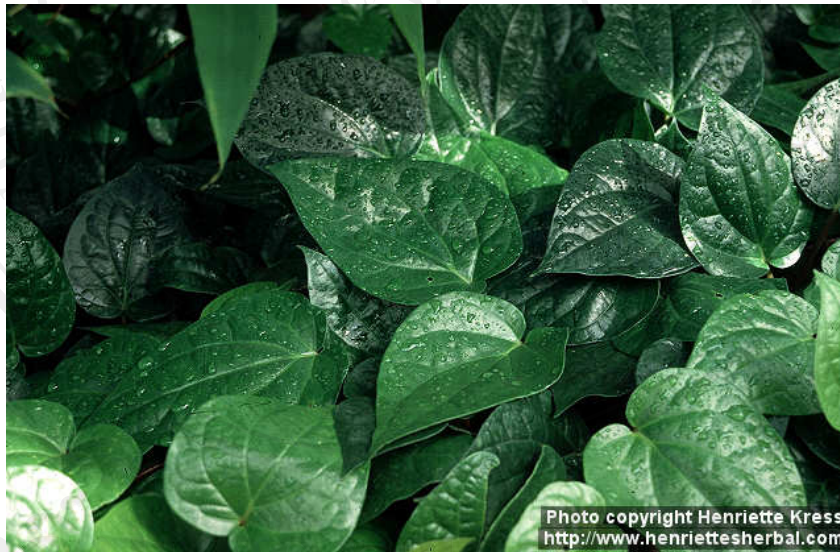


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลู

รุ่งรัตน์ (2540) ได้อธิบายเกี่ยวกับพลูไว้ดังนี้ พลู เป็นพืชพวกสมุนไพรมงคลชนิดหนึ่ง มีชื่อท้องถิ่นว่า ซีเก๊ะ(นราธิวาส) พลูจีน บลู เปล่ายวน ซีเก ดิปลีเชือก ดิปลี(ภาคใต้) มีชื่อสามัญว่า Betel leaf, Betel vine และ Betel pepper และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Piper betel* Linn. วงศ์ Piperaceae ลักษณะเป็นไม้เถาเลื้อย มีใบเป็นรูปหัวใจ ดังแสดงใน รูป 2.1



รูป 2.1 พลู

ที่มา : Henriette's Herbal Homepage (2001)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ราก พลูมีรากแบบระบบรากฝอย (fibrous root system) เนื่องจากมักจะนิยมปลูกโดยวิธีการปักชำ รากมี 2 ชนิดคือรากหาอาหารและรากยึดเกาะ ซึ่งรากหาอาหารจะอยู่ในดินทำหน้าที่ดูดน้ำและอาหารจากดินมาเลี้ยงลำต้น มีรากขนาดใหญ่ประมาณ 6 ราก และมีรากแขนงแตกแยกออกไปเป็นวงกว้างตามขนาดของทรงพุ่มและจะหยั่งลึกลงไปใต้ดิน ส่วนรากยึดเกาะบางครั้งเรียกว่ารากดินตุ๊กแก จะแตกออกตามข้อหรือปล้อง ทำหน้าที่ยึดเกาะกับเสาหรือหลักหรือวัตถุค้ำยันเพื่อให้ลำต้นสูงขึ้นและไม่ให้ลำต้นหลุดร่วงออกได้ง่าย

ลำต้น เป็นไม้เถาเลื้อยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 – 5 มิลลิเมตร ลักษณะของลำต้นอวบหนา มีร่องเล็ก ๆ สีน้ำตาลยาวขนานไปตลอดลำต้น สันร่องมีสีเขียว จะเจริญยึดเกาะกับเสาหรือไม้ค้ำยันหรือหลัก

ใบ เป็นใบเดี่ยว รูปร่างเป็นรูปไข่หรือรูปหัวใจ ฐานใบมนหรือค่อนข้างกลม พื้นโคนใบทั้งสองข้างมีขนาดเท่ากันบ้าง ไม่เท่ากันบ้างขึ้นอยู่กับพันธุ์ ใบมีขนาดความยาวประมาณ 6 – 17.5 เซนติเมตร และกว้างประมาณ 3.5 – 10 เซนติเมตร ปลายใบแหลม ผิวใบเรียบ ผิวใบด้านบนมีสีเขียวเข้มกว่าผิวใบด้านล่าง มีเส้นใบประมาณ 5 – 7 เส้น เส้นใบด้านบนจะโน้มลงไปตลอดแผ่นใบ ส่วนผิวใบด้านล่างจะนูนออกมาเห็นได้ชัดเจน

ดอก ดอกเพศผู้และดอกเพศเมียจะแยกกันคนละดอก และมักจะบานไม่พร้อมกันจึงมีโอกาสดึงดูดแมลงผสมพันธุ์จากการผสมพันธุ์จากเกสรเพศผู้น้อยมาก ดอกมีขนาดเล็กสีขาว ไม่มีก้านรูปร่างของดอกเป็นรูปทรงกระบอก ดอกออกเป็นกลุ่มเรียงอยู่บนก้านช่อดอกยาวประมาณ 5 – 15 เซนติเมตร

เมล็ด รูปร่างยาวรีคล้ายรูปไข่ มีขนาดความยาวประมาณ 2.25 – 2.6 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร

2.1.2 พันธุ์พืชนิยมปลูกกันในประเทศไทย

พืชนี๊ว เป็นพืชนิยมปลูกที่มีใบขนาดใหญ่ป้อมๆ มีสีเขียวเข้มและรสเผ็ดมากกว่าพันธุ์อื่น จำนวนใบต่อต้นน้อย ไม่ค่อยตกและมีราคาถูก นิยมนำไปทำพืชนาบคือนำไปทาบด้วยความร้อนให้ใบแห้งเพื่อเก็บไว้กินได้นานๆ

พืชนาวหรือพืชนวล เป็นพืชนิยมปลูกที่มีใบขนาดปานกลาง แต่มีขนาดเล็กกว่าพืชนี๊ว มีใบหนา กว่าพืชนี๊ว ลักษณะคล้ายใบพริกไทย ปลายใบแหลม ใบมีสีเขียวออกนวล เส้นใบทางด้านหลังมีสีเขียวใส พืชชนิดนี้รสไม่เผ็ดมาก จึงเป็นที่นิยมของผู้บริโภค

พืชน้องหรือพืชนอง เป็นพืชนิยมปลูกที่มีใบขนาดเล็กกว่าพืชนวลเล็กน้อย ใบมีลักษณะบาง เหมือนพืชนี๊ว แต่ปลายใบเรียวเหมือนพืชนวล ใบมีสีเขียวเหลือง ใบไม่เผ็ดมากนักและเป็นที่นิยมของผู้บริโภคแต่การดูแลรักษาพืชน้องนี้ยากกว่าพันธุ์อื่น

การขยายพันธุ์พืชน้อง ส่วนใหญ่ใช้ยอดปักชำและอาจใช้ใบที่มีตาติดหรือข้อชำได้

2.1.3 แหล่งปลูกพืชนิยมในประเทศไทย

พืชนิยมปลูกที่ปลูกให้ผลตอบแทนเร็วและลงทุนค่อนข้างต่ำ พื้นที่ทุกภาคของประเทศไทยเหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืชนิยม จังหวัดที่ปลูกพืชนิยมมากคือ ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี นครนายก นครปฐม ขอนแก่น นครราชสีมา อุดรธานี และอุบลราชธานี

2.1.4 การจำหน่าย

พืชนิยมมีการจำหน่ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ การจำหน่ายภายในประเทศจะทำโดยเอาใบพืชนิยมมาเรียงซ้อนกันและมัดพืชนิยมเป็นกำให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปบรรจุถุงและพืชนิยมให้ชุ่ม ส่วนการจำหน่ายใบพืชนิยมส่งออกสู่ต่างประเทศมี 2 ลักษณะคือ พืชนิยมสดและพืชนิยมอบ แต่ส่วนใหญ่เป็นการส่งออกพืชนิยมสด พืชนิยมที่ส่งออกส่วนใหญ่ส่งไปประเทศปากีสถาน

2.1.5 คุณสมบัติ

1. มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อโรคที่ทำให้เกิดหนองที่แผลหรือฝี ลดอาการอักเสบของแผล มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ใช้รักษาอาการอักเสบของเยื่อจมูกและคอ ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อวัณโรค แก้วไอและขับเสมหะ มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคกลากเกลื้อนและฮ่องกงฟุต ช่วยลดอาการคัน
2. รักษาและบรรเทาความเจ็บปวดของอาการเคล็ด ขัด ขอก
3. น้ำมันหอมระเหยจากใบพลูช่วยลดอาการเกร็งของลำไส้
4. ใช้รักษาอาการท้องอืด ท้องเฟ้อ
5. มีฤทธิ์กระตุ้นสมองอ่อนๆ ทำให้รู้สึกกระปรี้กระเปร่า สมองแจ่มใส
6. รักษาแผลซ้ำววม รักษาลมพิษ รักษาเลือดกำเดาไหล และเป็นยาชาเฉพาะที่
7. ใช้ห้ามเลือด ช่วยให้แผลหายเร็ว
8. ใช้กันเหินหรือกลิ่นเหม็นในน้ำมันพืชหรือน้ำมันหมู

มีรายงานการวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับใบพลู พบว่าในใบพลูอุดมไปด้วยวิตามินเอ วิตามินซี และสารฟีนอลิก ได้แก่ chavicol (Amonkar *et al.*, 1986), chavibetol, chavibetol acetate (Rimando *et al.*, 1986) และ eugenol (Nagabhushan *et al.*, 1989) ในปี 2007 Pichaon *et al.* ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณสารฟีนอลิก และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของพืชพื้นบ้านไทยบางชนิด พบว่าใบพลูมีสารฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 57.5 ± 0.6 mg GAE/g dw สารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดเท่ากับ 14.9 ± 0.1 mg RE/g dw และความสามารถในการต้านออกซิเดชันเท่ากับ 0.32 ± 0.00 (EC₅₀, µg/µg DPPH) จากรายงานการวิจัยของ Lakshmi *et al.* (2006) พบว่า สารสกัดจากใบพลูด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระดีกว่าบีเอชที และเมื่อเก็บสารสกัดจากใบพลูด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 น้ำมันพลู และสารสกัดจากใบพลูด้วยน้ำร้อน เป็นเวลา 12 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง (29 ± 1 องศาเซลเซียส) ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างจากวันแรกของการเก็บ นอกจากนี้ยังมีรายงานการวิจัยพบว่า สายพันธุ์ของใบพลูในประเทศอินเดียมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยสายพันธุ์ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง คือ Kauri รองลงมาคือ Ghanagete และ Bagerhati ตามลำดับ (Nabasree and Bratati, 2004) การใช้ประโยชน์จากใบพลูนั้นนิยมใช้ในรูปของสารสกัดและน้ำมันพลู โดยส่วนใหญ่นำไปใช้ในด้าน antiseptic มีงานวิจัยที่ทำการศึกษถึงประสิทธิภาพของสารสกัดพลู และน้ำมันพลูในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคผิวหนังบางชนิด ผลการศึกษาพบว่า สารสกัดพลูมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ

Staphylococcus epidermidis ได้ดีกว่าน้ำมันพลู แต่มีประสิทธิภavnน้อยกว่าสารมาตรฐาน erythromycin ส่วนผลการทดลองกับเชื้อราพบว่า สารสกัดพลูและน้ำมันพลูมีประสิทธิภavnในการยับยั้งการเจริญและฆ่าเชื้อ *Trichophyton mentagrophytes* ส่วนเชื้อ *Trichophyton rubrum* ให้ผลในการยับยั้งการเจริญโดยมีประสิทธิภavnดีกว่าสารมาตรฐาน amphotericin B แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้ในความเข้มข้นที่ทำการทดลอง (อุดมลักษณ์ และคณะ, 2553) น้ำมันหอมระเหยที่สกัดจากใบพลูมีส่วนประกอบทางเคมีหลายชนิด คือ chavicol ร้อยละ 7.2 – 16.7 Chavibetol ร้อยละ 2.7 – 6.2 Eugenol ร้อยละ 26.8 – 42.5 P-Cymene ร้อยละ 1.2 – 2.5 Cincole ร้อยละ 2.4 – 4.8 Eugenol methyl ether ร้อยละ 4.2 – 15.8 Caryophyllene ร้อยละ 3.0 – 9.8 และ Cadinene ร้อยละ 2.8 – 8.8 (ส่วนวิจัยเกษตรกรรม, 2532) ในปี 2551 อรัญญา และคณะ ได้ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของน้ำมันหอมระเหยสกัดจากสมุนไพรไทยจำนวน 13 ชนิดเพื่อใช้ทางเครื่องสำอาง พบว่า เฉพาะน้ำมันพลู และน้ำมันกะเพรามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเทียบเท่าสารมาตรฐานไวตามินอี และไวตามินซี วัชร (2551) ได้ศึกษาเปรียบเทียบถึง ประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยของสมุนไพรที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียและฤทธิ์ด้านการอักเสบ ได้แก่ พลู ตะไคร้หอม ตะไคร้บ้าน ขมิ้นชัน ไพล และมะกรูด พบว่า น้ำมันหอมระเหยสามารถฆ่าเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมาในนมได้ในประสิทธิภาพที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันหอมระเหยที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ได้แก่ พลู กะเพรา ตะไคร้หอม โหระพา ไพล ตะไคร้แกง ขมิ้นชัน และมะกรูด

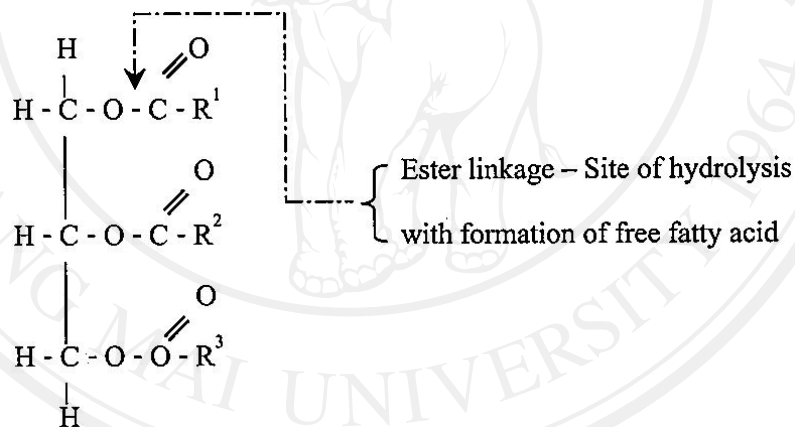
2.2 การเสื่อมเสียของอาหารประเภทน้ำมัน ไขมัน และอาหารที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ

การเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทน้ำมันและไขมัน และอาหารที่มีน้ำมันและไขมันเป็นส่วนประกอบนั้น ส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นนี้ อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมันจำเป็นในผลิตภัณฑ์อาหารนั้น หรือการสลายตัวของไวตามินชนิดที่ละลายได้ในไขมัน เช่น ไวตามินเอ ดี อี และ เค เป็นต้น หรืออาจเป็นสาเหตุให้เกิดมีสารที่เป็นอันตรายหรือสารพิษเกิดขึ้น เช่น สารก่อมะเร็งหรือสารก่อกลายพันธุ์ หรืออาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นของอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่าสีของอาหารอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยเฉพาะสีประเภทแคโรทีนอยด์ ไมโอโกลบิน แอนโทไซยานิน และคลอโรฟิลล์

การเสื่อมเสียที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทน้ำมัน ไขมัน และอาหารที่มีไขมัน และน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ได้แก่

1. การเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การเกิดไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายของน้ำมันหรือไขมัน ทำให้เกิด กลีเซอรอล โมโนและไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ ดังแสดงใน รูป 2.2 โดยปฏิกิริยาจะเกิด เร็วขึ้นถ้ามีน้ำหรือเอนไซม์อยู่ด้วย หรืออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงหรือความชื้นสูง เช่น การทอด อาหารที่มีความชื้นสูง การเกิดไฮโดรไลซิสของน้ำมันหรือไขมันเป็นสาเหตุทำให้ จุดเกิดควันของ น้ำมันต่ำลง เกิดฟองระหว่างการทอด เกิดการกัดกร่อนของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการแปรรูป อาหาร เนื่องจากมีกรดไขมันอิสระเกิดขึ้น และเกิดรสขมหรือกลิ่นคล้ายสบู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้า น้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันมะพร้าวหรือน้ำมันปาล์ม



รูป 2.2 ตำแหน่งการเกิดไฮโดรไลซิสของกลีเซอไรด์

ที่มา : ศิวาพร (2546)

2. ปฏิกิริยาการเกิดรีเวอร์ชัน (Reversion)

ปฏิกิริยาการเกิดรีเวอร์ชัน เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกลิ่นคล้ายสี (painty odor) หรือกลิ่นคล้ายหญ้า (grassy odor) โดยมากมักจะเกิดกับน้ำมันถั่วเหลือง สำหรับกลไกในการเกิดของปฏิกิริยานี้ยังไม่พบสาเหตุแน่ชัด แต่สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดลิโนเลนิกหรือกรดลิโนเลอิกที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันนั้น

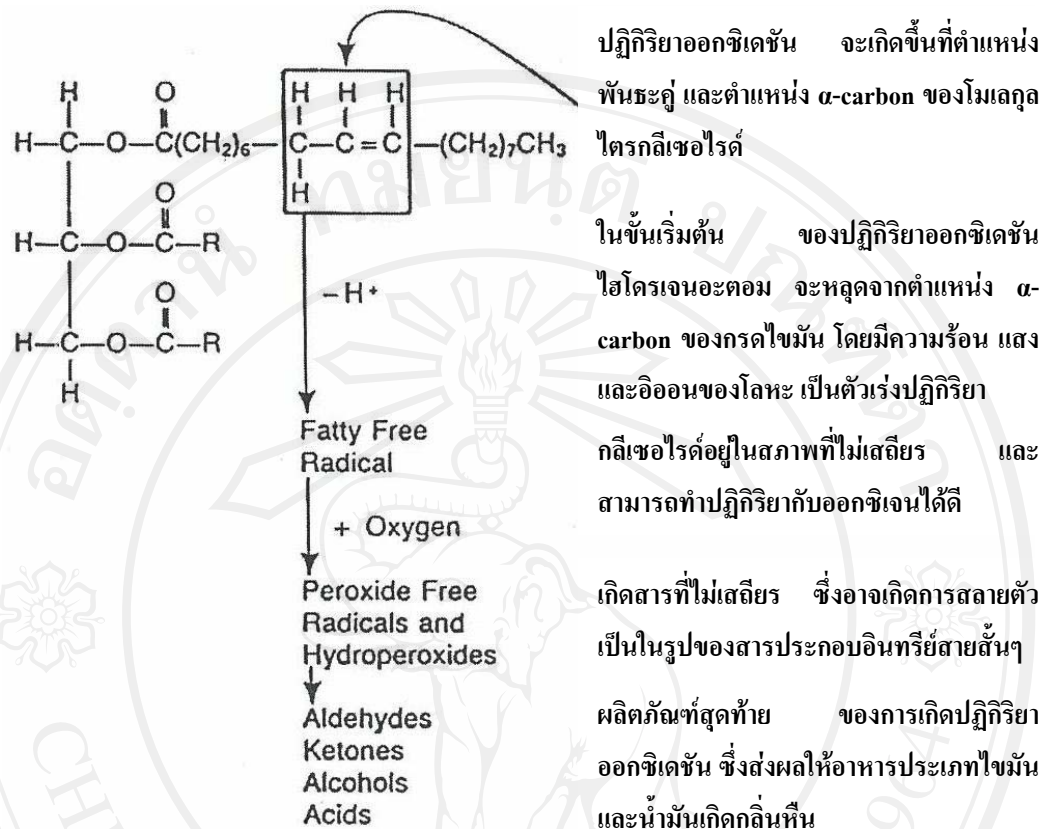
3. การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้มีการจับตัวกันระหว่างกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยจะเกิดขึ้นเมื่อไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ เป็นเวลานานๆ เช่น ในน้ำมันที่ใช้ในการทอด

4. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเสียด่างจากปฏิกิริยาทางเคมีที่สำคัญ และพบบ่อยที่สุดในอาหารประเภทน้ำมันและไขมัน และอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบ เป็นข้อจำกัดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมามีอายุการเก็บสั้นลง การเกิดออกซิเดชันขึ้นในกรดไขมันไม่อิ่มตัวทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ปัจจัยที่มีส่วนในการทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเร็วขึ้นหรือช้าลง ได้แก่ ชนิดของกรดไขมัน แสง อุณหภูมิ ออกซิเจน โลหะ เอนไซม์ และรังสี (ศิวาพร, 2546)

ถ้าหากน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูง โอกาสที่น้ำมันหรือไขมันนั้นจะถูกออกซิไดซ์จะมีมากกว่า อัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชันของไตรกลีเซอไรด์บางชนิดที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ($\text{mole O}_2 / \text{mole substrate} / \text{hour}$) ดังนี้ คือ glycerol trioleate 0.0015, glycerol trilinoleate 0.040 และ glycerol trilinolenate 0.145 และถ้าหากมีการเก็บไขมันหรือน้ำมันดังกล่าวในสภาวะที่มีโอกาสสัมผัสกับแสงหรือรังสี หรือในที่ๆ มีอุณหภูมิสูง หรือมีออกซิเจนอยู่ด้วย หรือมีโลหะปนเปื้อนมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทองแดงและเหล็กหรือมีเอนไซม์อยู่ด้วย การออกซิเดชันที่จะเกิดขึ้นกับน้ำมันดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น และอุณหภูมิจัดเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าปัจจัยอื่นๆ ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของกลีเซอไรด์ ดังแสดงใน รูป 2.3



รูป 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของกลีเซอไรด์
ที่มา : ดัดแปลงจาก Sherwin (1990)

4.1 กลไกการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันและไขมัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารมาก เนื่องจากเป็นสาเหตุให้เกิดกลิ่นหืน และเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง หรือออกซิเดชัน (Hamilton, 1994) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่พันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ยิ่งถ้ามีพันธะคู่มาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะยิ่งเกิดเร็วมากขึ้นด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนและอนุมูลอิสระ เกิดเป็นสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะสลายตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กๆ ที่ทำให้มีกลิ่นหืน และเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่เริ่มต้นของปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้อีก (Stauffer, 1996) โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันในอาหาร สามารถแบ่งเป็นขั้นต่างๆ ได้ 3 ขั้นตอน (Simic *et al.*, 1992) ดังนี้

1. ปฏิกริยาขั้นเริ่มต้น (Initiation)

ปฏิกริยาขั้นเริ่มต้น เป็นขั้นที่มีอนุมูลอิสระเกิดขึ้น เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกรดไขมันไม่อิ่มตัวและออกซิเจน โดยมีความร้อน แสง รังสี อีออนของโลหะ หรือฮีม (heam) เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (initiator) (Hamilton, 1994) ดังสมการ (1)



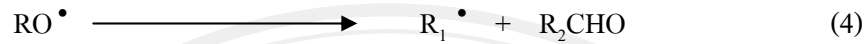
ปฏิกริยาขั้นเริ่มต้นที่กล่าว อาจเกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน เพียงแค่มีตัวเร่งปฏิกริยา เช่น แสง หรืออุณหภูมิ หรืออนุมูลโลหะ เป็นต้น ก็เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้ (Gordon and Roedig-Penman, 1999)

2. ปฏิกริยาขั้นต่อเนื่อง (Propagation)

ปฏิกริยาขั้นต่อเนื่อง เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกริยาขั้นต้น ทำปฏิกริยากับออกซิเจน เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (peroxide radical, ROO^\bullet) และอนุมูลเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ จะทำปฏิกริยากับกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอื่น ทำให้เกิดสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และอนุมูลอิสระ (R^\bullet) ขึ้น ซึ่งสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ สามารถเกิดปฏิกริยาต่อไปได้ ถ้าหากมีแสง หรือความร้อน หรือโลหะเป็นตัวเร่ง และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นก็จะไปทำปฏิกริยากับออกซิเจนใหม่เกิดอนุมูลเปอร์ออกไซด์ขึ้นอีก และปฏิกริยานี้จะเกิดต่อเนื่องแบบเดิมไปเรื่อยๆ แบบลูกโซ่ (Hamilton, 1994; Jadhav *et al.*, 1996) ดังสมการ (2) และ (3)

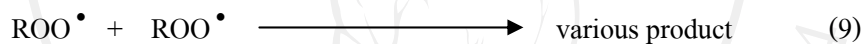
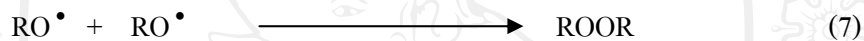
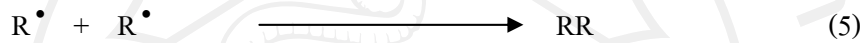


ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาที่กล่าวข้างต้น อาจมีปฏิกิริยาดังสมการข้างล่าง (4) เกิดขึ้นด้วย



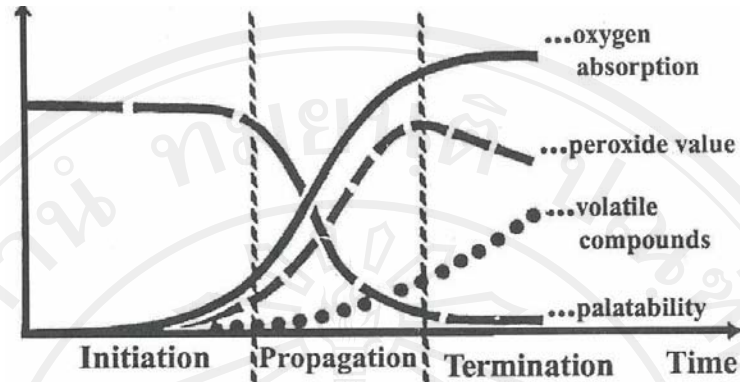
3. ปฏิกิริยาขั้นสุดท้าย (Termination)

ปฏิกิริยาขั้นสุดท้าย เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น เกิดการรวมตัวกันในรูปต่างๆ ทำให้เกิดสารที่มีความคงตัว และทำให้ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อไป (Jadhav *et al.*, 1996) ดังแสดงในสมการ (5) (6) (7) (8) และ (9)



ในระหว่างที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นนั้น คุณภาพของไขมันหรือน้ำมันจะค่อยๆ เสื่อมลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูป 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในปฏิกิริยาขั้นต่อนี้ คุณภาพของไขมันจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนมากที่สุด มีเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นมากที่สุด และมีสารประกอบที่ระเหยได้ (volatile compounds) เช่น แอลดีไฮด์ คีโตน อัลเคน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น เกิดขึ้นด้วย (Ho *et al.*, 1996)

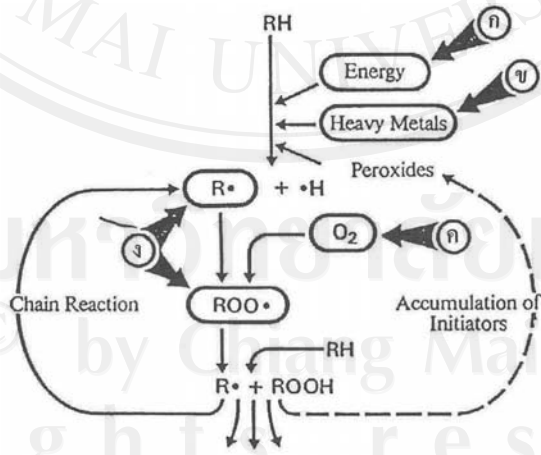
Increase of oxygen absorption, peroxide value and volatile



รูป 2.4 ขั้นตอนการเสื่อมคุณภาพของไขมัน
ที่มา : ศิวาพร (2546)

4.2 วิธีการชะลอปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ เราไม่สามารถจะป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นได้ แต่สามารถชะลอให้เกิดช้าลงได้ ในรูป 2.5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นเริ่มต้น และขั้นต่อเนื่อง และวิธีการชะลอปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นช้าลง



รูป 2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นเริ่มต้นและขั้นต่อเนื่อง
ที่มา : ศิวาพร (2546)

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังแสดงใน รูป 2.5 ถ้าต้องการชะลอปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นช้าลง อาจทำได้โดย

- ลดปริมาณความร้อนและแสงลง โดยการเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในที่เย็นและมีด
- อย่าให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่าง ๆ เนื่องจากการมีโลหะหนักปนเปื้อนมาแม้ในปริมาณที่ต่ำมาก เพียงแค่ 0.1 – 1 ppm ก็สามารถเร่งให้มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เร็วขึ้น
- ป้องกันมิให้สัมผัสกับออกซิเจน โดยการเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท
- ใช้สาร (สารกันหืน) ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ เพื่อหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะเกิดขึ้นแบบลูกโซ่

2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน

1. ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

เนื่องจากชนิดของกรดไขมันในโมเลกุลของน้ำมันและไขมัน มีผลกระทบต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอัตราเร็วของการเกิดจะแตกต่างกันโดยกรดไขมันที่มีพันธะคู่มากจะเกิดได้เร็วกว่า

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัวอิสระ

กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในรูปอิสระจะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายกว่าที่อยู่ในรูปเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

3. ความเข้มข้นของออกซิเจน

ในภาวะที่มีออกซิเจนมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน แต่ในภาวะที่มีออกซิเจนน้อยอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน อย่างไรก็ตามผลของออกซิเจนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิและพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับออกซิเจน

4. อุณหภูมิ

อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิจะเร่งปฏิกิริยาขั้นตอนของการเพิ่ม และเร่งการสลายตัวของสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น

5. พื้นที่ผิว

อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศ ดังนั้นหากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเร็วขึ้น สำหรับอาหารที่เป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าไปยังส่วนที่เป็นน้ำมัน

6. ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ (a_w)

อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับค่า a_w อาหารแห้งที่มีความชื้นต่ำมาก (a_w น้อยกว่า 0.1) ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อ a_w เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0.3 จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นมากซึ่งอยู่ในช่วง 0.55 – 0.85 อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

7. โลหะ

แร่ธาตุหรือโลหะบางชนิด เช่น โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และนิกเกิล มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (prooxidant) ได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.1 ppm ซึ่งจะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แร่ธาตุหรือโลหะเหล่านี้ได้มาจากดินที่ปลูกพืช และปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันพืชหรือมาจากสัตว์ และอุปกรณ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปและเก็บรักษา

8. เอนไซม์ไลพอกซิเจเนส (Lipoxygenase)

พบในเครื่องเทศ แป้งสาลี และผัก โดยเฉพาะพืชตระกูลถั่ว ซึ่งจะไปเร่งปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนของน้ำมันและไขมันพวกที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้ง โดยจะไปเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้ (Madhavi *et al.*, 1996)

9. การเกิดอิมัลชัน

ในอาหารที่เป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil in water) หยดน้ำมันจะกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ ออกซิเจนจะต้องแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเข้าไปยังหยดน้ำมันผ่านชั้นระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมัน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน พื้นที่ผิว ความหนืดของตัวกลางที่เป็นน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่วนประกอบ และขนาดรูของตัวกลาง

10. แสงและรังสี

แสงและรังสีต่างๆ เช่น แสงที่มองเห็นได้ แสงอัลตราไวโอเล็ต และแกมมา มีผลช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วขึ้น

11. สารต้านออกซิเดชัน

สารต้านออกซิเดชันจะช่วยยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ซึ่งมีทั้งสารต้านออกซิเดชันในธรรมชาติ เช่น วิตามินอีในน้ำมันพืช และสารต้านออกซิเดชันที่เป็นสารสังเคราะห์และได้รับอนุญาตให้เติมลงในอาหารได้ เช่น BHA, BHT, TBHQ และ PG (พาทวี, 2548)

2.4 ไขมันหรือน้ำมันทอดอาหาร

2.4.1 ข้อมูลทั่วไป

ไขมันหรือน้ำมันที่ใช้สำหรับทอดอาหารที่นิยมใช้กันมาก คือ น้ำมันหมูและน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับความนิยมของผู้บริโภค ไขมันหรือน้ำมันที่มีโมโน หรือไดกลีเซอไรด์ หรือกรดไขมันอิสระผสมปนอยู่ด้วย จะทำให้เกิดควันได้ง่าย และทำให้อาหารที่ทอดมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ติดไป ไขมันหรือน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจนจะมีความคงตัวเพิ่มขึ้น แต่ทำให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้นด้วย ในโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารควรประกอบด้วย กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนน้อย เพื่อให้มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความคงตัวดีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจน แต่ก็มีข้อเสีย คือ สามารถเกิดการหืน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่ายและทำให้อาหารมีกลิ่นหืนติดไปกับอาหารที่ทอดแล้วด้วย

น้ำมันพืชส่วนใหญ่จะมีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมาก ซึ่งจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หากไม่มีการเติมสารต้านออกซิเดชันลงไป ในน้ำมันนั้นๆ อย่างไรก็ตามในน้ำมันพืชตามธรรมชาติจะมีสารต้านออกซิเดชันธรรมชาติเช่น วิตามินอี หรือโทโคเฟอรอล และ tocotrienols ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันให้แก่กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้ (นิธิยา, 2548)

2.4.2 การทอดอาหาร

การทอดอาหารประเภทที่ต้องใช้น้ำมันมากๆ เรียกว่า deep-fat frying หากใช้ความร้อนสูงมากหรือใช้น้ำมันทอดอาหารซ้ำหลาย ๆ ครั้ง วิตามินอีจะถูกทำลายหมด ทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวถูกออกซิไดส์และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่าย โดยเฉพาะการทอดอาหารที่มีน้ำมันมาก เช่น การทอดไก่ ผลของปฏิกิริยาจะมีสารประกอบชนิดใหม่เกิดขึ้น ซึ่งสารที่เกิดขึ้นใหม่เหล่านี้เป็นสารพิษต่อร่างกายและบางชนิดก็เป็นสารก่อมะเร็งด้วย ดังนั้นน้ำมันที่เคยใช้ทอดอาหารมาแล้ว 2 – 3 ครั้ง หรือผ่านความร้อนสูงๆ มาแล้ว หากเหลือใช้ควรทิ้ง ไม่ควรนำมาใช้ทอดอาหารซ้ำแล้วซ้ำอีก เพราะจะทำให้สารก่อมะเร็งติดปนอยู่ในอาหารที่ทอด ซึ่งจะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งได้ (นิธิยา, 2548)

2.4.3 การเปลี่ยนแปลงของไขมันและน้ำมันระหว่างการทอด

การใช้ไขมันหรือน้ำมันในการทอดอาหาร ระหว่างที่ไขมันและน้ำมันได้รับความร้อนและขณะทอด จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอล ทำให้เกิดการสลายตัวที่มีความซับซ้อนเกิดขึ้น เนื่องจากการสลายตัวจากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณค่าทางโภชนาการของไขมันและน้ำมัน ไขมันและน้ำมันที่ผ่านความร้อนสูงอาจทำให้เกิดความเป็นพิษได้ (toxic effect) และมีผลต่อคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมันและอาหารที่ทอดในน้ำมันนั้น

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับไขมันและน้ำมันในขณะทอดอาหารที่เห็นได้ชัดเจน คือน้ำมันมีสีคล้ำมากขึ้น มีความหนืดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจุดเกิดควันลดลง และเกิดฟองมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นกับไขมันและน้ำมันเมื่อได้รับความร้อน คือ

- ไขมันและน้ำมันถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ โมโนและไดเอซิลกลีเซอรอล
- ไขมันถูกออกซิไดส์ได้เป็นสารประกอบชนิดใหม่ ได้แก่ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxides) อีพอกไซด์ (epoxides) ไฮดรอกไซด์ (hydroxides) คีโตน และ conjugate dienoic acid สารประกอบเหล่านี้อาจเกิดการแตกตัว fission ได้เป็นส่วนของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง หรืออาจยังคงอยู่เป็นส่วนหนึ่งในโมเลกุลไตรเอซิลกลีเซอรอล หรืออาจมาจับตัวรวมกัน (cross-link) ทำให้เกิด

เป็นไดเมอร์ (dimeric) และพอลิเมอร์ (polymeric triacylglycerols) สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าว สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ สารประกอบที่ระเหยได้ สารประกอบที่เป็นโมโนเมอร์ และ สารประกอบที่เป็นพอลิเมอร์

- ไขมันและน้ำมันสามารถเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนได้ ซึ่งถ้าเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนภายใน โมเลกุลของกรดไขมันเดียวกันจะทำให้เกิดวงแหวน (cyclic fatty acid) ถ้าเกิดพันธะใหม่ระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน จากกรดไขมันต่างโมเลกุลกันจะทำให้เกิดไดเมอร์ หรืออาจเกิดขึ้นได้ระหว่างกรดไขมันที่อยู่ใน โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เดียวกันหรือต่างโมเลกุลกันก็ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ของ สารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (นิธิยา, 2548)

2.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของไขมันและน้ำมัน

สมบัติทางเคมีที่นิยมตรวจวิเคราะห์ เพื่อใช้ชี้บ่งชนิดและคุณภาพของไขมันและน้ำมัน ได้แก่

- **ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value, P.V.)**

ค่าเปอร์ออกไซด์ เป็นการวัด degree of lipid oxidation โดยการหาปริมาณออกไซด์ ที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน สารเปอร์ออกไซด์จะเกิดขึ้นในไขมันหรือน้ำมันอย่างช้าๆ ในระหว่างที่ ไขมันหรือน้ำมัน ถูกเก็บไว้ให้สัมผัสกับอากาศหรือได้รับความร้อน เรียกว่าเกิด oxidative rancidity เป็นการเกิดออกซิเดชันขึ้นที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ดังนั้นไขมันหรือน้ำมันที่มี กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิด oxidative rancidity ได้ง่าย จึง นิยมวัดค่าเปอร์ออกไซด์ เพื่อใช้ชี้บ่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันและน้ำมัน เพราะเปอร์ออกไซด์ เป็นอินเทอร์มีเดียตของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

- **ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) หรือค่า Acid value (A.V.)**

ปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือค่า A.V. เป็นการตรวจสอบการสลายตัว และการหืน ของไขมันและน้ำมัน ค่า A.V. ที่วิเคราะห์ได้ใช้เป็นตัวชี้บ่งว่าไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีอยู่ในไขมัน หรือน้ำมัน ถูกทำลายด้วยเอนไซม์ไลเปสเป็นกรดไขมันอิสระมากน้อยเพียงใด ถ้าค่า A.V. สูง แสดง ว่าโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลถูกสลายตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก แสดงว่ามี hydrolytic rancidity เกิดขึ้นที่ไขมันหรือน้ำมันนั้น ความร้อนและแสงช่วยเร่งให้เกิดการหืนได้เร็วขึ้น

2.5 สารกันหืน (Antioxidant)

2.5.1 ข้อมูลทั่วไป

สารกันหืนหรือสารต้านออกซิเดชัน หมายถึง สารที่สามารถชะลอจุดเริ่มต้นหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือออโตออกซิเดชัน (autoxidation) ของไขมันอย่างช้าๆ (นิธิยา, 2545) ซึ่งช่วยทำให้ไขมันหรือน้ำมัน และผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไขมันหรือน้ำมันเป็นองค์ประกอบเกิดการหืนได้ช้าลง แต่ไม่สามารถทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วดีขึ้น (มณฑาทิพย์, 2539) สารกันหืนสามารถพบได้ในอาหารโดยธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถเติมเข้าไปในผลิตภัณฑ์อาหารได้ หรืออาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตได้เช่นกัน ซึ่งมีผลต่อการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีคุณภาพดีขึ้น รวมทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์นั้นอีกด้วย (Akoh and Min, 1998)

การเติมสารกันหืนลงในผลิตภัณฑ์อาหาร ควรพิจารณาถึงความสามารถในการละลายในไขมัน สารกันหืนจะต้องไม่มีผลต่อกลิ่นรสของอาหารตลอดช่วงอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และจะต้องมีประสิทธิภาพอย่างน้อย 1 ปี ที่อุณหภูมิ 25 – 30 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จะต้องมีความคงตัวเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน รวมทั้งก่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้บริโภค (Joseph and Anthony, 1995)

องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (Food and Drug Administration, FDA) กำหนดให้สารกันหืนเป็นสารที่ใช้รักษาคุณภาพอาหาร โดยชะลอการเสียที่เกิดการหืนหรือการเปลี่ยนสีอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

สารกันหืนควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

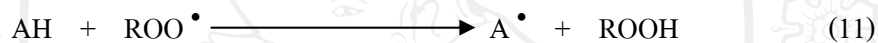
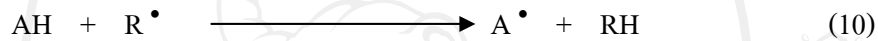
1. ต้องไม่มีโทษต่อร่างกาย
2. ไม่ทำให้ไขมัน น้ำมัน หรืออาหารที่เติมสารกันหืนมีสี กลิ่น และรสชาติเปลี่ยนไป
3. ให้ผลในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ความเข้มข้นต่ำ
4. ละลายได้ดีในไขมันและน้ำมัน
5. ทนต่อกระบวนการแปรรูปอาหาร
6. หาซื้อได้ทั่วไป และมีราคาถูก

2.5.2 ประเภทของสารกันหืน

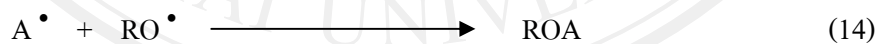
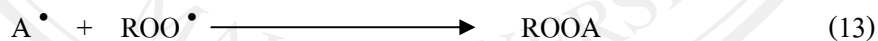
ประเภทของสารกันหืนแบ่งตามหน้าที่ได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. สารกันหืนปฐมภูมิ (Primary antioxidant)

สารกันหืน (AH) กลุ่มนี้ ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิโคโนเจนอะตอมหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ซึ่งจะยับยั้งหรือชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนเริ่มต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ (R^\bullet) ดังสมการ (10) หรือยับยั้งในขั้นตอนการเพิ่ม โดยจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (peroxide radical, ROO^\bullet) หรืออนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radical, RO^\bullet) ดังสมการ (11) และ (12)



อนุมูลอิสระของสารกันหืน (A^\bullet) จะทำปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนสุดท้าย โดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ออกไซด์ (ROO^\bullet) อนุมูลอัลคอกซี (RO^\bullet) และอนุมูลของสารกันหืน (A^\bullet) ดังสมการ (13) (14) และ (15) ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาหยุดลงและได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ กลไกการทำงานของสารกันหืนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังแสดงใน รูป 2.6



สารกันหืนปฐมภูมิที่ใช้เดิมในอาหาร ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบฟีนอลิกชนิดสังเคราะห์ ได้แก่ propyl gallate (PG), butylated hydroxyanisole (BHA), butylated hydroxytoluene (BHT) และ tertiary butylhydroquinone (TBHQ) นอกจากนี้ยังพบในธรรมชาติ ได้แก่ โทโคเฟอรอล และแคโรทีนอยด์ เป็นต้น (Hudson, 1990; Akoh and Min, 1998) สารเหล่านี้จะต้องมีประสิทธิภาพที่ความเข้มข้นที่ต่ำ แต่ถ้ามีการใช้ในปริมาณสูงก็จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (prooxidant) (Madhavi *et al.*, 1996)

2. สารจับออกซิเจน (Oxygen scavengers)

สารจับออกซิเจน เป็นสารที่หยุดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ โดยเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจึงทำให้เกิดอนุมูลอิสระลดลง สารจับออกซิเจนนี้ทำหน้าที่เป็นสารเสริมฤทธิ์สารกันหืนคือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารกันหืน แต่ตัวสารจับออกซิเจนเองไม่มีความสามารถในการเป็นสารกันหืนหรือมีน้อย ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก กรดอิริทอร์บิก และ โซเดียมอิริทอร์เบท

3. สารกันหืนทุติยภูมิ (Secondary antioxidant)

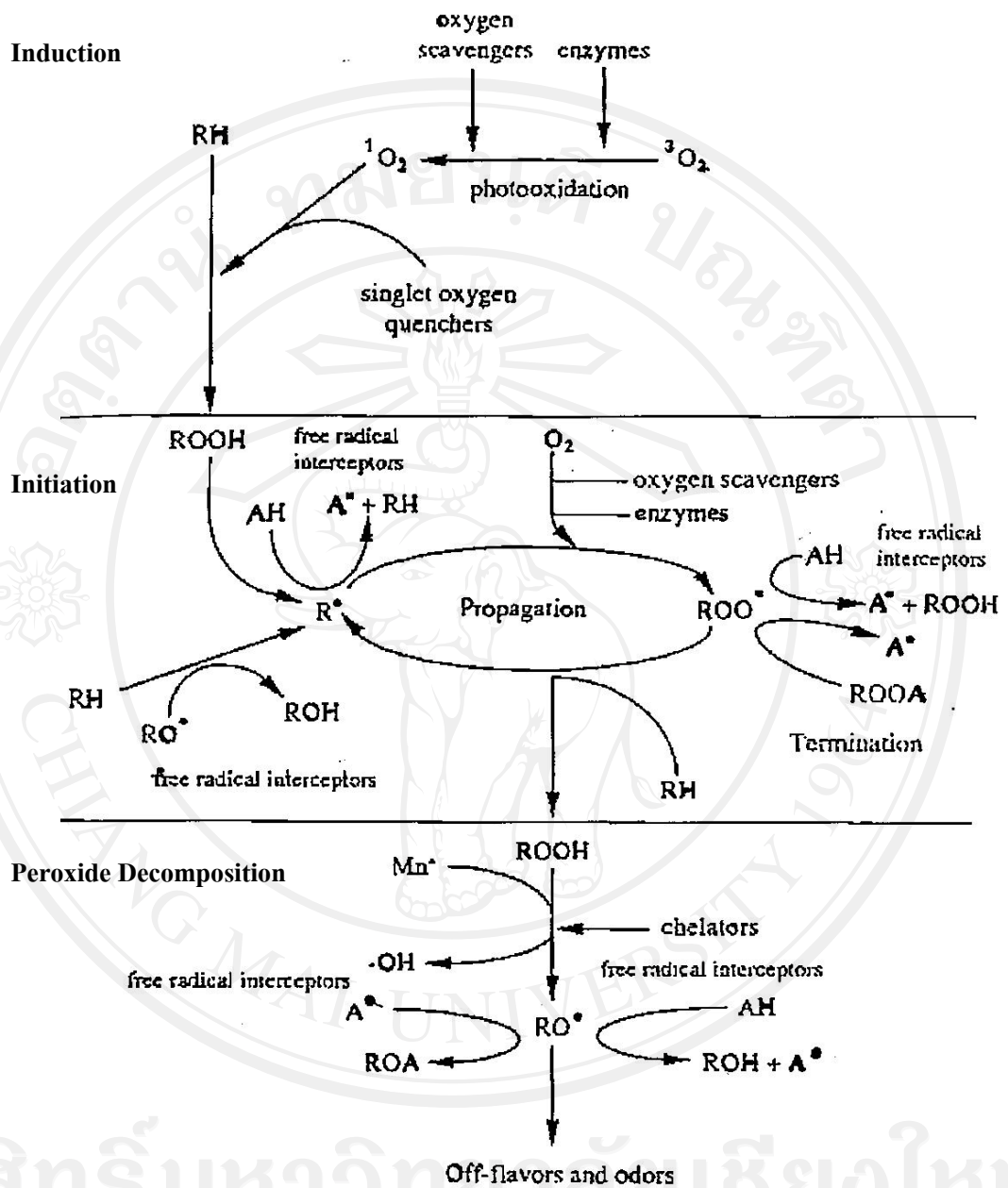
สารกันหืนทุติยภูมิ เป็นสารที่ใช้ชะลออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน สารเหล่านี้จะทำหน้าที่จับโลหะไอออน จับออกซิเจน และดูดซับสารรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นตัวเร่งของปฏิกิริยา อีกทั้งยังทำหน้าที่สลายสารไฮโดรเปอร์ออกไซด์ไปเป็นอนุมูลที่เสถียรหรือคงตัว โดยไม่สลายเป็นอัลดีไฮด์หรือคีโตน ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นหืน สารเหล่านี้ได้แก่ dialurythiopropionate และ thiodipropionic acid เป็นต้น (Hudson, 1990) แต่สารเหล่านี้ทาง FDA ยังไม่อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร (Madhavi *et al.*, 1996)

4. เอนไซม์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกันหืน (Enzymic antioxidant)

เอนไซม์เหล่านี้ได้แก่ glucose oxidase, superoxide dismutase, catalase และ glutathione peroxidase โดยทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดออกซิเจน เช่น เอนไซม์ glucose oxidase หรือกำจัดสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เช่น เอนไซม์ superoxide dismutase

5. ตัวจับโลหะไอออน (Chelating agents หรือ Sequestate)

โลหะไอออนของเหล็ก ทองแดง แมงกานีส โครเมียม นิกเกิล และอลูมิเนียม เป็นต้น โลหะไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Akoh and Min, 1998) ตัวจับโลหะไอออนใช้เติมลงไปเพื่อเป็นสารเสริมฤทธิ์สารกันหืน จึงไม่สามารถทำงานสมบูรณ์ด้วยตัวเอง ตัวจับโลหะไอออน ได้แก่ กรดซิตริก กรดอะมิโน กรดทาร์ทาริก เลซิติน และ ethylenediaminetetra – acetic acid (EDTA) เป็นต้น

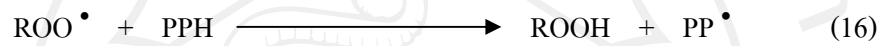


รูป 2.6 กลไกการทำงานของสารกันหืนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา : Akoh and Min (1998)

นอกจากจะแบ่งประเภทของสารกันหืนตามหน้าที่แล้ว ยังสามารถแบ่งประเภทของสารกันหืนตามแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท คือ สารกันหืนที่ได้จากการสังเคราะห์ และสารกันหืนที่ได้จากธรรมชาติ

สารกันหืนสังเคราะห์ และสารกันหืนจากธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบฟีนอลิก (PPH) ซึ่งละลายได้ในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ และโลหะไอออนที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่นๆ อีกด้วย ดังสมการ (16) และ (17)



เมื่อสารประกอบฟีนอลิกให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระไปแล้ว อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก (PP^\bullet) จะค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นต่อไป และยังสามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นได้อีกด้วย (วิวัฒน์, 2545) ดังสมการ (18) และ (19)



1. สารกันหืนสังเคราะห์

สารกันหืนสังเคราะห์เป็นสารจำพวกสารประกอบฟีนอลิก นิยมเติมลงในไขมัน น้ำมัน และผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการผลิต สารกันหืนสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีดังนี้

1.1 บีเอชเอ (BHA, butylated hydroxyl anisole)

บีเอชเอ หรือ 3-tertiary-butyl-4-hydroxyanisole เป็นสารกันหืนที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมอาหาร มีการอนุญาตให้ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 เป็นสารประกอบที่เป็นผลึกสีขาวหรือเหลืองอ่อน มีกลิ่นฉุน ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และ propane-1,2-diol โครงสร้างของบีเอชเอแสดงดังรูป 2.7



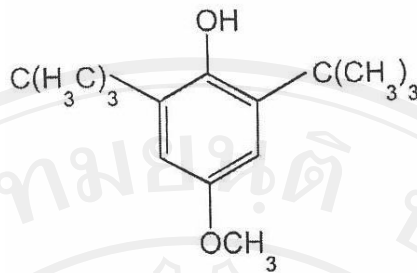
รูป 2.7 โครงสร้างบีเอชเอ

ที่มา : ศิวพร (2546)

บีเอชเอที่นิยมใช้กันจะเป็นสารผสมของ 2- และ 3-tert-butyl-4-hydroxyanisole และมักจะมี 3-BHA อยู่ในปริมาณมากกว่า อาจถึงร้อยละ 90 หรือมากกว่านั้น 3-BHA จะมีประสิทธิภาพดีกว่า 2-BHA และบีเอชเอจะมีประสิทธิภาพดีกว่าในไขมันและน้ำมันจากสัตว์ (Demopoulos *et al.*, 1983; Schaefer *et al.*, 1975) การใช้บีเอชเอร่วมกับแกลเลต (gallate) หรือบีเอชที จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารกันหืนดีขึ้น ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 อนุญาตให้ใช้ในปริมาณไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร โดยอาจใช้เพียงบีเอชเออย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับวัตถุกันหืนชนิดอื่นที่กำหนดไว้ แต่ปริมาณแกลเลตต้องไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร

1.2 บีเอชที (BHT, Butylated hydroxyl toluene)

บีเอชที หรือ 2,6-ditertiary-butyl-p-cresol เป็นสารประกอบที่เป็นผลึกหรือเกล็ดสีขาว มีกลิ่นฉุน ไม่ละลายในน้ำ และ propane-1,2-diol แต่ละลายในแอลกอฮอล์ โครงสร้างของบีเอชที แสดงดังรูป 2.8



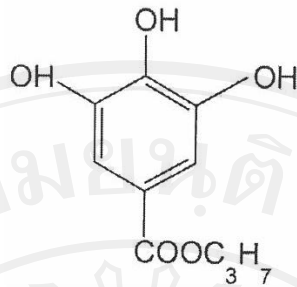
รูป 2.8 โครงสร้างบีเอชที

ที่มา : ศิวาพร (2546)

บีเอชทีเป็นสารกันหืนในกลุ่มฟีนอลิกอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับบีเอชเอ สามารถช่วยชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันในไขมันและน้ำมันสัตว์ได้ดีกว่าน้ำมันพืช การใช้บีเอชทีร่วมกับบีเอชเอ โพรพิลแกลเลต (propyl gallate) หรือทีบีเอชคิว และกรดซิตริกจะช่วยให้ประสิทธิภาพดีขึ้น บีเอชทีอาจมีการสลายตัวโดยการระเหย หรือการกลั่นในระหว่างกรรมวิธีการแปรรูปบางวิธี ตัวอย่างเช่น การทอด เป็นต้น บีเอชทีจะทำปฏิกิริยากับเหล็กที่ปนเปื้อนมา เกิดเป็นสารประกอบ stilbenequinone ซึ่งมีสีออกเหลืองๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองได้ ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 อนุญาตให้ใช้บีเอชทีได้ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร โดยอาจจะใช้เพียงอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับสารกันหืนชนิดอื่นที่กำหนดไว้ แต่ปริมาณแกลเลตต้องไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร

1.3 โพรพิลแกลเลต

โพรพิลแกลเลตเป็น propanol ester ของ 3,4,5-tri-hydroxybenzoic acid หรือกรดแกลลิก (gallic acid) เป็นสารประกอบผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น มีรสขมเล็กน้อย ละลายน้ำได้เล็กน้อย และละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ อีเทอร์ และ propane-1,2-diol โครงสร้างของโพรพิลแกลเลตแสดงดังรูป 2.9

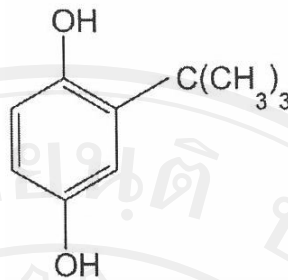


รูป 2.9 โครงสร้างโพรพิลแกลเลต
ที่มา : ศิวพร (2546)

โพรพิลแกลเลตเป็นสารกันหืนสังเคราะห์ ที่เตรียมโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดแกลลิกด้วยโพรพิลแอลกอฮอล์ (propyl alcohol) แล้วกลั่นเพื่อขจัดแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปออก โพรพิลแกลเลตที่มีการจำหน่ายในทางการค้า จะอยู่ในรูปผลึกสีขาวละลายน้ำได้เล็กน้อย มีประสิทธิภาพดีมากทั้งในไขมันและน้ำมันสัตว์ และน้ำมันพืช แต่สำหรับในน้ำมันพืชนั้นประสิทธิภาพจะดีสู้ทีบีเอชคิวไม่ได้ เนื่องจากโพรพิลแกลเลตไม่ทนความร้อน จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ โดยทั่วไปจะนิยมใช้โพรพิลแกลเลตร่วมกับบีเอชเอ หรือบีเอชที ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 อนุญาตให้ใช้โพรพิลแกลเลตได้ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร โดยใช้อย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับไดเดซิลแกลเลต หรือออกทิลแกลเลต บีเอชที บีเอชเอ แต่ปริมาณแกลเลตต้องไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร

1.4 ทีบีเอชคิว (TBHQ, Tertiary butylhydroquinone)

ทีบีเอชคิว เป็นสารประกอบที่เป็นผลึกสีขาว มีกลิ่นเฉพาะตัว ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในแอลกอฮอล์ โครงสร้างของทีบีเอชคิวแสดงดังรูป 2.10



รูป 2.10 โครงสร้างทีบีเอชคิว

ที่มา : ศิวาพร (2546)

ทีบีเอชคิวเป็นสารกันหืนชนิดหนึ่งในกลุ่มฟีนอลิก ที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นสารกันหืนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับน้ำมันพืช การใช้ทีบีเอชคิว จะช่วยให้น้ำมันมีความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ใกล้เคียงกับการใช้วิธีการเติมไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว (Sherwin, 1978) การใช้สารจับโลหะ เช่น กรดซิตริกร่วมกับทีบีเอชคิว จะช่วยเสริมประสิทธิภาพของทีบีเอชคิวให้ดีขึ้นได้ ในการใช้ทีบีเอชคิวในผลิตภัณฑ์อาหารนั้น อาจใช้ทีบีเอชคิวเพียงชนิดเดียว หรือใช้ร่วมกับบีเอชเอและหรือบีเอชทีในปริมาณที่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัมอาหาร

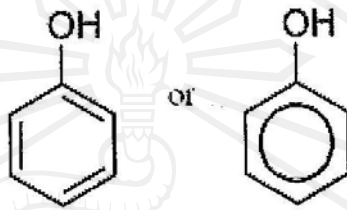
2. สารกันหืนที่ได้จากธรรมชาติ

สารกันหืนจากธรรมชาติ สามารถพบได้หลายแหล่ง เช่น พืช สัตว์ รวมทั้งจุลินทรีย์ อีกทั้งยังสามารถพบในระหว่างกระบวนการผลิตอาหารได้เช่นกัน ซึ่งจะพบสารที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Madhavi *et al.*, 1996) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากพืช เครื่องเทศ และสารสกัดจากผักหรือเนื้อเยื่อของสัตว์ต่างๆ (ศิวาพร, 2546) สารกันหืนจากธรรมชาติ สามารถจำแนกเป็นกลุ่ม ๆ ได้ดังนี้

2.1 สารประกอบฟีนอลิกจากพืชและเครื่องเทศ

สารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืชและเครื่องเทศมีคุณสมบัติเป็นสารกันหืน รวมถึงกรดฟีนอลิก (phenolic acid) ฟลาโวนอยด์และอนุพันธ์ (flavonoid and derivatives) เอสเทอร์ของกรดแกลลิก (ester of gallic acid) ลิกนิน (lignin) ความาริน (coumarine) และ ฟลาโวน (flavone) เป็นต้น (Shahidi, 1997; Rajalakshmi and Narasimhan, 1996)

โดยทั่วไปสารประกอบฟีนอลิกซึ่งอยู่ในกลุ่ม primary antioxidant เป็นสารที่ค่อนข้างมีบทบาทพอสมควร ส่วนใหญ่เป็นสารที่พบมากในธรรมชาติ เช่น พืชผัก ผลไม้ ชาเขียว ไวน์แดง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันพบสารประกอบฟีนอลิกเป็นจำนวนมากถึง 8,000 ชนิด โครงสร้างทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก และมีหมู่แทนที่เป็นไฮดรอกซีอย่างน้อยหนึ่งหมู่ ดังรูป 2.11

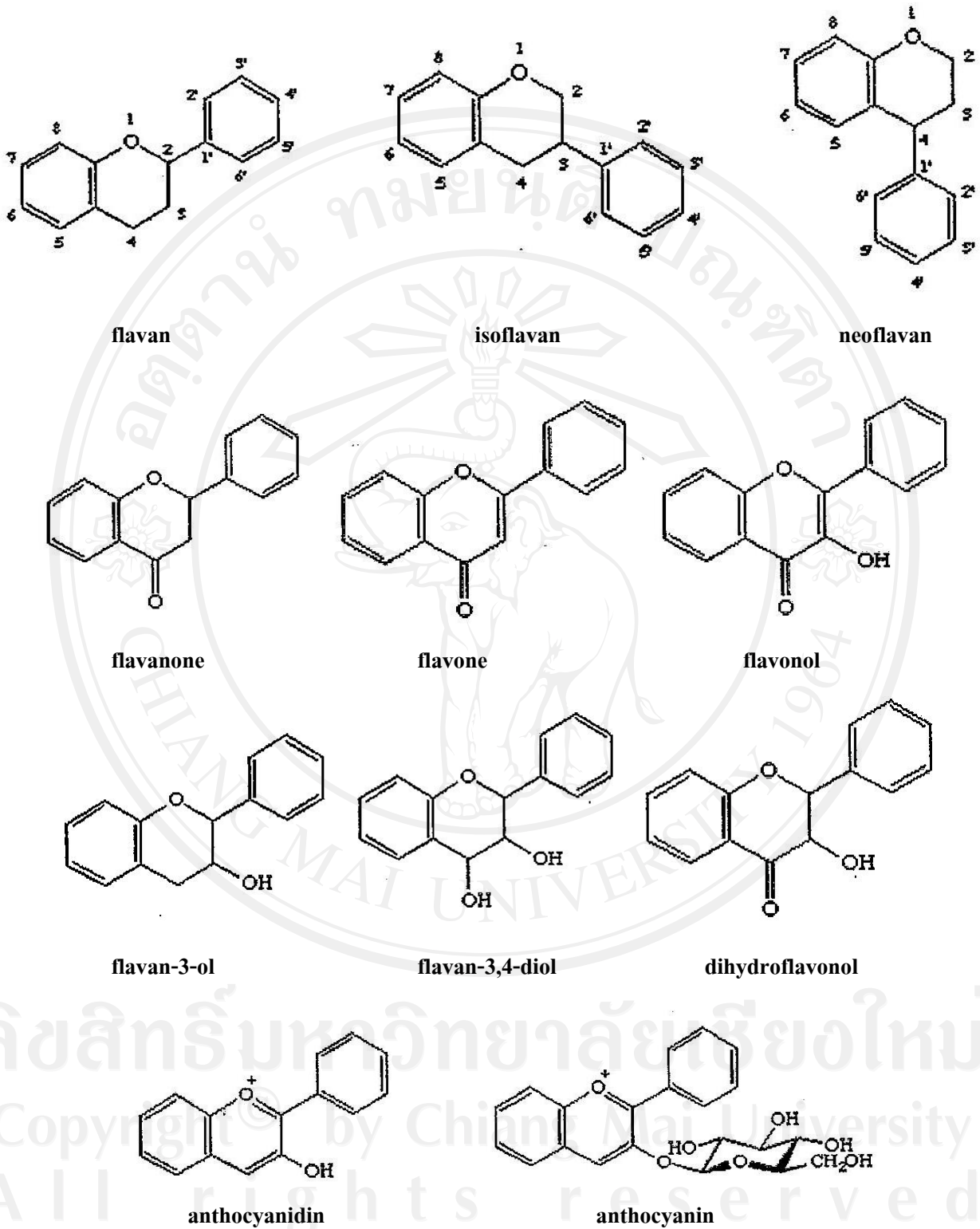


รูป 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลิก
ที่มา : โอภา และคณะ (2550)

สารประกอบฟีนอลิก สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ monocyclic phenol ประกอบด้วย วงแหวนฟีนอล 1 วง dicyclic phenol ประกอบด้วย วงแหวนฟีนอล 2 วง และสุดท้ายคือ polycyclic phenol หรือ polyphenolic ซึ่งถือเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญมากในการต้านอนุมูลอิสระ โดยตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในกลุ่ม polyphenolic ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) กรดฟีนอลิก (phenolic acid) และแอนโทไซยานิน (anthocyanin) (โอภา และคณะ, 2550)

2.1.1 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)

สารฟลาโวนอยด์พบได้ทั่วไปในทุกส่วนของพืช จัดเป็นสารสำคัญในกลุ่ม polyphenolic มีสูตรโครงสร้างหลักเป็นฟลาแวน (flavan) สารฟลาโวนอยด์แบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้หลากหลายกลุ่ม ดังรูป 2.12

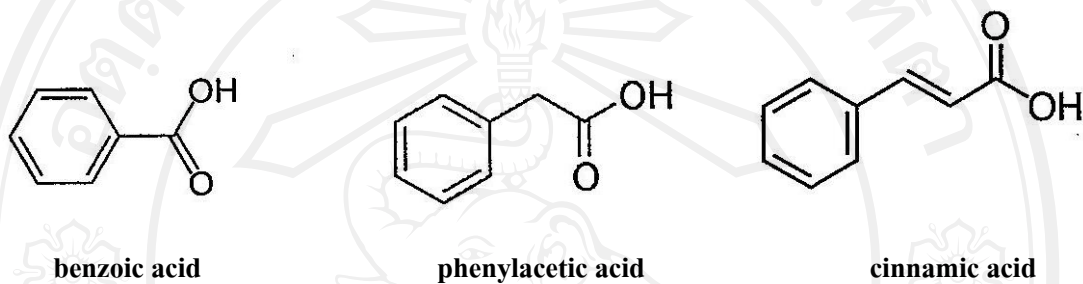


รูป 2.12 โครงสร้างหลักของสารฟลาโวนอยด์กลุ่มต่าง ๆ

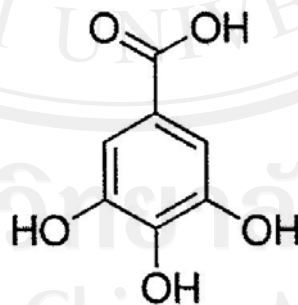
ที่มา : Queensmary university of London (2005)

2.1.2 กรดฟีนอลิก (Phenolic acid)

กรดฟีนอลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่ม polyphenolic เช่นเดียวกับ ฟลาโวนอยด์ โดยมีสารกลุ่มหลัก 3 กลุ่มคือ benzoic acid, phenylacetic acid และ cinnamic acid โดยมีโครงสร้างพื้นฐานดังรูป 2.13 (โอภา และคณะ, 2550; Shi *et al.*, 2002) และในการวิเคราะห์หากรดฟีนอลิกในผัก และผลไม้ ส่วนใหญ่นิยมหาออกมาในรูปของกรดแกลลิก (gallic acid) ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูป 2.14



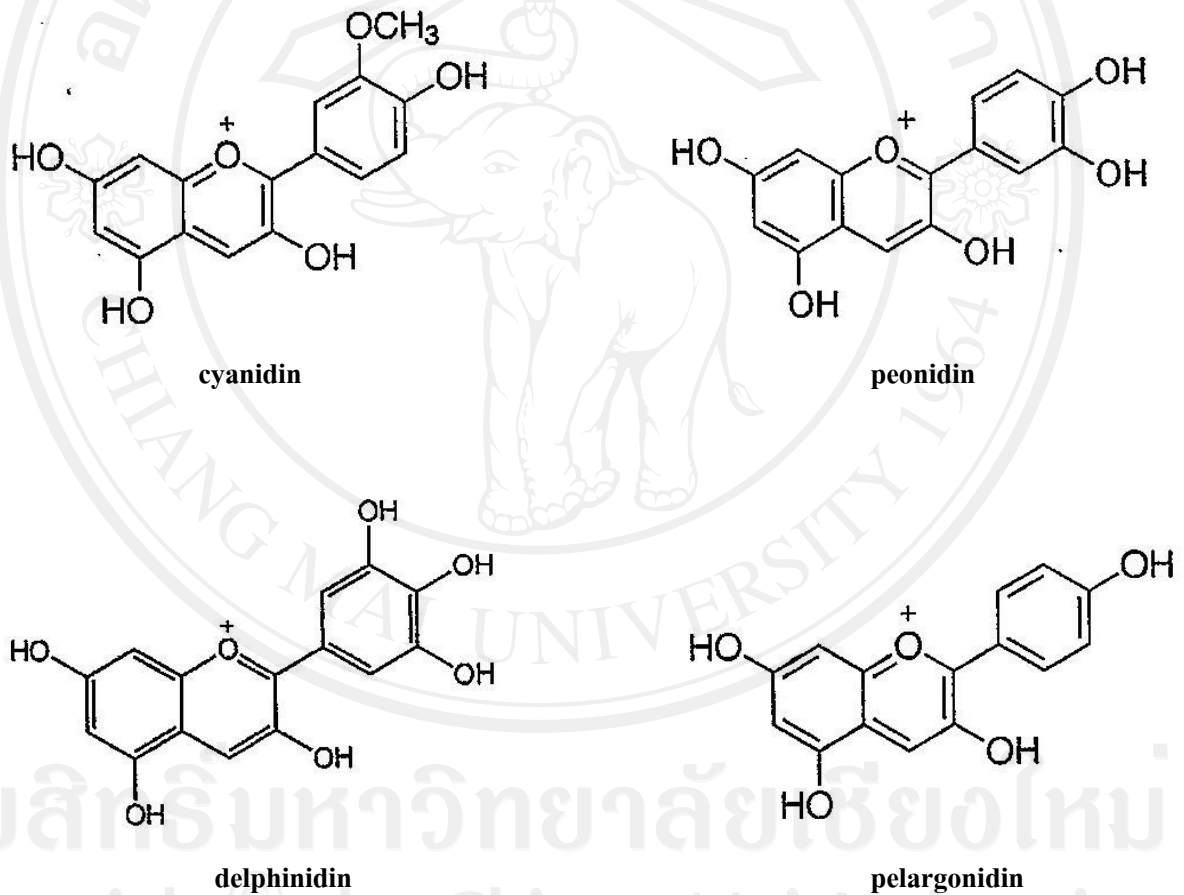
รูป 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของกรดเบนโซอิก กรดฟีนิลอะซิติก และกรดซินนามิก
ที่มา : Premier group of industries (2009)



รูป 2.14 โครงสร้างของกรดแกลลิก
ที่มา : Premier group of industries (2009)

2.1.3 แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)

แอนโทไซยานินเป็นสารกลุ่มหนึ่งของฟลาโวนอยด์ ที่เป็นสารให้สีที่พบในเซลล์พืช ให้สีแดง น้ำเงิน และม่วง ปัจจุบันพบว่าแอนโทไซยานินอยู่ประมาณ 120 ชนิด ซึ่งสารประกอบที่พบมากที่สุดได้แก่ ไซยานิดิน (cyanidin) พีโอนิดิน (peonidin) เดลฟินิดิน (delphinidin) และพีลาร์โกนิน (pelargonidin) มีโครงสร้างแสดงดังรูป 2.15 ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเบนโซไพแรน 2 วงต่อกับวงแหวนฟีนิล ที่สามารถละลายในน้ำได้แต่ไม่ละลายใน non-hydroxy solvent (นิธิยา, 2543; Shi *et al.*, 2002)



รูป 2.15 โครงสร้างของไซยานิดิน พีโอนิดิน เดลฟินิดิน และพีลาร์โกนิน
ที่มา : Packer *et al.* (1999)

2.2 กรดอะมิโน เปปไทด์ โปรตีนไฮโดรไลเสต และสารที่เกิดจากปฏิกิริยามอลดาร์ด์

การที่สารในกลุ่มนี้สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ก็เนื่องจากสามารถจับกับ โลหะที่มีอยู่ในอาหาร หรือปนเปื้อนมาในอาหาร โดยอาจจะมาจากอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ใน กระบวนการแปรรูปวัตถุดิบหรือภาชนะบรรจุ เป็นต้น ให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความคงตัว จึงไม่สามารถเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหารได้ สารที่เกิดจากปฏิกิริยามอลดาร์ด์ที่ เกิดขึ้นในระหว่างการอบนั้น พบว่าสามารถช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและ น้ำมันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Rajalakshmi and Narasimhan, 1996)

2.3 กรดไฟติกและไฟเตต

กรดไฟติกและไฟเตตเป็นสารประกอบที่มีประจุลบสูง พบมากในธัญพืชและถั่วเมล็ดแห้ง สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยการไปจับกับโลหะที่ปนเปื้อนมาในอาหาร เช่น เหล็ก และทองแดง ได้ดี (Shahidi, 1997; White and Xing, 1997)

2.4 ฟอสฟอลิปิด

ฟอสฟอลิปิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันถั่วเหลือง มีประสิทธิภาพในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยการจับกับอนุมูลอิสระหรือจับกับไอออนของโลหะที่ปนเปื้อน และจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นถ้าใช้ร่วมกับ โทโคเฟอรอล หรือโพรพิลแกลเลต (Sipos and Szuhaj, 1996)

2.5 วิตามินและเอนไซม์

วิตามินหลายๆ ชนิดที่พบในอาหาร เช่น วิตามินเอรวมถึงเบตาแคโรทีน วิตามินซี และวิตามินดี เป็นต้น มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยการไปจับกับออกซิเจนที่ไว ต่อปฏิกิริยา และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นเริ่มต้น และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่คงตัว ทำให้สามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ในขั้นต่อเนื่องได้ (Schuler, 1990) สำหรับ ตัวอย่างของเอนไซม์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารกันหืน ได้แก่ กลูโคสออกซิเดส (glucoseoxidase) และ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxidedismutase) เป็นต้น

2.6 สารกันเหิรอื่น ๆ

สำหรับสารกันเหิรในกลุ่มนี้ รวมถึงสารที่ได้จากการเผาไม้หรือควัน เป็นต้น (Rajalakshmi and Narasimhan, 1996) ที่พบว่าสามารถช่วยยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

2.5.3 อันตรรกจากสารกันเหิร

การใช้สารกันเหิรเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหารนั้น ถ้าหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป พบว่าเป็นสาเหตุให้เกิดอาการผิดปกติแก่ผู้บริโภคได้ จากการศึกษาถึงความ เป็นพิษของสารกันเหิรหลายๆ ชนิด พบว่าการใช้สารกันเหิรในปริมาณที่มาก และติดต่อกันเป็น เวลานาน เป็นสาเหตุให้เกิดอาการผิดปกติกับสัตว์ทดลอง เป็นมะเร็ง และเนื้องอกได้ ดังในรายงาน การวิจัยของ Tamano *et al.* (1998) และ Iverson (1999) ที่พบว่าเมื่อผสมบีเอชเอความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ในอาหารของหนูทดลอง จะทำให้เนื้อเยื่อของหนูทดลองเกิดการขยายตัวผิดปกติ และทำให้ หนูทดลองเป็นเนื้องอกในช่องท้อง เมื่อผสมบีเอชเอความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ในอาหาร นอกจากนี้ยัง ทำให้เกิดอาการผิดปกติในลำไส้เล็ก และหลอดอาหาร (Verhagen *et al.*, 1990) Kahl and Kappus (1993) ได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของบีเอชเอ และบีเอชที โดยเปรียบเทียบกับไวตามินอีที่เป็น สารกันเหิรธรรมชาติ พบว่า การใช้ บีเอชเอ บีเอชที และไวตามินอีในปริมาณสูงจะเป็นสาเหตุให้ เกิดเนื้องอกขึ้นในหนูทดลอง แต่เมื่อเปรียบเทียบอันตรายที่จะได้รับจากสารกันเหิรทั้ง 3 ชนิด พบว่า การใช้ไวตามินอีจะมีความปลอดภัยมากกว่าการใช้ บีเอชเอ และบีเอชที Takahashi (1992) ได้ ทดลองให้หนูบริโภคอาหารที่มีบีเอชเอผสมอยู่ร้อยละ 0.5 เป็นเวลา 21 วัน พบว่าหนูเกิดอาการเลือด คลั่งในปอด และอวัยวะอื่นๆ อีกหลายส่วน Cottrell *et al.* (1994) ได้ทดลองเลี้ยงหนูทดลองโดยให้ อาหารที่มีบีเอชทีผสมอยู่ ผลการทดลองพบว่าหนูที่ได้รับอาหารที่มีบีเอชทีผสมอยู่ในปริมาณที่ มากกว่า 600 มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักร่างกาย/วัน จะมีความต้องการไวตามินเคเพิ่มขึ้นมากกว่า ปกติที่ควรจะได้ เพื่อช่วยให้เลือดแข็งตัว ส่วนที่บีเอชทีนั้น ในการทดสอบกับสารพันธุกรรม พบว่าจะทำให้เกิดการแยกตัวของดีเอ็นเอสายคู่ และเกิดรอยแยกบนดีเอ็นเอสายเดี่ยวด้วย (Okubo *et al.*, 1997) และสำหรับการทดสอบความเป็นพิษของโพรพิลเกลเลตในหมู พบว่าจะทำให้ผิวหนัง ของ หมูมีความไวต่อแสงเพิ่มขึ้น

ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้บริโภคหันมาตระหนักถึงความปลอดภัยต่อสุขภาพกันมากขึ้น สารกัน เหิรที่ได้จากธรรมชาติจึงเป็นที่สนใจและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบัน มีงานวิจัยมากมายที่แสดง ให้เห็นว่าสารสกัดจากพืชสมุนไพรหลายชนิด สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมัน

และอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบได้ เช่น สารสกัดจากใบพลูช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์มได้ดีกว่าบีเอชทีที่เป็นสารกันหืนสังเคราะห์ (Lakshmi *et al.*, 2006) สารสกัดจากผักตบชวีมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดกลิ่นหืนในน้ำมันถั่วเหลือง และข้าวอบกรอบได้ดีกว่าวิตามินอีที่เป็นสารกันหืนธรรมชาติ (พิชญ์อร, 2550) สารสกัดจากกระเทียมที่ความเข้มข้น 1,000 ppm มีประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยช่วยให้น้ำมันดอกทานตะวันมีความคงตัวมากที่สุด รองลงมาคือ บีเอชที บีเอชเอ สารสกัดจากกระเทียมที่ความเข้มข้น 500 ppm และสารสกัดจากกระเทียมที่ความเข้มข้น 250 ppm ตามลำดับ (Iqbal and Bhangar, 2007) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่า สารสกัดจากกะเพราสามารถยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูปอดได้ โดยไปช่วยต้านการเกิดกลิ่นหืนในเนื้อหมูปอดเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Juntachote *et al.*, 2007) ในประเทศไทยมีพืชสมุนไพรและเครื่องเทศหลายชนิด จึงทำให้เกิดแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะใบพลูซึ่งเป็นภูมิปัญญาชาวบ้านสมัยก่อนที่ใช้แก้กลิ่นเหม็นหืนของน้ำมัน (พิณ, 2544) โดยที่ไม่ทำให้น้ำมันเสียรสหรือเสียกลิ่นไป (ส่วนวิจัยเกษตรกรรม, 2532) นอกจากนี้ใบพลูยังเป็นพืชที่ปลูกง่ายให้ผลตอบแทนเร็ว ลงทุนค่อนข้างต่ำ และพื้นที่ทุกภาคของประเทศไทยเหมาะแก่การเจริญเติบโตของพลู แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากใบพลูในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมัน และอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบยังมีน้อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาด้าน antiseptic ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากใบพลูในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันและอาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบ จะช่วยเพิ่มแนวทางในการใช้ประโยชน์จากใบพลู และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับใบพลูอีกทางหนึ่ง

2.6 กระบวนการสกัดสารจากพืชเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

การได้มาของสารสำคัญที่มีอยู่ในพืช เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งวิตามินต่างๆ โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการสกัด (extraction) ซึ่งเป็นการแยกสารที่ต้องการออกจากวัตถุดิบธรรมชาติ เรียกการสกัดแบบนี้ว่า solid-liquid extraction โดยอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานในการละลาย และความมีขั้ว (polarity) ของตัวทำละลาย (solvent) และตัวถูกละลาย (solute) โดยทั่วไปตัวทำละลายที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ เอทานอล และ น้ำ การเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัด ตัวทำละลายที่ดีจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด สามารถแยกออกหรือกำจัดออกได้ง่าย หลังจากการสกัดแล้ว เช่น มีจุดเดือดต่ำเพื่อแยกออกโดยการกลั่นได้ง่าย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึง

ความปลอดภัยต่อการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นสารที่รับรองโดยทั่วไปว่าปลอดภัย (Generally Recognized As Safe, GRAS) ตัวอย่างของตัวทำละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการสกัดสารสำคัญจากพืชรวมทั้งสมุนไพร ได้แก่ อีเทอร์ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และอะซีโตน เป็นต้น สารสกัดที่ได้จะถูกนำมาระเหยเพื่อกำจัดเอาตัวทำละลายออกให้เหลือแต่สารสำคัญที่ต้องการ (crude extract) และทำให้สารสกัดที่ได้เข้มข้นขึ้นโดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) เพื่อสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

การสกัดสารจากพืชสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่สกัด คุณสมบัติของสารสำคัญที่มีอยู่ในพืช ความคงทนต่อความร้อน ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป วิธีการสกัดที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน (อรรถญา, 2552) ได้แก่

1. การแช่ (Maceration)

การแช่ เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยการหมักพืชหรือสมุนไพรกับตัวทำละลายในภาชนะปิด ทิ้งไว้ประมาณ 3 – 7 วัน หรือจนกระทั่งเนื้อเยื่อพืชอ่อนนุ่มลง เพื่อให้ตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปละลายเอาสารสำคัญที่มีอยู่ในพืชออกมา

ข้อดีของวิธีนี้คือ สารสกัดที่ได้ไม่ถูกความร้อน แต่เป็นวิธีที่ใช้เวลานานในการสกัด และสิ้นเปลืองตัวทำละลายมาก นิยมใช้ในการสกัดพืชสมุนไพรทางเภสัชวิทยา

2. การชะสกัด (Percolation)

การชะสกัด เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยตัวทำละลายจะไหลผ่านพืชสมุนไพรอย่างต่อเนื่องในอุปกรณ์ที่เรียกว่า Percolator พร้อมกับละลายเอาสารสำคัญออกมา นอกจากนี้จะเป็นวิธีที่ไม่ใช้ความร้อนในการสกัดแล้ว ยังเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการสกัดอีกด้วย

3. การสกัดแบบต่อเนื่อง (Soxhlet extraction)

การสกัดแบบต่อเนื่อง เป็นวิธีการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น เฮกเซน หรืออีเทอร์ การสกัดทำได้โดยการให้ความร้อนเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยขึ้นไป แล้วควบแน่นกลับลงมาแช่ใน Thimble ที่บรรจุตัวอย่างไว้ ตัวทำละลายจะสกัดเอาสารสำคัญให้หลุดออกมา เมื่อตัวทำละลายมีปริมาณมากพอก็จะเกิดแรงดันทำให้ไหลกลับสู่ขวดด้านล่าง การสกัดจึงหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง

วิธีนี้ทำให้ประหยัดตัวทำละลาย และได้สารสกัดที่มีความเข้มข้นสูง แต่การใช้ความร้อนอาจทำให้สารสำคัญบางชนิดสลายตัวได้ ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืช เช่น งา ถั่วเหลือง รำข้าว และปาล์ม เป็นต้น

นอกจากวิธีการสกัดสารจากพืชที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้ว ยังมีการสกัดสารจากพืชวิธีอื่นโดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ในการสกัด ได้แก่

1. Supercritical Fluid Extraction (SFE)

เป็นการสกัดโดยใช้ของไหลวิกฤตยิ่งยวด หรือของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid) ซึ่งเป็นจุดที่สารอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิและความดันที่เป็นจุดวิกฤต (critical point) ของไหลที่อยู่ในสถานะนี้ มีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ของเหลวหรือก๊าซแต่มีลักษณะเป็นของไหลกึ่งของเหลวและก๊าซ มีคุณสมบัติคล้ายตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถซึมผ่านได้เหมือนก๊าซ มีความข้นหนืดและแรงดึงผิวต่ำ ทำให้สามารถสกัดหรือพาสารที่ต้องการออกจากพืชได้ดี จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้นิยมนำเอาวิธีการสกัดแบบ SFE มาใช้ในการสกัดสารสำคัญจากพืชและสมุนไพรต่างๆ มากกว่าวิธีการสกัดอื่นๆ โดยเฉพาะการสกัดด้วยตัวทำละลายที่อาจมีปัญหาในการกำจัดเอาตัวทำละลายออกได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการตกค้างของตัวทำละลายในสารสกัดที่ได้ ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดแบบ SFE คือ คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (supercritical CO₂) ซึ่งมีสถานะวิกฤตที่ความดัน 73.8 บาร์ (7.4 MPa) และอุณหภูมิ 31.1 องศาเซลเซียส (304 องศาเควิน)

วิธีการสกัดแบบ SFE เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในยุโรปและอเมริกา เนื่องจากสามารถลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เวลาสกัดน้อยกว่า ไม่เกิดการเสื่อมสลายขององค์ประกอบทางเคมีของสารสกัด ข้อเสียของวิธีนี้คือ เครื่องมือยังมีราคาแพง และสถานะการสกัดที่ความดันสูง ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถทนต่อแรงดันสูงได้ (นิตยา, 2548; อริญญา, 2552)

2. Ultrasonically Assisted Extraction (UAE)

เป็นวิธีการสกัดสารจากพืชโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ต่ำ (low frequency ultrasound) 20 – 100 kHz ช่วยในการสกัด อาศัยหลักการเกิดปรากฏการณ์ Cavitation เนื่องจากคลื่นประกอบด้วยช่วงอัดและช่วงขยาย ในช่วงขยายเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวทำละลายจะทำให้เกิดฟอง (bubble) ของตัวทำละลายขนาดเล็กจำนวนมากมาย เมื่อฟองเหล่านี้ได้รับแรงจากคลื่นในช่วงอัดจะทำให้ฟองแตกออกและเกิดเป็น Microjet ที่มีความแรงมาก ทำให้ผนังเซลล์ของพืชถูกทำลาย

และทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการชะสารสำคัญออกจากเซลล์พืชที่ถูกทำลายได้มากขึ้น (สุเมธ, 2552) การสกัดโดยวิธี UAE มี 3 รูปแบบ ได้แก่

1. การสกัดทางอ้อมโดยอาศัยตัวกลางในการส่งผ่านคลื่น
2. การสกัดโดยตรงแบบใช้ ultrasound horn เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น
3. การสกัดโดยตรงแบบให้แหล่งกำเนิดคลื่นติดกับถังสกัด

3. Microwave Assisted Extraction (MAE)

เป็นวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยในการสกัด ร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย หลักการของวิธี MAE อาศัยการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟไปยังเซลล์พืช โดยทำให้โมเลกุลของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในเซลล์พืชสั่นสะเทือน เกิดแรงดันขึ้นภายในเซลล์ทำให้เซลล์แตก และปล่อยสารสำคัญที่อยู่ภายในออกมาผสมกับตัวทำละลายที่ใช้สกัด เนื่องจากกระบวนการสกัดใช้เวลาสั้นๆ ทำให้ไม่เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบของสารที่สกัดได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น วิธีการสกัดแบบ MAE ในทางการค้ามี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบระบบปิด (closed extraction vessels) หรือ multimode microwave oven
2. แบบ focused microwave oven

ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้เวลาในการสกัดสั้น ไม่เปลืองตัวทำละลาย ช่วยป้องกันการสลายตัวขององค์ประกอบของสารสำคัญที่สกัดได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น และช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตของสารสกัดที่ได้

จากข้อความที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า การสกัดสารจากพืชแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารสำคัญที่ต้องการสกัดออกมา ดังนั้นจึงใช้เป็นข้อมูลในการทำวิจัยต่อไป

นอกจากวิธีการสกัดแล้ว ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ใช้ยังมีผลต่อสารสำคัญที่สกัดออกมาได้ Pichaon (2008) ได้ศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระประเภทฟีนอลิกจากสารสกัดของใบพลู ที่ได้จากตัวทำละลายและเวลาสกัดที่ต่างกัน พบว่า เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกจากใบพลู โดยสารสกัดที่ได้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารที่สกัดได้สูงที่สุด นอกจากนี้สารสกัดที่ได้จากการสกัด 4.5 ถึง 6 ชั่วโมง มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดที่เวลาอื่น แต่ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยทางผู้วิจัยเลือกใช้เอทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่รับประทานได้

เป็นตัวทำละลายในการสกัดสารสำคัญออกมา เนื่องจากในงานวิจัยจะต้องนำสารที่สกัดออกมาได้ ไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร จากรายงานการวิจัยของ ทรงศิริ และคณะ (2551) พบว่า สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการสกัด สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมดจากเปลือกและ เมล็ดองุ่นสูงที่สุด นอกจากนี้สารสกัดที่ได้ยังมีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด สุทัศน์ และคณะ (2550) ทำการศึกษา หาชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดสารต้าน อนุมูลอิสระ ผลการศึกษาพบว่า สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 สามารถสกัดสารต้าน อนุมูลอิสระจากเนื้อมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ได้ในปริมาณมากที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved