บทที่ 2
เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หม่อน และสารที่สำคัญในผลหม่อน

หม่อน(mulberry) เป็นพืชที่มีการปลูกมากทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในอดีตการปลูกหม่อนมีจุดประสงค์หลักเพื่อนำใบหม่อนไปใช้ในการเพาะเลี้ยงตัวหนอนไหมเท่านั้น แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเอาส่วนต่าง ๆ ของต้นหม่อน เช่น ยางต้นหม่อน ใบ ราก เปลือกหุ้มราก และผลหม่อน ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าและศักยภาพในการใช้ประโยชน์ให้กว้างขวางขึ้น ต้นหม่อนสามารถปลูกได้ในดินเกือบทุกชนิด แต่สำหรับการปลูกหม่อนเพื่อรับประทานผล จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ หลายด้าน คือ เป็นพื้นที่ไม่มีน้ำท่วมขัง มีการระบายน้ำที่ดี และมีหน้าดินลึก ดินไม่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไป ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของดินควรอยู่ในระหว่าง 6.0–6.5 สภาพพื้นดินจะต้องไม่เคยมีประวัติในการเกิดโรคระบาดของโรครากเน่ามาก่อน หากเคยมีประวัติดังกล่าว จะต้องแก้ปัญหาการปลูกโดยใช้ต้นตอที่มีความทนทานต่อโรครากเน่า พื้นที่ปลูกควรมีแหล่งน้ำที่สามารถให้น้ำได้ในช่วงฤดูแล้ง สำหรับการปลูกจะใช้ท่อนพันธุ์ที่มีอายุมากกว่า 6 เดือน ตัดเป็นท่อนยาว 15-20 เซนติเมตร นำส่วนที่อยู่ด้านโคนของท่อนพันธุ์ไปจุ่มในน้ำยาป้องกันเชื้อราทิ้งไว้ 10 นาที ส่วนด้านปลายนำไปจุ่มในสีน้ำมันเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ แล้วนำท่อนพันธุ์ไปปักชำลงในแปลง ลึกประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของท่อนพันธุ์ ให้ห่างกัน 10x10 เมตร และสามารถขยายพันธุ์หม่อนโดยวิธีการปักชำท่อนพันธุ์ลงในถุง การตอนกิ่ง และการติดตาบนต้นตอ เป็นต้น (วสันต์,2546)

หม่อนเป็นพืชในตระกูล *Moraceae* มีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Mulberry และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus spp.* จัดเป็นไม้ยืนต้นจำพวกไม้พุ่ม ลำต้นตั้งตรง ใบมีลักษณะของฐานใบเป็นรูปคล้ายใบโพธิ์ ปลายใบแหลม ตาดอกเป็นชนิดตารวม (mix bud) คือ มีทั้งตาใบ และตาดอกอยู่รวมกัน มีผลแบบผลรวม ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากตาข้างของปีนั้น (catkin) คือ จะมีช่อดอกเกิดที่ตาเหนือใบของตาข้างของกิ่งที่เกิดขึ้นใหม่ ส่วนลักษณะดอกเป็นทั้งแบบดอกที่มีเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียแยกกันคนละต้น (dioecious) หรือบางพันธุ์อาจเป็นดอกที่มีเกสรตัวผู้และตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน (monoecious) โดยมีดอกหลาย ๆ ดอกอยู่ในช่อเดียวกัน ในบางครั้งต้นหม่อนที่เป็นพันธุ์เดียวกันสามารถจะมีการเปลี่ยนเพศ จากเพศหนึ่งไปเป็นอีกเพศหนึ่งได้ พันธุ์หม่อนที่พบอยู่ทั่วโลกมีมากมายหลายสายพันธุ์ มีแหล่งกำเนิดกระจายอยู่ทั่วไป ตั้งแต่เขตร้อน (tropical zone) เขตอบอุ่น (subtropical zone) เขตหนาว (temperate zone) และเขตหนาวเย็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(sub-arctic zone) ส่วนใหญ่เป็นการปลูกเพื่อนำใบหม่อนไปใช้ในการเพาะเลี้ยงตัวไหม แต่มีอีกหลายสายพันธุ์ที่ใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น บริโภคผลสด เป็นต้นไม้สำหรับบังลม (wind break) เป็นไม้ประดับ เป็นอาหารของนก และบางสายพันธุ์ยังเป็นพืชพันธุ์ป่า (wild varieties) ซึ่งได้มีการจำแนกสายพันธุ์หม่อนระดับ Species เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2296 เมื่อ Linnaeus ได้จำแนกสายพันธุ์หม่อนออกเป็น 5 Species ได้แก่ *Morus alba* L., *Morus nigra* L., *Morus rubra* L., *Morus tartarica* L. และ *Morus indica* L. จนถึงปี พ.ศ. 2460 Koidzumi ได้จำแนกสายพันธุ์หม่อนออกเป็น 24 Species และ 1 Subspecies ต่อมานักพฤกษศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Horita ได้จำแนกสายพันธุ์หม่อนออกเป็น 35 Species (วสันต์,2546)

สำหรับสายพันธุ์หม่อนที่ปลูกในประเทศไทย เพื่อบริโภคผลหม่อน คือ หม่อนพันธุ์เชียงใหม่ พบว่ามีปลูกในภาคเหนือมานานหลายสิบปีมาแล้ว แต่ไม่ปรากฏหลักฐานชัดเจนสามารถสืบค้นต้นกำเนิดได้เพียงว่าในราวปี พ.ศ. 2515 นายโกสิ่ว แซ่โก ได้นำพันธุ์หม่อนมาจากอำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ มาปลูกไว้ในสวนที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ จนถึงปัจจุบัน ขณะนี้มีการปลูกกระจายทั่วไปทางภาคเหนือตอนบน และในหมู่บ้านชาวไทยภูเขาของภาคเหนือ ต้นหม่อนที่มีอายุ 3 ปี จะให้ผลผลิตผลหม่อนประมาณ 600 - 700 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี และเมื่อต้นหม่อนมีอายุมากขึ้นจะให้ผลผลิตผลหม่อนไม่ต่ำกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี ผลหม่อนพันธุ์เชียงใหม่จะมีลักษณะเด่น คือ มีผลขนาดใหญ่ อวบน้ำ รสชาติหวานกลมกล่อม เหมาะสำหรับบริโภคผลสด และการแปรรูป ขยายพันธุ์ได้ง่าย และสามารถกำหนดเวลาในการให้ผลผลิตได้ ด้วยวิธีการบังคับให้ออกดอกติดผลนอกฤดูกาล

ส่วนพันธุ์หม่อนที่เก็บผลผลิตใบหม่อนไปใช้ในการเพาะเลี้ยงตัวหนอนไหม ได้แก่ หม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 เป็นพันธุ์หม่อนที่ปรับปรุงพันธุ์โดยใช้หม่อนพื้นเมืองของไทยผสมกับหม่อนพันธุ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ คือ พันธุ์จีนเบอร์ 44 ให้ผลผลิตใบหม่อนประมาณ 4,300 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี ใบหม่อนมีลักษณะนุ่ม หนาปานกลาง เหี่ยวช้า และทนทานต่อโรคราแป้ง อีกพันธุ์หนึ่ง คือ หม่อนพันธุ์ศรีสะเกษ 33 เป็นหม่อนลูกผสมของหม่อนพันธุ์ Jing Mulberry จากประเทศจีน มีคุณลักษณะต้านทานต่อโรคใบด่างได้ดีกว่าหม่อนพันธุ์อื่น ๆ ให้ผลผลิตใบหม่อนประมาณ 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี

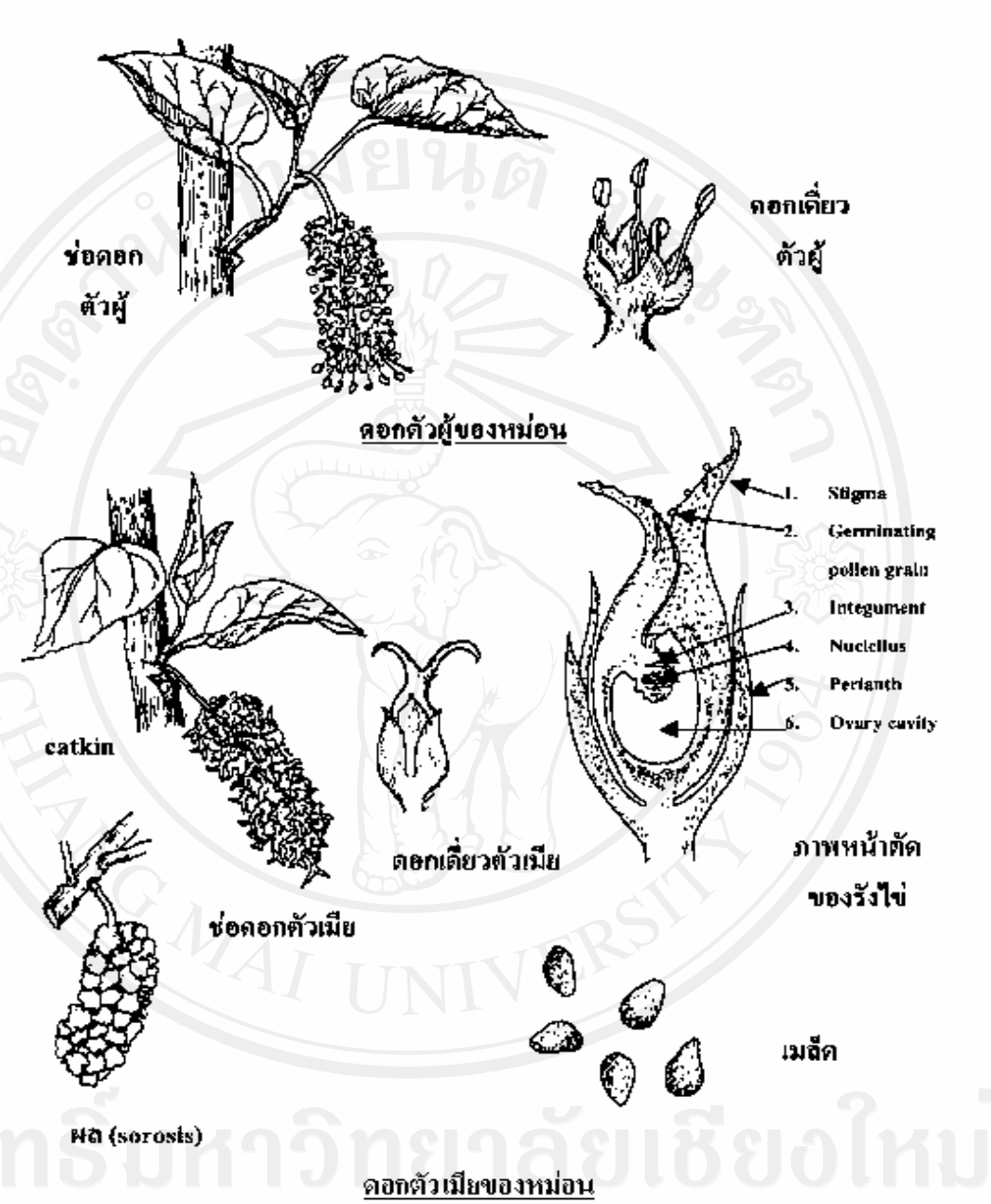
ต้นหม่อนที่โตเต็มที่จะเริ่มออกดอกในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายนของทุกปี โดยดอกหม่อนจะแตกออกมาพร้อมกับใบ แล้วบานหลังจากแตกช่อใบพร้อมช่อดอกประมาณ 8-12 วัน ดอกที่บานเต็มที่ยอดเกสรตัวเมียจะมีลักษณะสีขาวใส ดอกตัวเมียที่ได้รับการผสมพันธุ์ก็จะเจริญเติบโตกลายเป็นผล ซึ่งมีลักษณะเป็นผลรวมเช่นเดียวกับผลน้อยหน่าและขนุน ช่อดอกตัวผู้ประกอบด้วยดอกตัวผู้หลาย ๆ ดอกรวมกันเป็นช่อเดียว ดอกตัวผู้แต่ละดอกจะมีกลีบดอก (sepal)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4 กลีบ และเกสรตัวผู้ 4 เกสร (stamen) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ก้านเกสร (filament) และอับละอองเกสร (anther) (ภาพที่ 2.1) เมื่อดอกบานก้านเกสรจะยืดตัวออก และปล่อยละอองเกสรที่มีลักษณะเป็นสีเหลืองออกมาเป็นจำนวนมาก ส่วนช่อดอกตัวเมียประกอบด้วยกลีบดอก 4 กลีบ รังไข่ (ovary) ก้านเกสรตัวเมีย (style) และยอดเกสรตัวเมีย (stigma) โดยกลีบดอกจะห่อหุ้มรังไข่ไว้ ซึ่งทำให้มองดูมีลักษณะคล้ายลูกบอลสีเขียว ภายในถุงหุ้มรังไข่ (embryo sac) จะมีไข่อ่อน (ovule) บรรจุอยู่ ก้านเกสรจะมีความยาวแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสายพันธุ์ ส่วนปลายสุดของก้านเกสรตัวเมียเรียกว่ายอดเกสรตัวเมีย ซึ่งจะมีปุ่มและขนหนาแน่นปกคลุมอยู่ เพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตน้ำหวานสำหรับดักจับเกสรตัวผู้ เมื่อยอดเกสรตัวเมียยืดตัวออกเต็มที่จะมีลักษณะสีขาว ซึ่งเริ่มเข้าสู่ระยะพร้อมที่จะได้รับการถ่ายละอองเกสรและได้รับการผสมพันธุ์ เมื่อเกสรตัวผู้ตกลงบนยอดเกสรตัวเมียจะถูกจับยึดโดยเยื่อเมือกของเกสรตัวเมีย ทำให้มีการพองตัวและแทงหลอดละอองเกสร (pollen tube) ลงไปสู่ถุงหุ้มรังไข่และผสมกับไข่อ่อน หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วการผสมพันธุ์จึงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (วสันต์,2546)

การพัฒนาของผลหม่อนจะเริ่มหลังจากดอกได้รับการผสมเกสรแล้ว ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีเทาภายใน 3 วัน จากนั้นจะมีการพัฒนาการของผล โดยสีของผลจะเริ่มจากสีเขียว ขาว ชมพู แดง แดงดำ และสีม่วงดำ ตามลำดับ ทั้งนี้ลักษณะของสีผลหม่อนไม่สามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของสายพันธุ์ได้ เช่น สายพันธุ์ white mulberry จะมีสีผลเป็นสีขาว ชมพู แดง และสีม่วงดำ และสายพันธุ์ red mulberry มีผลสีแดงเข้มไปจนถึงสีม่วงดำ ส่วนสายพันธุ์ black mulberry จะมีสีม่วงดำ เป็นต้น ผลหม่อนจัดอยู่ในกลุ่มของผลรวม (collactive fruit หรือ inflorescent fruit) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากช่อดอกทั้งช่อรวมกันเป็นผลเดียวกัน สามารถมองเห็นเป็นผลเล็ก ๆ แยกกันอยู่บนแกนของช่อผล ผลเล็ก ๆ เหล่านี้เรียกว่า syconus อาจเกิดจากการผสมเกสร หรือไม่ผสมเกสรก็ได้ ซึ่งจัดเป็นไม้ผลพวก parthenocarpic fruit หรือ seedless fruit ที่เกิดจากการไม่มีการถ่ายละอองเกสร ทำให้รังไข่เจริญเติบโตไปเป็นผล ซึ่งเหมือนกับผลที่มาจากการผสมเกสรทุกประการ หลังจากนั้นผลหม่อนจะเจริญจนเป็นผลสุก ซึ่งมีสีม่วงดำ และมีลักษณะที่อวบน้ำ มีสัดส่วนความหวาน (sweetness) และความเปรี้ยว (tartness) ที่สมดุลกัน และรสชาติดีใกล้เคียงกับผลองุ่น เมล็ดหม่อนจะมีลักษณะเป็นรูปไข่ สีเหลืองอ่อน หรือเหลืองเข้ม ขนาดเล็กประมาณ 1x1 มิลลิเมตร เมล็ดในผลรวมของหม่อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นเมล็ดที่ได้รับการผสมเกสรอยู่บางส่วน แต่บางเมล็ดเป็นเมล็ดลีบที่ไม่ได้รับการผสมเกสร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ที่มา: วสันต์, 2546

ภาพที่ 2.1 ลักษณะดอกตัวผู้ ดอกตัวเมีย เมล็ด และผลหม่อน

นอกจากหม่อนจะมีผลให้เก็บเกี่ยวตามฤดูกาล ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายนแล้ว ยังมีเทคนิคที่สามารถบังคับให้หม่อนติดผลนอกฤดูกาลได้ ซึ่งมีวิธีการ คือ การริดใบ ตัดยอด และโน้มกิ่ง ลักษณะการโน้มกิ่งจะทำแบบโค้งให้ยอดเข้าหาพื้นดิน วิธีการนี้เหมาะสำหรับการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ปลูกหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ที่มีระยะปลูก 0.75x2.00 ถึง 3.00 เมตร โดยเมื่ออายุกิ่งหม่อนครบ 6 เดือน ก็เริ่มทำการริดใบหม่อนให้หมด จากนั้นจึงโน้มกิ่งเข้าหากันลักษณะแถวต่อแถว โดยใช้เชือกฟางผูกติดกิ่งหม่อนแถวหนึ่งเข้ากับอีกแถวหนึ่ง ทำให้มองดูเหมือนอุโมงค์ ซึ่งความสูงของอุโมงค์ควรสูงประมาณ 1.5 เมตร จากพื้นดิน แล้วปล่อยให้หม่อนเจริญเติบโตตามปรกติ ซึ่งหม่อนจะมีการแตกตาข้างออกมาเกือบทุกตา พร้อมกับมีการแทงช่อดอกออกมาตามบริเวณที่แตกยอดออกมาใหม่ ตาดอกจะเริ่มทะยอยบานไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะหมด ซึ่งมีประมาณ 3-6 ตาต่อยอดใหม่ที่แตกออกมา ในลักษณะเช่นนี้หม่อน 1 ต้นจะให้ผลผลิตผลหม่อนประมาณ 400-500 ผล และให้ผลผลิตต่อไร่ประมาณ 300-400 กิโลกรัม วิธีการเช่นนี้สามารถแบ่งแปลงหม่อนเพื่อทะยอยบังคับทรงพุ่ม เพื่อขยายระยะเวลาการให้ผลผลิตผลหม่อนได้ยาวนานขึ้น การบังคับการออกดอกของหม่อนอีกวิธีหนึ่ง คือ การโน้มกิ่งหม่อนที่ปลูกแบบทรงพุ่ม ที่มีระยะปลูกประมาณ 2x2 เมตร หรือ 4x4 เมตร เป็นการปลูกแบบไม่มีการตัดแต่งกิ่ง แต่ทำการบังคับให้ทรงพุ่มสูงจากพื้นดิน 1.50 เมตร เมื่อหม่อนแตกกิ่งกระโดงใหม่ขึ้นมาในแต่ละปี ก็จะทำการโน้มกิ่งให้ปลายยอดขนานกับพื้นดิน และก่อนจะโน้มกิ่งจะต้องริดใบหม่อนออกให้หมด พร้อมทั้งตัดยอดส่วนที่เป็นกิ่งสีเขียวยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ออกก่อน แล้วจึงโน้มกิ่งลง ใช้เชือกผูกปลายกิ่งโยงติดไว้กับหลักไม้ที่ปักไว้บนพื้นดิน หรือใช้ไม้ไผ่ล้อมเป็นคอกไว้สูงจากพื้นดินประมาณ 1.50 เมตร แล้วโน้มกิ่งลงมา ใช้เชือกผูกมัดติดไว้กับคอกที่ล้อมไว้ หรือทำราวเส้นลวดขึงขนานในระหว่างแถวของต้นหม่อนแล้วโน้มกิ่งให้ขนานกับพื้นดิน ใช้เชือกผูกมัดติดไว้กับเส้นลวด ส่วนระยะเวลาของการโน้มกิ่งจะอยู่ในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนมกราคม (วสันต์, 2546)

ผลหม่อนประกอบด้วยแคโรทีน วิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง วิตามินซี กลูโครส ซูโครส กรดทาร์ทาริก กรดซัคซินิค และกรดซิตริก (ENatural Health Center, 2003) ผลหม่อนบางสายพันธุ์ในแถบเอเชียกลางมีปริมาณน้ำตาลเฉลี่ยร้อยละ 12 บางสายพันธุ์มีปริมาณน้ำตาลมากกว่าร้อยละ 20 ในผลหม่อนตากแห้งจะมีน้ำตาลอยู่ปริมาณมาก กลิ่นหอม รสหวาน ฤทธิ์เย็น มีวิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง และวิตามินซีอยู่สูง ในทางการแพทย์โบราณของจีนถือว่าผลหม่อนเป็นยาบำรุงกำลัง บำรุงประสาท แก้อาการนอนไม่หลับ แก้ไขข้ออักเสบ แก้ไอขับเสมหะ ลดการอักเสบลำคอ แก้อาการบวมน้ำ และแก้ปวดเมื่อยตามร่างกาย (พจชนัน, 2545) นอกจากนี้ผลหม่อนยังมีสรรพคุณใช้แก้โรครูมาติค โรคโลหิตจาง ชาตามแขนขา อาการท้องผูก เวียนศีรษะ บำรุงหัวใจ บำรุงโลหิต บำรุงไต บำรุงสายตา บำรุงเส้นผมให้ดกดำ และขจัดความร้อนออกจากร่างกาย (คณาจารย์ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย, 2534) ในผลหม่อนสุกจะมีสารสี (pigment) ในกลุ่มของแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) โดยมีในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสดอยู่ในช่วง 258.41-2512.40 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้เมื่อนำผลหม่อนผลสุกที่เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลสด (สีม่วงดำทั้งผล) ไปสกัดเป็นสีเข้มข้น พบว่าจะมีสารประกอบฟีนอลอยู่สูงประมาณ 13,130-21,900 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสดปริมาณเกือบ 5 เท่าตัว (สมชาย และคณะ, 2550) สารประกอบฟีนอลมีคุณสมบัติในการยับยั้งการแข็งตัวของเกร็ดเลือด ต่อต้านอาการอักเสบและบวม รักษาแผลในกระเพาะอาหาร ต่อต้านการแพ้จากการหลั่งของฮีสตามีน และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Middleton and Kandaswami, 1994) มีการวิจัยพบว่าในผลหม่อนมีสารเคอร์ซีทิน (quercetin) ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ โดยมีในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสด 34.20 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีในผลหม่อนหม่อนสุกที่เป็นผลแห้ง 176.40 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งสารนี้ก็มีคุณสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนต์ด้วยเช่นกัน โดยจะช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของ LDL (low density lipoproteins oxidation) ในร่างกาย อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคที่เกิดจากสภาวะเสื่อมภายในร่างกาย เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคเส้นเลือดสมองตีบ (Nutrition update, 2007) มีการใช้สารประกอบฟลาโวนอยด์ในลักษณะที่เป็นสารสกัดผสมหลายชนิด เช่น การใช้ผงสกัดที่ได้จากพืช *Anemone hepatiea.* ซึ่งมีสารพวกแอนโทไซยานิน ฟลาโวนส์ และสารประกอบฟีนอล สารสกัดที่ได้มีฤทธิ์ในการขับน้ำดี (อภิชาต, 2542)

สารในกลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนต์นี้ กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ และผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร นอกจากนี้มีรายงานว่าในผลหม่อนสุกที่เป็นผลสด ยังมีสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรตรวมน้ำตาล เหล็ก วิตามินบีหนึ่ง และวิตามินบีหก (213.50, 4.35, 0.51 และ 9.30 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) (วสันต์, 2546) อีกทั้งยังมีงานวิจัยหลายฉบับที่ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีในผลหม่อน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ผลหม่อนสามารถนำไปบริโภคผลสด หรือใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ รวมทั้งนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น นำไปผลิตเป็นน้ำผลหม่อนพร้อมดื่ม น้ำผลหม่อนเข้มข้น ไวน์ผลหม่อน ผลหม่อนแช่อิ่ม ลูกอมผลหม่อน ผลหม่อนอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และสีธรรมชาติจากผลหม่อน (สมชาย และคณะ, 2550) เป็นต้น แต่มีข้อควรระวังในการบริโภคผลหม่อนสด โดยถ้าบริโภคในปริมาณมากเกินไปจะมีฤทธิ์เป็นยาระบาย สำหรับผลหม่อนสีเขียวหรือผลหม่อนที่ยังไม่สุกถ้าบริโภคในปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียนได้ (Mulberry Tree, 2003)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อน (ต่อน้ำหนักสด 100 กรัม)

ส่วนประกอบ	ผลหม่อนสุก[1/]	ผลหม่อนสุก[2/]	ผลหม่อนสุก[3/]
โปรตีน (กรัม)	1.68	1.5	1.1
คาร์โบไฮเดรท (กรัม)	21.35	8.3	10.3
ไขมัน (กรัม)	0.47	0.49	0.40
แคลเซี่ยม (มิลลิกรัม)	21	80	-
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	7	10	-
เหล็ก (มิลลิกรัม)	43.48	1.9	-
วิตามิน เอ (IU)	25	174	35
วิตามิน บี1 (มิลลิกรัม)	50.65	9	57
วิตามิน บี2 (มิลลิกรัม)	3.66	184	-
วิตามิน บี6 (มิลลิกรัม)	930.10	-	-
วิตามิน ซี (มิลลิกรัม)	4.16	-	12
กรดโฟลิก (มิลลิกรัม)	6.87	-	-
ไนอะซีน (มิลลิกรัม)	0.72	-	-
แทนนิน (กรัม)	1.06	-	-
กรดซิตริก (กรัม)	1.51	-	-
กรดนิโคตินิค (กรัม)	-	0.8	-
กรดแอสคอบิค (กรัม)	-	13	-
เส้นใย (กรัม)	2.03	1.4	1.1
เถ้า (กรัม)	1.52	0.9	-
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.90	-	-
ความชื้น	72.91	87.5	-
แครอรี่	-	-	49

ที่มา: 1/ วสันต์, 2546.

: 2/ James, 1983.

