บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวของ

ข้าวเหนียวดำสายพันธุ์ลืมผัว

ข้าว เป็นธัญพืชที่เป็นอาหารหลักของประชากรเกือบทุกประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทย มีหลักฐานแสดงให้เห็นว่าคนไทยบริโภคข้าวมาช้านาน โดยพบภาพเขียนอายุประมาณ 6,000 ปี ที่มีลักษณะคล้ายการปลูกข้าว ภาพควาย และแปลงพืชคล้ายแปลงข้าวบนผนังถ้ำที่ผาหมอนน้อย บ้านตากุ่ม ต.ห้วยไผ่ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคนไทยรู้จักการเพาะปลูกข้าวมาตั้งแต่สมัยโบราณ นอกจากนี้ยัง มีการขุดพบเมล็ดข้าวที่ถ้ำปุงฮุง จ.แม่ฮ่องสอน ลักษณะแกลบที่พบคล้ายของเมล็ดข้าวเหนียว และพบว่ามีการใช้แกลบเป็นส่วนผสมของเครื่องปั้นดินเผาที่บ้านเชียง อ.โนนนกทา ต.บ้านโคก อ.ภูเวียง จ. ขอนแก่น (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2558) ข้าวที่นิยมปลูกเพื่อนำมาบริโภค คือ ข้าวเอเชีย (*Oryza savita* Linn.) มีทั้งข้าวเจ้า หรือข้าวอินดิกา (Indica) ลักษณะเม็ดเรียว ยาว รี ลำต้นสูง มีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกหรือเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับประเทศไทยนิยมปลูกบริเวณที่ราบลุ่มตอนใต้ของแม่น้ำเจ้าพระยา และข้าวจาปอนิกา (Japonica) เป็นข้าวเหนียวเมล็ดป้อม กลมรี มีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกบริเวณประเทศจีน ญี่ปุน เกาหลี และทางภาคเหนือของไทย (บุญดิษฐ, 2549; สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2558) พันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยมีทั้งพันธุ์ข้าวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือพันธุ์ข้าวที่ได้จากการปรับปรุงพันธุ์ของเกษตรกร โดยนำข้าวหลายๆ สายพันธุ์มาปลูกรวมในแปลงเดียวกันซึ่งก่อให้เกิดการผสมข้ามสายพันธุ์และกลายพันธุ์เป็นข้าวสายพันธุ์ใหม่เรียกว่า ข้าวพื้นเมือง หรือ ข้าวพื้นบ้าน ซึ่งข้าวพื้นเมืองที่ได้อาจมีเยื่อหุ้มเมล็ด (pericarp) เป็นสีขาวหรือสีต่างๆ เช่น สีแดง หรือสีม่วงจนถึงดำ เช่น ข้าวเหนียวดำ

ข้าวเหนียวดำสายพันธุ์ลืมผัว (*Oryza Sativa* L. variety Leum Phua) เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของกลุ่มชาติพันธุ์ชาวม้ง บ้านรวมไทยพัฒนาที่ 3 ตำบลรวมไทยพัฒนา อำเภอพบพระ จังหวัดตาก ได้รับการคัดเลือกพันธุ์และรับรองพันธุ์จากกรมการข้าว ข้าวอายุเบา ลำต้นเตี้ย ควรปลูกในพื้นที่โล่ง ลมผ่านได้ ความสูงที่เหมาะสมในการปลูก คือ 400-800 เมตรจากระดับน้ำทะเล ช่วงปลูกที่เหมาะสม คือ ช่วงเริ่มฤดูฝน อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างฤดูปลูกไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส เจริญได้ดีในดินร่วนซุย หรือดินร่วนเหนียวที่มีความอุดมสมบูรณ์ ความเป็นกรด-ด่างของดินระหว่าง 4.4-6.5 ซึ่งจะให้ผลผลิตเฉลี่ย 343-455 กิโลกรัมต่อไร่ และได้เมล็ดข้าวกล้องที่ค่อนข้างอ้วน สีม่วงดำ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เปลือกเมล็ดข้าวมีสีฟางขีดดำหรือสีฟางทั้งเมล็ด ข้าวกล้องมีสีม่วงดำ (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2555)

การบริโภคข้าวเหนียวทำได้ทั้งนึ่งรับประทานกับอาหารซึ่งเมื่อสุกจะมีกลิ่นหอม รสชาติอร่อย เมื่อเคี้ยวจะกรุบ หนึบ นุ่มเหนียว หรือผสมกับข้าวสารหุงเป็นข้าวสวยหรือข้าวต้มเมื่อสุกจะได้ข้าวสีม่วงอ่อน หรือนำไปทำเป็นอาหารหวาน เช่น ข้าวเหนียวมูล ข้าวเหนียวเปียก หรือนำไปหมักกับลูกแป้งเป็นข้าวหมาก

คุณค่าทางโภชนาการและสารสำคัญ

ข้าวเหนียวดำลืมสายพันธุ์ผัวมีสารหลายชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายหลายชนิด เช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัวในกลุ่มโอเมกา 3, โอเมกา 6 และโอเมกา 9, วิตามินอี, เหล็ก, แคลเซียม, แมงกานีส, แกมมาโอไรซานอล และแอนโทไซยานิน (อภิชาติ และคณะ, 2553) โดยพบว่า วิตามินอี แอนโทไซยานิน และแกมมาโอไรซานอลมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ ที่มีสาเหตุจากอนุมูลอิสระ เช่น โรคมะเร็ง โรคหัวใจและหลอดเลือด

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการและสารสำคัญในข้าวเหนียวดำสายพันธุ์ลืมผัว*

สาร	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)
กรดไขมันอิ่มตัวทั้งหมด	2.35 (กรัม)
กรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมด	1.19 (กรัม)
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	
โอเมกา 3	33.94
โอเมกา 6	1,160.08
โอเมกา 9	1,146.41
วิตามินอี (อัลฟ่าโทโคเฟอรอล)	1.68
ไนอะซิน	6.48
วิตามินบี 1	0.05
วิตามินบี 2	0.035
แคลเซียม	16.98
เหล็ก	8.42
แมงกานีส	3.54
สังกะสี	2.36
ใยอาหาร	2.33 (กรัม)
แอนโทไซยานิน	46.56
แกมมาโอไรซานอล	50.81

ที่มา: อภิชาติ และคณะ, 2553

*แปลงเกษตรกร อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์

ข้าวหมาก

ข้าวหมากเป็นอาหารหมักพื้นบ้านของไทยที่ได้จากการนำข้าวเหนียวที่หุงสุกแล้วไปหมักกับลูกแป้งข้าวหมากที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-3 วัน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะนุ่ม ชุ่มน้ำ และน้ำควรมีลักษณะใส มีรสชาติของแอลกอฮอล์ และรสเปรี้ยวเล็กน้อย มีกลิ่นรสตามธรรมชาติที่ได้จากการหมัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) กลิ่นและรสชาติที่พบในข้าวหมากเกิดจากเชื้อราที่อยู่ในลูกแป้ง เช่น *Aspergillus* spp., *Rhizopus oryzae*. และ *Mucor* spp. *Amylomyces rouxii* สร้างเอนไซม์ อะไมเลสออกมาย่อยแป้งในข้าวเหนียวได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส กาแลกโตส และฟรุกโตส เมื่อแป้งในข้าวถูกย่อยกลายเป็นน้ำตาลจึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ทำให้น้ำที่มีอยู่ซึมออกมาเป็นน้ำเชื่อมข้าว จากนั้นเชื้อยีสต์ เช่น *Saccharomyces cerevisiae* ที่อยู่ในลูกแป้งจะที่เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ซึ่งอาจมีสูงถึงร้อยละ 10 นอกจากนี้ ในลูกแป้งยังมีแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลกติก เช่น *Pediococcus Lactobacillus Acetobacter* spp. และแบคทีเรียที่ผลิตกรดอะซิติก เช่น *Gluconobacter* spp. รวมถึงแป้งข้าวเจ้า สมุนไพรต่างๆ เช่น กระเทียม พริกไทย ข่า ที่มีส่วนช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรค (ฉัตรชัย และจีราภรณ์, 2547; เจริญ, 2548, Aidoo และคณะ, 2006; Buglass, 2011; Manosroi และคณะ, 2011) ข้าวหมากจัดเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เนื่องจากมีจุลินทรีย์ในกลุ่มโปรไบโอติก (probiotics) เช่น *S. cerevisiae* จากการศึกษาพบว่า จุลินทรีย์ในกลุ่มโปรไบโอติกมีส่วนช่วยปรับสมดุลของระบบทางเดินอาหารและระบบขับถ่าย ช่วยลดการเกิดภูมิแพ้และการอักเสบ ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในกระแสเลือด ช่วยกระตุ้นการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย และช่วยป้องกันการเกิดสารก่อมะเร็ง (ไชยวัฒน์, 2556)

วิธีทำข้าวหมาก

การทำข้าวหมาก เริ่มจากซาวข้าวเพื่อเป็นล้างสิ่งสกปรก นำข้าวไปแช่ในน้ำสะอาดประมาณ 3-4 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำซึมผ่านเข้าไปยังเอนโสเปิร์มของเมล็ดข้าว ซึ่งช่วยนำความร้อนให้กับเม็ดแป้งระหว่างการนึ่ง และยังเป็นการปรับปรุงอนุภาคของแป้งในเมล็ดข้าว ให้มีคุณสมบัติดีขึ้น จากนั้นนำข้าวไปนึ่งเพื่อให้แป้งเกิดเจลาติไนซ์ซึ่งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุลเม็ดแป้งเนื่องจากความร้อนไปทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ช สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินที่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบ ส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัว และทำให้โปรตีนที่อยู่ในข้าวเสียสภาพทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายของเอนไซม์ที่อยู่ในลูกแป้ง โดยปกติการนึ่งข้าวจะใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที หลังจากนึ่งข้าวเสร็จแล้วให้นำข้าวไปล้างน้ำเพื่อไม่ให้ข้าวติดกันเป็นก้อน และนำไปสะเด็ดน้ำให้แห้งก่อนนำไปคลุกเคล้ากับลูกแป้งข้าวหมากที่บดละเอียด โดยใช้อัตราส่วนลูกแป้ง 0.2 กรัมต่อข้าวเหนียวดิบ 100 กรัม นำข้าวที่คลุกเคล้ากับลูกแป้งจนเข้ากันดีแล้ว ใส่ในภาชนะที่ใช้หมัก ปิดด้วยผ้าขาวบาง แล้วปิดทับด้วยฝาปิดอย่างหลวมๆ และนำไปบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 2-3 วัน จะได้ข้าวหมากที่มีลักษณะเมล็ดข้าวนุ่ม รสหวาน มีกลิ่นแอลกอฮอล์เล็กน้อย (เจริญ, 2548)

ลูกแป้ง

ลูกแป้ง คือ กล้าเชื้อจุลินทรีย์ (starter) ที่มีเชื้อรา ยีสต์ และแบคทีเรียในรูปเชื้อแห้งผสมอยู่ ลูกแป้งมีหลายชนิดตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ เช่น ลูกแป้งเหล้า ลูกแป้งข้าวหมาก ลูกแป้งน้ำส้มสายชู ซึ่งแต่ละชนิดจะมีวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้เหมือนกัน คือ นำไปใช้ในการหมักกับวัตถุดิบประเภทแป้งเพื่อให้ได้น้ำตาล และแอลกอฮอล์ เช่น ข้าวหมาก สาโท กระแช่ อุ (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2558)

การผลิตลูกแป้ง นิยมทำกันในครัวเรือน ซึ่งแต่ละท้องถิ่นจะมีสูตรที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปได้จากการนำแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งข้าวเหนียวมาแช่น้ำ แล้วบดให้ละเอียดก่อนนำไปผสมกับสมุนไพรหรือเครื่องเทศ เช่น ข่า กระเทียม กานพลู พริกไทย ขิง ดีปลี โป๊ยกั๊ก ดอกจันทร์ อบเชย สมุนไพรเครื่องเทศที่ใช้จะทำหน้าที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่จำเป็นต่อการหมัก และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ เช่น จุลินทรีย์ก่อโรค จากนั้นนำลูกแป้งเดิม (ใช้เป็นแหล่งของจุลินทรีย์) โรยบนข้าวที่ผสมสมุนไพรหรือเครื่องเทศ จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดมาปั้นเป็นก้อน นำไปบ่มในบรรยากาศที่ควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 วัน จะเห็นการเจริญของเส้นใยราปกคลุมทั่วเห็นเป็นสีขาว จากนั้นลดระดับความชื้นสัมพัทธ์ ช่วงนี้ยีสต์จะใช้น้ำตาลและสร้างก๊าซออกมา และนำไปตากลม 1-2 วัน จากนั้นจึงนำไปตากแดด 1-2 แดดจนลูกแป้งแห้ง และมีน้ำหนักเบา วัดค่าความชื้นสุดท้ายได้น้อยกว่าร้อยละ 20 หรือ มีค่า a_w ไม่เกิน 0.85 (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2558)

ลูกแป้งที่ดีจะมีสีขาวนวลสีเดียวกันทั้งลูก มีน้ำหนักเบา ฟู มีโพรงอากาศข้างในแสดงถึงการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีของยีสต์ มีกลิ่นหอมแสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องเทศ เมื่อบดขยี้จะเห็นใยของรากระจายตัวดีเกาะกับผงแป้งแสดงถึงปริมาณเชื้อราเริ่มต้นที่เหมาะสม มีรสหวานแสดงถึงประสิทธิภาพในการสร้างน้ำตาลของรา ไม่มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวแสดงว่าไม่มีการปนเปื้อนของแบคทีเรียน้ำส้ม ลูกแป้งที่ดีเมื่อนำไปหมักจะให้น้ำต้อย (น้ำเชื่อมข้าว) มากและเร็ว ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหอมได้แอลกอฮอล์สูง และสภาวะการหมักไม่เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย (เจริญ, 2548; ไพบูลย์ และพัฒนา, 2548)

อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radical) คือ อะตอม โมเลกุลที่มีอิเล็คตรอนวงนอกขาดไป 1 ตัว ทำให้โมเลกุลไม่เสถียรและมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆ โดยอนุมูลอิสระจะแย่งอิเล็กตรอนจากโมเลกุลหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงมาแทนที่อิเล็กตรอนที่ขาดไปเพื่อให้ตัวเองคงตัว ส่งผลให้โมเลกุลหรืออะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นอนุมูลอิสระชนิดใหม่

ชนิดของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกาย แบ่งได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ (โอภา, 2550; Tiwari และคณะ, 2012; สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.), 2555)

1. กลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (reactive oxygen species, ROS) เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเมแทบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่ใช้ออกซิเจนในการหายใจ ส่งผลให้สารชีวโมเลกุลต่างๆ เช่น สารพันธุกรรม โปรตีน และไขมันถูกทำลาย ตัวอย่างอนุมูลอิสระในกลุ่มนี้ เช่น

1.1 ซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (superoxide anion, $O_2^{\bullet-}$) ถูกสร้างขึ้นเมื่อออกซิเจนรับอิเล็คตรอนมา 1 ตัว ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขนส่งอิเล็คตรอนภายในเซลล์ และเป็นอนุมูลเริ่มต้นของการเกิดอนุมูลอิสระตัวอื่นๆ โดยอนุมูลของซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออนสามารถเกิดปฏิกิริยาดิสมิวเตชัน (dismutation) ได้ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ได้อนุมูลไฮดรอกซิล

1.2 อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, $^{\bullet}OH$) เป็นอนุมูลที่มีความรุนแรงและว่องไวในการดึงอิเล็คตรอนจากโมเลกุลอื่น อนุมูลไฮดรอกซิลจะไปออกซิไดส์โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต สารพันธุกรรม และเอนไซม์ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป สิ่งมีชีวิตสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลได้จากการแตกตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในสภาวะที่ถูกรังสี หรือความร้อน รวมถึงสร้างได้จากปฏิกิริยาฮาเบอร์ไวส์ (Haber-Weiss reaction) และปฏิกิริยาเฟนตัน (fenton reaction) โดยมีซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) และไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารเริ่มต้น และมีโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ

$$O_2^{\bullet-} + H_2O_2 \xrightarrow{\text{โลหะ}} O_2 + {}^{\bullet}OH + OH^- \qquad \text{ปฏิกิริยาฮาเบอร์ไวส์}$$

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{3+} + {}^{\bullet}OH + OH^- \qquad \text{ปฏิกิริยาเฟนตัน}$$

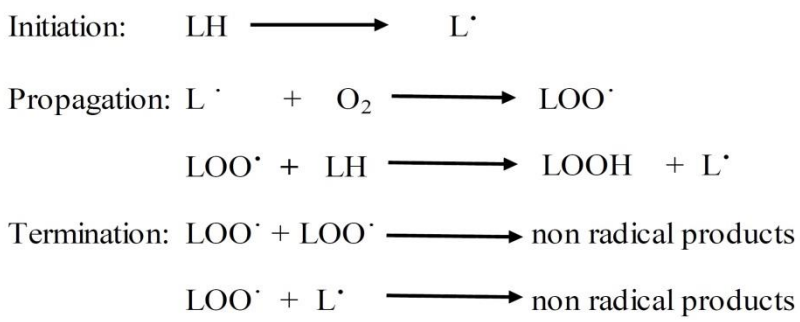
1.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) สร้างจากการเติมอิเล็คตรอนตัวที่ 2 ให้กับซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) ได้เปอร์ออกไซด์ (O_2^{2-}) ซึ่งจะถูกสร้างเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) นอกจากนี้ ร่างกายสามารถสร้างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบที่มีหมู่ซัลไฮดริล ปฏิกิริยาที่มีฟลาวินเป็นโคเอนไซม์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของควิโนน ปฏิริยาของเอนไซม์ซุปเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส (superoxide dismutase: SOD) และกระบวนการขนส่งออกซิเจนในไมโตรคอนเดรีย ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ไม่ใช้อนุมูลอิสระแต่เป็นสารที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและมีความคงตัวสูง สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปทำลายโมเลกุลที่อยู่ภายในเซลล์ให้ได้รับความเสียหายได้ รวมถึงทำให้อิออนของเหล็กที่อยู่ในไมโอโกลบิน ฮีโมโกลบิน และไซโตโครม ซี เสื่อมสภาพ

1.4 อนุมูลเปอร์รอกซี (peroxy radical, $ROO^{\bullet}$) เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่แบ่งได้เป็น 3 ระยะ (ภาพที่ 2.1) คือ (Abd El Baky และ El-Baroty, 2013)

ระยะเริ่มต้น (initiation) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (LH) เมื่ออยู่ในสภาวะที่มี แสง ความร้อน เอนไซม์ หรือโลหะจะส่งผลให้ไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลุดออกได้อนุมูลอิสระ ($L^{\bullet}$)

ระยะเพิ่มจำนวน (propagation) อนุมูลอิสระ ($L^{\bullet}$) ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซี ($LOO^{\bullet}$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวโมเลกุลอื่นเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, LOOH) และอนุมูลอิสระใหม่เพิ่มขึ้นเข้าสู่วงจรเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่

ระยะสิ้นสุด (termination) อนุมูลเปอร์ออกซีหรืออนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นอาจรวมตัวกันเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีความคงตัวส่งผลให้ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว
ที่มา: Abd El Baky และ El-Baroty, 2013

1.5 ซิงเล็ท ออกซิเจน (singlet, $(^1O_2)$ เป็นสารที่ไม่จัดเป็นอนุมูลอิสระ แต่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นสูง เช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัว สารประกอบอะโรมาติก กรดอะมิโน

2. กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (reactive nitrogen species, RNS) เช่น

2.1 ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide,$NO^{\bullet}$) พบในบรรยากาศ และในสิ่งมีชีวิต เป็นก๊าซไม่มีสี ละลายได้ในน้ำและในไขมัน ทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท ช่วยขยายหลอดเลือด ป้องกันการเชื่อมติดกันระหว่างเซลล์ ทำหน้าที่ในกระบวนการยับยั้งภูมิคุ้มกัน ช่วยทำลายเซลล์มะเร็ง ไนตริกออกไซด์สร้างมาจากเอนไซม์ไนตริกออกไซด์ ซินแทส (nitric oxide synthase, NOS) ไนตริกออกไซด์ที่สร้างขึ้นในแมคโครฟาจจะทำหน้าที่ทำลายเซลล์แบคทีเรียหรือไวรัสหรือเซลล์มะเร็ง ส่วนไนตริกออกไซด์ที่สร้างขึ้นในเซลล์ประสาท เซลล์เยื่อบุผนังหลอดเลือด หรือเกร็ดเลือดจะทำหน้าที่

กระตุ้นการสื่อประสาท และขยายหลอดเลือด นอกจากนี้ ไนตริกออกไซด์ยังก่อให้เกิดสภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) รวมถึงทำลายระบบการต้านอนุมูลอิสระในร่างกาย

2.2 เปอร์ออกซีไนไตรท์ (peroxynitrite, $ONOO^-$) เป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง สร้างขึ้นจากแมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นด้วยนิวโทรฟิว ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงในการการเกิดปฏิกิริยากับเซลล์บางชนิดของร่างกาย มีฤทธิ์ทำลายสารพันธุกรรม ไขมัน โปรตีนในร่างกาย รวมถึงสามารถเปลี่ยนเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล เพื่อเริ่มกระบวนการออกซิเดชันของกดไขมันไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการคลายตัวของหลอดเลือดและยับยั้งการเกาะกลุ่มกันของเกล็ดเลือดได้ด้วย

3. กลุ่มที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (reactive chlorine species, RCS) อนุมูลอิสระในกลุ่มนี้ประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน เช่น กรดไฮโปคลอรัส (hypochlorous acid, HOCL) ซึ่งถูกสร้างจากเอนไซม์มายอีโรเปอร์ออกซิเดส (myeloperoxidase) ในเม็ดเลือดขาวเพื่อทำลายสิ่งแปลกปลอมในร่างกาย

แหล่งของอนุมูลอิสระ

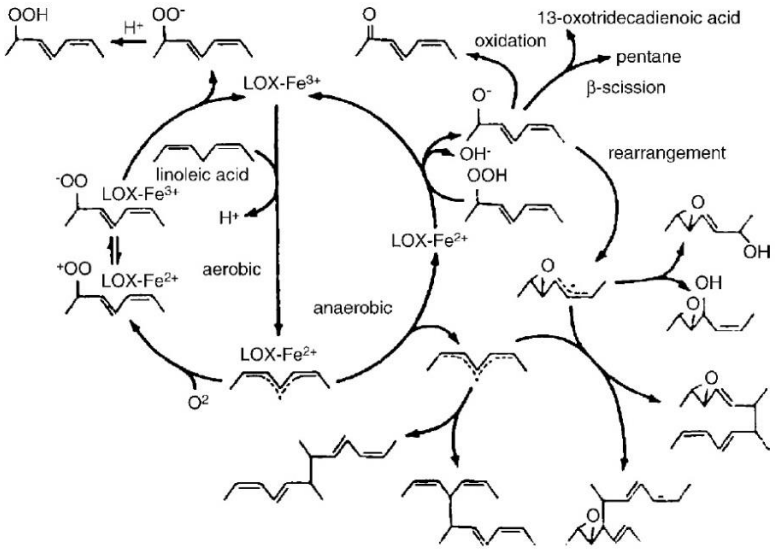
อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายเกิดจากปัจจัยภายในร่างกาย เช่น กระบวนการเมแทบอลิซึมของสารอาหาร การทำงานของเอนไซม์บางชนิด การกำจัดสิ่งแปลกปลอมหรือเชื้อโรค การอักเสบ การออกกำลังกาย และปัจจัยภายนอกร่างกาย ได้แก่ ยารักษาโรค มลพิษ ควันบุหรี่ แอลกอฮอล์ รังสี โอโซน เป็นต้น

1. ปัจจัยภายในร่างกายที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่น (โอภา, 2550; เจนจิรา และประสงค์, 2554; สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.), 2555)

1.1 กระบวนการเมแทบอลิซึมของสารอาหารโดยอาศัยออกซิเจนเพื่อให้ได้พลังงาน อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึมจะถูกออกซิเจนจับเกิดเป็นอนุมูลของออกซิเจนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล ($HO^{\bullet}$), ซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และอนุมูลเปอร์ออกซิล ($ROO^{\bullet}$) และอนุมูลอิสระชนิดอื่น เช่น ไนตริกออกไซด์ (NO)

1.2 ปฏิกิริยาของเอนไซม์ภายในร่างกาย เช่น (Halliwell และคณะ, 1995)

เอนไซม์ไลพอกซีจีเนส (lipoxygenase; $LOX\text{-}Fe^{3+}$) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้เป็นไฮโดรเปอร์รอกไซด์ซึ่งจะสลายต่อได้อนุมูลของกรดไขมัน



ภาพที่ 2.2 การทำงานของเอนไซม์ไลพอกซีจีเนส
ที่มา: Baysal และ Demirdöven, 2007

เอนไซม์แซนทีนออกซิเดส (xanthine oxidase) เกี่ยวข้องกับการสลายเบสพิวรีนในร่างกาย (purine) โดยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนไฮโพแซนธีน (hypoxanthine) เป็นแซนธีน (xanthine) และกรดยูริก (uric acid) ตามลำดับ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดอนุมูลซุปเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\bullet-}$) ดังสมการ

$$\text{Hypoxanthine} + O_2 + H_2O \xrightarrow{\text{xanthine oxidase}} \text{Xanthine} + H_2O_2 + O_2^{\bullet-}$$

$$\text{Xanthine} + O_2 + H_2O \xrightarrow{\text{xanthine oxidase}} \text{Uric acid} + H_2O_2 + O_2^{\bullet-}$$

1.3 กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาว เมื่อร่างกายได้รับเชื้อโรค เช่น ไวรัส หรือแบคทีเรียจะกระตุ้นให้มีการหลั่งเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดนิวโทรฟิล (neutrophil) และแมคโคฟาจ (macrophage) เพื่อทำลายเชื้อโรค ทำให้เกิดการสร้างซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ NADPH oxidase ที่อยู่บริเวณด้านนอกของเซลล์เมมเบรน รวมถึงพบว่าในเม็ดสี (granule) ของเซลล์เม็ดเลือดขาวมีเอนไซม์มายอีโรเปอร์ออกซิเดส (myelo-peroxidase) ที่ทำให้เกิดอนุมูลไฮโปคลอรัส (HOCL) ซึ่งทำหน้าที่ทำลายเชื้อโรคเช่นกัน อย่างไรก็ตาม

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำลายเชื้อโรคสามารถทำลายเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงได้เช่นกัน (สุรพันธุ์, 2558)

2. ปัจจัยภายนอกร่างกายที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่น (โอภา, 2550; เจนจิรา และประสงค์, 2554; สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.), 2555)

2.1 ยารักษาโรค โดยเฉพาะยารักษาโรคมะเร็ง เช่น adriamycin, mitomycin C, bleomycin เมื่อรับประทานเข้าไปจะเกิดอนุมูลอิสระและเกิดภาวะลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ลิพิดถูกออกซิไดซ์โดยอนุมูลอิสระ รวมถึงยาขยายหลอดเลือดซึ่งการขยายหลอดเลือดจะไปทำให้ร่างกายสามารถขนส่งออกซิเจนไปยังอวัยวะต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้นด้วย

2.2 รังสี เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา อาจเป็นสาเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกายจากการถ่ายทอดพลังงานให้กับน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ และก่อให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในเซลล์นั้น ได้สารอนุมูลอิสระเกิดขึ้น

2.3 ควันบุหรี่ ควันไอเสียและโรงงานอุตสาหกรรม ในควันบุหรี่มีส่วนประกอบของไนตริกออกไซด์ (NO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และเปอร์รอกซีไนไตรท์ (ONOO-) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($HO^{\bullet}$), ซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในควันจากท่อไอเสีย และโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสารพวกคาร์บอนมอนอกไซด์และไนตริกออกไซด์ ซึ่งเมื่อสัมผัสกับอากาศและแสงแดดจะเปลี่ยนเป็นโอโซน และไนโตรเจนไดออกไซด์ เมื่อเราหายใจเอาสารเหล่านั้นเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเยื่อหุ้มเซลล์ โปรตีนในร่างกายได้

2.4 โอโซน ไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระแต่จัดเป็นสารออกซิไดส์แรงสูงซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้จากการกระตุ้นของคลื่นแสง

2.5 โลหะหนัก เช่น เหล็ก ทองแดง แคดเมียม ปรอท สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระโดยกระตุ้นให้เกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (Stohs และ Bagchi, 1995)

สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) คือ สารที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระ ซึ่งสารดังกล่าวอาจดักจับอนุมูลอิสระ (radical scavenging) โดยการให้อิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ หรือสามารถหยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (chain-breaking) โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากอนุมูลอิสระ หรือยับยั้งการทำงานของซิงเล็ทออกซิเจน ($^1O_2$) หรือเสริมฤทธิ์ (synergism) การทำงานของสารต้านอุนมูลอิสระ หรือจับกับโลหะที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น เหล็ก ทองแดง หรือยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ (Scheibmeir และคณะ, 2005; เจนจิรา และประสงค์, 2554;)

ชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. สารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มเอนไซม์ (antioxidant enzymes) ร่างกายมีกลไกควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระให้อยู่ในภาวะสมดุล โดยสร้างสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของเอนไซม์ขึ้นมาเพื่อทำลายอนุมูลอิสระ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการทำลายอนุมูลอิสระที่สำคัญ ได้แก่ (โอภา, 2550; สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.), 2555)

1.1 เอนไซม์กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase; GPx) เป็นเอนไซม์ที่มีธาตุ ซิลิเนียมเป็นองค์ประกอบ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมถูกทำลายด้วยอนุมูลอิสระ โดยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยารีดักชั่นของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งถือเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันด้วย และลิพิดเปอร์ออกไซด์ (LOOR) ทำให้สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (lipid peroxidation) ในการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จำเป็นต้องใช้กลูตาไธโอน (GSH) ในรูปของรีดิวซ์ฟอร์มเป็นตัวให้อิเล็คตรอน ดังสมการ

$$H_2O_2 + 2GSH \xrightarrow{GPx} GSSG + H_2O$$

$$LOOH + 2GSH \xrightarrow{GPx} LOH + GSSG + H_2O$$

1.2 เอนไซม์ซุปเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase: SOD) โครงสร้างประกอบด้วยโลหะ เช่น ทองแดง แมงกานีส สังกะสี และเหล็กที่อยู่ตรงบริเวณที่ใช้จับกับสารตั้งต้น (active site) โดยจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชั่นและออกซิเดชันเป็นวงจร เอนไซม์ชนิดนี้มีหน้าที่สำคัญในการกำจัดซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) โดยไปเร่งปฏิกิริยาดิสมิวเตสในการเปลี่ยนซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน ($O_2^{\bullet-}$) เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งจะถูกเอนไซม์กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (GPx) และเอนไซม์คาตาเลส (CAT) เปลี่ยนเป็นน้ำ ดังสมการ

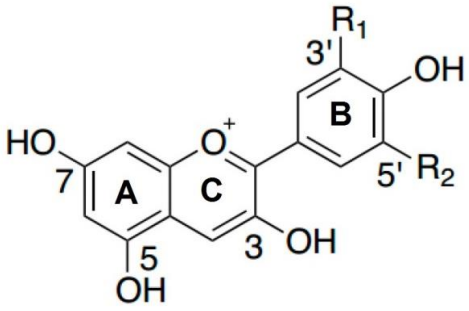
$$2\,O_2^{\bullet-} + 2H^+ \xrightarrow{SOD} H_2O_2 + O_2 \xrightarrow{GPx,\ CAT} H_2O$$

1.3 เอนไซม์คาตาเลส (catalase, CAT) โมเลกุลประกอบด้วยเฟอร์ริโปรโตพอร์ไฟริน (ferriprotoporphyrin) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นน้ำ และออกซิเจน

2. สารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มที่ไม่ใช่เอนไซม์ (nonenzymatic antioxidants) หากร่างกายได้รับอนุมูลอิสระในปริมาณมาก กลไกการกำจัดอนุมูลอิสระโดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ในร่างกายอาจมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องได้รับสารต้านอนุมูลจากภายนอกร่างกาย เช่น

2.1 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) พบทั่วไปในผัก ผลไม้ ธัญชาติ เครื่องดื่มต่างๆ เช่น ชา กาแฟ เบียร์ ไวน์ เป็นสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) ที่พืชสร้างขึ้นเพื่อใช้ป้องกันตัวเองจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น เชื้อโรค แมลง แสงอัลตร้าไวโอเลต และต้านอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกประกอบด้วยวงแหวน อะโรมาติกอย่างน้อย 1 วงจับอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) อย่างน้อย 1 หมู่ สารประกอบฟีนอลิกที่พบในธรรมชาติมีตั้งแต่โครงสร้างอย่าง่าย เช่น กรดฟีนอลิก ไปจนถึงโครงสร้างโพลีเมอร์ซับซ้อน เช่น แทนนิน สารประกอบฟีนอลิกที่พบมากในพืช คือฟลาโวนอยด์ (flavonoids) สารในกลุ่มนี้มีโครงสร้างประกอบด้วยฟลาแวน (flavan nucleus) ที่มีคาร์บอน 15 อะตอมเรียงเป็นวงแหวน 3 วง (C6-C3-C6) จากโครงสร้างของฟลาโวนอยด์สามารถแบ่งได้เป็น 6 กลุ่มย่อย คือ (1) ฟลาโวน (flavones) พบในคื่นช่าย ข้าวสาลี ชาเขียว ชาดำ ไวน์แดง (2) ฟลาโวนอล (flavonols) พบในบรอกโคลี องุ่น แอปเปิล เบอร์รี่ (3) ฟลาวานอล (flavanols) (4) ฟลาวาโนน (flavanones) พบในพืชตระกูลส้ม มะนาว (5) ไอโซฟลาโวน (isoflavones) พบในพืชตระกูลถั่ว โดยเฉพาะถั่วเหลือง และ (6) แอนโทไซยานิน (anthocyanins) พบในผัก ผลไม้หลายชนิดที่มีสีม่วง เช่น กะหล่ำปลีม่วง มะเขือม่วง ข้าวเหนียวดำ องุ่นม่วง (Dai และ Mumper, 2010) สารในกลุ่มฟลาโวนอย์มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ โดยสามารถจับกับอนุมูลอิสระสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชั่นของไขมันไม่อิ่มตัว สามารถยับยั้งการสร้างอนุมูลอิสระโดยจับกับสารโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง สามารถเหนี่ยวนำให้เอนไซม์ที่ทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระทำงานได้ดีขึ้นรวมถึงสามารถป้องกันความเสียหายของสารพันธุกรรมได้ด้วย (สมาคมเพื่อการวิจัยอนุมูลอิสระไทย (สวอ.), 2555)

2.2 แอนโทไซยานิน (anthocyanins) เป็นรงควัตถุที่ให้สีม่วง น้ำเงิน และแดงที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในไซโตพลาสซึมของพืชและเก็บสะสมไว้ในแวคิวโอล (Mol และคณะ, 1998) จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานินที่พบในพืชจะอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะไกลโคน เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) และส่วนที่เป็นน้ำตาล โครงสร้างของแอนโทไซยานิดินประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (A) ต่อกันกับวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก (C) ซึ่งต่อกับวงแหวนอะโรมาติก (B) (ภาพที่ 2.3) แอนโทไซยานินดินที่พบในพืชส่วนใหญ่มี 6 ชนิด คือ พีลาร์โกนิดิน (pelargonidin) พีโอนิดิน (peonidin) เดลฟินิดิน (delphinidin) ไซยานิดิน (cyaniding) มัลวิดิน (malvidin) และพีทูนิดิน (petunidin) (Kamiloglu และคณะ 2015) น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของแอนโทไซยานินอาจเป็นกลูโคส กาแลกโตส แรมโนส ไซโรส ราบิโนส หรือรูติโนสโดยเกาะอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 หรือตำแหน่งที่ 3 และ 5 หรือตำแหน่งที่ 3 และ 7 ในโมเลกุลของแอนโทไซยานิดิน (นิธิยา, 2545)



Anthocyanidin	R_1	R_2
Pelargonidin	H	H
Cyanidin	OH	H
Delphinidin	OH	OH
Peonidin	OCH_3	H
Petunidin	OCH_3	OH
Malviidin	OCH_3	OCH_3

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของแอนโทไซยานิดิน
ที่มา: ดัดแปลงจาก Wang และคณะ, 2014

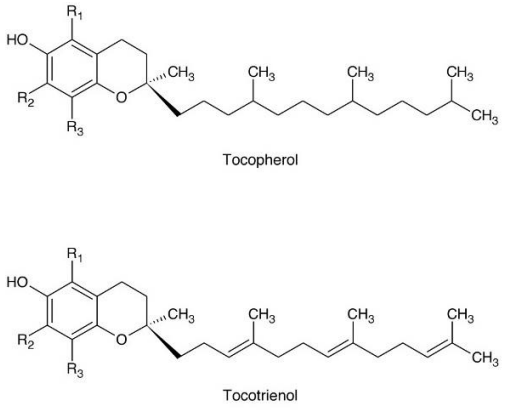
แอนไทไซยานินพบในอาหารหลายชนิด เช่น ดอกอัญชัน องุ่น เชอรี่ ลูกหม่อน ราสเบอรี่ สตอเบอรี่ มะเขือม่วง กระหล่ำปลีม่วง หอมแดง มันเทศ ถั่วดำ ถั่วแดง มันเทศ และข้าวสีต่างๆ เช่น ข้าวเหนียวดำ ข้าวสังข์หยด ข้าวหอมนิล Plaitho และคณะ (2013) ศึกษาปริมาณแอนไทไซยานินในข้าวสี 6 สายพันธุ์ พบว่า ข้าวเหนียวดำมีปริมาณแอนโทไซยานินมากสุด รองลงมา คือ ข้าวไรซ์เบอรี่ ข้าวมันปู ข้าวหอมมะลิแดง ข้าวสังข์หยด และข้าวหอมนิล ตามลำดับ นอกจากนี้ Sompong และคณะ (2011) ได้วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวสีแดง 9 สายพันธุ์ และข้าวสีดำ 3 สายพันธุ์ จากประเทศไทย จีน และศรีลังกา ผลการวิเคราะห์พบว่า ข้าวสีดำมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าข้าวสีแดง รวมถึงพบว่า ข้าวสีดำมีแอนโทไซยานินในรูปของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (cyanidin 3-glucoside) มากที่สุด

บทบาทสำคัญของแอนโทไซยานินต่อร่างกาย คือ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยการให้ไฮโดรเจนอะตอมหรืออิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ เช่น ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไฮดรอกซิล ($^{\bullet}OH$) ซิงเล็ท ออกซิเจน (singlet, ($^1O_2$) และซุปเปอร์ออกไซด์ แรดิคอล (O_2^-) (Oancea และ Oprean, 2011; Jhin และ Hwang, 2014) จึงสามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคหัวใจ โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน และโรคข้ออักเสบได้ (Rechner และ Kroner, 2005; Wang และ Stoner, 2008; Cassidy และคณะ, 2013)

2.3 แกมมาโอไรซานอล เป็นเอสเทอร์ของกรดเฟอรูลิก (ferulic acid) และสเตอรอล หรือสารประกอบไตรเทอร์พีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohol) ที่พบมากในรำข้าว เมล็ดข้าว เปลือกข้าว และเอนโดสเปอร์ม (Goufo และ Trindade, 2014) ภคินี และคณะ (2557) ศึกษาปริมาณแกมมาออริซานอลในข้าวกล้องจำนวน 10 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ปทุมธานี1 ขาวดอกมะลิ 105 ชัยนาท 1 กข31 สังข์หยด หอมกระดังงา กข6 เหนียวดำชุมแพ เหนียวดำช่อไม้ไผ่ และเหนียวดำหมอ ผลการศึกษาพบว่า ข้าวกล้องมีปริมาณแกมมาออริซานอล 286.16, 203.88, 196.72,180.41, 170.74, 205.35, 221.47, 391.97, 323.13 และ 388.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แกมมาโอไรซานอลเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยลดการอักเสบ ช่วยยับยั้งการเกาะตัวของ

เกร็ดเลือด ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล ช่วยเพิ่มระดับเอช ดี แอล คอเลสเตอรอล (HDL cholesterol) ในกระแสเลือด และยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระโดยการให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ เช่น DPPH (Cicero และ Gaddi, 2001; Akiyama และคณะ, 2005 Juliano และคณะ, 2005; Saenju และคณะ, 2011)

2.4 วิตามินอี เป็นวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมันและน้ำมัน พบในจมูกข้าว ข้าวสาลี ข้าวกล้อง น้ำมันพืชต่างๆ เช่น น้ำมันข้าวโพด น้ำมันรำข้าว น้ำมันถั่วเหลือง และเนย เป็นต้น โครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนคาร์บอนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เกาะอยู่ เรียก tocol หรือ chromanol ring และสายข้างไฮโดรคาร์บอน จากความแตกต่างของพันธะที่สายข้างไฮโดรคาร์บอน ทำให้แบ่งวิตามินอีออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีพันธะเดี่ยวตรงสายไฮโดรคาร์บอน เรียก โทโคเฟอรอล (tocopherol) และกลุ่มที่มีพันธะคู่ตรงสายไฮโดรคาร์บอน เรียก โทโคไตรอีนอล (tocotrienol) นอกจากนี้ความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันในวงแหวนคาร์บอนทำให้แบ่งวิตามินอีได้เป็น 4 ชนิด คือ อัลฟ่า, เบต้า, แกรมม่า และเดลต้า (นัยนา, 2553)

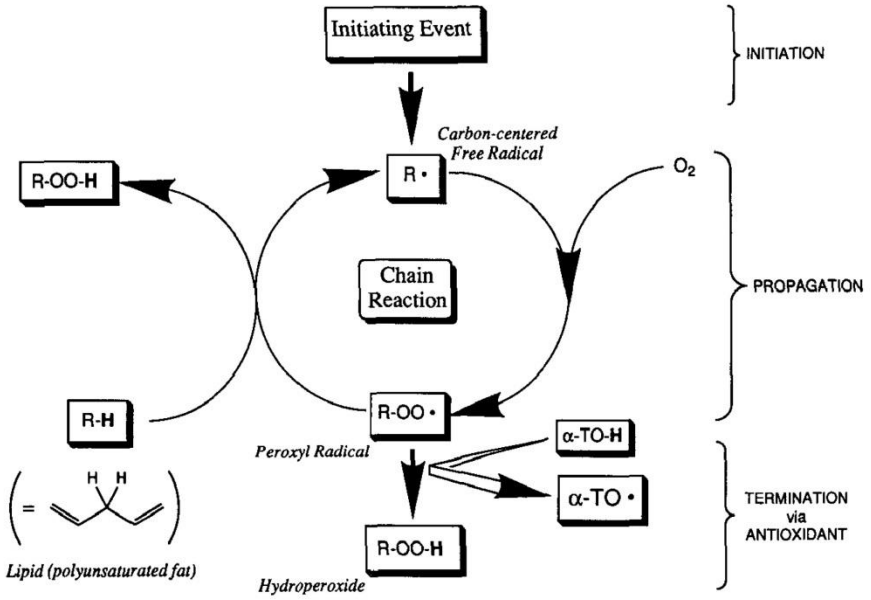


Compound	R_1	R_2	R_3
α-Tocopherol and α-Tocotrienol	CH_3	CH_3	CH_3
β-Tocopherol and β-Tocotrienol	CH_3	H	CH_3
γ-Tocopherol and γ-Tocotrienol	H	CH_3	CH_3
δ-Tocopherol and δ-Tocotrienol	H	H	CH_3

ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของวิตามินอี
ที่มา: Kashiwagi และ Huang, 2014

บทบาทสำคัญของวิตามินอีในการต้านอนุมูลอิสระ คือ สามารถดักจับอนุมูลอิสระ (radical scavenging) และหยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (chain-breaking) (Farbstein และคณะ, 2010; Burton และ Traber, 1999) โดยพบว่า วิตามินสีสามารถให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลเปอร์ออกซี ($LOO^{\bullet}$) เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (LOOH) ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันหยุดลง อนุมูลอิสระของวิตามินอีที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ออกซี ($LOO^{\bullet}$) ตัวอื่น ได้สารที่มีความว่องไวต่ำ (Burton และ Traber, 1999) (ภาพที่ 25.) จากการศึกษาพบว่า วิตามีอีสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง, แอล ดี แอล คอเลสเตอรอล (LDL cholesterol) และเซลล์เมมเบรน (Subasree, 2014) จึงมีส่วนช่วยป้องกันไม่ให้เซลล์

ถูกทำลายด้วยอนุมูลอิสระ รวมถึงพบว่า วิตามินอีสามารถลดการอักเสบลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (coronary heart disease) ช่วยป้องกันการเกิดมะเร็งในอวัยวะต่างๆ เช่น ลำไส้ใหญ่, ปอด, เต้านม และต่อมลูกหมาก (Rizvi และคณะ, 2014)

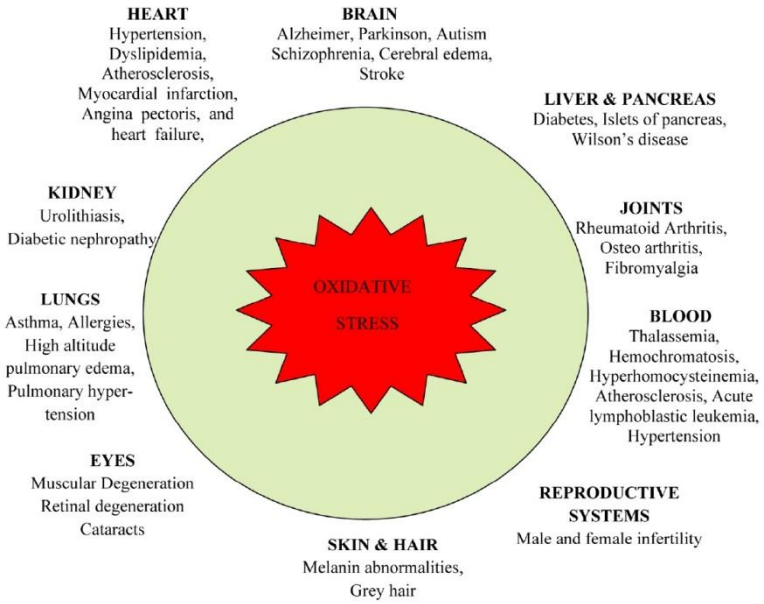


ภาพที่ 2.5 กลไกการต้านอนุมูลอิสระของวิตามินอี
ที่มา: Burton และ Traber, 1999

ภาวะเครียดจากออกซิเดชัน

ภาวะเครียดจากออกซิเดชัน (oxidative stress) เกิดขึ้นเมื่อมีอนุมูลอิสระและสารที่เป็นผลผลิตจากอนุมูลอิสระมากกว่าสารต้านอนุมูลอิสระ ภาวะดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดอนุมูลอิสระและผลผลิตจากอนุมูลอิสระมากขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นจากการออกกำลังกาย การเจ็บป่วย การบาดเจ็บ การอักเสบ การติดเชื้อ การได้รับสารพิษ การได้รับอนุมูลอิสระจากอาหารและมลพิษ หรือการที่เซลล์ได้รับออกซิเจนหลังจากขาดเลือดชั่วขณะหรือการลดน้อยลงของสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความบกพร่องของร่างกายในการสร้างเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ ความผิดปกติในการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระ หรืออาจเกิดจากการได้รับสารต้านอนุมูลอิสระจากอาหารไม่เพียงพอ ซึ่งภาวะดังกล่าวส่งผลให้เกิดความเสียหายกับสารชีวโมเลกุลในร่างกาย เช่น ดีเอ็นเอ โปรตีน และลิพิด เนื่องจาก สารชีวโมเลกุลดังกล่าวมีอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนอะตอมที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้อนุมูลอิสระสามารถดึงอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนออกจากสารชีวโมเลกุลเหล่านั้นง่ายขึ้น เมื่อดีเอ็นเอ โปรตีน และลิพิดที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ถูกออกซิไดส์โดยอนุมูลอิสระส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายอันเป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือดแข็งตัว

โรคมะเร็งโรคเบาหวาน โรคข้ออักเสบ โรคพากินสัน โรคอัลไซเมอร์ โรคที่เกี่ยวกับความผิดปกติของระบบภูมิคุ้มกัน และโรคที่เกิดความเสื่อมของระบบประสาท (โอภา, 2550; Rahman และคณะ, 2012; Kabel, 2014)



ภาพที่ 2.6 โรคที่มีสาเหตุมาจากภาวะเครียดจากออกซิเดชัน
ที่มา: Rahman และคณะ, 2012

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fernandez-Orozco และคณะ (2007) นำถั่วเหลืองหมักกับ *Aspergillus oryzae*, *Rhizopus oryzae* หรือ *Bacillus subtilis* ที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนเนื้อที่ได้จากการหมักมาหาปริมาณวิตามินอี และสารประกอบโพลีฟีนอล พบว่า ถั่วเหลืองที่หมักกับ *A. oryzae*, *R. oryzae* หรือ *B. subtilis* มีปริมาณวิตามินอีเพิ่มสูงขึ้น 31, 30, และ 89 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ รวมถึงพบว่า ถั่วเหลืองหมักมีปริมาณโพลีฟีนอลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถั่วดิบ

Lee และคณะ (2007) ได้นำถั่วดำนึ่งมาหมักกับเชื้อรา *Aspergillus awamori* ที่อุณหภูมิ 25, 30 หรือ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน พบว่า ถั่วดำหมักที่ 30 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานินในรูปของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (cyaniding 3-glucoside) สูงสุด โดยมีปริมาณสูงถึง 1.4 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ขณะที่ถั่วดำหมักที่ 25 หรือ 35 องศาเซลเซียส และถั่วดำที่ไม่ผ่านการหมักมีปริมาณแอนโทไซยานินในรูปของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ 1.3, 1.1 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

Kim และคณะ (2008) ศึกษาประสิทธิภาพของถั่วเหลืองหมัก (Chungkookjang) ต่อการป้องกันความเป็นพิษของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยนำเซลล์ไฟโบรบลาสจากตัวอ่อนหนู (NIH/3T3 cell line) ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 50 ไมโครโมล และในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (50 ไมโครโมล) ผสมกับสารสกัดที่ได้จากถั่วเหลืองหมักด้วยเอทานอลในปริมาณ 50-150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และวัดความเสียหายของสารพันธุกรรม (DNA) ด้วยวิธี Comet พบว่า เซลล์ที่ได้รับสารสกัดจากถั่วเหลืองหมักมีปริมาณสารพันธุกรรมที่ได้รับความเสียหายจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าเซลล์ที่ได้รับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

Plaitho และคณะ (2013) นำข้าวหอมมะลิแดง ข้างสังข์หยด ข้าวมันปู ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวหอมนิล และข้าวเหนียวดำมาหมักกับลูกแป้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน เพื่อให้ได้ข้าวหมาก หลังจากนั้นนำข้าวหมากที่ได้มาหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการยับยั้งสารก่อกลายพันธุ์โดยใช้แมลงหวี่เป็นสัตว์ทดลอง ผลการทดลองพบว่า ข้าวหมากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการยับยั้งสารก่อกลายพันธุ์ (ยูรีเทน) ในแมลงหวี่สูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการหมัก รวมถึงพบว่า ข้าวหมากจากข้าวเหนียวดำมีประสิทธิภาพดีกว่าข้าวสีชนิดอื่น

dos Reis และคณะ (2014) นำชาดำ หรือโกจิเบอรี่หมักกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณน้ำตาลในอาหารหมักลดลง แต่ปริมาณโพลีฟีนอลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอาหารที่ไม่ผ่านการหมัก

Abd Razak และคณะ (2015) ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในรำข้าวและรำข้าวที่หมักกับเชื้อ *Rhizopus oligosporus* และ *Monascus purpureus* ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส นาน 12 วัน พบว่า เมื่อนำตัวอย่างมาสกัดด้วยน้ำกลั่น และนำไปวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ พบว่า รำข้าวหมักมีปริมาณสารฟีนอลิก (8.38 มิลลิกรัมของกรดแกลลิคต่อกรัมตัวอย่าง) สูงกว่ารำข้าวที่ไม่ผ่านการหมัก (1.66 มิลลิกรัมของกรดแกลลิคต่อกรัมตัวอย่าง) ส่วนการศึกษาคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระได้ทำการศึกษาด้วยวิธี ferric reducing ability of plasma (FRAP) เพื่อวัดความสามารถของตัวอย่างในการให้อิเล็กตรอนกับ ferric tripyridyltriazine (Fe^{3+}-TPTZ) พบว่า รำข้าวหมักมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่ารำข้าวที่ไม่ผ่านการหมักถึง 2 เท่า

Rashid และคณะ (2015) นำรำข้าวหมักกับเชื้อแบคทีเรีย *Pediococcus acidilactici, Lactococcus lactis* หรือ *Pediococcus pentoseous* ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน พบว่า รำข้าวหมักมีปริมาณอัลฟ่าโทโคเฟอรอลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรำข้าวไม่หมัก ในส่วนของแกมมาโอไรซานอล พบว่า รำข้าวหมักกับ *P. acidilactici* มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่รำข้าวหมักกับ *L. lactis* หรือ *P. pentoseous* มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลลดลงเมื่อเทียบกับรำข้าวไม่หมัก

Ti และคณะ (2015) วิเคราะห์หาปริมาณสารโพลีฟีนอลและศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องและข้าวขาวหุงสุกที่ผ่านและไม่ผ่านการจำลองการย่อยในร่างกายมนุษย์ ผลการศึกษา

พบว่า ข้าวที่ผ่านการจำลองการย่อยมีปริมาณสารโพลีฟีนอลและศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อวัดด้วยวิธี oxygen radical absorbance capacity (ORAC) สูงกว่าข้าวสุก

Ghosh และคณะ (2015) ทดสอบคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของ Haria (เครื่องดื่มที่ได้จากการหมักข้าวของอินเดีย) Haria ได้จากการนำข้าวไปหมักกับหัวเชื้อที่เรียกว่า Bakhar ที่อุณหภูมิห้องนาน 3-4 วัน ผลการศึกษาพบว่า Haria มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อวัดด้วยวิธี 1,1-diphenyl-2-picryhydrazyl (DPPH) เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้หมัก

กรอบแนวคิดงานวิจัย