

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 พืชตระกูลส้ม

พืชตระกูลส้มพบได้ในแถบหนาวและแถบกึ่งร้อนของซีกโลกเหนือและใต้ส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่ในประเทศอัฟริกาตอนใต้และออสเตรเลีย พืชในตระกูลนี้มีทั้งที่เป็นไม้ยืนต้น ไม้ล้มลุกและไม้พุ่ม ใบมีทั้งชนิดใบเดี่ยวและใบประกอบใบมีทั้งชนิดใบเดี่ยวและใบประกอบ ซึ่งมีลักษณะแบนนูนมีมือและขนนก (เคหการเกษตร, 2538) พืชตระกูลส้มเป็นพืชเศรษฐกิจมานานกว่า 50 ปี พืชตระกูลส้มที่มีความสำคัญทางการค้าแบ่งได้เป็น 8 ชนิดได้แก่ *C. sinensis* เป็นกลุ่มของส้มเกลี้ยงและส้มตรา (orange) *C. paradisi* เป็นกลุ่มของเกรฟฟรุต (grapefruit) *C. reticulata* เป็นกลุ่มของส้มจีนและส้มเขียวหวาน (mandarin) *C. limon* เป็นกลุ่มของมะนาวฝรั่ง (lemon) *C. aurantifolia* เป็นกลุ่มของมะนาว (lime) *C. medica* เป็นกลุ่มของขอมมะนาว มะกรูด (citron) *C. aurantium* เป็นกลุ่มของส้มที่มีรสเปรี้ยว (sour orange) และ *C. grandis* เป็นกลุ่มของส้มโอ (pummelo) (Timmer and Duncan, 1999) แต่โดยทั่วไปแล้วพืชตระกูลส้มจะแบ่งเป็น 4 กลุ่มได้แก่ กลุ่มของส้มเกลี้ยงและส้มตรา (oranges group) กลุ่มของส้มจีนและส้มเขียวหวาน (mandarin group) กลุ่มของส้มโอและเกรฟฟรุต (pomelo and grapefruit group) และกลุ่มของมะนาว (common acid group) (เคหการเกษตร, 2538) พืชตระกูลส้มเป็นที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายในทุกภาคของประเทศไทยโดยเฉพาะในเขตภาคกลางแถบปทุมธานี นครนายก สระบุรี ภาคเหนือแถบจังหวัดเชียงใหม่ เชียงรายแพร่ น่าน เป็นต้น ปัจจุบันมีแนวโน้มการขยายพื้นที่ปลูกไปสู่แหล่งใหม่ๆมากขึ้น เนื่องจากแหล่งเดิมประสบปัญหาอย่างรุนแรงโดยเฉพาะในเรื่องของโรคซึ่งติดมากับกิ่งพันธุ์ที่นำไปปลูก (นิต, 2544) พืชตระกูลส้มที่นิยมปลูกในประเทศไทย ได้แก่ กลุ่มส้มเปลือกอ่อนหรือพวกส้มเขียวหวานและส้มจู (C. reticulata Blanco) เช่น ส้มเขียวหวานบางมด ส้มโชกุน ส้มนัมเบอร์วัน กลุ่มส้มโอ (C. grandis L.) และกลุ่มมะนาว (C. aurantifolia Swingle) (เปรมปรีดี, 2544)

2.2 ส้มเขียวหวาน

เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง เป็นพวกส้มเปลือกอ่อน สามารถปลูกได้ง่าย ขนาดทรงพุ่มประมาณ 4 - 6 เมตรและสูงประมาณ 3.5 - 5 เมตร ผลมีขนาดสูง 5 - 9 เซนติเมตร กว้าง 6 - 8 เซนติเมตร ค่อนข้างกลม แป้นเล็กน้อย บริเวณข้อผลราบถึงเว้าเล็กน้อย ผิวผลเมื่อสุกสีเขียวอมเหลืองถึงเหลืองเข้มถ้าปลูกในที่ที่มีอากาศเย็นผิวผลจะมีสีเหลืองเข้ม เช่นแถบจังหวัดภาคเหนือ

ของประเทศ ผิวผลเรียบมีต่อมน้ำมันใต้เต็มผิวของผล กลีบผลแยกออกจากกันได้ง่าย มีกลีบประมาณ 11 กลีบ มีรกลน้อย กิ่งมีขนาดสั้น น้ำน้ำ เนื้อผลสีส้ม รสชาติหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย มีเมล็ดน้อย 5 - 12 เมล็ดต่อผล ตั้งแต่ออกดอกถึงเก็บผลผลิตได้ใช้เวลา 9 เดือนและเริ่มให้ผลผลิตหลังจากปลูกประมาณปีที่ 3 ขึ้นไป

ส้มเขียวหวานในประเทศไทยพบว่านำเข้ามาปลูกกว่า 100 ปีมาแล้วโดยชาวจีนอพยพ แต่เริ่มปลูกเป็นการค้าจริงจึงเมื่อประมาณ 70 กว่าปีมานี้เอง โดยเริ่มที่บางมดจึงรู้จักกันดีในนามส้มบางมดแต่ต่อมาได้แพร่กระจายไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของประเทศ และเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปมาก พื้นที่ปลูกส้มจึงได้เปลี่ยนไปอยู่แถบจังหวัดปทุมธานี สระบุรีและนครนายกซึ่งถือเป็นแหล่งปลูกที่ใหญ่ที่สุดเนื่องจากมีน้ำชลประทานที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ก็มีแถบน่าน แพร่ซึ่งปลูกกันมานานแล้ว

อย่างไรก็ตามปัจจุบันแหล่งปลูกส้มเขียวหวานได้กระจายไปตามแหล่งอื่นๆของประเทศ ทั้งนี้เพราะปัญหาการสะสมของโรคและแมลงในแหล่งปลูกเดิมซึ่งได้แก่แถบลพบุรี ปราชินบุรี เชียงใหม่ เชียงราย หรือแม้แต่แถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือก็มีการขยายพื้นที่ปลูกกันมากขึ้น

2.2.1 คุณค่าทางอาหาร

ส้มเขียวหวานเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ดังนั้นข้อมูลจากการวิเคราะห์ของกองโภชนาการ กรมอนามัย (2535) พบว่า จากส่วนของผลส้มที่รับประทานได้จำนวน 100 กรัม จะมีปริมาณสารอาหารต่าง ๆ ดังนี้ คาร์โบไฮเดรต 9.9 กรัม โปรตีน 0.6 กรัม ไขมัน 0.2 กรัม แคลเซียม 31 มิลลิกรัม เหล็ก 0.8 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 18 มิลลิกรัม วิตามินเอ 4,000 หน่วยสากล วิตามินซี 18 มิลลิกรัม วิตามินบีหนึ่ง 0.04 มิลลิกรัม วิตามินบีสอง 0.05 มิลลิกรัม เส้นใย 0.2 กรัม ความชื้น 88.7 กรัม และพลังงาน 44 กิโลแคลอรี

2.2.2 ถิ่นกำเนิด

ถิ่นดั้งเดิมของส้มเขียวหวานอยู่ในประเทศจีนและญี่ปุ่น ได้มีการแพร่กระจายไปยังสหรัฐอเมริกาและยุโรป จนขณะนี้ ส้มเป็นพืชชนิดหนึ่งที่ปลูกทั่วไปทั้งในเขตร้อนและกึ่งร้อน

สำหรับประวัติการปลูกส้มเขียวหวานในประเทศไทยเริ่มมีมาตั้งแต่เมื่อใด ไม่มีหลักฐานปรากฏแน่ชัด กล่าวกันว่าบ้านเมืองเราปลูกส้มเขียวหวานมาประมาณกว่า 100 ปีแล้ว โดยเป็นพันธุ์ที่ชาวจีนอพยพได้นำเข้ามาและปลูกเป็นการค้าเมื่อประมาณ 70 กว่าปีที่ผ่านมานี้ ซึ่งปลูกกันมากในเขตตำบลบางมดซึ่งอยู่ในบริเวณเขตราษฎร์บูรณะและเขตบางขุนเทียน ซึ่งส้มเขียวหวานในแหล่งปลูกนี้มีชื่อเสียงในด้านคุณภาพตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันและมักเรียกว่า ส้มบางมด ระยะเวลาจากสภาพบริเวณบางมดที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งปัญหาในด้านน้ำเค็ม น้ำเสียและอื่นๆ ทำให้พื้นที่การปลูกส้มเขียวหวานกระจายออกไปโดยทั่ว เช่น พื้นที่จังหวัดปทุมธานี สระบุรี นครนายก ลพบุรี เป็นต้น โดยเฉพาะในจังหวัดปทุมธานีซึ่งเป็นเขตการ

ชลประทานที่สมบูรณ์แบบในขณะนี้จึงเป็นจังหวัดที่ปลูกส้มเขียวหวานมากที่สุด นอกจากนี้ยังแพร่ไปปลูกในแหล่งอื่นๆอีกด้วย เช่น เชียงใหม่ เชียงราย น่าน แพร่ จันทบุรี ตราด เป็นต้น

2.2.3 สภาพดินฟ้าอากาศ

ส้มเขียวหวานเป็นไม้ผลกึ่งร้อน ไม่ชอบสภาพอากาศที่หนาวจัดหรือร้อนจัดเกินไป สามารถปลูกได้ทุกลักษณะดินที่ไม่มีสภาพน้ำขัง เช่น ดินร่วน ดินร่วนปนทราย หรือดินเหนียวที่ได้ปรับปรุงสภาพให้เหมาะสม มีความอุดมสมบูรณ์และการระบายน้ำดี ดินปลูกควรมีสภาพความเป็นกรด -ด่างประมาณ 5.7 - 6.9 คือ มีสภาพดินปลูกเป็นกรดเล็กน้อยและเนื่องจากเป็นไม้ผลที่ต้องการน้ำอย่างสม่ำเสมอ พื้นที่ปลูกจึงควรมีแหล่งน้ำอย่างเพียงพอด้วย ความเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล ช่วงของอุณหภูมิจะมีผลต่อคุณภาพส้ม เช่น การปลูกในภาคเหนือของประเทศไทยที่มีอากาศเย็น ผิวส้มจะมีสีเหลืองเข้มที่นำรับประทานมากขึ้น

2.2.4 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ส้มเขียวหวานมีชื่อสามัญว่า Mandarin หรือ Tangerine มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus reticulata* Blanco อยู่ในวงศ์ Rutaceae จำนวนโครโมโซม $2n = 18$ และมีลักษณะบ่งชี้ดังนี้

2.2.4.1 การเจริญเติบโต มีทรงต้นสูงประมาณ 2-8 เมตร ทรงพุ่ม มีลักษณะแน่นทึบ จัดเป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก

2.2.4.2 ลำต้น ไม่มีหนาม กิ่งแก่ มีสีเขียวเข้ม ไม่มีขน มีรอยแผลเป็นของใบและต่อมน้ำมันกระจายอยู่ไปทั่ว ลักษณะของกิ่งอ่อนเป็นเหลี่ยมเรียว

2.2.4.3 ใบ เป็นรูปไข่ค่อนข้างยาวหรือรูปโล่หรือรูปหอก ปลายและฐานใบมีลักษณะมน ส่วนปลายสุดของใบมีรอยเว้าเข้า ผิวท้องใบมีสีเขียวอมเหลือง ผิวหลังใบเป็นมันสีเขียวเข้ม ตัวใบมีกลิ่น ก้านใบมีปีกแคบหรือไม่มีปีก มีสีเขียวอมเหลือง ใบมีขนาดเล็ก

2.2.4.4 ดอก มีขนาดเล็กขนาดของดอกตูมมีความยาว 0.5-0.7 เซนติเมตร ดอกบานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 - 2.5 เซนติเมตร ส่วนกลีบของดอกมีสีขาวและมีต่อมน้ำมันกระจายอยู่ แต่ละดอกจะมีจำนวนเกสรตัวผู้อยู่ในลักษณะแยกกันประมาณ 18 - 23 อัน ออกดอกในตำแหน่งซอกใบ เป็นดอกเดี่ยวหรือดอกช่อ

2.2.4.5 ผล มีรูปร่างกลมแบน ผิวเปลือกสีเขียว/เขียวอมเหลืองหรือส้มอมเหลืองจนถึงแดงอมส้ม ลักษณะของผิวเปลือกจะเรียบ มีต่อมน้ำมันอยู่ภายใน ส่วนเปลือกบาง มีความหนาประมาณ 0.2 - 0.3 เซนติเมตร มีกลิ่นหอมแรง เปลือกด้านในมีสีเหลืองอ่อน ภายใน 1 ผลประกอบด้วยกลีบผลจำนวน 10-15 กลีบ แต่ละกลีบมีผนังบาง เนื้อมีน้ำมาก สีส้ม รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย ก้านผลมีขนาดสั้น ขนาดผลแตกต่างกันตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 8 เซนติเมตร และยาว 4 - 7 เซนติเมตร ติดผลในลักษณะห้อยลง

2.2.4.6 เมล็ด รูปร่างแบนรูปไข่หัวกลับ เนื้อเยื่อส่วนสะสมอาหารมีสีเขียวอ่อนหรือสีเขียวมเหลือง จำนวนเมล็ดมีมากน้อยแตกต่างกันในแต่ละกลีบ

2.2.5 พันธุ์ส้มเขียวหวาน

ผิวเปลือกส้มที่มีสีแตกต่างกันสามารถเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงการจำแนกกลุ่มส้มได้ เช่น ผิวเปลือกสีส้มแก่ (tangerine) หรือผิวเปลือกสีเหลือง (mandarin) และสามารถจัดจำพวกของกลุ่มส้มเขียวหวานได้ดังนี้

2.2.5.1 ส้มพองแกน (Ponkan or Honey orange) ผลมีขนาดใหญ่ สุกในช่วงต้นฤดูซึ่งการเก็บเกี่ยวจะต้องขลิบทีละผล ถ้าเก็บเกี่ยวโดยการปลิดผลแล้วเปลือกที่ขั้วผลจะฉีกออกเป็นแผล ผลส้มพันธุ์นี้มีคุณภาพดี ลำต้นตรง กิ่งเปราะหักง่าย โดยเฉพาะช่วงเวลาการให้ผลตกและมักติดผลปีเว้นปี

2.2.5.2 ส้มชักชูมา (Satsuma mandarin) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Citrus unshiu* (Marc.) ลักษณะของพันธุ์นี้ สามารถทนทานต่อสภาพภูมิอากาศทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาวได้ดีมาก ให้ผลคุณภาพดี ไม่มีเมล็ด ผิวเปลือกสีส้มแก่สวยงาม โดยเฉพาะพันธุ์โอวาริ (Owari) เป็นพันธุ์เดียวที่ปลูกเป็นการค้า และมีปลูกมากทางตอนเหนือของฟลอริดา รวมทั้งในประเทศญี่ปุ่นด้วย

2.2.5.3 ส้มออแลนโด (Orlando tangelo) เป็นส้มพันธุ์ลูกผสมระหว่างส้มพันธุ์ต้นแคนกับส้มแดนซี มีลำต้นแข็งแรง สามารถทนต่อสภาพอากาศหนาวได้ดี ลักษณะขอบใบจะห่ออย่างเด่นชัด ผลที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เปลือกผลบางและติดค่อนข้างแน่นกับเนื้อ ผิวเปลือกสีส้ม คุณภาพของผลให้รสชาติดี ทนทานในการขนส่งแต่ผลแก่เร็วในรัฐฟลอริดาเป็นแหล่งที่ปลูกแพร่หลายที่สุด

2.2.5.4 ส้มแทนเจอร์น พันธุ์ที่ปลูกเป็นการค้าได้แก่ คลิเมนไทน์ (Clementine) และแดนซี (Dancy) เป็นผลส้มขนาดกลางค่อนข้างเล็ก ผิวเปลือกผลสีแดงอมส้มแก่เป็นพันธุ์ที่ให้ผลดก ปริมาณผลตอบแทนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยการปฏิบัติดูแลรักษาที่ดี ส่วนของกิ่งมีลักษณะเปราะและหักง่าย ผลส้มมีเปลือกอ่อน พร้อมทั้งเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมกับเขตปลูกที่ร้อนชื้น

2.2.5.5 ส้มคิง (King mandarin) ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus robilis* (Lour.) เป็นพันธุ์ส้มเปลือกอ่อนที่มีผลขนาดใหญ่ที่สุด เปลือกผลมีลักษณะหยาบและค่อนข้างหนา ผิวเปลือกผลและเนื้อผลมีสีเหลืองเข้มหรือสีส้มอ่อน ผลแก่ตอนช่วงปลายฤดูส่วนของเมล็ดสามารถทนต่อสภาพอากาศร้อนได้ ผลส้มพันธุ์นี้จัดได้ว่ามีคุณภาพดีมาก มีปลูกมากในออสเตรเลีย โดยเฉพาะพันธุ์ เอ็มเพเรอร์ (Emperor) นิยมปลูกเป็นการค้าแต่ก็ยังปลูกไม่มากหรือกล่าวได้ว่าไม่เป็นที่นิยมมากนัก

2.2.5.6 ส้มเพจ (Page) เป็นลูกผสมของส้มพันธุ์มินเนโอลากับส้มคลิเมนไทน์ ผลไม่ดกขนาดผลที่ได้สม่ำเสมอ เปลือกผลสีเหลือง เนื้อสีเข้ม รสดีมากแต่ไม่เป็นที่นิยมปลูกกัน

2.2.5.7 ส้มเมอร์คอต (Murcott or Murcott honey) ผลรูปทรงกลมค่อนข้างแบน เปลือกผลบริเวณที่ติดกับขั้วจะยังคงสีเขียวอยู่ ผิวเปลือกโดยทั่วไปเป็นสีส้มแก่แต่ไม่เข้มเท่ากับผลส้มชักชูมา ผิวเปลือกมีลักษณะบาง ทำให้ปอกได้ง่าย

2.2.5.9 ส้มมินเนโอลา (Minneola tangerine) เป็นส้มพันธุ์ลูกผสมที่มีกำเนิดจากส้มออแลนโด ลำต้นแข็งแรง ทนต่อสภาพอากาศหนาวได้บ้าง แต่ไม่ดีเท่าส้มออแลนโด ขนาดใบใหญ่ปลายใบแหลม ให้ผลลักษณะค่อนข้างกลมมีจุดเปลือกผลค่อนข้างหนา แต่ไม่ติดแน่นกับส่วนเนื้อเท่ากับผลส้มออแลนโด ผิวเปลือกมีลักษณะเรียบสีสวย จำนวนเมล็ดต่อผลน้อย รสชาติดี

2.2.5.10 ส้มลูกผสมอื่นๆ ได้แก่ ส้มออสซีโอลา (Osceola) ส้มโนวา (Nova) ส้มลี (Lee) และส้มโรบินสัน (Robinson) เป็นต้น ซึ่งเป็นลูกผสมที่มีน้ำส้มมากและรสชาติดี (เปรมปรีดิ์ , 2542)

2.2.6 พันธุ์ส้มเขียวหวานที่ปลูกในประเทศไทย

การปลูกส้มเพื่อการค้าในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่กลุ่มส้มเขียวหวาน และส้มโอเป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศมีความต้องการสูง แต่การปลูกส้มชนิดอื่นๆ เช่น ส้มตรา ส้มเกลี้ยงและส้มจุกยังคงมีอยู่ในบางพื้นที่ พันธุ์ส้มเขียวหวานที่นิยมปลูกและได้มีการขยายพื้นที่ปลูกแพร่หลายไปในภาคต่าง ๆ มากขึ้นมีดังนี้คือ

2.2.6.1 ส้มเขียวหวานพันธุ์แหลมทอง ส้มเขียวหวานชนิดนี้มีลำต้นขนาดใหญ่ ออกดอกติดผลค่อนข้างยาก ผลมีขนาดปานกลาง รสชาติหวานจัดแม้ผลที่ยังมีอายุไม่ถึงกำหนดการเก็บเกี่ยวก็มีรสชาติไม่เปรี้ยวมากซึ่งต่างจากส้มทั่วไป ส้มชนิดนี้เดิมมีการปลูกกันมากในแถบวัดเพลง ทำสนุนจังหวัดราชบุรี แต่ในปัจจุบันความนิยมในการปลูกได้ลดลงเนื่องจากปัญหาเรื่องการจัดการผลผลิต และมีลูกดกสู้ส้มเขียวหวานธรรมดาไม่ได้

2.2.6.2 ส้มเขียวหวานชนิดพันธุ์ผิวเรียบ ส้มพันธุ์นี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า " ส้มบางล่าง " หรือ " ส้มบางมด " เป็นชนิดที่เกษตรกรนิยมปลูกมากที่สุด เนื่องจากเป็นส้มที่ให้ผลผลิตดก ผลมีขนาดปานกลาง ทรงผลค่อนข้างกลมถึงแป้นเล็กน้อย ก้นผลราบหรือเว้าเล็กน้อย เปลือกบาง ผิวสีเหลืองเข้มหรือเขียวอมเหลือง สีผิวสม่ำเสมอ เนื้อผลสีส้ม ชานนุ่ม ตัวกุ้งมีขนาดสั้น รสชาติหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย ส้มพันธุ์นี้เดิมปลูกกันมากในเขตกรุงเทพฯ แถบบางมด บางขุนเทียน แต่ในปัจจุบันส้มชนิดนี้ได้ถูกนำไปปลูกในหลายพื้นที่ทั่วประเทศโดยเฉพาะในเขตภาคกลางและภาคเหนือ (เรียก " ส้มผิวทอง ") ส่วนในแหล่งปลูกเดิมนั้น เนื่องจากพื้นที่ได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนสภาพไปเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและเขตอุตสาหกรรม รวมถึงได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมจึงเหลือพื้นที่ปลูกอยู่น้อยมาก

2.2.6.3 ส้มเขียวหวานชนิดเปลือกค่อนข้างหนา หรือที่เรียกกันว่า "ส้มบางบน " ส้มชนิดนี้มีผลขนาดค่อนข้างใหญ่ ทรงผลค่อนข้างกลม ผลมีลูกนูนเล็กน้อย เปลือกค่อนข้างหนา ผิวมีสีเขียวหรือเขียวอมเหลือง เนื้อผลสีส้ม รสชาติหวานปานกลาง ส้มชนิดนี้เดิมปลูกกันมากในเขตกรุงเทพฯ บริเวณบางกอกน้อย บางขุนนนท์และบางกรวยจังหวัดนนทบุรี แต่ต่อมาได้มีการนำไปปลูกในแถบรังสิตจังหวัดปทุมธานีและจังหวัดนครปฐมจนเป็นที่รู้จักมาจนถึงปัจจุบัน (เปรมปรีดิ์ , 2544)

2.3 อนุมูลอิสระและผลเสียต่อสุขภาพ

ปัจจุบัน มนุษย์เราให้ความสนใจใส่ใจต่อสุขภาพมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการบริโภค ซึ่งมีการแนะนำให้บริโภคพืชผักสมุนไพรและผลไม้ให้มากขึ้นแทนการบริโภคเนื้อสัตว์ และเป็นวิทยาการใหม่ ๆ ได้ค้นพบว่าโรคหลายชนิดเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเสื่อมสลายของเซลล์และอวัยวะต่าง ๆ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองจากการบวนการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เรียกว่า ออโตออกซิเดชัน (autoxidation) กระบวนการดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลของไขมันจะเรียกกระบวนการออกซิเดชันนี้ว่า ลิพิด เปอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) การเกิดอนุมูลอิสระเริ่มต้นจากโมเลกุลที่เป็นสารตั้งต้นอาจได้รับความร้อน หรือแสง หรือได้รับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลที่เป็นสารรีดิวซิง (reducing agent) เช่น ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์บางชนิดที่กระตุ้นให้สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นอนุมูลอิสระเนื่องจากอนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ไม่คงตัว เมื่อเกิดขึ้นแล้วอนุมูลอิสระ จะดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่น เพื่อให้เกิดความเสถียรมากขึ้น (นวลศรีและอัญชนา, 2545; Akaike *et al.*, 1995; Awika *et al.*, 2003; Briante *et al.*, 2002; Cao *et al.*, 1995; Hauang *et al.*, 2005; Katsube., 2004)

อนุมูลอิสระ คือ กลุ่มของสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอกที่ไม่ครบถ้วนกว่า หรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอน ทำให้โมเลกุลดังกล่าวมีความไวสูงต่อปฏิกิริยา โดยสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในเซลล์ของร่างกาย โดยทั่วไปอนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นระหว่างการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของออกซิเจนหรืออนุพันธ์ของออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species, ROS) ไปยังโมเลกุลของน้ำ สารกลุ่ม ROS ที่สำคัญได้แก่ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, $OH^{\bullet}$) ซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (superoxide anion, $O_2^{\bullet-}$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) ไฮโปคลอไรต์ (hypochlorous, $HOCl$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของสารที่เป็นอนุพันธ์ของไนโตรเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive nitrogenspecies, RNS) ที่สำคัญได้แก่ ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide, $NO^{\bullet}$) และเปอร์ออกซิไนไตรต์ (peroxynitrite, $ONOO^{\bullet}$) เป็นต้น ทั้งกลุ่มของ ROS และ RNS จัดเป็นแหล่งของอนุมูลอิสระที่สำคัญในเซลล์ของร่างกาย (นวลศรีและอัญชนา, 2545; Lee and Hendricks, 1997; Lu and Fu, 2001; Madhavi *et al.*, 1996)

ดังนั้น อนุมูลอิสระจึงมีความไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ เช่น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และกรดนิวคลีอิก เป็นต้น ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีหน้าที่สำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ของเซลล์เมื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระจะทำให้โมเลกุลนั้นสูญเสียหน้าที่ไป ดังนั้นปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระมีผลทำลายสมดุลของระบบต่าง ๆ ในร่างกายเช่นทำลายหน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้โปรตีนต่าง ๆ ในร่างกายไม่สามารถทำงานได้ตามปกติและที่สำคัญที่สุดคือ การที่อนุมูลอิสระดึงอิเล็กตรอนจาก

DNA ซึ่งเป็นสารพันธุกรรมที่สำคัญ โดยเป็นศูนย์รวมของกิจกรรมทุกอย่างในเซลล์ เมื่อดีเอ็นเอ ถูกทำลายหรือสูญเสียหน้าที่ไป จะส่งผลทำให้เกิดเซลล์มะเร็งและเกิดพยาธิสภาพของโรคเรื้อรังต่าง ๆ ได้ (Chen *et al.*, 1997; Madhavi *et al.*, 1996; Matsufuji and Shibamoto, 2004)

โดยปกติร่างกายของคนเราจะมีระบบกำจัดหรือทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นได้ แต่ในสภาวะที่ร่างกายขาดความสมดุลระหว่างปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น และการกำจัดอนุมูลอิสระ หรือในสภาวะที่ร่างกาย ไม่สามารถรักษาระดับของอนุมูลอิสระ ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ร่างกายได้ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวว่า ออกซิเดทีฟ สเตรส (oxidative stress) ก็จะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคภัยไข้เจ็บต่าง ๆ ได้ โรคต่าง ๆ ที่เกิดจากร่างกายมีปริมาณอนุมูลอิสระสะสมอยู่ในระดับสูง เช่น โรคมะเร็ง หลอดเลือดหัวใจ ระบบภูมิคุ้มกันทำงานผิดปกติ ข้ออักเสบ แก่ก่อนวัย ต้อกระจก อัลไซเมอร์ พาร์กินสัน ฯลฯ ภาวะเหล่านี้เราสามารถควบคุมได้ โดยอาศัยสารต้านอนุมูลอิสระ หรือสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระบวนการออกซิเดชันซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระและเกิดผลเสียต่อเซลล์ (Kawaii *et al.*, 1999; Mortensen and Skibsted, 1997; Valentao *et al.*, 2002)

2.4 การป้องกันหรือควบคุมอนุมูลอิสระ

โดยปกติร่างกาย มีระบบควบคุมป้องกันอนุมูลอิสระที่เรียกว่า ระบบแอนติออกซิแดนซ์ (antioxidant defense system) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือใช้เอนไซม์ต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น คาตาเลส(catalase), ซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส(superoxide dismutase, SOD) และ กลูตาไธโอน เปอร์ออกซิเดส(glutathione peroxidase) เป็นต้น และวิธีที่ 2 คือไม่ใช้เอนไซม์ ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบต่าง ๆ และโปรตีนบางชนิดได้แก่ วิตามินซี วิตามินอี เบตาแคโรทีน กลูตาไธโอน (glutathione), ยูเรต (urate), บิลิรูบิน (bilirubin), บิควินอล (biquinol), อัลบูมิน (albumin), คาอีโรพลาสมิน(caeroloplasmin) และทรานส์เฟอริน (transferrin) (นวลศรีและอัญญา, 2545)

การป้องกันหรือควบคุมอนุมูลอิสระสามารถทำได้โดยการใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นแอนติออกซิแดนซ์ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระเหล่านี้ไม่ให้ทำลายองค์ประกอบของเซลล์ สารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากอนุมูลอิสระ สารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีทั้งสารที่ได้จากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ เช่น สารประกอบฟีนอลิก (phenolic) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) วิตามิน เอนไซม์ และโคเอนไซม์ (co-enzyme) บางชนิด เป็นต้น (นวลศรีและอัญญา, 2545)

สารแอนติออกซิแดนซ์ มีสมบัติในการต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่ดูดซับอิเล็กตรอนเดี่ยวจากสารอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระหมดคุณสมบัติที่จะออกซิไดซ์ต่อไปทำให้หยุดปฏิกิริยาถูกใช้ในการทำลายชีวโมเลกุลได้แก่โปรตีน ไขมันและDNA

ในเซลล์ของร่างกายหรือในอาหารและผลิตภัณฑ์ ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจ สารแอนติออกซิแดนท์กลุ่มหนึ่งที่เรียกว่า สารพฤกษเคมี (phytochemical) ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากพืชผัก ผลไม้ เมล็ดและธัญพืช จัดเป็นสารเคมีจากธรรมชาติ เช่น เบตาแคโรทีน แคโรทีนอยด์ วิตามินอี วิตามินซี โพลีฟีนอล ไบโอฟลาโวนอยด์ มีแร่ธาตุบางชนิด เช่น เซเลเนียม และสังกะสี เป็นสารที่ช่วยปฏิกิริยาของเอนไซม์ซึ่งทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระด้วยนอกจากนี้ยังมีการใช้สารสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติในการเป็นสารแอนติออกซิแดนท์เช่น บิเอชเอ (BHA; butylated hydroxy anisole) บิเอชที (BHT; butylated hydroxy toluene) ที่ใช้เป็นสารกันหืนในผลิตภัณฑ์น้ำมันปรุงอาหาร (Akaike *et al.*, 1995; Murakami *et al.*, 2004; Quezada *et al.*, 2004; Simo *et al.*, 2002)

ในอาหารและสิ่งแวดล้อม มีสารอนุมูลอิสระหรือสิ่งก่ออนุมูลอิสระค่อนข้างมาก เช่น อาหารทอด ปิ้งย่าง อาหารที่ปนเปื้อนด้วยสารเคมี สารฆ่าหญ้า ยาต้านมะเร็ง สารฟอกสี สารโลหะบางชนิดและรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นต้น อนุมูลอิสระหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มนุษย์และสัตว์มีการแก่ เนื่องจากการเสื่อมสภาพทางชีวภาพ ภาวะเจ็บป่วย และโรคเรื้อรังทั้งหลายที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสารแอนติออกซิแดนท์มีความสามารถในการต้านทานอนุมูลอิสระ แอนติออกซิแดนท์จึงมีประโยชน์ในการป้องกันหรือชะลอความชรา การต้านทานภาวะผิดปกติจากสารพิษในสิ่งแวดล้อมและการหยุดยั้งการเกิดโรคเนื่องจากสารเคมีที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระได้ (Madhavi *et al.*, 1996; Huang *et al.*, 2005)

สารที่มีสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยทั่วไปจะมีสมบัติข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อต่อไปนี้

- 1) สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (antiradical properties) คือ ความสามารถในการต้านหรือทำลายอนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ รวมทั้ง ROS และ RNS
- 2) สมบัติการต้านปฏิกิริยาไลโปเปอร์ออกซิเดชัน (antilipoperoxidant properties) คือ ความสามารถในการยับยั้งหรือหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัว
- 3) สมบัติการกำจัดออกซิเจน (antioxigen properties) คือ ความสามารถในการกำจัดโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปฏิกิริยาออกซิเดชันหลายชนิด
- 4) สมบัติการจับไอออนของโลหะ (chelating properties) คือ ความสามารถในการจับไอออนของโลหะเช่น Fe^{3+} , Cu^{2+} ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ

ในกรณีของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบสูงนั้นสามารถป้องกันหรือควบคุมได้โดยใช้สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยอาจใช้สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันสังเคราะห์หรือสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจากธรรมชาติ เช่น วิตามินอี วิตามินซีและสารสกัดจากพืชที่มีองค์ประกอบของสารโพลีฟีนอล เป็นต้น (Madhavi *et al.*, 1996)

2.5 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

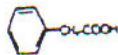
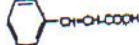
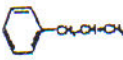
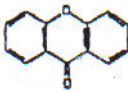
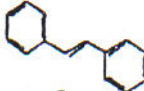
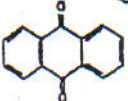
สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) เป็นสารในกลุ่ม secondary metabolite ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในกระบวนการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด ดังนั้นรูปแบบของสารประกอบฟีนอลิกในพืชแต่ละชนิดจึงมีความแตกต่างกันออกไป ในปัจจุบันพบว่า มีสารประกอบฟีนอลิกที่ทราบโครงสร้างแน่นอนแล้วมากกว่า 8,000 ชนิด ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นโพลีเมอร์ เช่น แทนนิน (tannins) ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลิก โดยธรรมชาติจะอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ (glycoside) กล่าวคือ โมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกจะมีโมเลกุลน้ำตาลตั้งแต่ 1 โมเลกุลขึ้นไปจับอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-group) โดยน้ำตาลดังกล่าวอาจจะเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharides) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ก็ได้แต่น้ำตาลชนิดที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกคือกลูโคส (glucose) ส่วนน้ำตาลชนิดอื่นที่พบ ได้แก่ กาแลคโตส (galactose) แรมโนส (rhamnose) ไซโรส (xylose) อะราบิโนส (arabinose) และอนุพันธ์ของน้ำตาลเหล่านี้ เช่น กรดกลูโคโรนิก (glucuronic acid) กรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) และอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบฟีนอลิกด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) กรดอินทรีย์ (organic acids) อะมีน (amines) และไขมันอีกด้วย (วิวัฒน์, 2545)

ความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ต่อการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบฟีนอลิกจากพืชมีมานานดังจะเห็นได้จากการนำสารประกอบฟีนอลิกประเภทต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ในลักษณะของสารฟอกสี (tanning agents) ในกระบวนการผลิตกระดาษ สี และเครื่องสำอาง ตลอดจนการใช้ในลักษณะของสีธรรมชาติ (natural colorants) หรือสารป้องกันการเสื่อมเสีย (preservatives) ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่กำลังหันมาให้ความสนใจกับคุณสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกมากเป็นพิเศษ

สารประกอบฟีนอลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งสามารถพบได้โดยทั่วไป และมีความสำคัญ ประกอบด้วยฟีนอล (phenols, C_6) กรดฟีนอลิก (phenolic acids, C_6-C_1) ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenylpropanoids, C_6-C_3) และฟเลโวนอยด์ (flavonoids) ตัวอย่างของฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล (phenol), ครีซอล (cresol), ไทมอล (thymol), เรโซซินอล (resocinol), ออซินอล (orcinol) และอื่น ๆ ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องเทศ รวมทั้งไฮโดรควิโนน (hydroquinone) และอนุพันธ์ เช่น เออร์บูทีน (arbutine) และเซซามอล (sesamol) และฟลอโรกลูซินอล (phloroglucinol) ด้วย สำหรับตัวอย่างของกรดฟีนอลิก ได้แก่ กรดแกลลิก (gallic acid), กรดวานิลลิก (vanillic acid), กรดไซริงจิก (syringic acid), กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (hydroxy

benzoic acid) และอัลดีไฮด์ของกรดฟีนอลิก เช่นวานิลลิน(vanillin), ไฮดรอกซีเบนซัลดีไฮด์ ไฮริงกัลดีไฮด์ (hydroxybenzaldehyde syringaldehyde) ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในพืชชั้นสูงและเฟิร์น

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างหลักของสารประกอบฟีนอลิกกลุ่มต่าง ๆ

Class	Basic Structure
Simple phenols	
Benzoquinones	
Phenolic acids	
Acetophenones	
Phenylacetic acids	
Hydroxycinnamic acids	
Phenylpropenes	
Coumarins, isocoumarins	
Chromones	
Naphthoquinones	
Xanthenes	
Stilbenes	
Anthraquinones	
Flavonoids	
Lignans, neolignans	
Lignins	

ที่มา : Bravo (1998) อ้างโดยวิวัฒน์ (2545)

2.5.1 สารประกอบฟีนอลิกในอาหาร

สารประกอบฟีนอลิกสามารถพบได้ในอาหารและเครื่องดื่มที่ได้มาจากพืช เช่น ผัก ผลไม้ ธัญชาติต่าง ๆ น้ำผลไม้ ไวน์ เบียร์ ชา และกาแฟ เป็นต้น แต่จะพบในปริมาณที่ต่างกันออกไปในพืชต่างชนิดกัน หรือแม้แต่ในพืชชนิดเดียวกันแต่มาจากสถานที่ผลิตที่แตกต่างกัน เนื่องจากการสร้างสารประกอบฟีนอลิกของพืช จะมีทั้งปัจจัยทางด้านพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้องนอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการปลูก ระดับความสูง กระบวนการแปรรูป หรือแม้แต่วิธีการเก็บรักษาก็ล้วนมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งสิ้น (วิวัฒน์, 2545)

สารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของอาหารจากพืช เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีรสฝาดและขม และมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา โดยจะทำให้อาหารเกิดสีน้ำตาล เกิดการพัฒนากลิ่นรสและมีการสูญเสียสารอาหารบางชนิดได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้อาจเป็นสิ่งที่ต้องการในบางกรณี เช่น การผลิตชาดำหรือโกโก้ แต่อาจเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในบางกรณี เช่น การแปรรูปผักผลไม้ เป็นต้น (วิวัฒน์, 2545)

การรายงานปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกในอาหาร และเครื่องดื่มมีมากมาย แต่ไม่สามารถที่จะนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และความแตกต่างของสารประกอบฟีนอลิกในอาหาร ซึ่งมีความหลากหลายและแตกต่างกันออกไปตามปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วอีกทั้งยังมีสารประกอบฟีนอลิกอีกมากที่ยังไม่ถูกบ่งชี้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในอาหาร ยังไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอและในบางครั้งพบว่ามีความขัดแย้งกันเองเกิดขึ้นได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในอาหารและเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ ที่ได้มาจากพืชไว้ใน ตารางที่ 2.2 (วิวัฒน์, 2545)

2.5.2 เมตาบอลิซึมของสารประกอบฟีนอลิก

มีผลงานวิจัยยืนยันอย่างแน่ชัดว่า สารประกอบฟีนอลิกที่ละลายได้จะสามารถถูกเมตาบอลิซึมได้ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ โดยสารประกอบฟีนอลิกอย่างง่ายที่อยู่ในรูปอิสระเช่น กรดซินนามิก(cinnamic acid) กรดคูมาริก(coumaric acid), กรดเฟอร์ูลิก(ferulic acid), กรดคาเฟอิก(caffeic acid) สามารถถูกดูดซึมได้โดยตรงที่บริเวณผนังลำไส้เล็ก ขณะที่โกลโคไซด์จะต้องถูกย่อยสลายเป็นอะโกลโคโนและน้ำตาลก่อน จึงจะสามารถถูกดูดซึมได้ แต่ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ไม่มีเอนไซม์เบตา-โกลโคซิเดส (β -glucosidases) ที่เหมาะสมโกลโคไซด์จึงมักไม่มีการดูดซึมที่บริเวณลำไส้เล็ก โกลโคไซด์จึงต้องผ่านไปที่บริเวณลำไส้ใหญ่ซึ่งมีจุลินทรีย์ต่าง ๆ ช่วยย่อยสลายให้อยู่ในรูปของอะโกลโคโนก่อนจึงจะดูดซึมที่บริเวณส่วนปลายของลำไส้ใหญ่ (colon) ได้ แต่มีรายงานว่าจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ไม่สามารถที่จะย่อยสารประกอบฟีนอลิกได้

ทุกชนิด ตัวอย่างของสารประกอบฟีนอลิกที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้คือ insoluble condensed tannins ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระทั้งหมด (วิวัฒน์, 2545)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในอาหารและเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากพืช

Food/ Beverage	Total Polyphenols	Food/ Beverage	Total Polyphenols
Cereals (mg/100 g dm)		Fruits (mg 100g fm)	
Barley	1200-1500	Blackcurrant	140-1200
Corn	30.9	Blueberry	135-280
Millet	590-1060	Cherry	60-90
Oats	8.7	Cowberry	128
Rice	8.6	Cranberry	77-247
Sorghum	170-10}260	Gooseberry	22-75
Wheat	22-40	Grape	50-490
Legumes (mg/100 g dm)		Fruits (mg 100g fm)	
Black gram	540-1200	Grapefruit	50
Chickpeas	78-230	Orange	50-100
Cowpeas	175-590	Peach	10-150
Common beans	34-280	Pear	2-25
Green gram	440-800	Plum	4-225
Pigeon peas	380-1710	Raspberry	37-429
Nut (% dm)		Red currant	17-20
Betel nuts	26-33	Strawberry	38-218
Cashew nuts	33.7	Tomato	85-130
Peanuts	0.04	Fruit juices (mg/L)	
Pecan nuts	8-14	Apple juice	2-16
Vegetables (mg 100g fm)		Orange juice	370-7100
Brussels sprouts	6-15		660-1000
Cabbage	25	Beverages	
Leek	20-40	Tea leaves (% dm)	
Onion	100-2025	Green	20-35
Parsley	55-180	Black	22-33
Celery	94	Tea cup (mg/200 mL)	150-210
Fruits (mg 100g fm)		Coffee beans (% dm)	0.2-10
Apple	27-298	Coffee cup (mg/150 mL)	200-550
Apricot	30-43	Cacao beans (% dm)	12-18
		Wine (mg/L)	
		White	200-300
		Red	1000-4000 (6500)
		Beer (mg/L)	60-100

ที่มา : Bravo (1998) อ้างโดยวิวัฒน์ (2545)

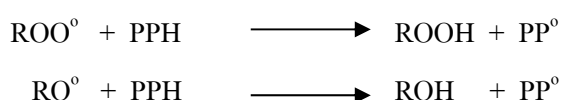
2.5.3 อธิพพลของสารประกอบฟีนอลิกต่อการใช้ประโยชน์สารอาหารของร่างกาย

สารประกอบฟีนอลิมีความสามารถในการรวมตัวและตกตะกอนโปรตีน ซึ่งความสามารถในการรวมตัวกับโปรตีนนั้น เป็นสมบัติของสารประกอบฟีนอลิกทั่วไปและไม่ก่อให้เกิดปัญหาใด ๆ ต่อการย่อยโปรตีนของร่างกายมนุษย์ แต่สารประกอบฟีนอลิกที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ คือ ประกอบด้วยฟีนอลอย่างน้อย 3 หน่วยขึ้นไป สามารถตกตะกอนโปรตีนได้ ทำให้โปรตีนที่ร่างกายได้รับจากอาหารอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ การย่อยสลายโปรตีนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และสารประกอบฟีนอลิกโมเลกุลใหญ่เหล่านี้ยังสามารถรวมตัวกับเอนไซม์ต่างๆ ทำให้เอนไซม์สามารถทำงานได้น้อยลง ซึ่งมีผลกระทบต่อการย่อยสลายโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน นอกจากนี้พบว่าสารประกอบ ฟีนอลิกโมเลกุลใหญ่ยังสามารถรวมตัวกับโพลีแซคคาไรด์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งจะมีผลทำให้ร่างกายนำคาร์โบไฮเดรตไปใช้ประโยชน์ได้น้อยลง ส่วนผลกระทบของสารประกอบฟีนอลิก ต่อเมตาบอลิซึมของไขมันนั้นเป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากที่สุด เนื่องจากพบว่าสารประกอบฟีนอลิกมีผลทำให้มีการขับไขมันออกมาพร้อมกับอุจจาระในปริมาณมากขึ้น มีการศึกษาถึงบทบาทในการลดระดับโคเลสเตอรอลในเลือดของสัตว์ทดลองที่ถูกเลี้ยงด้วยอาหารที่มีแทนนิน กรดแทนนิกและแคทีชินซึ่งการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มปริมาณ HDL (high-density lipoprotein cholesterol) ซึ่งเป็นโคเลสเตอรอลชนิดดีและลดปริมาณ LDL (low-density lipoprotein cholesterol) ซึ่งเป็นโคเลสเตอรอลชนิดเลวลงได้ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีผลมาจากการลดการดูดซึมโคเลสเตอรอลและเพิ่มการขับกรดน้ำดีออกจากร่างกาย ทำให้ร่างกายจำเป็นต้องใช้โคเลสเตอรอลที่มีอยู่ในการสร้างกรดน้ำดีมากขึ้น(วิวัฒน์, 2545)

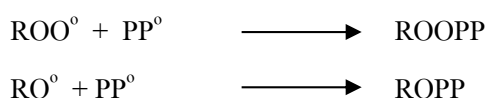
ในกรณีของเกลือแร่ มีรายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกสามารถรวมตัวกับโลหะประจุบวกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของธาตุเหล็กซึ่งเป็นผลมาจากหมู่แคโลอิล (galloyl group)และหมู่แคทีคอลล (catechol groups)ในโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิก จึงพบว่าสารประกอบฟีนอลิกในชาเขียว ชาสมุนไพร ชาดำ กาแฟ โกโก้และไวน์ ล้วนมีผลในการลดการดูดซึมธาตุเหล็กของร่างกายทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกจากถั่วเหลือง ถั่วเขียวและถั่วแดงไม่มีผลต่อการดูดซึมธาตุเหล็กของร่างกาย ส่วนเกลือแร่ชนิดอื่นที่มีรายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทต่อการลดการดูดซึมได้แก่ ทองแดง สังกะสี โซเดียมและอะลูมิเนียม ขณะที่มีการรายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกไม่มีผลต่อการดูดซึมแมกนีเซียม แคลเซียม และแมงกานีส (วิวัฒน์, 2545)

2.5.4 คุณสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิก

คุณสมบัติที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบันของสารประกอบฟีนอลิก คือ การเป็นสารต้านออกซิเดชันและสารต้านการกลายพันธุ์ (antimutagens) และการใช้สารประกอบฟีนอลิกในการป้องกันโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะโรคหัวใจขาดเลือดและมะเร็งโดยสารประกอบฟีนอลิกจะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระและไอออนของโลหะที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่นๆ ด้วยการให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระอย่างรวดเร็ว ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อสารประกอบฟีนอลิก ให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระไปแล้ว อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกจะค่อนข้างมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นต่อไป ยิ่งไปกว่านั้นอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดยังคงสามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นได้อีกด้วย จึงทำให้สามารถลดจำนวนอนุมูลอิสระลงได้ถึง 2 เท่า ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



แต่ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกยังขึ้นอยู่กับระบบด้วยดังนั้นการศึกษาหรือเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวจึงจำเป็นต้องระบุนรายละเอียดของระบบให้ชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งสับสเตรทที่เป็นเป้าหมายของระบบ นอกจากนี้ยังพบว่าในภาวะที่มีสารประกอบฟีนอลิกความเข้มข้นสูง ฟีนอลสูงและมีเหล็กอยู่ด้วย สารประกอบฟีนอลิกอาจจะเป็นตัวเริ่มต้นของกระบวนการออกซิเดชันเสียเองได้ (Bravo, 1998 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545)

สารประกอบฟีนอลิกที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันนั้นสามารถพบได้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เมล็ด (ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง เมล็ดฝ้าย มัสตาร์ด ข้าว และงา) ผล (ได้แก่ องุ่น ส้ม พริกไทยดำและโอลิฟ) ใบ (ได้แก่ ชา และเครื่องดื่มต่าง ๆ) และส่วนอื่นๆ (ได้แก่ มันเทศ และหัวหอม) ส่วนสารประกอบฟีนอลิกอื่น ๆ ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก คือฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ตัวอย่างเช่น ฟลาโวน (flavones), ฟลาโวนอล (flavonols), ไอโซฟลาโวน (isoflavones), แคทีชิน (catechins), ฟลาโวนอน (flavonones) และ คาลโคน (chalcones) เป็นต้น และอนุพันธ์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid derivatives) ได้แก่ กรดคาเฟอิก (caffeic acid), กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid), กรดคาโลโรจีนิก (chlorogenic acid) เป็นต้น โดยจะสามารถพบสารประกอบฟีนอลิกดังกล่าวได้ในเกือบทุกส่วนของพืช แต่จะมีความแตกต่างกันออกไปในด้านของชนิดและปริมาณ ซึ่งอาจสรุปเป็นแนวโน้มได้ดังตารางที่ 2.3 (Pratt, 1992 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545)

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกในส่วนต่าง ๆ ของพืช

ส่วนของพืช	ชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก
ผล	Cinnamic acids > catechins $\approx$ leucoanthocyanins (flavan3,4-diols) > flavonols
ใบ	Flavonols $\approx$ cinnamic acids > catechins $\approx$ leucoanthocyanins
เนื้อไม้	Catechins $\approx$ leucoanthocyanins > flavonols > cinnamic acids
เปลือกไม้	เหมือนในเนื้อไม้แต่จะปริมาณสูงกว่า

ที่มา : Pratt (1992) อ้างโดย วิวัฒน์ (2545)

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลบริสุทธิ์ พบว่า แคลทิน > ไมริเซทิน = อีพิกัลทิน = รุทีน > กรดแกลลิก > เควอร์ซีติน quercetin > ไซยานิดิน (Frankle, 1999 อ้างโดย วิวัฒน์, 2545)

2.5.5 ความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

ความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกในการเป็นสารต้านออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งได้แก่ ความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ แสง เอนไซม์ การรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆ

เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล ในแต่ละตำแหน่งของสารประกอบฟีนอลิก มีบทบาทต่อคุณสมบัติของการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างซึ่งจะมีผลให้หมู่ไฮดรอกซิล เกิดการเปลี่ยนแปลงจึงน่าจะมีผลต่อสมบัติของการเป็นสารต้านออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกด้วยเช่นกัน (Jackman and Smith, 1996 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545)

อุณหภูมิสูงในระหว่างการแปรรูปมีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกโมเลกุลเล็ก ๆ ระเหยกลายเป็นไอไปได้ ในขณะที่เฟลโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างแบบ C6-C3-C6 โดยมีลักษณะเป็นวงแหวน 3 วงต่อกันจะเกิดการแตกของวงแหวน C และสลายตัวต่อไปโดยวงแหวน B จะเปลี่ยนเป็นกรดคาร์บอกซิลิกและวงแหวน A จะเปลี่ยนเป็นคาร์บอกซิลที่ดีไฮด์ตามลำดับ (Jackman and Smith, 1996 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545) และระเหยไปพร้อมกับไอน้ำ (Kim and Smith, 1992 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545)

แสงแดด เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เร่งการสลายตัว หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก เช่น หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ในโมเลกุลของแอนโทไซยานินจะสามารถเรืองแสงและไวต่อการสลายตัวเมื่อโดนแสงแดดนอกจากนี้แสงแดดยังเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนให้เกิดเร็วขึ้นด้วย (Jackman and Smith, 1996 อ้างโดยวิวัฒน์, 2545)

ในสภาพที่มีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase) อยู่ด้วยจะเป็นการเร่งการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดให้เกิดได้เร็วขึ้นแต่อัตราเร่งปฏิกิริยาจะแตกต่างกันออกไป Fu และคณะ (1992) (อ้างโดยวิวัฒน์, 2545) พบว่าโพลีฟีนอลออกซิเดสสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ (-)อีพิแคเทชิน ((-)-epicatechin) ได้ดีกว่า (+) แคเทชิน ((+)-catechin) (วิวัฒน์, 2545)

สารประกอบฟีนอลิกสามารถเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลอื่นๆ เช่น โปรตีน โพลีแซคคาไรด์ อัลคาลอยด์และแอนโทไซยานินได้ง่ายและปฏิกิริยาอาจจะเป็นแบบสามารถผันกลับได้หรือไม่ได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจน ไอออนโลหะเอนไซม์และกรด เป็นต้น ซึ่งจะเป็นตัวการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา เช่น ทำให้สารประกอบในภาวะสมดุลรวมตัวกันและตกตะกอนแยกออกมา หรือเกิดพันธะโควาเลนต์รวมกันเป็นสารใหม่ทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ (Haslam *et al.*, 1992 อ้างโดย วิวัฒน์, 2545) หากปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างไปจะทำให้สารประกอบฟีนอลิกสูญเสียสมบัติในการเป็นสารต้านออกซิเดชันไปได้

2.5.6 บทบาทของสารประกอบฟีนอลิกกับการป้องกันโรคมะเร็ง

โรคมะเร็งสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่ร่างกายได้รับสารเคมี รังสี หรือไวรัสจากสิ่งแวดล้อม สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับของ DNA ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของเซลล์และเนื้อเยื่อขึ้นตามลำดับ และมีรายงานว่า สารประกอบฟีนอลิกบางชนิดมีบทบาททั้งในด้านส่งเสริมและป้องกันมะเร็งได้ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.4 โดยกลุ่มที่มีบทบาททั้ง 2 ด้านดังกล่าวนี้ คือสารในกลุ่มของฟีนอลและแคทาคอล เนื่องจากในสภาพปกติสารดังกล่าวจะเข้าทำปฏิกิริยากับไนโตรที่ทำให้ไนโตรที่หมดสภาพในการเป็นสารก่อมะเร็ง และส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นควิโนน(quinones) ซึ่งสามารถถูกกำจัดออกจากร่างกายได้ด้วยเอนไซม์กลูตาไธโอนทรานส์เฟอเรส (glutathione transferase) ในกระบวนการทางกำจัดสารเคมีแปลกปลอมที่เข้ามาในร่างกาย (xenobiotic metabolism) แต่หากร่างกายได้รับฟีนอลิกและแคทาคอล ในปริมาณสูงมากจนระบบดังกล่าวไม่สามารถกำจัดได้หมด ควิโนน (quinines) จะเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนและก่อให้เกิดอนุมูลอิสระต่าง ๆ ซึ่งเท่ากับมีผลในการส่งเสริมให้เกิดโรคมะเร็งขึ้นได้ในขณะที่สารในกลุ่มโพลีฟีนอลิก จะมีแต่บทบาทในด้านที่เป็นประโยชน์เท่านั้น คือ จะทำหน้าที่ในการกำจัดอนุมูลอิสระ ไนโตร และโลหะ นอกจากนี้ยังมีบทบาทในการต่อต้านไวรัส และช่วยส่งเสริมระบบเอนไซม์ต่าง ๆ ในกระบวนการทางกำจัดสารเคมีแปลกปลอมด้วย (วิวัฒน์, 2545)

ตารางที่ 2.4 บทบาทของสารประกอบฟีนอลิกต่อการเกิดโรคมะเร็ง

บทบาท	ตัวอย่างของสารประกอบฟีนอลิก
Carcinogenic	Catechol, sesamol, caffeic acid, hydroquinone, BHA
Co-carcinogenic	Catechol, caffeic acid, hydroquinone, BHA
Promoting	Phenols, BHA, BHT
Anticarcinogenic	Catechol, quercetin, ellagic acid, chlorogenic acid, BHT, BHA, caffeic acid, tannins, flavanols, other polyphenol

ที่มา : Weisburger (1992) อ้างโดย วิวัฒน์ (2545)

สำหรับกลไกในการป้องกันการเกิดโรคมะเร็งของสารประกอบฟีนอลิกมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสารพฤกษเคมี (phytochemical) อื่น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งสารประกอบฟีนอลิกออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ป้องกันการเกิดสารก่อมะเร็งและการป้องกันการดูดซับสารก่อมะเร็ง
2. ป้องกันไม่ให้สารก่อมะเร็งทำปฏิกิริยากับโมเลกุลเป้าหมาย (blocking agents)
3. ยับยั้งหรือลดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ที่ได้รับสารก่อมะเร็งไม่ให้เปลี่ยนเป็นเซลล์มะเร็ง (suppressing agents)

สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันเป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติในพืช การนำพืชที่มีสารประกอบฟีนอลิกมาใช้เป็นอาหารจึงเท่ากับการเป็นการเพิ่มสารต้านออกซิเดชันให้กับร่างกายด้วยวิธีหนึ่งแต่เนื่องจากข้อมูลในด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับสารประกอบฟีนอลิกในผักผลไม้ของไทยยังมีอยู่น้อย จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์จากผักผลไม้ของไทยในรูปแบบต่าง ๆ ให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น (วิวัฒน์, 2545)

2.5.7 การสกัดสารประกอบฟีนอลิก

การสกัดสารประกอบฟีนอลิกต้องคำนึงถึงส่วนประกอบทั้งหมด เพราะพืชยังประกอบด้วยเซลล์ลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและถ้าเป็นพืชสดจะมีน้ำอยู่ร้อยละ 70-80 นอกจากนี้ยังมีคลอโรฟิลล์(chlorophyll), ไข(waxes), ไขมัน(fats), เทอร์ปีน(terpenes), เอสเทอร์(esters), เกลือที่ละลายน้ำได้(water-soluble salt), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose), น้ำตาล(sugar) และกรดอะมิโน (amino acid) รวมด้วยดังนั้นต้องสกัดสารที่ไม่ใช่ฟีนอลิก (non-phenolic), สารที่ไม่มีขั้ว (non - polar substance) ออกจากพืชด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว (non - polar organic solvent) เช่น ปีโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether), เฮกเซน(hexane), เบนซีน(benzene), คลอโรฟอร์ม(chloroform) หรืออีเทอร์ (ether) หลังจากนั้นจึงสกัดฟีนอลิกด้วยอะซิโตน(acetone), เอทานอล (ethanol) , เมทานอล (methanol) หรือน้ำ การเลือกตัวทำละลาย (solvent) ใด ขึ้นอยู่กับจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล(hydroxyl group) และน้ำตาลในโมเลกุลของสารนั้นๆ (พรณิภาและอ้อมบุญ , 2530)

2.5.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมด (Peter and Simon , 1994)

การตรวจวัดปริมาณโพลีฟีนอลทั้งหมด มีหลักการ คือ วัดปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบทั้งหมดที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุล และไม่คำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบโพลีฟีนอลนั้น ๆ ดังนั้น การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้ จึงไม่มีการระบุชนิดของสารประกอบโพลีฟีนอลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แบบนี้ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบันและยังเป็นต้นแบบของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของโพลีฟีนอลทั้งหมดในรูปของกรดอะมิโนไทโรซีน

การหาปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมดโดยทั่วไปมี 3 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไปและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง การที่จะเลือกใช้วิธีการใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ

2.5.8.1 วิธีที่ 1 Folin - Denis method

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction - oxidation) โดยที่สารประกอบฟีนอลิกลูกออกซิไดซ์ในสถานะที่เป็นด่าง จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไปรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนทังสติก – ฟอสโฟโมลิบดีนิก (phosphotungstic – phosphomolybdic complex) ได้ผลิตภัณฑ์เชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงินและสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร

2.5.5.8 วิธีที่ 2 Folin - Ciocalteu method

เป็นวิธีที่ปรับปรุงและพัฒนาจาก Folin - Denis method ซึ่งมีหลักการของการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ Folin - Denis method แต่จะเพิ่มอัตราส่วนของโมลิบดีนัมและทังสเทนให้มีปริมาณมากขึ้นแล้วใช้สารละลายเกลือ (liquid bromine) ไปออกซิไดซ์ตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนทังสติก – ฟอสโฟโมลิบดีนิกจึงทำให้ผลิตภัณฑ์เชิงซ้อนมีสีน้ำเงินที่สว่างขึ้น

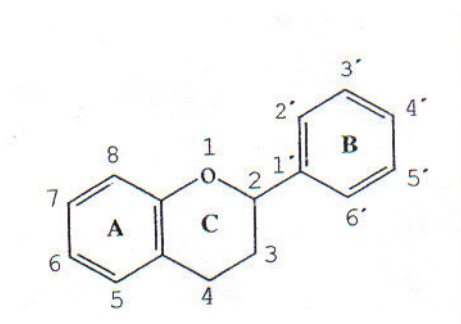
2.5.8.3 วิธีที่ 3 Price - Butler method

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) โดยที่สารประกอบฟีนอลิกลูกออกซิไดซ์ในสถานะที่เป็นด่าง จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไปรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนทังสติก – ฟอสโฟโมลิบดีนิก ได้ผลิตภัณฑ์เชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงินและสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตรซึ่งวิธีการนี้มีวิธีการที่ง่าย สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีการที่ 1 และ 2 เนื่องจากไม่ต้องเตรียมสารเคมีใช้สารเคมีที่สำเร็จรูปแล้ว

2.6 สารประกอบฟลโวนอยด์ (flavonoid compounds)

ฟลโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่กำลังได้รับความสนใจมากที่สุดในขณะนี้ จัดเป็นกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก ที่มีการค้นพบมากที่สุดในบรรดาสารประกอบฟีนอลิกจากพืชทั้งหมด เนื่องจากการค้นพบฟลโวนอยด์แล้วมากกว่า 5,000 ชนิด และมีการจำแนกออกเป็นกลุ่มตามลักษณะโครงสร้างได้ถึง 13 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.5 (วิวัฒน์, 2545)

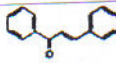
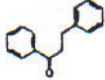
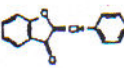
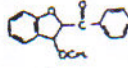
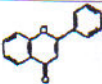
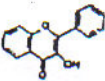
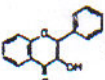
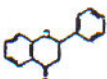
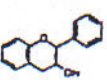
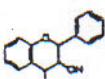
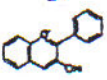
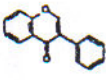
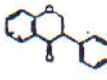
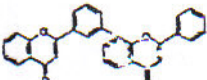
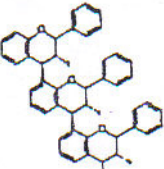
ฟลโวนอยด์มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบไดฟีนิลโพรเพน(diphenylpropanes : $C_6-C_3-C_6$) ประกอบด้วยวงแหวน 2 วงที่เชื่อมกันด้วยคาร์บอนสามอะตอมซึ่งมักจะอยู่ในลักษณะของออกซิเจน hetero เฮเทอโรไซเคิล(oxygenated heterocycle) และมีระบบที่ระบุตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของฟลโวนอยด์ ดังภาพที่ 2.1 โดยทั่วไปฟลโวนอยด์มักถูกพบในลักษณะของอนุพันธ์ของไกลโคไซด์โดยอยู่ในส่วนของอะไกลโคน(aglycone) ในโมเลกุลไกลโคไซด์



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานและการระบุตำแหน่งคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลฟลโวนอยด์
ที่มา : วิวัฒน์ (2545)

ฟลโวนอยด์ มีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดีมาก ในอาหารที่เป็นไขมันและไขมันผสมกับน้ำ และปัจจัยที่ส่งเสริมคุณสมบัติดังกล่าวคือตำแหน่งและจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลและโครงสร้างอื่นๆ ของโมเลกุล ตัวอย่างเช่น หมู่ไฮดรอกซิลของวงแหวน B ซึ่งถือเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการพิจารณาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ในกรณีของฟลโวนอยด์นั้นพบว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง para ($C4'$) จะมีผลให้มีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งออร์โธ(ortho) ($C2'$ และ $C6'$) ในขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งเมทา(meta) จะไม่มีผลต่อสมบัติดังกล่าว นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลที่ $C3$ (วงแหวน A) และ 4-keto group ($C=O$ ที่คาร์บอนตัวที่ 4 ของวงแหวน C) และ/หรือหมู่ไฮดรอกซิลที่ $C5$ (วงแหวน A) และ 4-keto group ในโมเลกุลของฟลโวนอยด์เป็นกลุ่มที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับโลหะซึ่งเป็นการช่วยลดการเกิดออกซิเดชันได้อีกทางหนึ่ง ส่วนหมู่ไฮดรอกซิลของวงแหวน A ที่ตำแหน่งเมทา ($C5$ และ $C7$) และหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง $C3$ และพันธะคู่ระหว่าง $C2$ และ $C3$ ในวงแหวน C อาจมีผลเล็กน้อยต่อคุณสมบัติการเป็นสารต้านออกซิเดชันของฟลโวนอยด์ (วิวัฒน์, 2545)

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลิก 13 กลุ่ม

Flavonoid	Basic Struture
Chalcones	
Dihydrochalcones	
Aurones	 
Flavones	
Flavonols	
Dihydroflavonol	
Flavanones	
Flavanol	
Flavandiols or Leucoanthocyanidin	 
Anthocyanidin	 
Isoflavonoids	
Biflavonoids	
Proanthocyanidins or Condensed tannins	

ที่มา : Brovo (1998) อ้างโดย วิวัฒน์ (2545)

สารประกอบในกลุ่มฟเลโวนอยด์ที่พบมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ฟเลโวน (flavones) เช่น อะพิจินิน (apigenin), ลูทีโอลิน (luteolin), ไดออสเมทิน (diosmetin) และฟเลโวนอล (flavonols) เช่น เควอร์ซิทิน (quercetin), ไมริซิทิน (myricetin), แคมเฟอรอล (kaempferol) รวมทั้งไกลโคไซด์ของทั้งสองชนิด เนื่องจากสามารถพบได้ในพืชเกือบทุกชนิด ยกเว้นในสาหร่ายและ ฟังไจ โดยมีการค้นพบฟเลโวนอล ไกลโคไซด์ (flavonol glycosides) แล้วประมาณ 380 ชนิด และพบเควอร์ซิทิน ไกลโคไซด์ และ แคมเฟอรอล ไกลโคไซด์ แล้วประมาณ 200 ชนิด (วิวัฒน์, 2545)

สำหรับฟเลโวนอยด์ในกลุ่มอื่น ๆ ที่น่าสนใจได้แก่ฟเลวาโนน (flavanones) เช่น นารังจีน (naringenin), เฮสเพอริดิน (hesperidin) ซึ่งพบมากเฉพาะในพืชตระกูลส้มและพ룬 ไอโซฟเลโวน (isoflavones) เช่น เจนิสทิน (genistein), ไดเซอิน (daidzein) ซึ่งพบมากในพืชตระกูลถั่วที่มีลักษณะเป็นฝัก (legumes) ฟลาวานอล (flavanals) เช่น แคทอิซิน (catechin), อีพิกแอทอิซิน (epicatechin), แกลโลแคทอิซิน (gallocatechin) สามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระและเป็นโมโนเมอร์ของคอนเดนซ์แทนนิน (condensed tannin) ในชาและแอนโทไซยานิน (anthocyanins) รงควัตถุที่สามารถละลายน้ำได้ในพืชที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นสารที่แสดงสีของดอกไม้และผลไม้ของพืชชั้นสูงทั่วไปและมีความสำคัญในการพัฒนาสีของไวน์แดงเนื่องจากสามารถรวมตัวกับฟเลโวนอยด์อื่นๆ เกิดเป็นโพลีเมอร์พิกเมนต์ (polymeric pigments) ได้ (วิวัฒน์, 2545; Yen *et al.*, 2001)

2.6.1 ฟเลโวน (flavones)

ฟเลโวน หรือ 2-ฟีนิลเบนโซไพโรน (2-phenylbenzopyrone) ในโมเลกุลมีพันธะคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ฟเลโวนเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี ตัวอย่างเช่น อะพิจินิน (apigenin) ลูเตโอลิน (luteolin) และไตรเซทิน (trisetin) (นิธิยา, 2545)

2.6.2 ฟเลโวนอล (flavonols)

ฟเลโวนอล เกิดจากการที่สารประกอบฟเลโวน มีการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 ตัวอย่างของฟเลโวนอลได้แก่ เควอร์ซิทิน (quercetin หรือ 3,5,7,3,4'-penta-hydroxylflavone) แคมพ์เฟอรอล (kaempferol) และไมริซิทิน (myricetin) อะไกลโคโคนที่เป็นอนุพันธ์ของฟเลโวนและฟเลโวนอลที่ทราบโครงสร้างมีอีกประมาณ 60 ชนิดซึ่งจะแตกต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซีและเมทอกซี (นิธิยา, 2545; Manthey and Guthrie, 2002)

2.6.3 เฟลวานอน (flavanones)

เฟลวานอน มีสูตรโครงสร้างคล้ายฟเลโวนแต่พันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นพันธะเดี่ยว เฟลวานอนเป็นฟเลโวนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้ม ตัวอย่างของไกลโคไซด์ เช่น เฮสเพอริดิน (hesperidin) และนารังจีน (naringin) ที่ pH เป็นด่าง (pH 12) วงแหวนที่อยู่ภายในโมเลกุลของเฮสเพอริดินจะเปิดออกได้เป็นชาลโคน (chalcone) เหมือนการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ชาลโคนจะให้สีเหลืองถึงสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545)

2.6.4 เฟลวานอนอล (flavanonals)

เฟลวานอนอล มีสูตรโครงสร้างคล้ายเฟลโวน แต่มีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 (นิธิยา, 2545)

2.6.5 ไอโซเฟลโวน (isoflavones)

ไอโซเฟลโวน มีสูตรโครงสร้างเช่นเดียวกับเฟลโวน แต่วงแหวนฟีนิลอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 เป็น 3 - ฟีนิลเบโซไพโรน (3-phenylbenzopyrone) (นิธิยา, 2545)

สารประกอบเฟลโวนอยด์ที่มีอะไกลโคนเป็นองค์ประกอบจะเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันและเอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำตาลและบางครั้งก็มีหมู่เอซิลอยู่ในโมเลกุลด้วยเช่นเดียวกับแอนโธไซยานิน เฟลโวนอยด์หลายชนิดมีน้ำตาลที่เป็นโมโนแซคคาไรด์หรือไดแซคคาไรด์อยู่ในโมเลกุลด้วยซึ่งน้ำตาลที่พบคือ กลูโคสและแรมโนส (นิธิยา, 2545)

สารประกอบเฟลโวนอยด์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีความคงตัวต่อความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าแอนโธไซยานิน แต่สามารถเปลี่ยนสีได้ง่ายเมื่อรวมตัวกับโลหะ เช่น เมื่อรวมตัวกับเหล็กจะทำให้สีน้ำเงินหรือสีเขียว นอกจากนี้สารประกอบเฟลโวนอยด์ยังเป็นสารประกอบเริ่มต้นสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ได้ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ไม่พึงประสงค์ในอาหาร ตัวอย่างเช่น หน่อไม้ฝรั่งบรรจุกระป๋องอาจมีเฟลโวนอยด์ ชื่อ รูติน (rutin หรือ quercetin -3 -rhamnoglucoside) สามารถรวมตัวกับเหล็กที่ออกมาจากกระป๋องได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีดำ ทำให้หน่อไม้ฝรั่งมีสีคล้ำได้ แต่ถ้ารวมตัวกับดินก็จะให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลือง (นิธิยา, 2545)

นารินจินเป็นเฟลโวนอยด์ที่มีน้ำตาลนีโอเฮสเพอริโดส (neohesperidose) อยู่ในตำแหน่งที่ 7 และทำให้มีรสขม แต่ไอโซเมอร์ของมัน คือ ไอโซเฟลโวนซึ่งมีน้ำตาลรูติโนสอยู่ในตำแหน่งที่ 7 ไม่มีรสชาติเลย (นิธิยา, 2545)

นีโอเฮสเพอริโดส คือ ไดแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลแรมโนสและกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α (1 $\rightarrow$ 2) ขณะที่รูติโนสเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง α (1 $\rightarrow$ 6) น้ำตาลนีโอเฮสเพอริโดส ที่วงแหวนในโมเลกุลเปิดออกเป็นซาลิโคน อนุพันธ์ที่ได้คือนีโอเฮสเพอริดินไดไฮโดรซาลิโคน (neo - hesperidin dihydrochalcone) ส้มเคราะห์ได้จากนารินจินจะมีความหวานมากกว่าน้ำตาลซูโครสเกือบ 2,000 เท่า (นิธิยา, 2545)

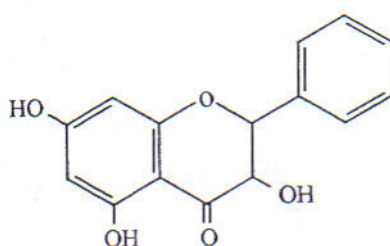
พืชส่วนใหญ่มีรงควัตถุเฟลโวนอยด์ โดยเฉพาะเฟลวานอล เช่น เคอร์ซีตินและแคมเฟอรอลไกลโคไซด์ซึ่งพบว่ามีอยู่ในพืชมากกว่าร้อยละ 50 และมีไมริซีนมากกว่าร้อยละ 10 ของพืชที่ได้มีการศึกษา แต่ปริมาณของเฟลโวนอยด์ในอาหารยังมีรายงานน้อยมาก อาจเนื่องจากยังขาดวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณที่เหมาะสม (นิธิยา, 2545)

2.6.6 เฟลโวนอยด์ในพืชตระกูลส้ม

เฟลโวนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้มแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

2.6.6.1 เฟลวาโนน

เฟลวาโนนที่พบในพืชตระกูลส้ม เช่น นารินจิน เฮสเปอร์ดิน นารินจินิน โครงสร้างของเฟลวาโนนจะไม่มีพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 ในวงแหวน C (C-ring structure) ทำให้มีสมบัติด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งจากการศึกษาของ Das และ Pereira (1993) แสดงให้เห็นว่านารินจินินไม่มีพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 ในวงแหวน C

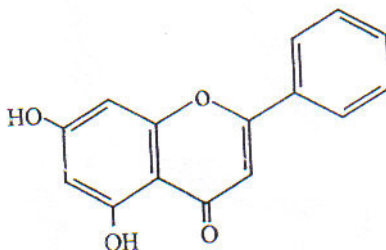


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเฟลวาโนน

ที่มา : Rice-Evans และคณะ (1997)

2.6.6.2 เฟลโวน

เฟลโวน ที่พบในพืชตระกูลส้มมีความเข้มข้นอยู่ในระดับต่ำ พบอยู่ในส่วนของเนื้อเยื่อส้ม (citrus tissue) เช่น อีพิจีนิน (epigenin) ลูทีโอลิน (luteolin) ไดออสเมทิน (diosmetin) และแทนเจอริน (tangeretin) โครงสร้างของเฟลโวนจะขาดหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในตำแหน่งที่ 3 บนวงแหวน C แม้จะพบเฟลโวนในปริมาณน้อยในพืชตระกูลส้ม แต่เฟลโวนก็แสดงสมบัติด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำลายอนุมูลอิสระได้ดี

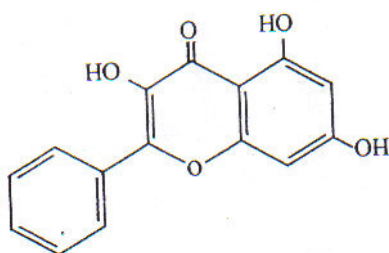


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเฟลโวน

ที่มา : Rice-Evans และคณะ (1997)

2.6.6.3 เฟลโวนอล

เฟลโวนอล ที่พบในพืชตระกูลส้มมีความเข้มข้นอยู่ในระดับต่ำ พบอยู่ในเนื้อเยื่อส้มเช่น เควอร์ซีทิน (quercetin) และแคมเฟอร์อล (kaempferol) เฟลโวนอลจะมีหมู่ 3-ไฮดรอกซี (3-hydroxy) อยู่บนวงแหวน C และ หมู่ 5-ไฮดรอกซี (5-hydroxy) อยู่บนวงแหวน A (A-ring structure) จึงแสดงสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำลายอนุมูลอิสระได้ดีแม้จะพบในปริมาณน้อย



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเฟลโวนอล

ที่มา : Rice-Evans และคณะ (1997)

2.6.6.4 แอนโธไซยานิน

แอนโธไซยานิน สารในกลุ่มนี้เป็นรงควัตถุพบเฉพาะในส่วนของน้ำส้มสีทับทิม (blood orange) ซึ่งมีสีส้มแดง เช่น ไซยานิดิน (cyanidin) พิโอนิดิน (peonidin) เดลฟินิดิน (delphinidin) และพิทูนิดิน (petunidin) สารในกลุ่มนี้พบในปริมาณน้อยและมีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่เด่นชัดเท่าเฟลโวนอยด์ชนิดอื่น

เฟลโวนอยด์เป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันกลุ่มที่สำคัญมากกลุ่มหนึ่งที่พบได้ในพืชตระกูลส้มแต่จะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและการเชื่อมต่อกันด้วยหมู่แทนที่ต่าง ๆ ดังนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

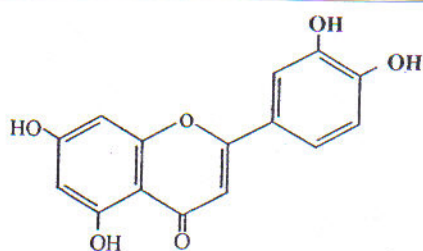
ตารางที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีที่สำคัญและลักษณะการแทนที่ด้วยหมู่ต่าง ๆ บนโมเลกุลของ
เฟลโวนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้ม

Flavonoid	<i>Citrus sp.</i>	C-ring structure ^a	Substitution pattern
Naringin	<i>C. paradisi</i>	FLA	5, 4'-OH
	<i>C. aurantium</i>		7-O-Neo ^b
Neohesperidin	<i>C. aurantium</i>	FLA	5,3',4'-OH
			7-O-Neo
Hesperidin	<i>C. sinensis</i>	FLA	5,3'-OH, 4'-OMe
			7-O-Rut ^b
Diosmin	<i>C. sinensis</i>	FLO	5,3'-OH
	<i>C. limonia</i>		4'-Ome
			7-O-Rut ^b
Rutin	<i>C. limonia</i>	FOL	5,7,3',4'-OH
			3-O-Rut
naringenin	<i>C. paradisi</i>	FLA	5,7,4'-OH
Eriodictyol	<i>C. aurantium</i>	FLA	5,7,3',4'-OH
Hesperetin	<i>C. sinensis</i>	FLA	5,7,3'-OH
			4'-Ome
Apigenin	<i>C. paradisi</i>	FLO	5,7,4'-OH
Luteolin	<i>C. limonia</i>	FLO	5,7,3',4'-OH
	<i>C. aurantium</i>		
Diosmetin	<i>C. sinensis</i>	FLO	5,7,3'-OH
			4'-Ome
Kaempferol	<i>C. paradisi</i>	FOL	5,7,3,4'-OH
Quercetin	<i>C. limonia</i>	FOL	5,7,3,3',4'-OH
Tangeretin	<i>C. aurantium</i>	FLO	5,6,7,8,4'-Ome
	<i>C. paradisi</i>		
	<i>C. limonia</i>		

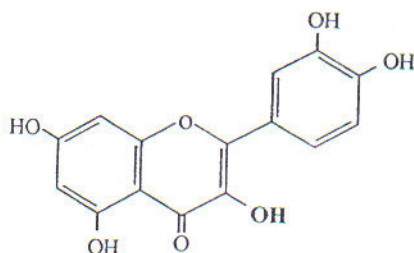
^aFLA, flavanone ; FLO, flavone ; FOL, flavonol. ^bNeo, neohesperidoside ; Rut, rutinoside

ที่มา : Benavente – Garcia และ คณะ (1997)

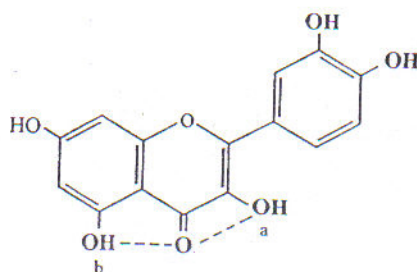
สารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่พบตามธรรมชาติในพืช ส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ซึ่งสมบัตินี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์ โดยฟลาโวนอยด์เป็นสารที่ให้อะตอมของไฮโดรเจนกับอนุมูลอิสระเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของอนุมูลอิสระที่มีความเสถียรมากขึ้นและ/หรือทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้หยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Heo *et al.*, 2004; Kawai *et al.*, 1999; Kawai *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2004; Wanasundara and Shahidi, 1994) นอกจากนี้ฟลาโวนอยด์ยังทำหน้าที่เป็นสารจับกับโลหะไอออนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากฟลาโวนอยด์มีหมู่ออร์โทไดไฮดรอกซิล (ortho - dihydroxyl, 3', 4'-dihydroxy) บนวงแหวน B (B ring structure) และมีหมู่ 4-oxo (C=O) บนวงแหวน C ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟลาโวนอยด์ ดังนั้น การต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟลาโวนอยด์ จะมีประสิทธิภาพดีมาน้อยเพียงใด ขึ้นกับอยู่โครงสร้างของฟลาโวนอยด์นั้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.7



ภาพที่ 2.5 A



ภาพที่ 2.5 B



ภาพที่ 2.5 C

ภาพที่ 2.5 หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของฟลาโวนอยด์ในลักษณะต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา : Benavente-Garcia และคณะ (1997)

ตารางที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันของฟลาโวนอยด์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในพืชตระกูลส้มซึ่งมีผลต่อสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Flavonoid	Type of antioxidant structure				
	A	B	C(a)	C(b)	other
naringin	-	-	-	X	4'-OH
neoeriocitrin	X	-	-	X	
hesperidin	-	-	-	X	3'-OH , 4'-OMe
diosmin	-	X	-	X	3'-OH , 4'-OMe
Rutin	X	X	X ^a	X	
naringenin	-	-	-	X	4'-OH
Eriodictyol	X	-	-	X	
hesperetin	-	-	-	X	3'-OH , 4'-OMe
Apigenin	-	X	-	X	4'-OH
Luteolin	X	X	-	X	
diosmetin	-	X	-	X	3'-OH , 4'-OMe
kaempferol	-	X	X	X	4'-OH
quercetin	X		X	X	
Tangeretin	-	X	-	-	5,6,7,8, 4'-OMe

^aGlycosylated in 3-OH

ที่มา : Benavente-Garcia และคณะ (1997)

- การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนวงแหวน B (ภาพที่ 2.5 A) การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งออร์โธ (ortho, 3') และตำแหน่งพารา (para, 4') บนวงแหวน B จะมีผลทำให้ฟลาโวนอยด์แสดงสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี

- พันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 และหมู่ 4-oxo ของวงแหวน C (ภาพที่ 2.5 B) ซึ่งโครงสร้างที่ตำแหน่งดังกล่าว จะมีผลทำให้สารประกอบในกลุ่มของฟลาโวนอยด์มีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันแตกต่างกันออกไป เช่น แทซิโฟลีน (taxifolin) และนารินจินิน (naringenin) ขาดพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 ไป ทำให้มีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ในระดับต่ำ (Das and Pereira, 1993) นอกจากนี้จากการทดลองของ Ramaswamy และคณะ (1972) ยังพบว่าพันธะคู่ตำแหน่ง 2-3 ในโครงสร้างของฟลาโวนอยด์มีส่วนสำคัญที่ทำให้ฟลาโวนอยด์แสดงสมบัติเป็นสารต้านการเจริญของจุลินทรีย์ด้วย

- หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งที่ 3 บนวงแหวน C และ หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 5 บนวงแหวน A (ภาพที่ 2.5 C) การที่เฟลโวนอยด์มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีผลทำให้มีสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระได้ดี เนื่องจากตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ 4-oxo ของวงแหวน C ซึ่งมีประสิทธิภาพในการให้ไฮโดรเจนอะตอมแก่ลิปิดเปอร์ออกซิลแรดดิคัล (lipidperoxyl radical) (Benavente-Garcia *et al.*, 1997) นอกจากนี้โครงสร้างดังกล่าวยังมีความสำคัญในการจับกับอนุมูลไอออนของโลหะอีกด้วย

2.7 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พบในพืชตระกูลส้ม

เปลือกและเมล็ดพืชตระกูลส้มเป็นแหล่งของสารพฤกษเคมีที่สำคัญมากมาย เช่นวิตามินซี เฟลโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน เมื่อบริโภคส้มในรูปแบบของผลสดก็จะได้รับสารเหล่านี้เข้าไปด้วย ซึ่งสารเหล่านี้มีผลดีต่อสุขภาพ คือ ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ด้านอาการอักเสบ อาการแพ้ต่าง ๆ ด้านไวรัส ด้านการกลายพันธุ์และด้านสารก่อมะเร็ง นอกจากรับประทานในรูปแบบของผลสดแล้ว ปัจจุบันได้มีการศึกษาและสกัดสารพฤกษเคมีจากพืชตระกูลส้ม มาใช้ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรมพบว่า สารในกลุ่มของเฟลโวนอยด์ที่สกัดจากพืชตระกูลส้มให้ผลดีทั้งด้านการแพทย์และเภสัชกรรม จากรายงานของ Nogata และคณะ (1996) พบว่าสารสกัดที่สกัดได้จากส่วนของอัลเบโด (albedo) ของเลมอน ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ไซโคลออกซีจีเนส (cyclooxygenase) และไลพอกซีจีเนส (lipoxygenase) ซึ่งเป็นผลให้สามารถป้องกันการจับตัวเป็นลิ่มของโลหิต (thromobosis) โรคหลอดเลือดแข็งตัว (atherosclerosis) และป้องกันการก่อมะเร็ง เฟลโวนอยด์ 2 ชนิด ที่นำมาใช้ในทางการแพทย์และเภสัชกรรม คือ เฮสเปอร์ดิน (hesperidin) และไดออสมิน (diosmin) ซึ่งเฟลโวนอยด์ทั้ง 2 ชนิดจะเป็นส่วนผสมอยู่ในยาที่ใช้รักษาอาการเจ็บป่วยของคนไข้ โดยจะช่วยลดอาการอักเสบ อาการปวดบวม กำจัดอนุมูลอิสระและเพิ่มภูมิคุ้มกันให้ร่างกาย สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของเฟลโวนอยด์ คือ มีผลด้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และไวรัส เช่น เควอร์เซติน (quercetin) และเฮสเปอร์ดิน มีผลในการยับยั้งการติดเชื้อของไวรัสเริม ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคโปลิโอ ไวรัสไข้หวัดใหญ่ (parainfluenza virus) และไวรัสทางเดินหายใจ (ปาริชาติ, 2543 ; Benavente-Garcia *et al.*, 1997) และจากการศึกษาของ Ramaswamy และคณะ (1972) แสดงให้เห็นว่าไบโอเฟลโวนอยด์ (bioflavonoid) จากพืชตระกูลส้มมีผลด้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ โดยพบว่าโครงสร้างของเฟลโวนอยด์ที่เป็นอะไกลโคนมีสมบัติด้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าเฟลโวนอยด์ไกลโคไซด์ และยังพบอีกว่าพันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 ในโครงสร้างของวงแหวน C มีส่วนสำคัญในการต้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย ซึ่งจากการทดลองนี้ เฟลโวนอลมีผลด้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด ส่วนแนวโน้มของการใช้สารสกัดจากพืชตระกูลส้มในอุตสาหกรรมอาหารนั้น ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อเป็น

สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและน้ำมันในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิก และสารประเภทฟลโวนอยด์ในพืชตระกูลส้มมีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาของนักวิจัยจำนวนมากพบว่า สารประกอบฟีนอลิกจากธรรมชาติและสารประกอบฟลโวนอยด์ มีส่วนช่วยถนอมอาหารและยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นได้และพบว่าสารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบฟลโวนอยด์มีส่วนช่วยทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตด้วย (Milic *et al.*, 1998)

2.7.1 วิตามินซี

วิตามินซีเป็นวิตามินที่ละลายน้ำได้ พบมากในพืชตระกูลส้ม แต่สลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกความร้อน การชะล้างและการหั่น ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการรับประทานส้มสด ๆ จึงจะได้รับวิตามินซีสูงสุด นอกจากนี้การเก็บส้มมาจากต้นนานเกินไปก็จะทำให้สูญเสียวิตามินซีมากขึ้น การทำหน้าที่เป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของวิตามินซีส่วนใหญ่ จะทำหน้าที่ร่วมกับวิตามินอีจึงให้ผลต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี วิตามินซีแสดงสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น บริเวณพันธะคู่ของกรดไขมันโดยทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นด้วยการเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาออกซิเดชันไปเป็นสารที่มีความเสถียรมากขึ้น (Mitsumoto *et al.*, 1991) และจับกับโลหะไอออนที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Frankel, 1996) ในเนื้อเยื่อของพืชวิตามินซีจะทำหน้าที่ปกป้องเซลล์ของพืชโดยการทำลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชัน สำหรับในอาหารวิตามินจะทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนที่เป็นสาเหตุ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและยังทำหน้าที่เป็นสารคีเลต (chelating agent) อีกด้วย ถึงแม้ว่าวิตามินซีจะมีสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี แต่การใช้วิตามินซีก็มีข้อจำกัดด้วย คือ ถ้าใช้ในระดับความเข้มข้นสูงๆและอยู่ในสภาวะที่มีโลหะไอออนอยู่ วิตามินซีจะแสดงสมบัติเป็นสารที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Mitsumoto *et al.*, 1991) พบว่าควรใช้วิตามินซีอยู่ระหว่าง 200 – 1,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จึงจะมีผลต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี

2.7.2 ฟลโวนอยด์

ฟลโวนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้มเป็นสารพฤษเคมีกลุ่มใหญ่ที่สุดและมีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เด่นชัดกว่าสารประกอบกลุ่มอื่นๆ ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยถึงสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟลโวนอยด์เมื่อนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมากมาย และได้ศึกษาถึงโครงสร้างของฟลโวนอยด์ที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้ฟลโวนอยด์แสดงสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้

Ramanathan และ Das (1992) ศึกษาผลของสารโพลีฟีนอลธรรมชาติต่อการควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเนื้อปลาสุกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 สัปดาห์ พบว่าเคอร์ซีทิน (200 ส่วนในล้านส่วน) ไมริซีน (200 ส่วนในล้านส่วน) กรดแทนนิน (30 และ 200 ส่วนในล้านส่วน) และกรดแอสลาจิก (30 และ 200 ส่วนในล้านส่วน) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเนื้อปลาดังกล่าวได้ดี

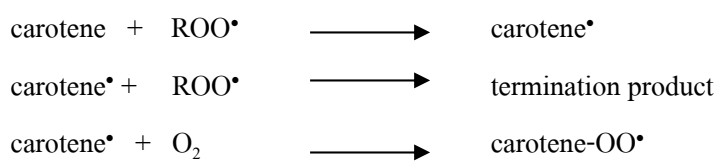
Das และ Pereira (1990) ศึกษาผลของเฟลโวนอยด์ และความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่อการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม พบว่ามอริน(morin) ไมริซีน เคมเฟอร์อล และเคอร์ซีทิน ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเฟลโวนอยด์ มีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีเมื่อใช้น้ำมันปาล์ม และพบว่าโครงสร้างที่มีส่วนสนับสนุนสมบัติการต้านการเกิดออกซิเดชัน คือ จำนวนและตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลที่เข้าแทนที่บนวงแหวน B พันธะคู่ที่ตำแหน่ง 2-3 และการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่ตำแหน่ง 3 และ 5 บนวงแหวน C และ A และหมู่ 4-oxo

Wanasudara และ Shahidi (1994) ศึกษาเสถียรภาพของน้ำมันคาโนล่าต่อการเกิดออกซิเดชันของไขมันเมื่อใช้สารเฟลโวนอยด์ (ไมริซีน อพิเกทิน นารินจิน รูทีน มอริน และเคอร์ซีทิน) เติมน้ำมันคาโนล่าเปรียบเทียบกับ BHA และ BHT โดยศึกษาการเกิดออกซิเดชันของไขมันเป็นเวลา 13 วัน ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าไมริซีนมีผลชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้สูงถึง 15 วัน และยับยั้งการเกิดสารประกอบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ถึง 69% ในช่วงแรก (induction period) ของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมัน เนื่องจากไมริซีนมีจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของวงแหวน B มากเมื่อเปรียบเทียบกับเฟลโวนอยด์ชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลองทำให้ไมริซีนแสดงสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สูงที่สุด

2.7.3 แคโรทีนอยด์ (carotenoids)

แคโรทีนอยด์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่พบได้ในเปลือกและส่วนที่เป็นน้ำของส้ม มีสีเหลืองจนถึงสีส้ม แบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มของแคโรทีน เช่น เบต้าแคโรทีน (β -carotene) และไลโคปีน (lycopene) ส่วนอีกกลุ่มหนึ่ง คือ แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) เช่น เอสธาแซนทิน (asthaxanthin) และเคพธาแซนทิน (canthaxanthin) แคโรทีนอยด์ที่พบในส้มจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ของส้ม ความแก่อ่อน ฤดูกาลและการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว แคโรทีนอยด์ที่พบในเปลือกส้ม เช่น แอลฟาและเบต้าแคโรทีน ลูทีน (lutein) และไวโอลแซนทิน (violaxanthin) เป็นต้น จากการศึกษาของ Curl และ Bailey (1956) พบว่าเปลือกและเยื่อใยของส้มพันธุ์วาลเลนเซียประกอบด้วยแคโรทีนอยด์สูงถึง 60 % และสารประกอบในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่พบมากที่สุดคือ ไวโอลแซนทิน เช่นเดียวกับ Yen และ Chen(1995) ซึ่งทดลองแยกแซนโทฟิลล์จากเปลือกส้ม

ในประเทศไต้หวัน พบว่า ไวโอเลแซนธินเป็นสารที่มีมากที่สุดในเปลือกส้มและเมื่อนำไวโอเลแซนธินที่แยกได้จาก HPLC และสารที่สกัดได้จากเปลือกส้ม มาทดสอบความคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันถั่วเหลืองที่ระดับ 10-50 ส่วนในล้านส่วน เปรียบเทียบกับแอลฟาแคโรทีน เบต้าแคโรทีนและลูทีน พบว่าประสิทธิภาพการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยมีดังนี้ เบต้าแคโรทีน > สารสกัดจากเปลือกส้ม > ไวโอเลแซนธิน > ลูทีน > แอลฟาแคโรทีน ตามลำดับ และจากการทดสอบยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ใช้ ถ้าใช้ความเข้มข้นที่ระดับ 50 ส่วนในล้านส่วนจะมีประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุด แคโรทีนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้ม มีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีโดยจะทำหน้าที่จับกับโลหะหรือช่วยทำลาย singlet oxygen ที่เป็นสาเหตุของปฏิกิริยาออกซิเดชัน แคโรทีนอยด์มีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีเฉพาะในกรณีที่มีความดันออกซิเจนต่ำๆ (15-50 torr) เท่านั้น แต่เมื่ออยู่ในสภาพที่มีความดันออกซิเจนสูงๆ แคโรทีนอยด์ก็จะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้



จากสมการข้างต้น แคโรทีน จะทำปฏิกิริยากับลิปิดเปอร์ออกซิลเรดิคัล (lipid peroxy radical) และเปลี่ยนเป็นแคโรทีนเรดิคัล (carotene radical) ในกรณีที่มีระดับความเข้มข้นออกซิเจนต่ำๆ แคโรทีนเรดิคัล จะอยู่ในสภาวะเสถียร ซึ่งจะแสดงสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี แต่ในกรณีที่มีความดันของออกซิเจนสูงๆ แคโรทีนเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็วเกิดเป็นเปอร์ออกซิลเรดิคัลแคโรทีน (carotene peroxy radical, carotene-OO[•]) ซึ่งสารที่เกิดขึ้นไม่เสถียรสามารถทำปฏิกิริยากับซิสเตรทชนิดอื่น ๆ ได้ อีก เช่น แคโรทีนด้วยกันเองหรือเซลล์เมมเบรนของไขมันซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป อย่างไรก็ตาม สารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่มีการค้นคว้าวิจัยแล้วว่ามีสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เด่นชัดที่สุด คือ ลูทีน ไลโคปีน และเบต้าแคโรทีน โดยมีรายงานว่าสารเหล่านี้มีสมบัติยับยั้งการเกิดโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ในน้ำมันที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ได้ดี

2.7.4 กรดฟีนอลิก

กรดฟีนอลิก เป็นสารอีกกลุ่มหนึ่ง ที่พบได้ในพืชตระกูลส้ม เช่น คุมาริน (coumarin) ฟิคุมาริน (p-coumarin) เฟอรูลิก (ferulic) คาเฟอิก (caffeic) ซินนามิก (cinnamic) เป็นต้น กรดฟีนอลิกที่พบในพืชตระกูลส้มส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่จับกับสารประกอบชนิดอื่นๆ

พบมากในส่วนของเปลือก แต่จะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ สภาพภูมิอากาศและความแก่สุกของส้ม (Gorinstein *et al.*, 2001) กรดฟีนอลิกมีสมบัติด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันคล้ายกัน นอกจากนี้ กรดฟีนอลิกยังมีสมบัติทางด้านเภสัชศาสตร์ด้วย เช่น ช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจ และยับยั้งการดูดซึม Cu^{2+} ที่มีส่วนไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไลโปโปรตีน ที่มีความหนาแน่นต่ำ (LDL) ในร่างกายมนุษย์

2.8 สมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารสกัดจากพืชตระกูลส้ม

พืชตระกูลส้มเป็นพืชที่ประกอบด้วยสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมากมายโดยเฉพาะสารประกอบในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ ดังนั้นจึงมีผู้สนใจศึกษาสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารที่สกัดได้จากส่วนต่างๆของพืชตระกูลส้มและความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารดังนี้

ประพันธ์ ปิ่นศิริโรคมและวันทนี ช้างน้อย (2545) ศึกษาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและศักยภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารสกัดจากเมล็ดพืชตระกูลส้มชนิดต่าง ๆ ที่ปลูกในประเทศไทยโดยใช้เอธานอลเป็นตัวสกัด พบว่า เมล็ดส้มเขียวหวานมีปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกสูงที่สุด รองลงมาคือเมล็ดส้มฟริมองต์ ส้มโชกุน ส้มสายน้ำผึ้ง ส้มโอขาวน้ำผึ้ง ส้มโอทองดี และมะนาว ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานอีกว่าสารสกัดจากเมล็ดส้มสายน้ำผึ้งมีความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือเมล็ดส้มเขียวหวาน ส้มฟริมองต์ ส้มโอทองดี มะนาว ส้มโชกุนและส้มโอขาวน้ำผึ้ง ตามลำดับ

Benavente- Garcia (1995) รายงานว่าสารประกอบฟลาโวนอยด์จากพืชตระกูลส้มมีความสามารถในการยับยั้งและ/ หรือทำลายโมเลกุลต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุสำคัญของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ซิงเกิ้ลทออกซิเจน อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอนุมูลไฮดรอกซี เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (autoxidation) ที่เกิดขึ้นในกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันอิ่มตัวสายยาว

Bocco และคณะ (1998) ศึกษาสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารสกัดจากเปลือกและเมล็ดของพืชตระกูลส้มชนิดต่าง ๆ โดยใช้ตัวละลายอินทรีย์ 2 ชนิดในการสกัดได้แก่ เมธานอลและเอทิลอะซิเตต พบว่าสารสกัดจากเมล็ดโดยทั่วไปจะมีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันดีกว่าสารสกัดจากเปลือก นอกจากนี้สายพันธุ์ของพืชตระกูลส้มที่ต่างกันจะให้สารสกัดจากเมล็ดและเปลือกที่มีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันต่างกันด้วย สำหรับชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้มีผลต่อกลุ่มของสารประกอบที่ถูกสกัดออกมาแตกต่างกันโดยสารสกัดที่ได้จากการใช้เมธานอลจะมีองค์ประกอบของฟลาโวนและไกลโคไซด์ที่เทท ฟลาวาโนน เป็นส่วนใหญ่ในขณะที่สารสกัดที่ได้จากการใช้เอทิลอะซิเตตสกัดจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น

กรดฟีนอลิกและฟลาโวนอล อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับชนิดหรือองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกในสาร สกัดดังกล่าว

Gorinstein และคณะ (2001) ศึกษาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบ อื่น ๆ ที่มีสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารสกัดจากเปลือกและผลของพืชตระกูลส้ม ชนิดต่าง ๆ พบว่าในส่วนของเปลือกจะมีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าผล และสารสกัดจากเปลือกยังแสดงสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าสารสกัดจากผลของ พืชตระกูลส้มทุกชนิดที่ใช้ในการทดลอง

Jamilah และคณะ (1998) ศึกษาการใช้สารสกัดจากเปลือกมะกรูด (*Citrus hystrix*) ใน น้ำมันปาล์มโอลลีนที่ใช้ทอดอาหาร พบว่าการใช้สารสกัดที่ระดับ 2,000 ส่วนในล้านส่วน และ สาร BHT 200 ส่วนในล้านส่วน เติมนลงในน้ำมันปาล์มโอลลีนที่ใช้ทอดข้าวเกรียบปลาที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 5 ชั่วโมง/วัน เป็นเวลาติดต่อกัน 4 วัน พบว่าสารสกัดจาก เปลือกมะกรูดแสดงสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Larrauri และคณะ (1996) ศึกษาสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงเชื้อยีสที่ได้ จากส้มพันธุ์วาเลนเซีย (*Citrus sinensis*) และเปลือกมะนาวพันธุ์เพอร์ซา (*Citrus aurantifolia*) โดยติดตามประสิทธิภาพการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของกรด ลิโนเลอิกที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับวิตามินอี และ BHT พบว่าประสิทธิภาพ การต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของ BHT ดีที่สุด รองลงมา คือ เปลือกมะนาวพันธุ์เพอร์ซา วิตามิน อีและเปลือกส้มพันธุ์วาเลนเซีย ตามลำดับ และเมื่อนำผงเชื้อยีสทั้ง 2 ชนิดมาแยกโดยใช้ HPLC สารประกอบโพลีฟีนอลที่เป็นองค์ประกอบในผงเชื้อยีสทั้ง 2 ชนิด คือ กรดคาเฟอิก กรดเพอรูสิก นารินจิน เฮอร์เปอร์ดิน และไมริซิทีน ส่วนในเปลือกมะนาวพันธุ์เพอร์ซาจะมีสารประกอบที่ แตกต่างจากเปลือกส้มพันธุ์วาเลนเซีย คือ กรดแอลลาจิก เควอร์ซีทีนและเคมเฟอรอล ซึ่ง สารประกอบดังกล่าว เป็นสารที่แสดงสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี จึงทำให้เปลือกมะนาว พันธุ์เพอร์ซาแสดงสมบัตียับยั้งการเกิดออกซิเดชันของกรดลิโนเลอิกได้ดีกว่าเปลือกส้มพันธุ์ วาเลนเซีย

Tanizawa และคณะ (1992) ศึกษาสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจากส่วนต่าง ๆ ของส้มทั้งหมด 20 สายพันธุ์ โดยใช้วิธีทดสอบการเกิดเปอร์ออกไซด์ของไขมันในไมโครโซม (rat liver microsomal) ที่ก่อให้เกิดไดไฮโดรนิโคตินาไมอะดีนีนไดนิวคลีโอไทด์ฟอสเฟต (dihydronicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH) และอะดีโนซีนไดฟอสเฟต (adenosine diphosphate, ADP) พบว่าส่วนเอกโซคาร์ป (exocarp) ของส้มมีสมบัติการต้าน ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าซาโคคาร์ป (sacocarp) ของส้ม ที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกรกฎาคมถึง สิงหาคม และพบว่าส้มเขียวหวาน (*Citrus reticulata* Blanco) ที่เก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคมมี สมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันดีที่สุด

William และ Harris (1985) ศึกษาสมบัติการเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของส้มพันธุ์ *Citrus Sinesis*(L.) *Osbeck* โดยนำากส่วนที่เหลือจากการคั้นน้ำส้ม (ส่วนของเยื่อใยและเปลือก) มาบดและทำให้แห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากนั้นนำากากส้มที่มีลักษณะเป็นแป้ง (flour) มาเติมลงในมีทโลฟปริมาณ 3 และ 7% โดยน้ำหนัก พบว่า สามารถลดการเกิดกลิ่นหืนในมีทโลฟที่ผ่านการทำให้สุกที่เก็บรักษาแบบแช่แข็งและแบบแช่เย็น แต่ไม่มีผลในมีทโลฟดิบและเมื่อทดสอบสมบัติการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธีแคโรทีน บลิชชิง (carotene bleaching) พบว่าากากส้มทำแห้งที่สกัดได้โดยใช้เมธานอลมีผลด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีแต่สารประกอบที่มีผลต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ได้ระบุอย่างชัดเจน