: 3/ Mulberry Tree, 2003

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลหม่อน

ที่ผ่านมาได้มีศึกษาดัชนีการเก็บเกี่ยวผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ พบว่าต้นหม่อนที่ออกดอกในฤดู (กุมภาพันธ์ถึงเมษายน) ผลหม่อนเริ่มสุกหลังจากดอกบานแล้ว 20 วัน และมีช่วงระยะเวลาที่ผลหม่อนเริ่มสุกจนถึงสุกงอม 12 วัน ส่วนต้นหม่อนที่ออกดอกนอกฤดู (ตุลาคมถึงธันวาคม) พบว่าหลังที่ริดใบ ตัดยอด แล้วโน้มกิ่งเป็นเวลา 8-12 วัน ดอกจึงเริ่มบาน หลังดอกบาน 42 วัน ผลหม่อนจึงเริ่มสุก และมีช่วงระยะเวลาที่ผลหม่อนเริ่มสุกจนถึงสุกงอม 14 วัน ผลหม่อนในฤดูจะมีคุณภาพทางเคมีมากกว่าผลหม่อนนอกฤดู ผลหม่อนห่าม (สีม่วงดำร้อยละ 50) และผลสุก (สีม่วงดำทั้งผล) มีคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสเหมาะสำหรับ การเก็บเกี่ยวเพื่อบริโภคผลสดมากที่สุด (ปัทมาภรณ์, 2546)

การศึกษาคุณภาพของผลหม่อนสุกได้มีการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ ในประเทศไทยได้มีรายงานว่าผลหม่อนสุกพันธุ์บุรีรัมย์ 60 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณสารแอนโทไซยานิน และปริมารสารแอนติออกซิแดนต์ สูงกว่าผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ และผลหม่อนสุก (สีม่วงดำทั้งผล) มีปริมาณสารต่าง ๆ ดังกล่าวสูงกว่าผลหม่อนห่าม (สีม่วงดำร้อยละ 50) (สุรินทร์, 2548) นอกจากนี้ยังพบว่าผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ มีสารประกอบฟีนอลทั้งหมด สารแอนโทไซยานินทั้งหมด สารเคอร์ซีทิน และดัชนีสารต้านอนุมูล-อิสระ เพิ่มสูงขึ้นตามระยะความสุกที่เพิ่มขึ้น ผลหม่อนสุก (สีม่วงดำทั้งผล) พบสารกลุ่มนี้มีปริมาณสูงสุด (3,654.97$\pm$7.59 2,512.40$\pm$11.32 1.81$\pm$1.00 ไมโครกรัมต่อกรัม และ 6.89$\pm$0.53 ตามลำดับ) (สมชาย และคณะ, 2550) สำหรับในต่างประเทศได้มีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลหม่อนขาว (*Morus alba* L.) ผลหม่อนแดง (*Morus rubra* L.) และผลหม่อนดำ (*Morus nigra* L.) ที่ปลูกในบริเวณทางตะวันออกของประเทศตุรกี พบว่าสารประกอบฟีนอล และสารเคอร์ซีทินเพิ่มสูงขึ้นตามระยะความสุก 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-ด่าง (pH) มีอยู่ในช่วงร้อยละ 3.52-5.60 และปริมาณวิตามินซีมีอยู่ในช่วง 0.19-0.22 มิลลิกรัมต่อกรัม (Ercisli and Orhan, 2006)

สำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ โดยการใช้สารเคมี พบว่าการไม่เติมสารให้ความหวาน และไม่เติมโปแตสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ (KMS) สามารถเก็บรักษาผลหม่อนสุกที่อุณหภูมิห้องได้เพียง 2 วัน แต่ถ้ามีการเติมน้ำตาลซูโครสร่วมกับการเติม KMS

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

500 ppm สามารถเก็บรักษาผลหม่อนสุกที่อุณหภูมิห้องได้นาน 90 วัน แต่การเก็บรักษาผลหม่อนด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับการนำผลหม่อนไปผลิตเป็นไวน์ (สุวรัตนา, 2548) นอกจากนั้นยังพบว่าการเก็บรักษาผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ ในถาดโฟมหุ้มด้วยฟิล์มสามารถเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องได้นาน 2 วัน สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาหม่อนเพื่อรับประทานผลสด คือ การเก็บผลหม่อนสุกในถาดโฟมหุ้มด้วยฟิล์ม แล้วเก็บในตู้เย็น (4 องศาเซลเซียส) สามารถเก็บได้นานถึง 14 วัน (ธิติพันธ์, 2549)

การนำเอาผลหม่อนไปใช้ประโยชน์นั้นได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ได้มีรายงานการศึกษาจากประเทศจีนว่าสามารถสกัดเอาสารแอนโทไซยานินในผลหม่อนสุก เพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร น้ำผลหม่อนที่สกัดได้มีปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 384.07 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ Macro porous resin จากนั้นนำไปทำให้เข้มข้น แล้วสามารถใช้เป็นสีผสมอาหารได้ (Xueming *et al*, 2004) สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษานำผลหม่อนสุกพันธุ์เชียงใหม่ไปสกัดเป็นสีผสมอาหารด้วยเช่นกัน โดยพบว่าสามารถผลิตสีผสมอาหารได้ 3 รูปแบบ คือ สีน้ำเข้มข้น สีผงเคลือบน้ำตาล และสีผงที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง สีผลหม่อนที่ได้ทุกรูปแบบสามารถใช้แต่งสีในอาหารได้เกือบทุกชนิด เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ และอาหารหวาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำผลหม่อนไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยพบว่าผลหม่อนห่าม (สีม่วงดำร้อยละ 50) นั้นเหมาะสำหรับผลิตเป็นผลหม่อนแช่อิ่ม ส่วนการผลิตลูกอมผลหม่อนพบว่าสามารถใช้ได้ทั้งผลหม่อนแก่ (สีแดงทั้งผล) และผลหม่อนห่าม (สีม่วงดำร้อยละ 50) สำหรับการผลิตผลหม่อนอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าผลหม่อนห่าม (สีม่วงดำร้อยละ 50) เหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นวัตถุดิบ คุณภาพของผลหม่อนอบแห้งที่ได้คล้ายผลหม่อนสด แต่มีสารประกอบฟีนอลทั้งหมด สารแอนโทไซยานินทั้งหมด สารเคอร์ซีทิน และดัชนีสารต้านอนุมูล-อิสระ สูงกว่าผลหม่อนสดประมาณ 5-10 เท่าตัว (12,110.50$\pm$60.96 6,090.91$\pm$65.9 7.61$\pm$ 1.00 ไมโครกรัมต่อกรัม และ 11.90$\pm$ 1.40 ตามลำดับ) (สมชาย และคณะ, 2550)

เครื่องดื่มจากผลหม่อนเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย โดยพบว่าหม่อนสุกพันธุ์บุรีรัมย์ 60 สามารถนำไปผลิตไวน์ที่มีคุณภาพดี การปรับปริมาณกรดทั้งหมดในน้ำหมักเป็น 3.5 กรัมต่อลิตร และการใช้ยีสต์ผงทางการค้าสายพันธุ์ Fermivin 7013 ทำให้ได้ไวน์มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งจะมีสีม่วงแดง มีเอทานอลร้อยละ 13.27 โดยปริมาตร ปริมาณกรดทั้งหมดเท่ากับ 5.47 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3.76 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 7.77 องศาบริกซ์ ปริมาณสารแอนติออกซิแดนต์เท่ากับร้อยละ 89.2 (สุรินทร์, 2548) ส่วนการผลิตไวน์จากน้ำผลหม่อนที่ผ่านกระบวนทำเข้มข้นโดยการระเหยแบบสุญญากาศ และการแช่เยือกแข็งแบบผลึกแขวนลอย พบว่าไวน์ผลหม่อนทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณเมทานอลเท่ากับ 101

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และ 180 มิลลิกรัมต่อลิตร เอทานอลเท่ากับร้อยละ 11.0 และ 10.4 โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 9 และ 8 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 0.32 และ 0.1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณกรดทั้งหมดเท่ากับ 0.48 และ 0.56 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ปริมาณสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 5,497 และ 3,295 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมารสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 747 และ 299 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (พงศ์กมล, 2547) นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาการผลิตผลหม่อนผงโดยวิธีอบแห้งแบบโฟมแมท โดยคัดเลือกสารที่ก่อให้เกิดโฟมในน้ำผลหม่อนสกัด 3 ประเภท คือ Methocel, Glyceryl monostearate (GMS), และ Carboxy methyl cellulose (CMC) พบว่าการใช้สารละลาย Methocel ในปริมาณร้อยละ 45 โดยน้ำหนักของน้ำผลหม่อนสกัดเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด น้ำผลหม่อนที่ได้มีสีแดงเข้ม (L = 13.74, a* = 39.82, b* = 21.20) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 14 องศาบริกซ์ ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.4 ปริมาณกรดทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก และปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ 152.29 มิลลิกรัมต่อลิตร (อัศจรรย์ และปิยาภรณ์, 2548)

2.2 สารอนุมูลอิสระ และการเกิดสารอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radical) หมายถึง สารใด ๆ ที่มีอิเล็กตรอน ที่ไม่ได้จับคู่ (unpaired lelctron) มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจรของโมเลกุล ในพจนานุกรมศัพท์วิทยาศาสตร์ของราชบัณฑิตยสถาน ใช้คำว่า อนุมูลเสรี ซึ่งหมายถึง โมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกสุดปราศจากคู่ เกิดขึ้นเมื่อวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของโมเลกุลได้รับอิเล็กตรอนเข้ามา หรือสูญเสียอิเล็กตรอนออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน การเขียนสัญลักษณ์ของอนุมูล-อิสระโดยการใช้จุดที่ตำแหน่งบนขวาของสูตรโมเลกุลเดิม เพื่อแสดงถึงอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ ปกติจะใช้สัญลักษณ์ R แสดงถึงอนุมูลอิสระที่ไม่เฉพาะเจาะจง โดยทั่วไปอนุมูลอิสระมีทั้งที่เป็นอนุมูลประจุบวก เรียกว่า อนุมูลแคทไอออน (cation radical) ใช้สัญลักษณ์ $(R)^{+\bullet}$ เช่น อนุมูล pyridinyl ส่วนอนุมูลประจุลบ เรียกว่า อนุมูลแอนไอออน (anion radical) ใช้สัญลักษณ์ $(R)^{-\bullet}$ เช่น อนุมูล superoxide $(O_2)^{-\bullet}$ และอนุมูลที่มีประจุเป็นกลาง (neutral radical) ใช้สัญลักษณ์ $(R)^{\bullet}$ เช่น อนุมูล hydroxyl $(OH)^{\bullet}$ อนุมูล alkoxyl $(C_nH_{(2n+1)}O)^{\bullet}$ อนุมูล alkylperoxyl $(C_nH_{(2n+1)}OO)^{\bullet}$ และอนุมูล alkylthiyl $(C_nH_{(2n+1)}S)^{\bullet}$ เป็นต้น (Roberfroid and Calderon, 1995)

อนุมูลอิสระแบ่งได้เป็น 4 ชนิด (สุวลี, 2549) ได้แก่

1. ซุปเปอร์ออกไซด์ (super oxide) อนุมูลอิสระชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อไมโตคอนเดรียในเซลล์นำออกซิเจนออกมาใช้เป็นพลังงาน ดังนั้นถ้ายังมีชีวิตอยู่ย่อมหนีไม่พ้นที่จะเกิดอนุมูลอิสระชนิดนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogene peroxide) เป็นสารที่มีความเสถียรพอประมาณ คือ มากกว่าซิงเลทออกซิเจน และไฮดรอซีล เรดิคัล จึงปล่อยอิเล็กตรอนออกมาทำให้มีพิษ

3. ซิงเลทออกซิเจน (singlet oxygen) เป็นอนุมูลอิสระที่สามารถก่อปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรง เกิดขึ้นได้ในร่างกายเมื่อได้รับรังสีเอ็กซ์ และรังสีอัลตราไวโอเลท แล้วจะเกิดซิงเลทออกซิเจนจำนวนมาก

4. ไฮดรอซีล เรดิคัล (hydoxyl radical) เป็นอนุมูลอิสระที่มีฤทธิ์ก่อปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรงที่สุด ทำให้ร่างกายแก่เร็ว เกิดโรคมะเร็ง และโรคต่าง ๆ ในผู้สูงอายุ

อนุมูลอิสระส่วนใหญ่เป็นสารที่ไม่เสถียร มีช่วงครึ่งอายุ (half life) สั้น โดยทั่วไปอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับสารอื่นใน 2 รูปแบบ คือ โดยการดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนมาจากสารโมเลกุลอื่นที่อยู่ข้างเคียง และโดยการเพิ่มโมเลกุลของออกซิเจนเข้าไป เพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซิล (peroxyl radical) (Steven and Harry, 1997) เนื่องจากอนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่อยู่ในโมเลกุล จึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในร่างกาย ทำลายสมดุลของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย โดยการไปทำลายองค์ประกอบหลักของเซลล์ เช่น ทำลายหน้าที่ของเซลล์เมมเบรนอันนำไปสู่การตายของเซลล์ ทำลายดีเอ็นเอโดยไปจับกับหมู่ฟอสเฟตและน้ำตาลดีออกซีไรโบส อนุมูลอิสระยังสามารถแตกพันธะเปปไทด์ของโปรตีน ทำให้โปรตีนไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดการกลายพันธุ์ และการเกิดมะเร็ง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดสภาวะทางพยาธิสภาพ และทำให้เกิดการติดเชื้ออักเสบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคที่สำคัญ ได้แก่ โรคหัวใจ ไขมันอุดตันในเส้นเลือด ไขข้ออักเสบ ต้อกระจก เป็นต้น อีกทั้งยังพบว่า อนุมูลอิสระเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคประสาท และโรคพิษสุราเรื้อรัง อนุมูลอิสระมีที่มาทั้งแหล่งภายนอกร่างกาย ได้แก่ มลพิษในอากาศ โอโซน ไนตรัสออกไซด์ ฝุ่น ควันบุหรี่ ไนโตรเจนไดออกไซด์ อาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว หรือมีธาตุเหล็กมากกว่าปกติ แสงแดด ความร้อน รังสีแกมม่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารปรุงแต่งอาหาร แบคทีเรีย ไวรัส ยากำจัดแมลง และศัตรูพืช เป็นต้น ทั้งนี้การออกกำลังอย่างหักโหมจะทำให้อนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้ด้วย และแหล่งภายในร่างกาย ได้แก่ ออกซิเจน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเคมีโดยตรงกับองค์ประกอบภายในร่างกาย สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้ (Gutteridge, 1993)

เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในโมเลกุลของอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คือ ดึงดูดในสนามแม่เหล็กอย่างอ่อน สามารถตรวจสอบ และวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคที่เรียกว่า electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy แต่อนุมูลอิสระส่วนน้อยเท่านั้นที่มีความเสถียรพอที่จะตรวจสอบโดยเทคนิคนี้ได้ที่อุณหภูมิห้อง วิธีที่นิยมมากที่สุดในการใช้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตรวจสอบอนุมูลอิสระที่สลายตัวง่าย คือ การใช้เทคนิคที่เรียกว่า spin trapping โดยวิธีนี้จะใช้โมเลกุลอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น diamagnetic ซึ่งเรียกว่า spin trap ให้ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่ต้องการตรวจสอบ เพื่อให้เป็นอนุมูลอิสระที่มีความเสถียรมากขึ้น และสามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิค EPR ดังกล่าว อนุมูลอิสระมีความไวสูงในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระมีหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโมเลกุลอนุมูลอิสระ ธรรมชาติของสารละลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง และคุณสมบัติอื่น ๆ (Roberfroid and Calderon, 1995)

ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระจัดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (free radical chain reaction) ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเรียกว่าขั้นตอนอินนิทิเอชัน (initiation step) เป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ขั้นตอนที่สองเรียกว่าขั้นตอนพรอพาเกชัน (propagation step) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระถูกเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลตัวอื่น และขั้นตอนสุดท้ายเรียกว่าขั้นตอนเทอร์มิเนชัน (termination step) เป็นขั้นตอนที่มีการรวมกันของอนุมูลอิสระ 2 อนุมูล ได้เป็นสารที่มีความเสถียร (Hudson, 1990) ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนอินนิทิเอชัน (initiation step) เป็นปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระในเซลล์มักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายพันธะด้วยน้ำ (hydrolysis) แสง (photolysis) รังสี (radiolysis) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) นอกจากนี้ก็ยังมีเอนไซม์อื่น ๆ อีกหลายชนิดที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในเซลล์ รวมถึงโมเลกุลที่มีความไวสูงในการทำปฏิกิริยา เช่น nitric oxide (NO) และ singlet oxygen ($^1O_2$) ซึ่งหมายถึงออกซิเจนในสถานะที่ถูกกระตุ้น (excited state) สิ่งเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดขั้นตอนอินนิทิเอชันของปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระได้ทั้งสิ้น ดังสมการที่ (1)

$$RH \longrightarrow R^{\bullet} \qquad \text{สมการ (1)}$$

singlet oxygen เมื่อทำปฏิกิริยากับไขมัน (RH) จะทำให้เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2)

$$RH + {}^1O_2 \longrightarrow ROOH \qquad \text{สมการ (2)}$$

นอกจากนี้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ยังเกิดขึ้นได้ ในปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนในสถานะ groud state ซึ่งเรียกว่า triplet oxygen ($^3O_2$) และมีเอนไซม์ lipoxygenase อยู่ด้วยดังสมการที่ (3)

$$RH + {}^3O_2 \xrightarrow{\text{lipoxygenase}} ROOH \qquad \text{สมการ (3)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พันธะ O-O ในโมเลกุลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะที่อ่อน จึงถูกสลายได้ง่าย ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนอินนิทิเอชันของปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ (4)–(6)

$$ROOH \rightleftharpoons RO^{\bullet} + H^{\bullet} \qquad \text{สมการ (4)}$$

$$ROOH \rightleftharpoons RO^{\bullet} + OH^{\bullet} \qquad \text{สมการ (5)}$$

$$2ROOH \rightleftharpoons RO^{\bullet} + H_2O + ROO^{\bullet} \qquad \text{สมการ (6)}$$

ในปฏิกิริยาที่มีโลหะไอออน เช่น เหล็ก และทองแดง พบว่าจะเป็นการช่วยเร่งการสลายโมเลกุลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$ROOH + M^{N+} \longrightarrow RO^{\bullet} + OH + M^{(N+1)+} \qquad \text{สมการ (7)}$$

$$ROOH + M^{(N+1)+} \longrightarrow RO^{\bullet} + OH + M^{N+} \qquad \text{สมการ (8)}$$

2. ขั้นตอนพรอพาเกชัน (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในขั้นตอนอินนิทิเอชันที่ดำเนินปฏิกิริยาต่อไป โดยเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ทาง คือ โดยการดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนจากโมเลกุลข้างเคียง หรือโดยการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนที่อยู่ในสถานะ ground state ทำให้ได้อนุมูลอิสระตัวใหม่ ดังสมการที่ (9) – (11)

$$RH + R^{1\bullet} \rightleftharpoons R^{\bullet} + R^{1}H^{\bullet} \qquad \text{สมการ (9)}$$

$$R^{\bullet} + {}^{3}O_2 \rightleftharpoons ROO^{\bullet} \qquad \text{สมการ (10)}$$

$$ROO^{\bullet} + RH \rightleftharpoons ROOH^{\bullet} + R^{\bullet} \qquad \text{สมการ (11)}$$

3. ขั้นตอนเทอร์มิเนชัน (termination step) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น 2 อนุมูลมารวมกันได้เป็นสารที่มีความเสถียร จึงเป็นการหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ (12) และ (13)

$$ROO^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightleftharpoons ROOR + O_2 \qquad \text{สมการ (12)}$$

$$ROO^{\bullet} + R^{\bullet} \rightleftharpoons ROOR \qquad \text{สมการ (13)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3 สารแอนติออกซิแดนต์ในผักและผลไม้

สารแอนติออกซิเดนท์ (antioxidant) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสารต้านอนุมูลอิสระ คือ สารที่ทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (มลศิริ, 2540) บ้างก็เรียกว่า free radical scavenger ในที่นี้รวมถึงสารที่สามารถยับยั้ง และควบคุมอนุมูลอิสระไม่ให้ไปกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงช่วยยับยั้งอนุมูลอิสระไม่ให้ทำลายองค์ประกอบของเซลล์ (วัลยา และพัชรี, 2542) และจะไปหยุดยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระทำให้คงตัว จึงทำให้หยุดการก่อตัวใหม่ นอกจากนี้ยังซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากตัวอนุมูลอิสระที่ไปทำลายเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย อีกทั้งกำจัดและแทนที่โมเลกุลที่ถูกทำลาย เพราะสารเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อร่างกายได้ สารแอนติออกซิแดนต์มีทั้งที่เป็นสารจากธรรมชาติ (natural antioxidant) มักพบในอาหารจำพวกผักและผลไม้ ได้แก่ phenolic compounds, peptides, amino acid, ascorbic acid, carotenoids, flavonoids, melanoidin, other organic acid, tannins, quercetin และ tocopherols เป็นต้น (Huang *et al*, 1992) และสารสังเคราะห์ (synthetic antioxidant) ได้แก่ tert-butyl-4-hydroxyanisol (BHA), tert-butyl-4-hydroxytoluene (BHT) และ tert-butyhydroquinone (TBHQ) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์หลักในระบบต้านอนุมูลอิสระประกอบด้วย superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT) และ glutathione peroxidase

สารต้านอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ (Hudson, 1990) ดังนี้

1. primary antioxidant สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารประกอบฟีนอล (phenolic substance) ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังรวมถึงสารโทโคฟีรอลจากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ (natural and synthetic tocopherol) alkyl gallate, BHA, BHT, TBHQ และอื่น ๆ ซึ่งสารในกลุ่มดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน

2. oxygen scavenger สารในกลุ่มนี้ ได้แก่ ascorbic acid, ascorbyl palmitate erythorbic acid (isoascorbic acid) และ sodium erythorbate เป็นต้น สารกลุ่มนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเป็นการช่วยกำจัดออกซิเจนในระบบปิดได้

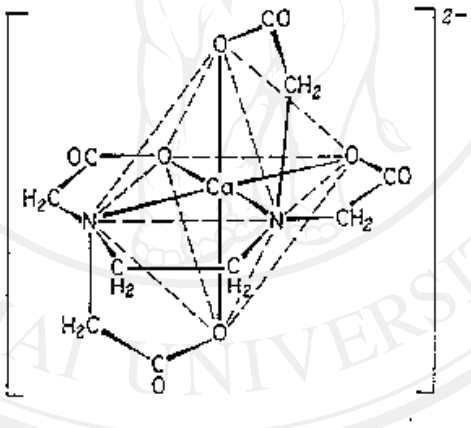
3. secondary antioxidant สารในกลุ่มนี้ ได้แก่ dilauryl thiopropionate และ thiopropionic acid ทำหน้าที่สลายโมเลกุลของ lipid hydroperoxide ให้เป็นสารที่มีความเสถียร

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

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5. chelating agent หรือ sequestrant สารในกลุ่มนี้ ได้แก่ กรดซิตริก กรดอะมิโน และ ethylenediaminetetra-acetic acid (EDTA) เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ไปจับกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก และทองแดง ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่ส่งเสริม และเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร (ภาพที่ 2.2)

เนื่องจากสารแอนติออกซิแดนต์มีหน้าที่หลายอย่าง เช่น ทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) เป็นตัวกำจัดอนุมูลอิสระ จับกับไอออนของโลหะที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ยับยั้งการเกิดออกซิเจนในรูปแอคทีฟ ซึ่งพบในขั้นตอนอินนิทิเอชันของปฏิกิริยาออกซิเดชัน หน้าที่ต่าง ๆ เหล่านี้จึงทำให้มีผลในการชะลอ หรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยการทำปฏิกิริยากับอนุมูล peroxyl เพื่อให้เป็นสารที่มีความเสถียร หรือเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกต่อไป จนได้เป็นสารที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระ (non-radical product) (Basu *et al*, 1999 ; Huang *et al*, 1992)



ที่มา: Hudson, 1990

ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับโลหะไอออน

กลไกในการทำงานของสารแอนติออกซิแดนต์ (Gutteridge and Halliwell, 1994)

1. เข้าจับกับ oxygen-derived species โดยใช้เอนไซม์ หรือเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุมูลอิสระ

2. ลดการเกิดของ oxygen-derived species

3. เข้าจับไอออนโลหะเพื่อทำให้ปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแปลง reactive species ลดลง เช่น $O_2^{-\bullet}$ และ H_2O_2 ส่งผลให้เกิด $OH^{\bullet}$ ได้น้อยลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4. ช่วยซ่อมแซมส่วนที่ถูกทำลาย

5. ทำลายโมเลกุลที่ถูกทำลาย และเติมโมเลกุลใหม่เข้าไปแทนที่

ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นกลไกในการป้องกัน และควบคุมอนุมูลอิสระ โดยการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) และช่วยซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากอนุมูลอิสระ

การทดสอบฤทธิ์ต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมีการทดสอบได้หลายวิธี ได้แก่

1. วิธี thiobarbituric reactive substances (TBARS) เป็นวิธีการติดตามปริมาณสารประกอบอัลดีไฮด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ low density lipoprotein (LDL) กับโลหะไอออน เช่น Fe^{2+} และ Cu^{2+} โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร (Pokorny *et al*, 2001)

2. วิธี 2,2-azinobis [ethylbenzothiazoline-6-sulphonate] (ABTS) เป็นการทดสอบฤทธิ์ต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ABTS ในรูปของ $ABTS^{+}$ ซึ่งใช้ทดสอบกับสารสกัดจากอาหาร วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร (Whiteman and Guan, 2003)

3. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (ในรูปกรดแกลลิค) เป็นการทดสอบสารฟีนอลทั้งหมด โดยใช้สาร folin-ciocalteu reagent ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างสารละลาย และทำการเปรียบเทียบด้วยสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิค โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโมเมตร (Waterman and Mole, 1994)

4. การวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH radical scavenging เป็นการทดสอบฤทธิ์ต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยให้สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากับสาร DPPH (2,2-diphenyl-1-pricrylhydrazyl) ติดตามผลการทดลองโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 516 นาโนเมตร (Yen and Hsieh, 1997)

สารแอนติออกซิแดนต์มีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ที่มีความสำคัญและพบมากในผักและผลไม้มีอยู่ 3 ชนิด คือ สารประกอบฟีนอล สารแอนโทไซยานิน และ สารเคอร์ซีทิน ซึ่งแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สารประกอบฟีนอล (phenolic compound) เป็นสารที่พบได้ในผักและผลไม้ทั่วไป มีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) มีจำนวน hydroxyl group อย่างน้อยหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งหมู่ในโมเลกุล สามารถละลายในน้ำได้ ส่วนใหญ่สารประกอบฟีนอลมักพบอยู่รวมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) สารประกอบฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีหลายกลุ่ม และมีลักษณะสูตรโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน กลุ่มใหญ่ที่พบจะเป็นสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบต่าง ๆ เช่น phenyl propanoid, phenolic quinone และ polyphenolic ซึ่งได้แก่พวก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลิกนิน (lignin) เมลานิน (melanin) และแทนนิน (tannin) เป็นต้น รวมทั้งยังพบว่ามีสารประกอบที่มีกลุ่มฟีนอล (phenolic unit) รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีนอัลคาลอยด์ (alkaloid) และเทอร์ฟีนอยด์ (terpenoid) เป็นต้น

หน้าที่ของสารประกอบฟีนอลเหล่านี้ บางชนิดก็ทราบแน่ชัด เช่น ลิกนิน ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ของพืช สารในกลุ่มแอนโทไซยานิน (anthocyanin) เป็นสารที่ให้สีในดอกไม้ ผัก และผลไม้ สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์มีความสำคัญในการควบคุมการเจริญของพืชจำพวกถั่ว เป็นต้น สารประกอบฟีนอลหลายชนิดมีสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนต์ ซึ่งจะเป็นตัวกำจัดอนุมูลอิสระ (Packer *et al*, 1999) โดยมีกลไก คือ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ สารประกอบฟีนอลจะหน่วงเหนี่ยว หรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจะถูกทำให้เป็นสารที่มีความเสถียร ดังนั้นจึงสามารถป้องกันการเกิดขั้นตอน propagation ได้ (Basu *et al*, 1999) สารประกอบฟีนอลยังทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ เป็นตัวให้ไฮโดรเจน และกำจัดออกซิเจนที่อยู่ในรูปแอคทีฟ (Rice and Miller, 1996) ประโยชน์ของสารประกอบฟีนอลในการรักษาโรค เช่น ช่วยยับยั้งการแข็งตัวของเกร็ดเลือด ต่อต้านอาการอักเสบและบวม รักษาแผลในกระเพาะอาหาร ต่อต้านการแพ้จากการหลั่งของฮีสตามีน และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Middleton and Kandaswami, 1994) ศักยภาพของสารประกอบฟีนอลในการเป็นสารแอนติออกซิแดนต์นั้นขึ้นกับค่า redox potential ของ hydroxyl group ในโมเลกุล และโครงสร้างทางเคมีซึ่งแตกต่างกันไป (ภาพที่ 2.3)

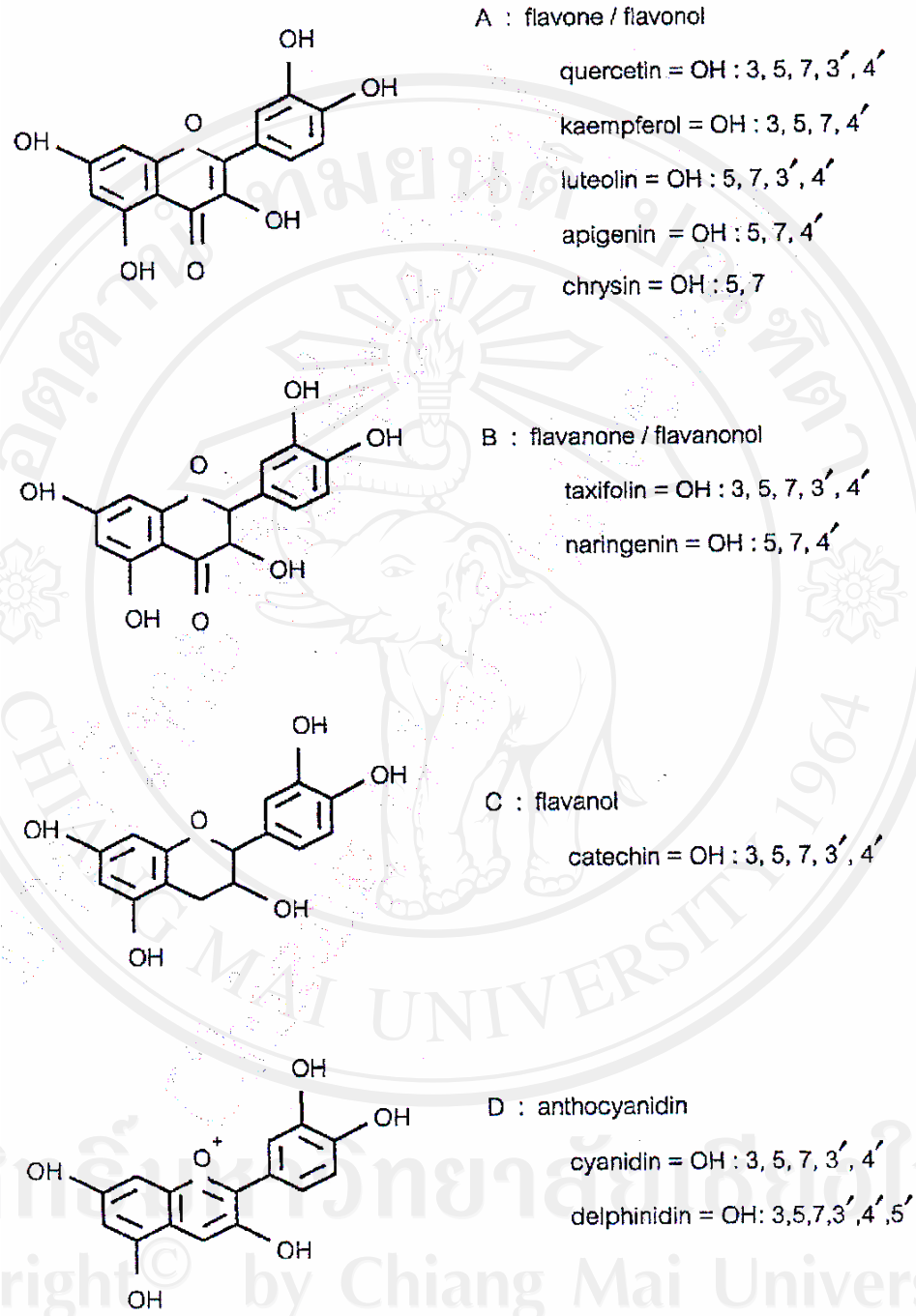
โดยประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลจะมีมากขึ้น ถ้าในโครงสร้างโมเลกุลมีตำแหน่งดังต่อไปนี้

1) 3-hyfroxyl group ของวงแหวน C เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง quercetin และ luteolin พบว่า luteolin มีแอคติวิตีของสารแอนติออกซิแดนต์น้อยกว่า quercetin เนื่องจาก luteolin ไม่มีตำแหน่ง 3-hydroxyl group ที่วงแหวน C

2) 2, 3-double bond และ 4-oxo group ของวงแหวน C เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง quercetin และ taxifolin พบว่า taxifolin มีแอคติวิตีของสารแอนติออกซิแดนต์น้อยกว่า quercetin เนื่องจาก taxifolin ไม่มีพันธะคู่ที่ตำแหน่งดังกล่าว

3) 3′, 4′-hydroxyl group ของวงแหวน B เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง quercetin และ kaempferol พบว่า kaempferol มีแอคติวิตีของสารต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่า quercetin เนื่องจาก kaempferol ไม่มี hydroxyl group ที่ตำแหน่ง 3′ ของวงแหวน B

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



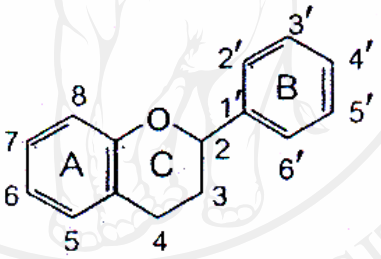
ที่มา: Rice and Miller, 1996

ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลบางชนิด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2) สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) เป็นรงควัตถุที่จัดอยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกไกลโคไซด์ สามารถละลายน้ำได้ดี ให้สีแดง สีชมพู สีน้ำเงิน และสีม่วง สารแอนโทไซยานินพบอยู่ใน organelle ที่เรียกว่าแวคิวโอลในเซลล์ที่อยู่ในชั้น sub-eqidermal tissue ของใบ ดอก และผลของพืช สารแอนโทไซยานินละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ และแอลกอฮอล์ โดยการละลายจะเพิ่มขึ้นถ้าตัวทำละลายมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (Moskowitz and Hrazdina, 1981)

สารแอนโทไซยานินจะมี flavan nucleus เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ (ภาพที่ 2.4) จะประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) คือ วงแหวน A B และวงแหวน C โดยวงแหวน A และ B เป็นวงสำคัญ ที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยเฉพาะที่วงแหวน B จะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และ/หรือหมู่เมทอกซิล ($-OCH_3$) มาเกาะ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารอนุพันธ์ตัวอื่น ๆ เกิดเป็นสารแอนโทไซยานินที่หลากหลาย และมีวงแหวน C เป็นตัวเชื่อมระหว่างวงแหวน A และ B

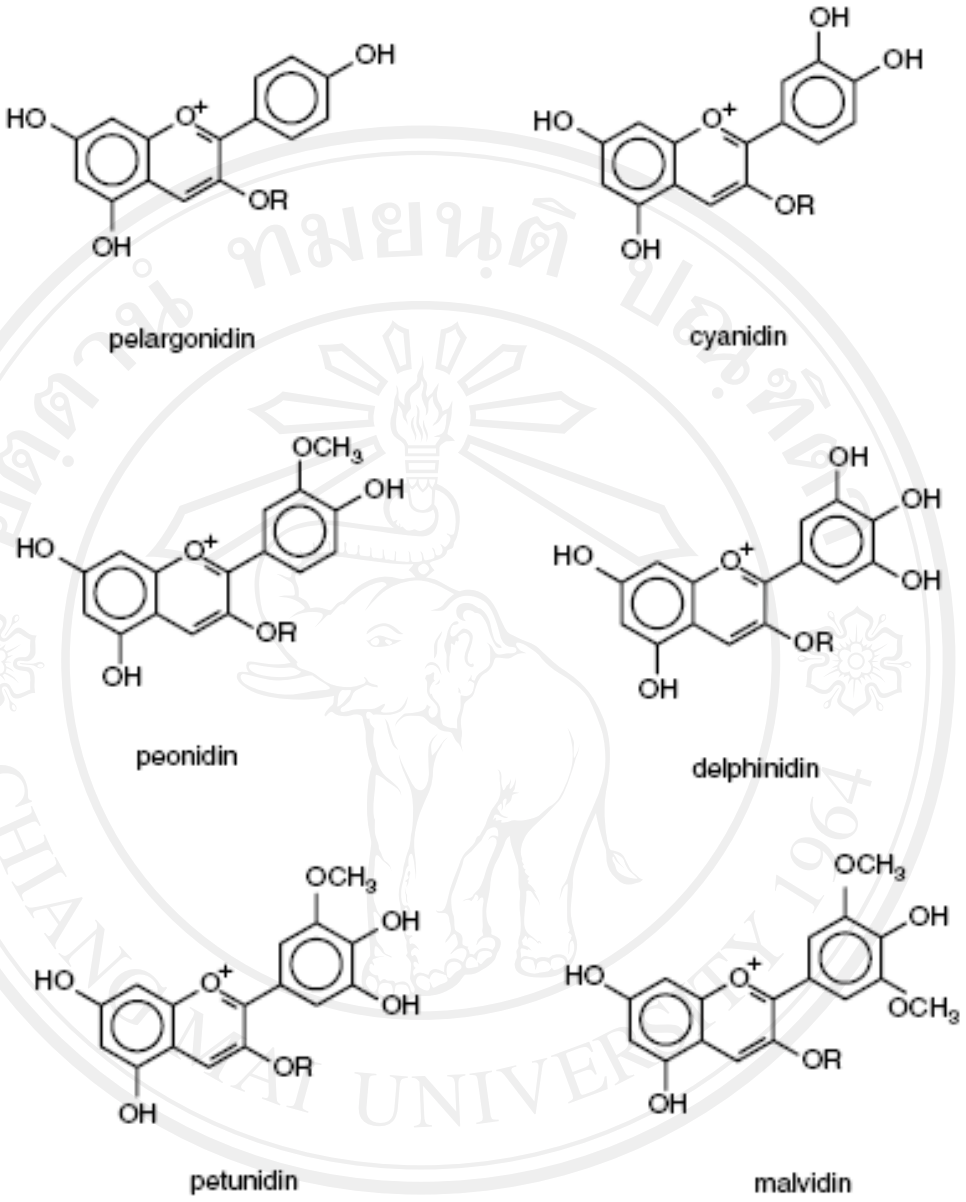


ที่มา: Gross, 1987

ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสารแอนโทไซยานิน

Godoy and Lozoya (1999) ได้แบ่งรงควัตถุแอนโทไซยานินที่มีการเปลี่ยนแปลงมาจาก anthocyanidin ในธรรมชาติออกเป็น 17 กลุ่ม คือ apigenindin, aurantinidin, capensinidin, columnidin, 5-methylcyanidin, 6-hydroxycyanidin, delphinidin, europinidin, hirstidin, luteolinidin, malvidin, peonidin, petunidin, pulchellidin, rosinidin และ tricetinidin ซึ่งมีกลุ่มที่สำคัญ 6 กลุ่ม ได้แก่ pelargonidin, cyanidin, peonidin, delphinidin, petunidin และ malvidin (ภาพที่2.5) โดยโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และการ methylation ของ hydroxyl groups ซึ่งจะจับกับวงแหวน A และที่จำเพาะกับวงแหวน B

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ที่มา: Taxeoko and Dao, 2002

ภาพที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของสารแอนโทไซยานินบางชนิดที่สำคัญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารฟลาโวนอยด์พบอยู่ในพืชในลักษณะของไกลโคไซด์ (glycoside) คือ มีน้ำตาลมาเกาะอยู่ด้วยที่กลุ่ม hydroxyl กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งหรือมากกว่า นอกจากนั้นยังอาจมีกลุ่ม methyl หรือกรดในกลุ่ม cinnamic ต่าง ๆ มาเกาะอยู่ด้วย รวมทั้งอาจรวมตัวกันเป็น dimmer trimer และ

polymer ฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีน้ำตาลเกาะอยู่บนโมเลกุลเรียกว่า aglycone ส่วนสารแอนโทไซยานินที่ไม่มีน้ำตาลเกาะเรียกว่า แอนโทไซยาดิน (anthocyanidin)

มีสารแอนโทไซยานินจำนวนมากที่เกิดจาก anthocyanidin ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการ glycosylation และ acylation นอกจากนี้สารแอนโทไซยานินสามารถแบ่งกลุ่มได้หลายกลุ่มด้วยกัน เช่น 3-monosides, 3-biosides, 3-triosides, 3-monosides-5-monosides, 3-biosides-5-monosides และ 3-monodies-7-monosides เป็นต้น ซึ่งสารแอนโทไซยานินจะประกอบด้วยส่วนของ ester จาก organic acid และ hydroxyl ของ anthocyanidin หรือ sugar moiety สำหรับน้ำตาลที่พบบ่อยในโมเลกุลของสารแอนโทไซยานินคือ glucose, galactose, rhamnose, bata-D-glucopyranose, gentiobiose, sambubiose, rutinose และ 2^{G}-glucosylrutinose เป็นต้น น้ำตาลในโมเลกุลของสารแอนโทไซยานินนั้นมีส่วนช่วยให้สารแอนโทไซยานินสามารถคงตัว และละลายน้ำได้ดี (Godoy and Lozoya, 1999; Mazza and Miniati, 1993)

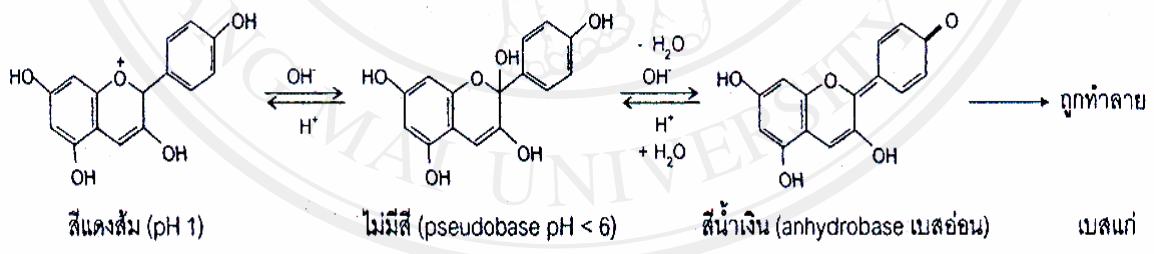
อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารแอนโทไซยานิน ที่พบในธรรมชาติมักพบสารแอนโทไซยานินอยู่ 3 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มของ pelargonidin (Pg) ซึ่งถูก hydroxylated ที่ตำแหน่ง 4'-position เท่านั้น และเกิดเป็นสีส้ม สีชมพู สีแดง และสีคล้ายเนื้อปลาแซลมอน กลุ่มของ cyanidin (Cy) มี hydroxyl groups เกาะที่ตำแหน่ง 3' และ 4'-positions ซึ่งทำให้เกิดมีสีม่วง สีม่วงอมน้ำเงิน และสีฟ้า นอกจากนี้ ทั้ง Pg, Cy และ Dp สามารถที่จะเกิดการผสมกันแล้วเกิดเป็นสีต่าง ๆ ได้ตั้งแต่สีส้มแดงจนถึงสีฟ้าก็ได้ anthocyanidin methyl ethers รวมตัวกันเกิดเป็น peonidin ซึ่งมีสีม่วงแดง หรือเกิดจากการรวมตัวกันของ cyanidin และ petunidin ก็ได้ นอกจากนี้ malvidin ซึ่งมีสีม่วงก็เกิดจากการรวมกันของ delphinidin ได้เช่นเดียวกัน นั่นคือสารแอนโทไซยานินที่สร้างขึ้นมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่ hydroxyl group ภายในโมเลกุล ชนิด และจำนวนน้ำตาลที่เกาะกับโครงสร้างของ anthocyanidin ทำให้เกิดชนิด และสีของสารแอนโทไซยานินที่แตกต่างกันไป

ในสภาพที่เป็นกรดสารแอนโทไซยานินดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีเขียว ความยาวคลื่น 465-550 นาโนเมตร โดยวงแหวน B และในช่วงแสงอัตราไวโอเลต ความยาวคลื่น 270-280 นาโนเมตร โดยวงแหวน A การดูดกลืนแสงของสารแอนโทไซยานินนี้เปลี่ยนแปลงได้เมื่อกลุ่มต่าง ๆ ที่มาเกาะกับโครงสร้างหลักเปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่อเกิด hydroxylation หรือเพิ่มหมู่ hydroxyl เข้าไปจะทำให้ช่วงการดูดกลืนแสงขยับไปในช่วงคลื่นที่ยาวขึ้น แต่เมื่อเกิด glycosylation หรือน้ำตาลเข้ามาเกาะกับคาร์บอนตำแหน่งต่าง ๆ การดูดกลืนแสงจะขยับไปในช่วงคลื่นที่สั้นลง และเมื่อเกิด acylation หรือมีหมู่ acyl ของกรดในกลุ่ม cinnamic ต่าง ๆ มาเกาะกับน้ำตาลจะทำให้มีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอีกในช่วงความยาวคลื่น 310-335 นาโนเมตร แต่การ methylation

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หรือการมีหมู่ methyl เข้ามาเกาะไม่ทำให้การดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปมากนัก จากการดูดกลืนแสงของสารแอนโทไซยานินดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้สารแอนโทไซยานินทำตัวเหมือน indicator ในสารละลาย กล่าวคือมีโครงสร้าง และสีเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ในสารละลายที่เป็นกรดมาก ๆ สารแอนโทไซยานินจะให้สีค่อนข้างแดงของ flavylium anion แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นในช่วงกรดอ่อนหรือเป็นกลาง สีจะค่อย ๆ จางลงไม่มีสีของ pseudobase เมื่อสารละลายมีสภาพเป็นเบสอ่อนจะให้สีน้ำเงินของ anhydrobase แอนโทไซยานิน ในทั้ง 3 รูปนี้ ยังเปลี่ยนกลับไปกลับมา (reversible) ได้ แต่ในสภาพที่เป็นด่างจัดแอนโทไซยานินจะถูกทำลาย และไม่อาจเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปอื่นได้อีก (ภาพที่ 2.6)

จากการที่สารแอนโทไซยานินอยู่ในของแวคิวโอล ที่มีสารละลายเป็นกรดอ่อน ๆ ทำให้สามารถถูกทำลายด้วยกลุ่ม hydroxyl ส่งผลให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีสี ดังนั้นการที่สารแอนโทไซยานินให้สีต่าง ๆ ของดอกไม้อยู่ได้นานเป็นเพราะมีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งในธรรมชาติทำได้ 4 แนวทาง คือ การรวมตัวกันเอง (self association) การรวมตัวกับสารอื่นที่ไม่มีสีแล้วให้สีเกิดขึ้น (intermolecular copigmentation) การจัดเรียงตัวภายใน (intramolecular copigmentation) และการจับตัวกับโลหะ (metal complexity) ทำให้โครงสร้างหลักปลอดภัยจากการทำลายจากไอออน



ที่มา: Gross, 1987

ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ตามค่าความเป็นกรด-ด่าง

ชนิดและปริมาณของแอนโทไซยานินในผลไม้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.2 บางพืชมีแอนโทไซยานินเพียงชนิดเดียว เช่น ผลเสาวรส บางพืชมี 2 ชนิด เช่น ผลท้อ บางพืชมีมากกว่า 20 ชนิด เช่น ผลองุ่น ความแตกต่างของชนิดแอนโทไซยานินในผลไม้ขึ้นอยู่กับน้ำตาลที่มาเกาะกับ aglycone (anthocyanidin) ส่วนใหญ่ได้แก่ cyanidin (55 %) รองลงมา คือ peonidin และ delphinidin อย่างละประมาณ 12 % ตามด้วย pelargonidin และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

malvidin ประมาณอย่างละ 8 % และ petunidin 6 % ในผลแอปเปิลพบเพียง 1 aglycone ในขณะที่ผลองุ่นพบ 5-6 aglycone น้ำตาลส่วนใหญ่ที่มาเกาะกับ aglycone เหล่านี้เป็นน้ำตาลกลูโคสเกาะ ณ ตำแหน่งที่ 3 และ 5 (3, 5-diglucoside) พบในลิ้นจี่ และทับทิม นอกจากนี้ยังพบว่ามีกรดต่าง ๆ มาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ cinnamic, p-coumaric, caffeic และ acetic สำหรับปริมาณของแอนโทไซยานินในผลไม้โดยเฉลี่ยมีประมาณ 500 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยผันแปรอยู่ตั้งแต่ 160-4,000 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนใหญ่พบสะสมในแวคิลโอลของเปลือก หรือผิวของผลไม้ ยกเว้นในพืชบางชนิด เช่น ในผลทับทิม ฝรั่งขี้นก ผลเชอรี ที่มีเนื้อสีแดง

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารแอนโทไซยานินในผลไม้บางชนิด

Fruits	**Ripening stage**	**Anthocyanin content (µg/g. fresh weight)**
Cranberry	Ripe	450-1,000
Currant, red	Ripe	160
Cherry, sour	Ripe	450
Grape, muscadine	Ripe	400-4,030
Raspberry	Ripe	200-600
Strawberry	Ripe	450-700

ที่มา: Gross, 1987

การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารแอนโทไซยานินในผลไม้ ส่วนใหญ่พบว่ามีการสังเคราะห์สารแอนโทไซยานินเพิ่มสูงมากเมื่อผลไม้เริ่มแก่ และเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผลสุกเต็มที่ แต่ในผลไม้บางชนิด เช่น ในผลองุ่น พบปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุดในระยะ verasion ปัจจัยภายในที่มีผลต่อสีของผลไม้ คือ พันธุกรรม ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารแอนโท-ไซยานิน รวมทั้งสารฟลาโวนอยด์อื่น ๆ

ภายหลังการเก็บเกี่ยว สารแอนโทไซยานินในผลไม้อาจเปลี่ยนแปลงได้ ที่เห็นได้ชัด คือ ผลลิ้นจี่ ซึ่งมักจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลภายในเวลา 2-3 วันที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ผลมังคุดเปลี่ยนจากสีม่วงแดงไปเป็นสีดำทำให้ไม่เป็นที่ดึงดูดใจต่อผู้บริโภค การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของผลลิ้นจี่ เกิดขึ้นเนื่องจากการออกซิเดชัน และการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ของสารประกอบฟีนอล รวมทั้งสารแอนโทไซยานิน โดยการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ประกอบกับ

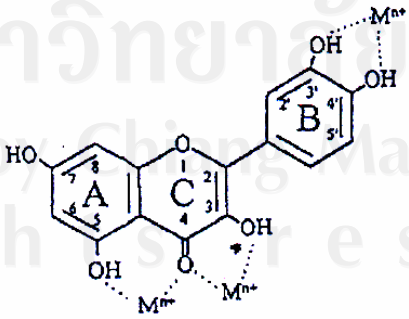
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การสูญเสียน้ำ ส่วนในมังคุดน่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ภายในเซลล์ที่ผิวของเปลือกมังคุด ในทางตรงกันข้ามกับผลลิ้นจี่และมังคุดข้างต้น ผลทับทิมและสตรอเบอรีมีปริมาณสารแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น และสีแดงขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากการสร้างสารแอนโทไซยานินขึ้นมาใหม่ การเก็บรักษาผลไม้ทั้ง 2 ชนิดนี้ภายใต้บรรยากาศที่มี CO_2 สูง จะยับยั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารแอนโทไซยานิน ทั้งนี้เพราะบรรยากาศที่มี CO_2 ไปทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของผลไม้สูงขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารแอนโท-ไซยานิน ได้แก่ phenylalanine ammonia lyase (PAL) และ glycosyl transferase (จริงแท้, 2549)

การสลายตัวของสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin degradation) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารแอนโทไซยานินในแวคิวโอล อันเนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างในแวคิวโอล ปริมาณน้ำตาลในเซลล์ อายุของพืช แสง อุณหภูมิ ระดับฮอร์โมนภายในพืช และฮอร์โมนหรือสารเคมีที่ได้รับจากภายนอก เป็นต้น

การใช้ประโยชน์ของแอนโทไซยานิน เช่น อุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง นมเปรี้ยว อาหารหวาน และไวน์แดง เป็นต้น ซึ่งสีของแอนโทไซยานินจะคงสภาพได้ดีที่ความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 และการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นกรดจะให้สีคงทน (สันติ, 2534)

3) สารเคอร์ซีทิน (quercetin) เป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีคุณสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนต์ พบในแอปเปิล ผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ และหัวหอม สารเคอร์ซีทินทำหน้าที่เป็น chelating agent ดักจับไอออนของโลหะเข้าไว้ในโมเลกุล โดยโครงสร้างของสารเคอร์ซีทินมีตำแหน่ง (binding site) ที่สามารถดักจับไอออนของโลหะ เช่น ทองแดง ได้ 3 บริเวณ คือ บริเวณ 3′, 4′-dihydroxy ของวงแหวน B บริเวณ 3-hydroxy, 4-keto ของวงแหวน C และบริเวณระหว่างตำแหน่ง 5-hydroxy ของวงแหวน A ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ที่มา: Packer *et al*, 1999

ภาพที่ 2.7 บริเวณ Binding site ของสารเคอร์ซีทินที่จับกับไอออนของโลหะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

มีรายงานการวิจัยพบว่าสารเคอร์ซีทิน สามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดสมองตีบ การเสริมสารเคอร์ซีทินช่วยลดความดันโลหิตในสัตว์ที่มีความดันโลหิตสูง และได้มีการศึกษาการเสริมสารเคอร์ซีทินในผู้ป่วยทั้งชายและหญิงที่เริ่มมีความดันโลหิตสูง (n=19) และเป็นความดันโลหิตสูงขั้น 1 (n=22) ด้วยวิธี randomized, doubleblind, placebo control และ crossover โดยเสริมสารเคอร์ซีทินวันละ 730 มิลลิกรัม เป็นเวลา 28 วัน พบว่าหลังการเสริมสารเคอร์ซีทิน ความดันโลหิตในกลุ่มที่เริ่มมีความดันโลหิตสูงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งตรงข้ามกับกลุ่มที่มีความดันโลหิตสูงขั้น 1 ความดันโลหิตจะลดลง (Nutrition update, 2007)

ได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของเคอร์ซีทินในด้านการละลาย ความคงตัว และศึกษาฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH radical scavenging กักเก็บสารเคอร์ซีทินด้วยอนุภาคไลโปโซมโดยวิธีฟิล์มบางไฮเดรชัน ร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิค และการเอ็กทรูชัน วิเคราะห์คุณลักษณะของอนุภาคเคอร์ซีทิน-ไลโปโซม ได้แก่ รูปร่าง ขนาด ประจุที่ผิวอนุภาค ปริมาณลิปิด และประสิทธิภาพการกักเก็บสาร พบว่าสารเคอร์ซีทินละลาย และคงตัวดีที่สุดในแอลกอฮอล์ มีค่าการละลายเป็น 3.80 และ 4.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ 25 และ 37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อัตราการสลายตัวลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่ที่เวลา 12 ชั่วโมง ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันแสดงเป็นค่า EC_{50} ที่ปริมาณ 0.012 มิลลิกรัม เทียบได้กับผลของวิตามินซี และวิตามินอี อนุภาคที่ได้เป็นทรงกลม ประจุลบ และมีขนาดอยู่ในช่วง 40-500 นาโนเมตร ปริมาณลิปิด และประสิทธิภาพการเอนแคปซูเลชันมีค่าประมาณร้อยละ 80 และ 66 ตามลำดับ ทั้งนี้คาดได้ว่าอนุภาคที่พัฒนาขึ้น มีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบนำส่งยาสำหรับป้องกันสภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (แสงระวี และคณะ, 2550)

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาปริมาณการดูดซึมของสารเคอร์ซีทิน ในอาสาสมัครที่ทำศัลยกรรมสร้างทางผ่านเข้าไปในลำไส้เล็กท่อนปลาย โดยทางผนังช่องท้อง (ileostomy) เพื่อป้องกันการสูญเสียสารประกอบฟลาโวนอยด์ เนื่องจากแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ และได้รับสารเคอร์ซีทินจากหัวหอมทอด ซึ่งมีสารเคอร์ซีทินกลูโคไซด์ในปริมาณสูง (เทียบเท่ากับอะไกลโคน 89 มิลลิกรัม) สารเคอร์ซีทินรูติโนไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นสารเคอร์ซีทินหลักในชา เทียบเท่ากับอะไกลโคน 10 มิลลิกรัม หรือสารเคอร์ซีทินอะไกลโคนบริสุทธิ์ 100 มิลลิกรัม พบว่าภายใน 13 ชั่วโมง สารเคอร์ซีทิน หรือไกลโคไซด์ของสารเคอร์ซีทินในของเหลวจากทางเดินอาหารมีการสลายตัวน้อยมาก มีการดูดซึมของสารเคอร์ซีทินกลูโคไซด์จากหัวหอมทอดร้อยละ 52 สารเคอร์ซีทินรูติโนไซด์ร้อยละ 17 และสารเคอร์ซีทินอะไกลโคนบริสุทธิ์ร้อยละ 24 การขับออกของสารเคอร์ซีทิน หรือไกลโคไซด์ของสารเคอร์ซีทินเป็นร้อยละ 5 ของปริมาณที่ถูกดูดซึม แสดงว่าสารเคอร์ซีทินกลูโคไซด์จากหัวหอมถูกดูดซึมได้ในลำไส้เล็ก (Pietta and Simonetti, 1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 การผลิตอาหารในบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว

อาหารกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความสำคัญต่อมนุษย์มาอย่างยาวนาน และมีวิวัฒนาการทั้งด้านเทคโนโลยีการผลิต รวมถึงเทคโนโลยีการบรรจุมาโดยตลอด ภาชนะบรรจุที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ กระป๋องโลหะ และภาชนะแก้ว แม้ว่าภาชนะบรรจุทั้ง 2 ชนิดนี้ จะมีข้อดีหลายประการ แต่สำหรับการใช้งานบางลักษณะยังพบว่ามีปัญหาหลายด้าน เช่น ปัญหาการถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากันทุกจุด ทำให้อาหารที่อยู่ใกล้ผนังภาชนะบรรจุสุกมากเกินไป ส่วนอาหารที่อยู่บริเวณกลางภาชนะบรรจุได้รับความร้อนไม่เพียงพอ ปัญหากระป๋องเกิดสนิม ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักจากกระป๋อง และสารบัดกรี ปัญหาน้ำหนักของภาชนะแก้ว ปัญหาแก้วแตกง่าย ปัญหาการเปลืองพื้นที่ และค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ รวมถึงการขนส่ง เป็นต้น ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้มีการคิดค้นภาชนะบรรจุชนิดใหม่ ๆ ขึ้นมาแทนที่

รีทอร์ต เพาซ์ (retort pouch) เป็นบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว (flexible package) ที่ผลิตจากฟิล์มพลาสติก หรือพลาสติกกับอลูมิเนียมฟอยล์ (foil) และวัสดุเชื่อมประสานตั้งแต่ 4 ชั้นขึ้นไป มีน้ำหนักเบา สามารถทนความร้อน และความดันในระหว่างการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนได้เช่นเดียวกับกระป๋องและขวดแก้ว อีกทั้งสามารถเก็บรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้นานตั้งแต่ 6 เดือน จนถึง 2 ปี การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้ในระยะแรกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในกองทัพสหรัฐอเมริกา โดย The US Army Natick Research and Development Center เพื่อใช้ในโครงการอวกาศ และเป็นเสบียงอาหารที่แจกแก่ทหารในกองทัพ เมื่อเข้าสู่ทางการค้าระยะแรกยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ส่วนหนึ่งเป็นเพราะผลการตรวจสอบจากองค์การอาหารและยา ของสหรัฐอเมริกา (USFDA) ล่าช้า การเติบโตของบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ในสหรัฐอเมริกานั้นเป็นธุรกิจขนาดเล็ก (ประมาณ 60 ล้านถุง ค.ศ. 1986) ซึ่งตรงกันข้ามกับในประเทศญี่ปุ่นที่ได้รับความนิยมแพร่หลายเป็นอย่างมาก จนกระทั่งประเทศญี่ปุ่นเป็นผู้ผลิตอาหารในถุงรีทอร์ต เพาซ์ รายใหญ่ที่สุดของโลก ในบางปีมีอัตราการผลิตมากถึง 500 ล้านถุง ซึ่งอาหารส่วนใหญ่เป็นอาหารประเภท แกง สตูเนื้อ ซุป ข้าว ข้าวต้ม อาหารทะเล ผัก ผลไม้ และซอสต่าง ๆ เป็นต้น (สถาบันอาหาร, 2547)

สำหรับประเทศเกาหลี ไต้หวัน และไทย อาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว ก็กำลังเป็นที่นิยมแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่วัสดุและเทคโนโลยีนั้น จะนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น อาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้นั้นจะมีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับอาหารชนิดเดียวกันที่บรรจุในกระป๋อง หรือขวดแก้วในปริมาณที่เท่ากัน และผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องได้ สำหรับอาหารที่ต้องรับประทานขณะอุ่น หรือร้อนสามารถอุ่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รับประทานได้อย่างรวดเร็วโดยการจุ่มทั้งบรรจุภัณฑ์ลงในน้ำเดือด หรือนำไปอุ่นในเตาไมโครเวฟก็ได้

โครงสร้างหลักของบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว จะประกอบด้วยชั้นของฟิล์มพลาสติก และอลูมิเนียมฟอยล์ หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน แสงสว่าง และความชื้น การเลือกใช้โครงสร้างของบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการใช้กาวชนิดพิเศษที่ป้องกันการหลุดลอก (delamination) และปิดผนึกได้แน่น เป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเกิดรอยรั่วได้ บรรจุ-ภัณฑ์ชนิดนี้มีทั้งแบบถุงใส (ไม่ลามิเนตด้วยอลูมิเนียมฟอยล์) และถุงทึบ (ลามิเนตด้วยอลูมิเนียมฟอยล์) ซึ่งมีโครงสร้างทั่วไปเป็นพลาสติก 3 ชั้น เชื่อมประสานกัน ชั้นนอกจะเป็นชั้นที่เหนียวทนต่อการขีดข่วน ชั้นกลางเป็นชั้นที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน แสงสว่าง และความชื้น และชั้นในจะเป็นชั้นที่มีคุณสมบัติที่ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ และสัมผัสอาหารได้โดยปลอดภัย

บรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัวส่วนใหญ่ประกอบด้วยวัสดุ 4 ชั้น อัดติดกัน ดังนี้

ชั้นที่ 1 เป็นพลาสติกชนิดโพลิเอสเทอร์ (polyester) เป็นชั้นที่อยู่นอกสุด มีความหนาประมาณ 12 ไมครอน มีคุณสมบัติที่แข็งแรงทนทาน มีความเหนียว ไม่ฉีกขาดง่าย ต้านทานแรงกระแทกได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง และสามารถพิมพ์ข้อความหรือภาพกราฟฟิกได้โดยไม่หลุดลอก

ชั้นที่ 2 เป็นพลาสติกชนิดไนลอน (nylon) มีความหนา 15-25 ไมครอน มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี แต่ป้องกันไอน้ำได้ปานกลาง

ชั้นที่ 3 เป็นชั้นของอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil) มีความหนา 7-9 ไมครอน ชั้นนี้มีสมบัติป้องกันแสง อากาศ กลิ่น และเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี อีกทั้งยังเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เพราะมีพื้นที่ผิวมากกว่ากระป๋อง หรือขวดแก้ว ทำให้ใช้ความร้อนในขณะแปรรูปน้อยกว่า

ชั้นที่ 4 เป็นพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (polypropylene) เป็นชั้นที่อยู่ในสุด มีความหนา 70-100 ไมครอน มีสมบัติป้องกันการรั่วซึม มีความแข็งแรง และยืดหยุ่นสูง สามารถปิดผนึกได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว ได้แก่ สัมผัสกับอาหารได้โดยปลอดภัย และอนุมัติให้ใช้ได้โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ไอน้ำ ไขมัน น้ำมัน และส่วนประกอบต่าง ๆ ของอาหารได้ดี ทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ฆ่าเชื้อได้สูงประมาณ 145 องศาเซลเซียส ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี และในช่วงอุณหภูมิกว้าง มีความแข็งแรงไม่แตกทะลุหรือฉีกขาดง่าย สามารถใช้กับเครื่องขึ้นรูป และเครื่องบรรจุอัตโนมัติได้ สามารถพิมพ์ลวดลาย และข้อความต่าง ๆ ได้ง่าย

สภาวะการใช้ความร้อนสำหรับการฆ่าเชื้อ กับชนิดของอาหาร และวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.3 สภาวะการใช้ความร้อนสำหรับการฆ่าเชื้อ กับชนิดของอาหาร และวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์

สภาวะการใช้ความร้อน	ชนิดของอาหาร	วัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์
พาสเจอไรซ์ (60–85 °C)	อาหารที่เป็นกรด และกรดสูง (pH 4.5 หรือต่ำกว่า) เช่น ผลไม้ ผลไม้ในน้ำเชื่อม และอาหารหมักดอง เช่น สาเก	K- cell/PE, PET/PE KNY/PE, KPET/PE OP/Ewald/PE NY/Ewald/PE,PPT/ Ewald/PE PET/Al/PE
การต้มที่อุณหภูมิ 85–100 °C	อาหารที่มีกรดปานกลาง และเป็นกรดต่ำ (pH 4.5–7.0) เช่น แฮม ปลาทูน่าในน้ำซีอิ๊ว คามาโบโกะ	PET/PE, NY/PE, PET/CPP NY/CPP, PET/ Ewald/PE PET/Al/ CPP, NY/Al/ CPP
การฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง 100–120 °C	อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (pH > 4.5) เช่น แกง ซุป และสตู	PET/CPP, NY/CPP PET/NY/CPP PET/Al/ CPP, (NY/Al/ CPP)

ที่มา: Kawamura, 2000

: อักษรย่อ PE (Polyethylene), PT (Ordinary cellophane), PET (Polyester), KNY (Vinylidene chloride coat NY), Ewald (Ewald Film; ethylene vinyl acetate copolymer saponification matter), NY (Nylon; Biaxidl oriented), Al (Aluminium foil) และ CPP (Undrawn polyoropylene)

บรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัวสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้

1. ถุงแบน (flat pouch) มีพลาสติกประกบกันอย่างน้อย 2 ชนิด มีทั้งที่เป็นถุงใส และถุงทึบ ความหนาของพลาสติกแต่ละชิ้นจะเป็นตัวเลขที่แสดงในวงเล็บมีหน่วยเป็นไมคอน โดยทั่วไปชั้นนอกจะเป็นพลาสติกที่ทนต่อรอยขีดข่วน และการซึมผ่านของก๊าซได้ดี เช่น โพลี-เอทธีลีนเธอแรฟทาเรท (PET) หรือไนล่อน (โพลีเอมายด์ ON) โดยมีความหนาตั้งแต่ 12-25 ชั้นในสุดจะเป็นชิ้นที่ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ จะเป็นวัสดุพวก PP และ PE ที่มีความหนา 50-85 หากเป็นถุงทึบป้องกันแสงก็จะมีชั้นของอลูมิเนียมฟอยล์ (Al/foil) อยู่ตรงกลางมีความหนา 7-9 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำถุงแบนที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ PET(12)/Al(9)/CPP(70), PET(12)/ON (15)/CPP(75), PET(12)/ON(15)/CPP(85), ON(25)/CPP(80), ON(25)/CPP(60) และ ON (15)/CPP(50) เป็นต้น

2. ถุงตั้งได้ (standing pouch) เป็นถุงที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับถุงแบน แต่ในส่วนของก้นถุงนั้นมีส่วนขยายเพื่อให้ตั้งได้ และมีความหนาของพลาสติกมากกว่า ถุงชนิดนี้มีทั้งถุงใส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และถุงทึบ ขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาบรรจุ โดยทั่วไปถุงใสนั้นจะใช้บรรจุอาหารจำพวกถั่วแดง ในขณะที่ถุงทึบมักจะใช้บรรจุอาหารจำพวกข้าวต้ม ซอสต่าง ๆ ส่วนใหญ่ถุงแบบตั้งได้นี้จะใช้พลาสติกประกบกันมากกว่า 3 ชั้น ยกเว้นถุงใสที่ใช้พลาสติก 2 ชนิด ประกบกันแต่เพิ่มของชั้นในมากขึ้น ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำถุงตั้งได้ในปัจจุบัน ได้แก่ ON(15)/CPP(100), ON(15)/CPP (80), PET(12)/Al(7)/ON(15)/CPP(70), PET(12)/ON(15)/Al(7)/CPP(80) และ PET(12)/ON (15)/Al (9)/CPP(60) เป็นต้น

3. ถาด และถ้วย (trays and cups) จะมีทั้งแบบใส และทึบ เช่นเดียวกับถุงส่วนใหญ่ ตัวถาดจะใช้พลาสติกจำพวกโพลีโพรพิลีน (PP) ขึ้นรูปด้วยความร้อน และการฉีดขึ้นรูป แต่ถาดและถ้วยที่ทำจากพลาสติก PP นี้จะไม่เหมาะกับอาหารที่มีความมัน เพราะวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนต่ำ จึงเหมาะสำหรับการบรรจุข้าวมากกว่า แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน มีผู้ผลิตถาดและถ้วยแบบใสที่ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดีร่วมด้วย โดยการผลิตเป็นฟิล์มชนิดรีดร่วม (co-extrusion) ระหว่าง PP และ EVOH จึงสามารถเพิ่มคุณสมบัติของถาดและถ้วยมากขึ้น นอกจากนั้นบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้ต้องมีฝาปิดเช่นเดียวกับกระป๋องโลหะด้วย

ผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว จะมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิปกติได้ตั้งแต่ 3 เดือน ถึง 2 ปี สำหรับอาหารที่มีอายุการเก็บรักษา 3-6 เดือน นิยมใช้ถุงใส ส่วนอาหารที่มีอายุการเก็บรักษา 1-2 ปี นิยมใช้ถุงทึบที่มีการลามิเนตด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าถุงใส

การบรรจุ และการปิดผนึก จัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการผลิต เนื่องจากปริมาณและความหนาของผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ จะมีผลต่อปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อ อาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ขนาดความจุ 180-300 กรัม ซึ่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะมีเครื่องบรรจุ และเครื่องปิดผนึกแบบอัตโนมัติ โดยมีอัตราเร็วประมาณ 30-60 ถุงต่อนาที

การบรรจุ (filling) อาหารลงในบรรจุภัณฑ์นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของอาหารที่บรรจุ ได้แก่ ของเหลว ของเหลวกับของแข็งผสมกัน และแยกบรรจุของแข็งกับของเหลว จะต้องมีการความคุมการบรรจุที่ดี ปริมาณอาหารที่บรรจุจะเป็นปัจจัยกำหนดความหนาของถุง ซึ่งจะมีผลต่อสภาวะการฆ่าเชื้อ การบรรจุอาหารมากเกินไปหรือขาดความระมัดระวัง อาจทำให้เกิดรอยคราบอาหารบริเวณที่จะปิดผนึก ทำให้ความแข็งแรงของรอยปิดผนึกลดลง หรือการปิดผนึกไม่สนิท หลังจากที่บรรจุอาหารลงในบรรจุภัณฑ์แล้ว จะต้องไล่อากาศออกก่อนการปิดผนึก เนื่องจากถ้ามีอากาศอยู่ในบรรจุภัณฑ์จำนวนมาก การกระจายความร้อนจะไม่ทั่วถึง ทำให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การฆ่าเชื้อไม่สมบูรณ์ และยังมีผลทำให้ถุงแตกในระหว่างการฆ่าเชื้อได้ นอกจากนี้ออกซิเจนที่ค้างอยู่ในบรรจุภัณฑ์ยังเป็นสาเหตุทำให้อาหารเสื่อมสภาพในระหว่างการเก็บรักษาด้วย สำหรับการไล่อากาศออกจากบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัวทำได้หลายวิธี (งามทิพย์, 2550) ได้แก่

1. การบีบบรรจุภัณฑ์ไล่อากาศ (mechanical squeezing) ทำให้ระดับของอาหารสูงขึ้นมาใกล้ปากถุง เป็นการไล่อากาศออกไป ทำได้ง่าย แต่เสียเวลา และอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย อาหารอาจถูกบีบแรงเกินไปจนเลอะปากถุง ทำให้รอยปิดผนึกไม่สมบูรณ์

2. การบรรจุอาหารขณะร้อน (hot filling) ความร้อนของอาหารจะช่วยไล่อากาศได้ทางหนึ่ง เมื่ออาหารเย็นลงปริมาตรของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์จะลดลง ทำให้เกิดสูญญากาศภายในบรรจุภัณฑ์ได้

3. การพ่นไอน้ำ (steam flushing) ใช้ไอน้ำอิ่มตัว (saturated steam) หรือ ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) พ่นเข้าไปในช่องว่างเหนืออาหาร ไอน้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศ เมื่ออุณหภูมิลดลงไอน้ำจะกลั่นตัวทำให้เกิดสูญญากาศภายในบรรจุภัณฑ์ การใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดจะมีข้อดีกว่าไอน้ำอิ่มตัว เนื่องจากไม่มีหยดน้ำจากการกลั่นตัวที่อาจเป็นปัญหาต่อการปิดผนึกได้ การไล่อากาศด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า 2 วิธีแรก

4. การใช้สุญญากาศดึงอากาศ อาจใช้ vacuum chamber หรือใช้ท่อต่อเข้าไปในบรรจุ-ภัณฑ์ แล้วใช้ปั๊มสุญญากาศดึงอากาศออกไป วิธีนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง แต่ใช้เวลานาน และไม่ควรใช้กับอาหารที่ร้อนจัด หรืออาหารผง

5. ส่วนอาหารที่บรรจุในถาด หรือถ้วยนั้น ก่อนการปิดผนึกฝาจะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน (nitrogen flushing) พ่นเข้าแทนที่อากาศก่อนการปิดผนึก

6. การบรรจุอาหารให้เต็มพอดี (brim filling) เพื่อไม่ให้มีช่องว่างเหนืออาหารหลงเหลืออยู่ วิธีนี้จะต้องควบคุมปริมาณอาหารที่บรรจุให้ถูกต้อง และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้สูง อาหารที่บรรจุมากเกินจนล้นจะทำให้รอยปิดผนึกไม่แข็งแรง หรือเกิดรอยรั่วได้

สำหรับการปิดผนึก (sealing) ก็เป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ซึ่งเกิดจากรอยปิดผนึกไม่สนิท ถึงแม้ว่าการฆ่าเชื้อจะสมบูรณ์ก็ตาม ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงความสมบูรณ์และความแข็งแรงของรอยปิดผนึก ซึ่งจะต้องมีค่าสูงกว่าภาชนะบรรจุอาหารธรรมดา ความแข็งแรงของรอยปิดผนึกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นขณะฆ่าเชื้อ เนื่องจากพลาสติกอ่อนตัวลง ฉะนั้นจึงต้องเลือกใช้พลาสติกที่สามารถรักษาความแข็งแรงของรอยปิดผนึกได้สูง เพียงพอที่จะต้านทานต่อแรงดันภายในภาชนะบรรจุที่เกิดขึ้นขณะฆ่าเชื้อ ส่วนการปิดผนึกที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ (งามทิพย์, 2550)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1. การปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealing) เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด หลักการปิดผนึกด้วยความร้อน คือ ให้ความร้อนมากเพียงพอ ที่ทำให้ฟิล์มพลาสติกชั้นที่ประกบเข้าหากันหลอมละลาย แล้วใช้แรงดันอัดให้ชั้นฟิล์มทั้งสองติดกัน เมื่อปล่อยให้เย็นจะได้รอยปิดผนึกที่แข็งแรงและสมบูรณ์ ดังนั้นในการปิดผนึกด้วยความร้อนจะต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการปิดผนึกให้เหมาะสมกับฟิล์ม นอกจากนี้ความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของรอยปิดผนึกยังขึ้นกับความสะอาดของฟิล์มบริเวณที่ปิดผนึก โดยทั่วไปบริเวณนี้จะมีรอยสกปรกเนื่องจากไอน้ำที่ใช้ในการไล่อากาศ หรือขณะบรรจุร้อน เมื่อกลั่นตัวเป็นหยดน้ำจะทำให้เกิดฟองอากาศในรอยปิดผนึก หากมีขนาดใหญ่เพียงพอจะทำให้เกิดรอยรั่วซึม ซึ่งจุลินทรีย์อาจผ่านเข้าไปได้ และอาหารโดยเฉพาะส่วนของซอส หรือของเหลวอื่น ๆ และอาหารที่มีชิ้นเล็ก ๆ จึงต้องควบคุมขั้นตอนการบรรจุ และการไล่อากาศอย่างเข้มงวด โดยทั่วไปเครื่องปิดผนึกมักจะใช้แถบแผ่นร้อน (hot bars sealer) แต่ระบบการปิดผนึกแบบ impulse sealing จะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง มีจังหวะการทำงานแบบร้อนและเย็นสลับกัน คือ ขณะปิดผนึกจะใช้ความร้อนทำให้ชั้นพลาสติกหลอมติดกัน และจะมีระบบทำให้เย็นติดตั้งอยู่ด้วย เพื่อป้องกันการเกิดความร้อนสูงเกินไป ทำให้ควบคุมอุณหภูมิขณะปิดผนึกได้ สำหรับภาชนะกึ่งคงรูปที่มีความหนามาก ๆ เช่น ถาดพลาสติก หรือถ้วยกระดาษ การปิดผนึกด้วยฝาเปิดลอกหรือฝาปิดที่หนามาก ๆ มักต้องใช้เวลานาน ไม่เหมาะกับการผลิตในอุตสาหกรรม จึงใช้การปิดผนึกด้วยความร้อนที่เกิดจากการสั่นสะเทือน เรียกว่า ultrasonic sealing หรือ ultrasonic welding พลาสติกที่เป็นชั้นปิดผนึกทั้งฝาและถาด ควรเป็นพลาสติกชนิดเดียวกันหรือตระกูลเดียวกัน เช่น ถ้วยกระดาษทำจากวัสดุ PP/paper/Al/CPP ควรใช้ฝา OPET/Al/PP เป็นต้น

2. การปิดผนึกด้วย double seamer ใช้หลักการเดียวกับการปิดฝากระป๋องโลหะ นิยมใช้ปิดถ้วยหรือกระป๋องพลาสติกด้วยฝาโลหะที่มีห่วงดึงให้เปิดได้ง่าย (easy-open, Pull-ring lid) การปิดผนึกที่สมบูรณ์นั้นรอยผนึกจะต้องแน่นสนิท ไม่มีเศษอาหารตกค้างอยู่ในรอยปิดผนึก และรอยปิดผนึกจะต้องเรียบสม่ำเสมอ

การตรวจสอบรอยปิดผนึกของบรรจุภัณฑ์ (inspection of sealed pouches) มักจะกระทำโดยผู้ผลิตเครื่องมือปิดผนึก และผู้ผลิตจำหน่ายบรรจุภัณฑ์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีวิธีการตรวจสอบอยู่ 2 วิธีการ ได้แก่

1. วิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive examination)

1.1) ใช้หลักการสังเกตตรวจสอบด้วยตาเปล่า โดยตรวจสอบรอยผนึกทุกด้านด้วยการบีบบรรจุภัณฑ์จากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง จุดที่สำคัญคือ มุมของบรรจุภัณฑ์ และรอยปิดผนึก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ด้านข้าง ทุกด้านจะต้องไม่มีรอยรั่ว นอกจากนั้นความกว้างของรอยปิดผนึกจะต้องสม่ำเสมอ และมีขนาดเท่ากับที่เครื่องมือกำหนดไว้

1.2) ใช้หลักการบีบ (squeeze test) โดยใช้มือกดไล่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ไปยังรอยผนึกทุกด้าน สังเกตว่ามีอาหารซึมออกมาหรือไม่ และสังเกตการลอกของชั้นของวัสดุที่บริเวณรอยปิดผนึก หากพบลักษณะดังกล่าวให้ทดสอบพับไปพับมาอย่างน้อย 10 ครั้ง แล้วตรวจหารอยรั่ว สำหรับถาดหรือถ้วยให้ใช้แรงกระทำที่ด้านข้างของบรรจุภัณฑ์ทุกด้านพร้อม ๆ กัน ฝาปิดจะต้องโป่งขึ้น สังเกตว่ามีก๊าซหรืออาหารซึมออกมาหรือไม่

2. วิธีการตรวจสอบโดยการทำลายตัวอย่าง (destructive examination)

2.1) ฉีกรอยผนึก (teardown) โดยการเปิดบรรจุภัณฑ์จากรอยผนึกด้านบนและด้านล่าง แล้วตรวจสอบรอยปิดผนึกว่าสม่ำเสมอหรือไม่

2.2) ทดสอบความคงทนของรอยปิดผนึกด้วยความดัน (burst strength) ทำให้บรรจุภัณฑ์ทะลุ โดยเพิ่มความดันเข้าไปในบรรจุภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอประมาณ 30 วินาที ภายใต้สภาวะที่ต้องการศึกษา ถ้ารอยปิดผนึกยังเป็นปกติถือว่าผ่านการทดสอบ

2.3) ทดสอบความแข็งแรงของการยืดตัวของรอยปิดผนึก (seal tensile strength test) เป็นวิธีการวัดความแข็งแรงของรอยปิดผนึกตาม American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยการดึงปลายทั้ง 2 ด้าน ของวัสดุที่เชื่อมติดกันด้วยรอยปิดผนึกที่จะวัดความแข็งแรง ปลายทั้ง 2 ด้านทำมุม 180 องศา บันทึกค่าแรงที่ใช้แยกรอยปิดผนึก และสังเกตลักษณะของการฉีกขาด โดยรอยที่ฉีกขาดจะต้องสม่ำเสมอไม่มีร่องรอยของการปิดผนึกไม่ติด

2.4) ทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (burst strenhth test) เป็นวิธีทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึก โดยการอัดอากาศเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ จนกระทั่งบรรจุภัณฑ์แตกแล้วบันทึกค่าความดัน หรืออัดอากาศเข้าไปด้วยความดันที่กำหนดไว้เป็นเวลา 30 วินาที สังเกตว่าบรรจุภัณฑ์ทนทานได้หรือไม่ สำหรับถาดและถ้วย การทดสอบนี้จะช่วยบอกด้วยว่าฝาปิดนั้นจะเปิดลอกได้ง่าย หรือไม่ หากค่าความต้านทานแรงดันทะลุสูง ฝาจะเปิดลอกได้ค่อนข้างยาก

2.5) การทดสอบด้วยสี (dye penetration test) ใช้ได้ทั้งถุงและถาด นำบรรจุภัณฑ์ที่ปิดผนึกแล้วมาตัดปลายด้านตรงข้ามกับรอยปิดผนึกที่จะตรวจสอบ เทอาหารออกแล้วล้างภาชนะบรรจุให้สะอาด หยดสี (นิยมใช้สารละลาย methylene blue) รอบรอยปิดผนึกด้านใน แล้วปล่อยทิ้งไว้จนสีแห้ง แยกรอยปิดผนึกออกจากกัน แล้วสังเกตคราบของสีบนวัสดุหรือบนปากถ้วย รอยปิดผนึกที่ดีจะต้องไม่พบสีซึมออกไปข้างนอก สีที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ควรเป็นสีที่ละลายในน้ำ (water-based dye) ไม่ควรใช้สีที่ละลายในสารทำละลาย (solvent-based dye) เนื่องจากสารทำละลายบางชนิดอาจจะละลายหรือทำปฏิกิริยากับพลาสติกได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัวที่บรรจุอาหาร แล้วผ่านการฆ่าเชื้อของผู้ผลิตรายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ ทดสอบความทนทานต่อแรงดัน (pressure resistance test) ทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึก (adhesive strength test) ทดสอบการตกกระแทก (falling test) ตรวจวัดอากาศที่หลงเหลือในถุง (measurement of remaining air in the pouch) และการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ เป็นต้น

ข้อดีของบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัว

1. มีความหนาน้อยกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น ทำให้การถ่ายเทความร้อนได้เร็วกว่ากระป๋องหรือแก้ว จึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ลดโอกาสที่จะทำให้อาหารสุกเกินไป (overcook) ทำให้คุณภาพและรสชาติของอาหารดีกว่า มีการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการน้อยกว่า

2. เปิดได้ง่าย จึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์ช่วยเปิด และไม่มีอันตรายจากการเปิดเพื่อบริโภค บางครั้งมีซิปติดอยู่ เพื่อช่วยให้ความสะดวกในการปิดและเปิดใหม่

3. สามารถพิมพ์ลวดลายบนภาชนะได้โดยตรง ทำให้มีความสวยงาม และดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคได้มากกว่า

4. ช่วยลดต้นทุนการขนส่ง เนื่องจากมีลักษณะแบนบาง จึงสามารถขนส่งได้มากขึ้นในแต่ละครั้ง

5. ต้องการพื้นที่เก็บน้อย โดยเฉพาะการเก็บบรรจุภัณฑ์ที่ยังไม่ได้บรรจุ จะใช้พื้นที่เก็บน้อยมากเมื่อเทียบกับกระป๋องเปล่า โดยพื้นที่ของรถพ่วง (trailer) ขนาด 45 ฟุต จะบรรจุกระป๋องขนาด 8 ออนซ์ ได้ 200,000 กระป๋อง แต่บรรจุบรรจุภัณฑ์ทนร้อนชนิดอ่อนตัวได้ 2.3 ล้านซอง

6. ปลอดภัยจากโลหะหนัก และการกัดกร่อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved