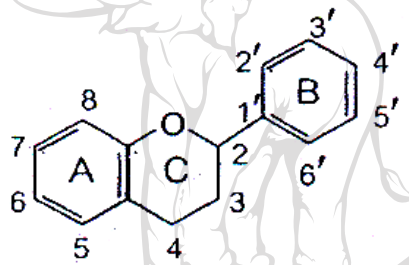


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเคอร์ซีทิน

ที่มา: Castaeda-Ovando *et al.*, 2009

รายงานการวิจัยพบว่าสารเคอร์ซีทิน สามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ และเส้นเลือดสมองตีบ การเสริมสารเคอร์ซีทินช่วยลดความดันโลหิตในสัตว์ที่มีความดันโลหิตสูง (Manach, 2005) และได้มีการศึกษาการเสริมสารเคอร์ซีทินในผู้ป่วยทั้งชายและหญิงที่เริ่มมีความดันโลหิตสูง และเป็นความดันโลหิตสูงขั้นที่หนึ่ง โดยเสริมสารเคอร์ซีทินวันละ 730 มิลลิกรัม เป็นเวลา 28 วัน พบว่าหลังการเสริมสารเคอร์ซีทิน ความดันโลหิตในกลุ่มที่เริ่มมีความดันโลหิตสูงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งตรงข้ามกับกลุ่มที่มีความดันโลหิตสูงขั้นที่หนึ่งที่มีความดันโลหิตจะลดลง (Nutrition update, 2007) ได้มีการศึกษาปริมาณการดูดซึมของสารเคอร์ซีทินในอาสาสมัครที่ทำศัลยกรรมสร้างทางผ่านเข้าไปในลำไส้เล็กก่อนปลาย โดยทางผนังช่องท้อง (ileostomy) เพื่อป้องกันการสูญเสียสารประกอบฟลาโวนอยด์ เนื่องจากแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ และได้รับสารเคอร์ซีทินจากหัวหอมทอด ซึ่งมีสารเคอร์ซีทินไกลโคไซด์ในปริมาณสูง (เทียบเท่ากับอะไกลโคน 89 มิลลิกรัม) สารเคอร์ซีทินรูตินไฮดรอกไซด์บริสุทธี ซึ่งเป็นสารเคอร์ซีทินหลักในชาเทียบเท่ากับอะไกลโคน 10 มิลลิกรัม หรือสารเคอร์ซีทินอะไกลโคนบริสุทธี 100 มิลลิกรัม พบว่าภายใน 13 ชั่วโมง สารเคอร์ซีทิน หรือไกลโคไซด์ของสารเคอร์ซีทินในของเหลวจากทางเดินอาหารมีการสลายตัวน้อยมาก มีการดูดซึมของสารเคอร์ซีทินไกลโคไซด์จากหัวหอมทอดร้อยละ 52 สารเคอร์ซีทินรูตินไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 17 และสารเคอร์ซีทินอะไกลโคนบริสุทธีร้อยละ 24 การขับออกของสารเคอร์ซีทิน หรือไกลโคไซด์ของสารเคอร์ซีทินเป็นร้อยละ 5 ของปริมาณที่ถูกดูดซึม แสดงว่าสารเคอร์ซีทินไกลโคไซด์จากหัวหอมถูกดูดซึมได้ในลำไส้เล็ก (Pietta and Simonetti, 1999)

3) สารแอนโทไซยานิน (anthocyanins) เป็นรงควัตถุที่พบในผัก ผลไม้ และดอกไม้ ละลายอยู่ใน vacuole sap ในเซลล์ของพืช เช่น มะเขือม่วง กะหล่ำปลี สีม่วง แอปเปิล กระจับปี่ องุ่น และผลไม้ประเภทเบอร์รี่ เป็นต้น สามารถละลายน้ำได้แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายประเภท non-hydroxyl เช่น acetone, chloroform และ ether จะมีสีแดงที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำ และมีสีม่วงหรือสีน้ำเงินที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่าง โมเลกุลประกอบด้วยแอนโทไซยานิดิน ที่เรียกว่าอะไกลโคนจับตัวกับน้ำตาลด้วยพันธะ β -glycosidic และจับที่คาร์บอนตำแหน่งที่สาม (ภาพที่ 2.3) น้ำตาลที่จับกับแอนโทไซยานินเป็น monosaccharide ได้แก่ glucose, rhamnose, galactose หรือ arabinose หรือพวก disaccharide หรือ trisaccharide โมเลกุลน้ำตาลมักถูก esterified มีที่คาร์บอนตำแหน่งที่สามด้วยกรดอินทรีย์บางชนิด เช่น p-coumaric, caffeic และ ferulic ซึ่งน้ำตาลในโมเลกุลของสารแอนโทไซยานินนั้นมีส่วนช่วยให้สารแอนโทไซยานินสามารถคงตัวได้ดี (เกียรติศักดิ์, 2535)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน

ที่มา: Dzyubak, 2007

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน เช่น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ออกซิเจน และแสง โครงสร้างในส่วนของวงแหวนฟีนอลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมธอกซิลเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อสีของแอนโทไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้น โดยสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นด้วยและการเพิ่มหมู่เมธอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้สีแดงเพิ่มมากขึ้น การใช้ประโยชน์ของแอนโทไซยานิน เช่น อุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง นมเปรี้ยว และไวน์แดง เป็นต้น ซึ่งสีของแอนโทไซยานินจะคงสภาพได้ดีที่ความชื้นไม่เกิน ร้อยละ 3 และการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดจะให้สีคงทน (สันติ, 2534)

2.4 การใช้เอนไซม์เพคตินเอสในการสกัดน้ำผลไม้

กระบวนการสกัดน้ำผลไม้สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีทางกล (mechanical extraction) โดยใช้แรงไปทำให้เซลล์เนื้อผลไม้ฉีกขาด เพื่อบีบของเหลวออกจากผลไม้ และวิธีทางชีวภาพ (biological extraction) ซึ่งจะใช้สารชีวภาพ เช่น เอนไซม์ไปย่อยสลายเซลล์เนื้อผักผลไม้ให้มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะปลดปล่อยของเหลวในผลไม้ออกมา การสกัดน้ำผลไม้ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การตีปั่น และการคั้นน้ำผลไม้ แต่ผลไม้บางชนิดอาจนำไปคั้นน้ำได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการตีปั่น เช่น องุ่น และส้ม การตีปั่น (pulping) เป็นขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวของผลไม้ให้มากขึ้น เพื่อง่ายต่อการคั้นน้ำผลไม้ โดยจะทำให้เนื้อผลไม้มีขนาดเล็กลงมีสภาพเป็นของเหลวกึ่งแข็ง การคั้นน้ำผลไม้ (pressing) เป็นการสกัดของเหลวออกจากส่วนของผลไม้โดยการคั้น

เอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เอนไซม์ในอาหาร (endogenous enzymes) และเอนไซม์นอกอาหาร (exogenous enzymes) เอนไซม์ในอาหาร หมายถึง เอนไซม์ที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเยื่อพืช และสัตว์โดยธรรมชาติ ส่วนเอนไซม์นอกอาหาร หมายถึง เอนไซม์ที่เติมลงไปในกระบวนการแปรรูปอาหารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยทั่วไปการนำเอนไซม์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะเป็นแบบเอนไซม์สังเคราะห์ เช่น เอนไซม์เพคตินเอส ช่วยทำให้น้ำผลไม้ใส ลดความหนืดของน้ำผลไม้ เป็นต้น ผลไม้ประกอบด้วยเนื้อเยื่อและของเหลว ผลไม้เนื้อนุ่มจะมีปริมาณน้ำไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือพบว่าเป็นสารประกอบที่รวมเป็นเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารคาร์โบไฮเดรตในรูปต่างๆ เช่น แป้ง น้ำตาล โยอาหาร ซึ่งส่วนของโยอาหารนี้ ได้แก่ เพคติน และเซลลูโลส เป็นหลัก ปริมาณเพคตินที่พบในผลไม้มีประมาณร้อยละ 7-20 โดยน้ำหนัก ดังนั้นบทบาทของเอนไซม์เพคตินเอสจึงมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสกัดน้ำผลไม้ และกลั่นรสที่ละลายในน้ำผลไม้ (ปราณี, 2547)

เพคตินสพบทั่วไปในพืชชั้นสูง เช่นเดียวกับที่พบสารเพคติน แต่อยู่คนละชั้นของเซลล์ แต่เมื่อเซลล์พืชฉีกขาดหรือได้รับการกระทบกระเทือน เอนไซม์และเพคตินจะเคลื่อนเข้าใกล้กัน ทำให้เกิดการย่อยสลาย ลักษณะการคงตัวของเนื้อสัมผัสของผักผลไม้เสียไป ผักผลไม้จะนิ่มลง ปัจจุบันได้มีการผลิตเพคตินเอสเพื่อการค้าจากการสกัดจากจุลินทรีย์ มี 2 รูปแบบ คือ เป็นผงและของเหลว (ปราณี, 2535) เอนไซม์เพคตินเอสเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่ย่อยสลายพวกเพคติน โดยสับเสตรของเพคตินเอส คือ สารประกอบเพคตินและอนุพันธ์ของโพลีเมอร์ α - 1,4 - D-galacturonopyranose units เพคตินเอสสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ depolymerase และ esterases โดย depolymerase จะแยกพันธะระหว่าง galacturonic acid ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเพคติน ในขณะที่ esterases จะแยกหมู่เมธอกซิลออกจาก โมโนเมอร์ที่ถูกเอสเทอร์

เอนไซม์หลักที่ใช้ในการย่อยสลายเพคติน ได้แก่

1) เพคตินเอสเทอร์เรส เอนไซม์นี้มีชื่อตามระบบว่า Pectin pectylhydrolase, EC 3.1.1.11 เอนไซม์จะเร่งปฏิกิริยาการแยกหมู่เมทิลจากสารประเภทเพคตินที่มีการเติมหมู่เมทิลที่หมู่คาร์บอกซิล ทั้งนี้ไม่ย่อยสลายพันธะไกลโคซิด และยังคงจัดอยู่ในกลุ่มการย่อยของไฮโดรเลสที่ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์

2) พอลิแกแลคทูโรเนส เอนไซม์นี้มีชื่อตามระบบว่า poly - α - 1,4 galacturonide glyconohydrolase, EC 3.2.1.15 ทำหน้าที่ไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดในสารประกอบเพคติน แบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย ตามชนิดสับสเตรต คือ พอลิเมทิล กาแลคทูโรเนส (polymethyl galacturonase) และแบ่งการย่อยไปตามลักษณะการย่อยสลาย คือ แบบสุ่ม และแบบเป็นระเบียบ

- การย่อยสลายแบบสุ่ม จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีเมทิลเอสเทอร์ จะไฮโดรไลซ์สับสเตรตที่เป็นเพคตินได้ดีกว่ากรดเพคติก และมีการย่อยแบบไม่เป็นระเบียบในสายพอลิเมอร์

- การย่อยสลายแบบเป็นระเบียบ จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีเมทิลเอสเทอร์ จะไฮโดรไลซ์สับสเตรตที่เป็นเพคตินได้ดีกว่ากรดเพคติก และมีการย่อยแบบเป็นระเบียบจากปลายสายพอลิเมอร์

3) เพคเทตไลเอส เอนไซม์นี้มีชื่อตามระบบว่า poly - α - 1,4 - D-galacturonide lyase (EC 4.2.2.2) มีลักษณะปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดในเพคติน หรือกรดเพคติก แล้วได้สายพอลิเมอร์สายสั้นที่ปลายหนึ่งมีปลายรีดิวซ์ และอีกสายพอลิเมอร์มีพันธะคู่

การใช้เอนไซม์ในกระบวนการสกัดน้ำผลไม้ ในอดีตกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ โดยเฉพาะการสกัดน้ำจะได้น้ำในปริมาณน้อย จึงต้องมีการพัฒนาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ในปี 1930 จึงเริ่มนำเอนไซม์เซลลูเลส และเพคตินเนสเข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหาผลผลิตต่ำ และลดการอุดตันของแผ่นกรอง (Uhlig, 1998) ในกระบวนการผลิตหลังจากการบีบคั้นน้ำแล้วอาจยังมีน้ำหลงเหลืออยู่ โดยแทรกตัวอยู่กับกากที่คั้นแล้ว เอนไซม์จะทำปฏิกิริยาทำให้เนื้อผลไม้มีขนาดเล็กลง และทำให้มีช่องของเหลวเกิดขึ้น ช่วยเพิ่มผลผลิต สามารถลดระยะเวลาในการบีบคั้นน้ำได้อีกด้วย (Pilnik and Vorragen, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รุจิรา (2542) ได้ศึกษาเรื่องการทำน้ำสาตีไฮดรอกซ์ พบว่า เมื่อเติมเอนไซม์เพคตินเนส ปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม บมที่อุณหภูมิห้องนาน 90 นาที คั้นด้วยเครื่องไฮดรอลิก ปริมาณผลผลิตของน้ำสาตี ภายหลังการคั้นเมื่อไม่เติมและเติมเอนไซม์เพคตินเนสเท่ากับร้อยละ 50.08 และ 60.72 ตามลำดับ ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์ของเอนไซม์เพคตินเนสและเอนไซม์อื่นๆ มีความสำคัญอย่างมากในเทคโนโลยีการผลิตน้ำผลไม้ เช่น การใช้เอนไซม์เพคตินเนสในการสกัดน้ำผลไม้ ทำให้น้ำผลไม้ป้องกันการเกิดเจล และลดปริมาณของเสีย

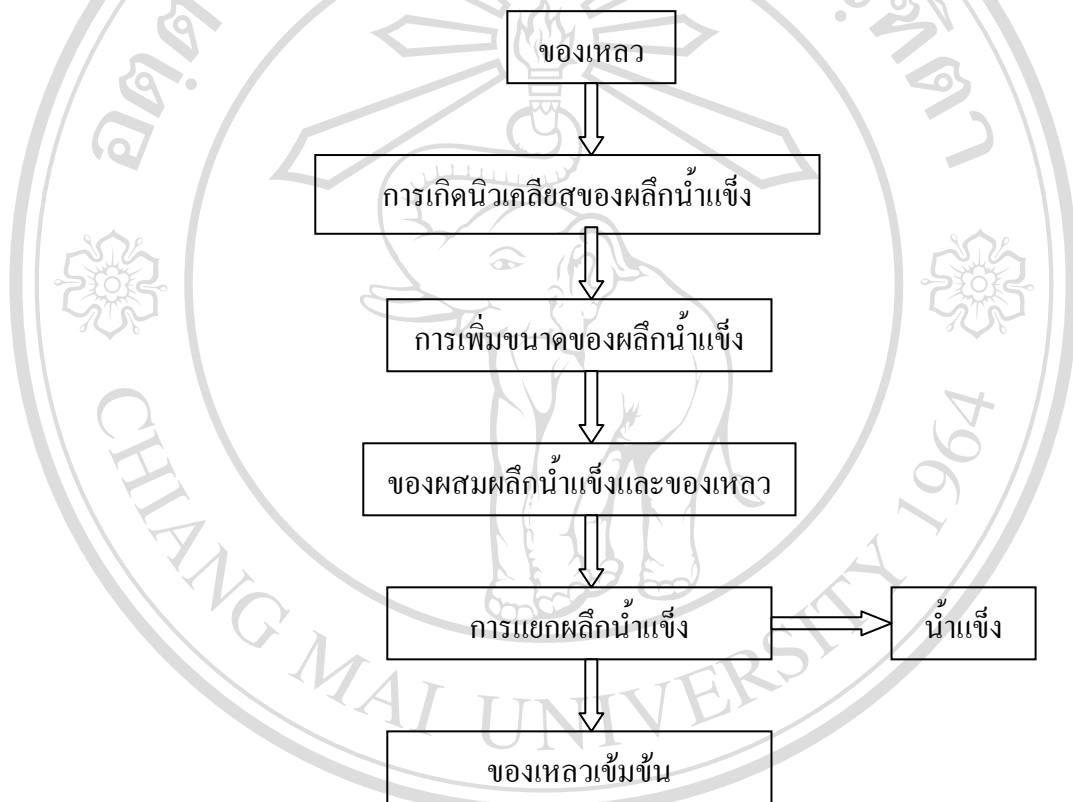
ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดโดยใช้เอนไซม์เพคตินเนส คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลา พบว่า การใช้เอนไซม์ Pectinex TM Ultra SP-L ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 และ 0.12 เป็นเวลา 0 15 30 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิช่วง 45-60 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของเอนไซม์ไม่มีผลต่อการลดลงของความหนืด แต่เวลาในการสกัดมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ส่วนผลการเปรียบเทียบเครื่องมือใช้แยกน้ำมะม่วงหลังการใช้เอนไซม์สกัด พบว่าเครื่องกรองภายใต้ความดันสามารถแยกน้ำมะม่วงที่มีลักษณะใส (อรัญญา และคณะ, 2545) งานวิจัยของ กัลยา (2536) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเอนไซม์เพคตินเนสในการสกัดน้ำละมุด โดยใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ 5 ระดับ คือร้อยละ 0.01 0.02 0.03 0.04 และ 0.05 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 15 30 45 และ 60 นาที สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.01 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะทำให้ความหนืดของเนื้อละมุดตีปั่นลดลง และให้ผลผลิตน้ำละมุดร้อยละ 71 เมื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำละมุดที่ใช้เอนไซม์ในการสกัดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นกรดค่า (pH) ลดลง ในขณะที่ปริมาณกรด ค่าการเกิดสีน้ำตาล (browning index) และปริมาณของของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เพิ่มขึ้น และ อมรรัตน์ (2545) ได้ศึกษาวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำฝรั่งแช่ชนิดใสด้วยวิธีทางชีวเคมี โดยใช้เอนไซม์เพคตินเนสปริมาณ ร้อยละ 0.10 0.12 และ 0.14 เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 1 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่าการใช้เอนไซม์เพคตินเนสปริมาณ ร้อยละ 0.14 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลผลิตกัณฑ์ที่ได้มีเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่านสูง และได้รับคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงสุด

2.5 การทำให้เข้มข้นโดยเทคนิคการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง

2.5.1 ขั้นตอนการทำให้เข้มข้นโดยเทคนิคการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง

โดยทั่วไปการทำให้เข้มข้นในอาหารเหลวมีอยู่ 3 วิธี คือการระเหยโดยใช้ความร้อน (evaporation) เมมเบรนเทคโนโลยี (reverse osmosis) และการทำให้เข้มข้นโดยการแช่แข็ง (freeze concentration) (Miyawaki *et al.*, 2005) การทำให้เข้มข้น โดยการแช่แข็งเป็นการทำให้อาหารที่เป็นของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีหลักการ คือการลดอุณหภูมิของอาหารเหลวให้ต่ำลงจนกระทั่งอาหารบางส่วนแข็งตัว อาหารในช่วงนี้มีลักษณะเป็นกึ่งของเหลวกึ่งของแข็ง (slurry) เพราะในอาหารเหลวประกอบด้วยผลึกน้ำแข็ง (ice crystal) อยู่ร่วมกับส่วนที่เป็นของเหลว ทำให้อาหารมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากน้ำในอาหารเหลว บางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ถ้าผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสมผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากแทบจะไม่มีองค์ประกอบ

อื่น ๆ ของอาหารเข้าไปอยู่ในผลึกน้ำแข็ง เมื่ออาหารเหลวมีลักษณะเป็น slurry แล้วผลึกน้ำแข็งจะถูกแยกออกจากของเหลว โดยมีของเหลวติดไปกับผลึกน้ำแข็งน้อยที่สุด ดังนั้นผลิตภัณฑ์ ที่ได้คืออาหารเหลวที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal nucleation) และต่อด้วยขั้นตอนการเพิ่มขนาดของนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) เพื่อให้ได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเหมาะสม จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการแยกผลึกน้ำแข็ง (separation) ออกจากอาหารเหลวที่เข้มข้นเพิ่มขึ้น (วสันต์, 2550)



ภาพที่ 2.4 กระบวนการพื้นฐานของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง
ที่มา: ดัดแปลงจาก วสันต์, 2550

การทำให้เข้มข้น โดยการแช่เยือกแข็งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนของการเกิดผลึกน้ำแข็ง (crystallization) และขั้นตอนการแยกผลึกน้ำแข็ง (separation unit)

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง (crystallization)

การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารเหลว มี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ในขั้นตอนนี้ต้องมีการควบคุมให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งอาหารเหลว และเป็นผลึกน้ำแข็งที่เหมาะสมแก่ขั้นตอนการแยก นั่นคือ ผลึกน้ำแข็งควรมีรูปร่าง

กลม มีขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวเข้มข้นได้ง่าย และลดปริมาณอาหารเหลวเข้มข้นที่ติดไปกับผลึกน้ำแข็ง (รุ่งนภา, 2544) โดยกระบวนการเกิดผลึกจะเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอนคือ

(1) การเกิดผลึกน้ำแข็ง (Crystal formation) หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (nucleation) เป็นจุดเริ่มต้นของการแช่แข็ง ที่ก่อให้เกิดนิวคลีโอ (nuclei) ขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป ที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง โดยทั่วไปแล้วนิวคลีโอจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ โฮโมจีเนียส (homogeneous) และเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งแบบแรกนั้นจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยเฉพาะในระบบที่น้ำถูกทำให้บริสุทธิ์อย่างมาก โดยนิวคลีโอจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำที่รวมตัวกัน ส่วนการเกิดแบบเฮเทอโรจีเนียสนั้นอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีอยู่ในสารละลายจะทำตัวเป็นนิวคลีโอแล้วเกิดเป็นผลึกขึ้น อนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้างผลึกคล้ายกับที่เกิดจากน้ำแข็ง

(2) การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Crystal growth) การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งเป็นขั้นตอนที่สองของการเกิดผลึกน้ำแข็ง เกิดขึ้นหลังจากเกิดนิวคลีโอเกิดขึ้นในจำนวนที่มากพอ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแช่เยือกแข็ง ขนาดของผลึกน้ำแข็งนี้จะขึ้นกับจำนวนของนิวคลีโอที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็งคือ ถ้าเกิดนิวคลีโอจำนวนเล็กน้อยจะได้ผลึกขนาดใหญ่ แต่ถ้าเกิดนิวคลีโอจำนวนมาก ก็จะได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมากด้วย เนื่องจากการเกิดนิวคลีโอจะขึ้นกับระดับการทำให้เย็นยิ่งยวด (super cooling) ดังนั้นขนาดของผลึกที่ได้จึงขึ้นกับอัตราการแช่แข็งด้วย ถ้าอัตราการกำจัดความร้อนช้า (อัตราการแช่แข็งช้า) นิวคลีโอที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ถ้าความเร็วกำจัดออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จะเกิดนิวคลีโอจำนวนมากและมีการเพิ่มขนาดที่จำกัด ขนาดของผลึกน้ำแข็งจะขึ้นอยู่กับเครื่องแช่เยือกแข็ง

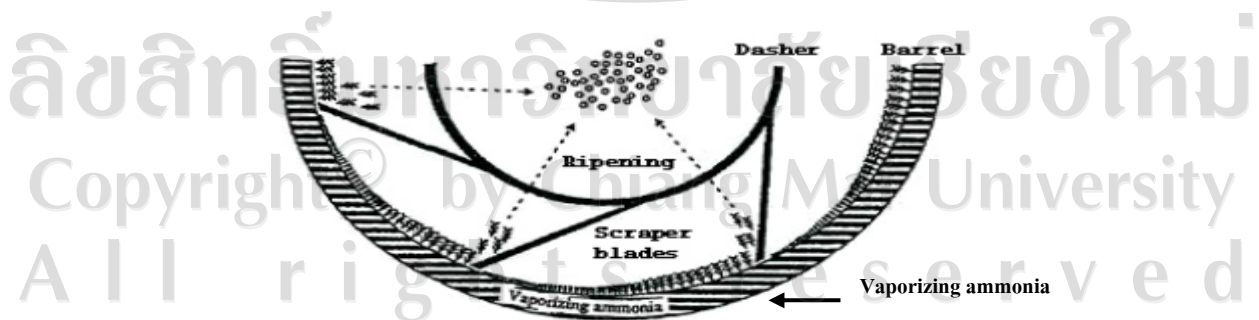
เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างผลึกน้ำแข็ง ทำหน้าที่ดึงความร้อนแฝงของการกลายเป็นน้ำแข็ง (heat of crystallization) ออกจากของเหลว ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การดึงความร้อนออกจากสารละลายโดยตรง คือ การใช้การระเหยน้ำแบบสุญญากาศ และการดึงความร้อนออกโดยผ่านผนังเย็นจากระบบทำความเย็นดังนี้

1) เครื่องแช่แข็งที่สารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารเหลวโดยตรง เครื่องแช่แข็งแบบนี้สารให้ความเย็นจะสัมผัสกับอาหารเหลวโดยตรง สารให้ความเย็นที่ใช้กัน ได้แก่ Freon และ butane เป็นต้น ที่ความดันสูงสารให้ความเย็นจะมีสถานะเป็นของเหลวส่วนที่ความดันต่ำสารให้ความเย็นจะมีสถานะเป็นก๊าซ สารให้ความเย็นจะถูกฉีดออกมาด้วยความดันสูง สารให้ความเย็นจึงมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อสารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารเหลวความดันจะต่ำลงสารให้ความเย็นจึงเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ในขณะเดียวกันก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอาหารเหลวทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นในอาหารเหลว เรียกเครื่องแช่แข็งแบบนี้ว่าเป็นแบบ bubbling of expanding refrigerant

อีกรูปแบบหนึ่งคือแบบ vacuum vaporization of solvent วิธีนี้นิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีและในการเปลี่ยนน้ำทะเลให้กลายเป็นน้ำจืด แต่ไม่นิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นอาหารเหลว โดยเป็นเครื่องแช่แข็งที่ภายในเป็นสุญญากาศสูงมากจนน้ำในสารละลายกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำจะสัมผัสกับสารให้ความเย็นแล้วไอน้ำจะควบแน่นเป็นผลึกน้ำแข็ง เนื่องจากใน เครื่องแช่แข็งแบบนี้จะมีไอน้ำอยู่รวมกับน้ำที่มีสถานะเป็นของเหลว หากใช้วิธีนี้กับอาหารเหลวจะทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสที่ระเหยได้ของอาหารเหลวไปกับไอน้ำ ทำให้คุณภาพของอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ไม่ดีไปกว่าการทำให้เข้มข้นโดยการระเหยเลย นี่คือเหตุผลสำคัญที่ไม่นิยมใช้วิธีนี้ในการทำให้อาหารเหลวเข้มข้น

2) เครื่องแช่แข็งที่สารให้ความเย็นไม่สัมผัสกับอาหารโดยตรง จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารให้ความเย็นกับอาหารเหลวผ่านผนังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแช่เยือกแข็งที่การเย็นลงของอาหารเหลวและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกัน แบ่งย่อยได้เป็น

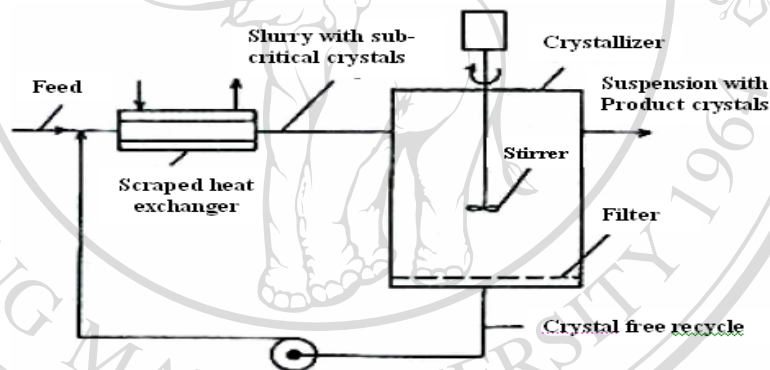
(2.1) แบบผลิตพร้อมกับการเลี้ยงผลึก โดยทั่วไปของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ จะมีส่วนของการสร้างผลึก และส่วนของการเลี้ยงผลึกอยู่ในตัวเดียวกัน โดยมีการทำงานของเครื่อง คือเมื่อผิวเย็นทำหน้าที่ของการสร้างผลึกเล็ก (nucleation zone) แล้วผลึกเล็ก ๆ เหล่านั้นจะถูกใบมีดทำการขูดผลึกเหล่านั้นออกมาให้อยู่ในส่วนของการเลี้ยงผลึก (growth zone) (ภาพที่ 2.5) ใบมีดของอุปกรณ์ชนิดนี้ ทำหน้าที่ในการกวนสารละลายเพื่อเพิ่มความเป็นเทอร์บูเลนซ์ให้กับสารละลายด้วย ข้อดีของการผลิตผลึกแบบนี้ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ มีราคาถูกลงกว่า จึงเหมาะสำหรับการผลิตแบบแบทช์ และสามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่าย ส่วนข้อเสียของอุปกรณ์นี้ คือ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบตกผลึกภายนอก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมพลังงานของการกวนได้เพราะใบกวน และใบขูดติดอยู่ในชุดเดียวกัน



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของการเกิดผลึกพร้อมกับการขูดผลึกของใบมีด

ที่มา : Hartel, 1996

(2.2) แบบตกผลึกภายนอก (External cooled crystallizer) หลักการผลิตด้วยเครื่องผลิตผลึกด้วยวิธีนี้คือ การแยกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กำเนิดผลึกออกจากถังกวน เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะได้ดีกว่าแบบแรก เหมาะสำหรับระบบการผลิตที่เป็นแบบต่อเนื่อง (continuous type) แต่มีการลงทุนที่สูง และต้องการการควบคุมสภาวะที่ซับซ้อนกว่าแบบแรก โดยวิธีผลิตผลึกแบบนี้มีอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ เครื่อง scrap surface heat exchanger อัตราทำความเย็นสูง ถังบ่มผลึก (ripening tank) และปั๊ม (pump) ที่ทำหน้าที่ส่งสารละลายที่เป็นของเหลวกลับมาทำความเย็นได้อีก ในกระบวนการผลิตผลึก ความร้อนจะถ่ายเทผ่านผนังของ scrap surface heat exchanger ในอัตราที่สูง ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนี้อยู่ในรูปของ subcritical crystal จากนั้นผลึกน้ำแข็งเหล่านั้นจะถูกส่งอย่างต่อเนื่องไปสู่เครื่องผลิตผลึก (crystallizer) ผลึกที่ถูกส่งมาจะเกิดการละลายไปรวมกับผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีอยู่แล้วในระบบ โดยในส่วนของกระบวนการผลิตผลึกนี้จะใช้เวลาไม่ต่ำกว่าครึ่งชั่วโมง (ภาพที่ 2.6)

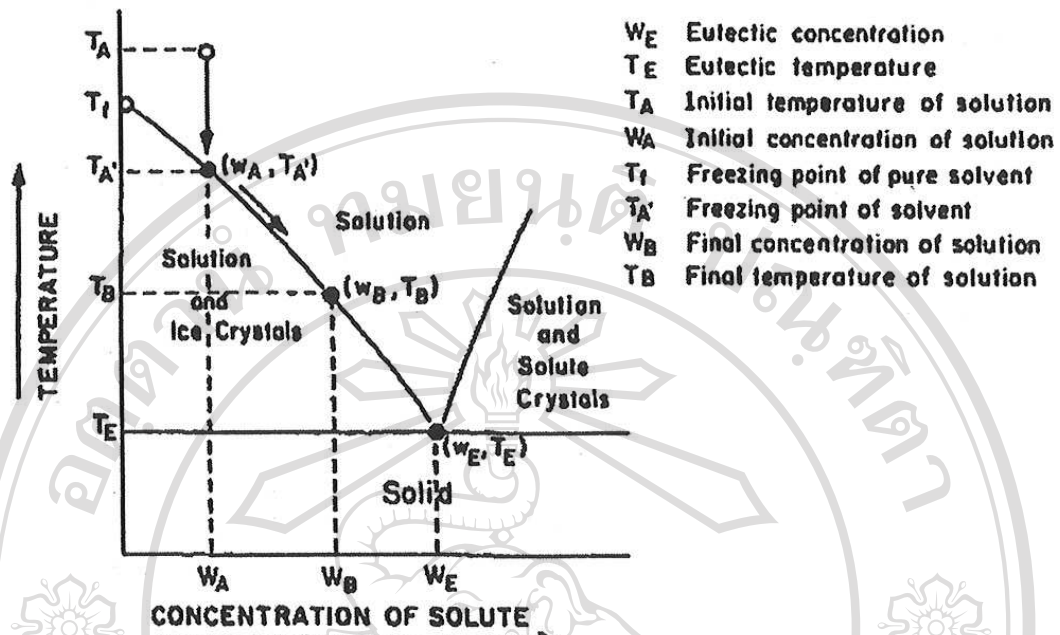


ภาพที่ 2.6 ระบบของเครื่องผลิตผลึกแบบเลี้ยงผลึกภายนอก

ที่มา : Hartel, 1996

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็ง

1) การลดลงของจุดเยือกแข็งและการเกิดจุด Eutectic กราฟสถานะของสารละลายที่มีองค์ประกอบสองอย่างแสดงไว้ในภาพที่ 2.7 จากภาพจะเห็นว่าเมื่อของเหลวถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (จากจุด TA - TA') ของของเหลว น้ำจะแยกตัวออกมาเป็นผลึกน้ำแข็งในปริมาณเท่ากับ WA เมื่อของเหลวถูกทำให้เย็นลงกว่านี้ ความเข้มข้นของของเหลวจะเพิ่มขึ้นจากจุด (WA - TA') ถึงจุด (WA - TB) จนถึงจุดสมมูล ความเข้มข้น WE องค์ประกอบในผลึกของแข็งและในส่วนที่ยังเป็นของเหลวจะเท่ากัน เนื่องจากเมื่อของเหลวมีความเข้มข้นมากขึ้นจะมีความหนืดมาก และทำให้การแยกผลึกน้ำแข็งออกเป็นไปได้ยาก กระบวนการแช่เยือกแข็งจึงมักจะหยุดก่อนที่จะถึงจุดสมมูล คือ จุด Eutectic (Marcus, 2003)



ภาพที่ 2.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบของแข็งและของเหลวผสม

ที่มา: Marcus, 2003

2) วิธีการเตรียมอาหารเหลวก่อนนำอาหารเหลวไปแช่แข็ง ประสิทธิภาพของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะสูงขึ้นได้หากมีการเตรียมอาหารเหลวให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของอาหารเหลว เช่น ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือโดยใช้วิธีการแยกทางกายภาพ เช่น การหมุนเหวี่ยง และการกรอง เพื่อแยกองค์ประกอบบางอย่างออกไปจากอาหารเหลว เช่น การแยกองค์ประกอบพวกเศษเนื้อ และเพคตินออกไป การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในน้ำผลไม้ทำได้โดยนำน้ำผลไม้ไปให้ความร้อน ซึ่งจะเป็นการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้และทำลายเอนไซม์เพคตินเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้น้ำผลไม้ขุ่น การใช้ความร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านจุลชีววิทยาและมีความใส โดยไม่ทำให้คุณภาพด้านอื่น ๆ ของผลิตภัณฑ์สูญเสียไป ตัวอย่างเช่น น้ำองุ่น pH 3.0 3.5 และ 3.8 ถ้าถูกทำให้ความร้อน 0.8 วินาที ที่อุณหภูมิ 88 93 และ 96 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เพคตินเนสได้อย่างสมบูรณ์ การแยกเศษเนื้อออกไปแล้วมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการแยกจะสูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียตัวถูกละลายไปในขั้นตอนการแยกด้วยเครื่องแยกแบบคอลัมน์

3) ความหนืดของอาหารเหลวโดยทั่วไปแล้วเมื่อความเข้มข้นของอาหารเหลวเพิ่มขึ้น ความหนืดของอาหารเหลวจะเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น น้ำเชื่อมที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถ้ามีความเข้มข้นร้อยละ 20 และร้อยละ 50 จะมีความหนืด 3.8 และ 93.9 เซนติพอยส์ ตามลำดับ ความหนืดที่

เพิ่มขึ้นระหว่างการทำให้เข้มข้น โดยการแช่เยือกแข็งจะเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของอาหารเหลวที่จะทำได้ เพราะประสิทธิภาพในการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวเข้มข้นจะลดลงหากความหนืดของอาหารเหลวสูงขึ้น ความหนืดยังมีผลต่อขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งด้วย โดยอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งจะช้าลงหากความหนืดของอาหารเหลวสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ในสารละลายที่มีองค์ประกอบพวกน้ำตาล โปรตีน และสตาแรช ซึ่งองค์ประกอบพวกนี้ทำให้สารละลายมีความหนืดมากกว่าน้ำ พบว่าสารละลายที่มีองค์ประกอบเหล่านี้จะมีอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งช้ากว่าอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งในน้ำบริสุทธิ์ ความหนืดที่เพิ่มขึ้นในอาหารเหลวบางชนิดจะสามารถป้องกันการเกิดนิวเคลียสของผลึกของตัวถูกละลายได้ ซึ่งก็จะช่วยให้การแช่เยือกแข็งดำเนินต่อไปได้แม้ว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแล้วก็ตาม

ขั้นตอนที่ 2 การแยกผลึกน้ำแข็ง

เมื่อน้ำผลไม้ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นโดยใช้เทคนิคแบบแช่เยือกแข็งแล้ว จะได้สารละลายที่อยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้นผสมกับผลึกน้ำแข็ง แต่เนื่องจากการสารละลายเข้มข้นเพียงอย่างเดียว จึงต้องมีการเหวี่ยงแยกผลึกน้ำแข็งออกจากของเหลว ซึ่งกระบวนการเหวี่ยงแยกผลึกน้ำแข็งนี้ สามารถแบ่งเครื่องมือที่ใช้ในการแยกออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

1) เครื่องหมุนเหวี่ยง สามารถกรองผลึกน้ำแข็งได้ในตัว (filtering centrifuges) โดยอาศัยหลักการที่ว่าความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งกับส่วนของเหลวเข้มข้นมีค่าไม่เท่ากัน ส่วนของเหลวเข้มข้นมีความหนาแน่นมากกว่าผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นจะถูกหมุนเหวี่ยงไปได้ไกลกว่า ส่วนของเหลวเข้มข้นจึงเป็นส่วนที่อยู่ติดผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยงซึ่งที่ผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะเป็นตัวกรองโดยรอบ ของเหลวเข้มข้นสามารถไหลผ่านตัวกรองออกไปได้ นอกจากนั้นยังพบว่ามี การสูญเสียกลิ่นรสของอาหารไปบางส่วน ทั้งนี้เพราะในระหว่างการหมุนเหวี่ยงจะเกิดช่องว่างอากาศบริเวณตรงกลางของเครื่องเหวี่ยง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการแยกของเครื่องหมุนเหวี่ยง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน ขนาดของผลึก การกระจายขนาดของผลึก รูปร่างของผลึก และความหนืดของของเหลวเข้มข้น

2) Wash column เป็นเครื่องที่ใช้กันมากในโรงงานที่ผลิตอาหารเหลวเข้มข้น เพราะได้มีการพัฒนาเครื่องให้มีประสิทธิภาพในการแยกสูง wash column มีลักษณะเป็นคอลัมน์ในแนวตั้ง เครื่องจะแยกให้ผลึกน้ำแข็งเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ในขณะที่ของเหลวเข้มข้นจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ที่บริเวณด้านล่างสุดของคอลัมน์จะมีตัวกรองทำให้เฉพาะส่วนของเหลวเข้มข้นเท่านั้นที่ไหลผ่านไปได้ wash column ถูกแบ่งออกเป็นสามชนิดโดยจำแนกตามลักษณะของแรงที่ใช้ในการแยก ดังนี้ buoyancy bed columns, screw conveyor columns และ piston bed columns

3) เครื่องแยกผลึกน้ำแข็งแบบกด (Hydraulic piston) จะใช้กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ progressive crystallizers โดยใช้แรงกดในการแยกส่วนของเหลวเข้มข้นออกจากผลึกน้ำแข็ง อุปกรณ์ที่ใช้กดอาจจะเป็นลูกสูบไฮดรอลิกหรือสกรู การใช้เครื่องกดเป็นวิธีที่ค่าใช้จ่ายไม่สูง แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะส่วนของเหลวเข้มข้นที่จะติดไปกับผลึกน้ำแข็งค่อนข้างมาก

การทำให้อาหารเข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งกระทำในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ไม่มีการใช้ความร้อน จึงมีข้อดีว่าการระเหย และ reverse osmosis ดังนั้นคุณภาพของอาหารจึงไม่ถูกทำลาย เหมาะกับอาหารที่ไม่ควรให้ความร้อน ไม่มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสของอาหาร สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ได้โดยไม่มีการสูญเสียแอลกอฮอล์แต่อย่างใด อาหารเข้มข้นที่ได้มีอุณหภูมิต่ำจึงสะดวกในการนำไปผ่านกระบวนการอื่น ๆ ที่ต้องกระทำที่อุณหภูมิต่ำต่อไปได้ทันที เช่น นำเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Marcus, 2003)

2.5.2 ข้อดี และข้อด้อยของกระบวนการทำให้เข้มข้น โดยเทคนิคแบบแช่เยือกแข็ง

ข้อดี

1) เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ลดการสูญเสียสารที่ไวต่อความร้อน และยังคงคุณค่าสารอาหารที่สำคัญ เช่น วิตามิน สารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผลไม้

2) เป็นวิธีที่สามารถเก็บรักษากลิ่นหอมระเหยได้มากกว่าวิธีการทำให้เข้มข้นโดยวิธีอื่น ๆ

ข้อด้อย

1) ความเข้มข้นของอาหารที่ได้ต่ำกว่าอาหารที่ได้จากวิธีการระเหย ถ้าใช้วิธีการระเหยจะทำให้ได้อาหารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70-90 แต่ถ้าใช้การทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะได้อาหารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40-50 เนื่องจากความหนืดของส่วนเหลวเพิ่มขึ้น

2) ค่าใช้จ่ายสูงกว่าวิธีระเหย และวิธีการ reverse osmosis ทั้งการลงทุน (capital cost) ค่าใช้จ่ายระหว่างการปฏิบัติงาน และค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียส่วนของเหลวเข้มข้นไปกับผลึกน้ำแข็งในระหว่างกระบวนการแยกผลึกน้ำแข็ง

3) ถ้าอาหารเหลวเริ่มต้นมีคุณภาพต่ำจะมีกลิ่นรสที่ไม่ดี หากนำมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง กลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์จะยังคงมีในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ เช่น ถ้านำน้ำผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง จะมีกลิ่นผลไม้ที่สุกเกินไปหลงเหลืออยู่ในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ ซึ่งถ้าหากนำน้ำผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปไปทำให้เข้มข้นโดยการระเหย กลิ่นที่ไม่พึงประสงค์นี้จะหายไป

4) การกำจัดผลึกน้ำแข็งออก โดยที่ไม่มีการสูญเสียของสารถูกละลายเลยนั้น ทำได้ยาก คือเมื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์ในน้ำผลไม้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ของแข็งบางส่วนในน้ำผลไม้ จะติดไปกับน้ำแข็งที่แยกออกไป เช่น สี กลิ่น และสารอาหารที่สำคัญ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu (1998) ศึกษาการทำน้ำมะเขือเทศเข้มข้นโดยการทำให้เข้มข้นแบบแช่แข็งแบบ progressive พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 2.8 องศาบริกซ์ เป็น 4.8 องศาบริกซ์ ปริมาณวิตามินซี และสี ยังคงรักษาไว้ได้ใกล้เคียงกับน้ำมะเขือเทศคั้นสดมากที่สุด

Bradock and Marcy (1998) ศึกษาการผลิตน้ำสับประรดเข้มข้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง โดยการนำน้ำสับประรดไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบชุดผิว และบ่มในถังบ่มผลึก จนมีขนาดของผลึกน้ำแข็งใหญ่กว่า 200-250 ไมโครเมตร ทำการแยกผลึกออกจากน้ำสับประรดเข้มข้น ด้วยเครื่องแยกแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง พบว่า จากน้ำสับประรดสด 44.9 กิโลกรัม ที่มีปริมาณของแข็ง 14.4 °Brix จนได้น้ำสับประรดเข้มข้น 31.3 กิโลกรัม และปริมาณของแข็งหลังจากเพิ่มความเข้มข้น 18.2 °Brix ผลึกน้ำแข็ง 10.3 กิโลกรัม และมีส่วนตกค้างในระบบ 3.3 กิโลกรัม สำหรับด้านพลังงาน ได้มีการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต พบว่า ใช้พลังงานไฟฟ้า 1.85 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม

Marcus (2003) รายงานการใช้เทคนิคการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ในขั้นตอนแรกได้มีการทำให้สารละลายกาแฟเพิ่มความเข้มข้นขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 40 โดยใช้วิธีการเพิ่มความเข้มข้นแบบแช่เยือกแข็งก่อน แล้วจึงนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง สามารถช่วยรักษากลิ่นของกาแฟไว้ได้

Ramos (2005) ศึกษาการทำน้ำเบอร์รี่เข้มข้นโดยการทำให้เข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.0 เป็นร้อยละ 8.9 ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นจาก 2.98 เป็น 3.02 เมื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านกลิ่น โดยการใช้เครื่อง GC พบว่าสารที่ให้กลิ่นในเบอร์รี่ คือ Geraniol ไม่เปลี่ยนแปลงและยังทำให้มีกลิ่นที่ดีขึ้น

Siddharth (2005) ศึกษาการให้น้ำอ้อยเข้มข้น โดยเทคนิคแบบแช่เยือกแข็งจาก 20 ถึง 40 องศาบริกซ์ ก่อนนำไปต้มให้เดือด พบว่าสามารถช่วยลดการเกิดคาราเมล (caramelisation) ในน้ำอ้อยได้ ลดการเกิดสีน้ำตาลในน้ำอ้อย และยังช่วยลดปริมาณของชานอ้อยลงได้ด้วย ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการทำให้เข้มข้นแบบใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว