บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ข้าวเหนียวก่ำพันธุ์พื้นเมืองและความสำคัญ

ข้าวเหนียวก่ำ เป็นการเรียกตามลักษณะสีของเมล็ดข้าวที่มีสีม่วงดำหรือแดงก่ำตามภาษาพื้นเมืองทางภาคเหนือ นิยมปลูกมากภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการปลูกทั่วไปใน ประเทศสาธาณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว สาธารณรัฐเวียดนาม อินเดีย ญี่ปุ่น และสาธาณรัฐประชาชนจีน ข้าวเหนียวก่ำมีลักษณะเป็นข้าวพันธุ์ไวแสงและเป็นข้าวเหนียว ปลูกได้เฉพาะนาปี มีทั้งชนิดที่เป็นข้าวไร่และข้าวสวน นอกจากนี้ข้าวเหนียวก่ำพันธุ์พื้นเมืองยังมีความสามารถในการทนแล้ง และการฟื้นตัวจากแล้งได้ดี ต้านทานต่อเพลี้ยจักจั่นสีเขียว (วิไลลักษณ์, 2541) ซึ่งลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากข้าวทั่วไปที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือการปรากฏของสีม่วงบนส่วนต่างๆ ของต้น เช่น กาบใบ แผ่นใบ กลีบดอก เปลือกเมล็ด และเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นต้น ปริมาณของสีจะเข้มข้นแตกต่างกันไปเป็นลักษณะประจำพันธุ์ ในข้าวเหนียวก่ำไร่จะมีสีม่วงเฉพาะเยื่อหุ้มเมล็ดเท่านั้น แต่ในขณะที่ข้าวเหนียวก่ำนาจะมีสีม่วงปรากฏในส่วนอื่นด้วย (ดำเนินและศันสนีย์, 2543) ตามภูมิปัญญาท้องถิ่นข้าวที่เป็น ข้าวเหนียวก่ำ จะต้องมีลักษณะเฉพาะคือ มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วง (ธิดารักษ์ และดำเนิน, 2553) นอกจากนี้อาจแบ่งลักษณะประจำพันธุ์ตามสีเยื่อหุ้มเมล็ด โดยเฉพาะข้าวเหนียวก่ำนาจะเรียกตามท้องถิ่น คือ ข้าวเหนียวก่ำล้วน (เมล็ดข้าวมีสีม่วงทั้งเมล็ด) กับข้าวเหนียวก่ำผ่า (เมล็ดมีสีม่วงบางส่วน) (จารุณี, 2545) ธีรพงษ์ (2538) ได้ทำการศึกษาคุณค่าทางอาหารของข้าวเหนียวก่ำ ประกอบด้วย ปริมาณโปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม และแคลเซียม ทั้งในส่วนของเปลือกและข้าวกล้อง พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วกลุ่มข้าวเหนียวก่ำมีปริมาณธาตุอาหารทั้ง 5 ชนิดในข้าวกล้องสูงกว่ากลุ่มข้าวขาว ซึ่งข้าวเหนียวก่ำมีโปรตีนโดยรวมสูงกว่าข้าวขาว (ดำเนินและศันสนีย์, 2543) นอกจากนี้ยังพบแอนโธไซ-ยานิน ที่พบในข้าวเหนียวก่ำนั้น เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ แอนโธไซยานินและ แอนโธไซยานิดิน และยังพบว่าข้าวเหนียวก่ำมีสารในกลุ่มฟีนอลิกต่างๆ วิตามินอี และแกมมา-โอไรซานอล ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Goffman and Berman, 2003; Han *et al*., 2004)โดยเฉพาะในข้าวเหนียวก่ำที่เก็บรวบรวมไว้ ในหน่วยวิจัยข้าวก่ำ สาขาวิชาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่นั้น จากการศึกษาของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จักรกฤษณ์ (2550) พบว่าข้าวเหนียวก่ำที่เก็บรวบรวมไว้นั้นมีปริมาณของ แอนโธไซยานินสูงถึง 265.01 มิลลิกรัม/100 กรัม และการถ่ายทอดลักษณะการให้สารแอนโธไซยานินไปยังข้าวพันธุ์อื่นนั้นสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากลักษณะของสีม่วงที่ปรากฏบนส่วนต่างๆ ของข้าวเหนียวก่ำนั้นถูกควบคุมด้วยยีนจำนวนน้อยคู่ และมีลักษณะการถ่ายทอดทางพันธุกรรมเป็นแบบเชิงคุณภาพ (สุณิสา, 2542)

แอนโธไซยานินในข้าวก่ำ

แอนโธไซยานิน (anthocyanin) มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ *anthos* :flower และ *kyanos* :blue แอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่มีสีแดงไปจนถึงสีม่วงหรือน้ำเงินที่อยู่ในกลุ่มของ สารฟลาโวนอยด์ ซึ่งจัดเป็น second metabolite มักพบแอนโธไซยานินอยู่ในแวคคิวโอของเซลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อชั้น sub–epidermis แอนโธไซยานินสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์และละลายในน้ำได้ (Moskowitz and Hradina, 1981; Abdel-Aal *et al*., 2006) แอนโธไซยานินที่สกัดได้ครั้งแรกได้มาจากดอกกุหลาบเมื่อปี ค.ศ. 1913 คือ Cyanidin-3,5-diglucoside ปัจจุบันพบว่ามีแอนโธไซยานินมากกว่า 120 ชนิด สำหรับแอนโธไซยานินในข้าวเริ่มมีการศึกษาในปี ค.ศ. 1940-1950s โดยแอนโธไซยานิน ในข้าว มีอยู่ 4 ระดับ คือ 1. colorless 2. rose red 3. pansy purple และ 4. blackish red purple (Nagao and Takahashi, 1948) โดยสีที่เกิดจากแอนโธไซยานินนั้นปรากฏในเกือบทุกส่วนของพืช พบว่าโดยส่วนใหญ่สีที่ปรากฏขึ้นบนส่วนต่างๆของข้าวเหนียวก่ำ เกิดจากแอนโธไซยานินและรงควัตถุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน มีสารประกอบให้สีคือ แอนโธไซยานิน โดยมีไซยานิดิน ประมาณ 0-470 มิลลิกรัม/100 กรัม และ พีโอนิดิน (peonidin) ประมาณ 0-40 มิลลิกรัม/100 กรัม เป็นองค์ประกอบหลัก เรียกข้าวชนิดนี้ว่า purple rice (Hayashi *et al*., 1952) นอกจากนี้ยังมี malvanidin และ pelargonidin ในปริมาณเล็กน้อยปริมาณของแอนโธไซยานินที่พบในข้าวสีม่วงดำอยู่ในรูปไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ (Chung and Woo, 2001) และ พีโอนิดิน 3-กลูโค-ไซด์ (Escribano-Bailon *et al*., 2004; Ryu *et al*., 1998) ส่วนที่เหลือเป็นแอนโธไซยานินอนุพันธุ์อื่นๆ เช่น Cyanidin-3-rhamnoside, Cyaniding-3,5-rhamnoglucoside, Cyanindin-3,5-diglucoside, Malvidin, Palargonidin-3,5-diglucoside (Zhang *et al*., 2006) เป็นต้น (ตาราง 1)

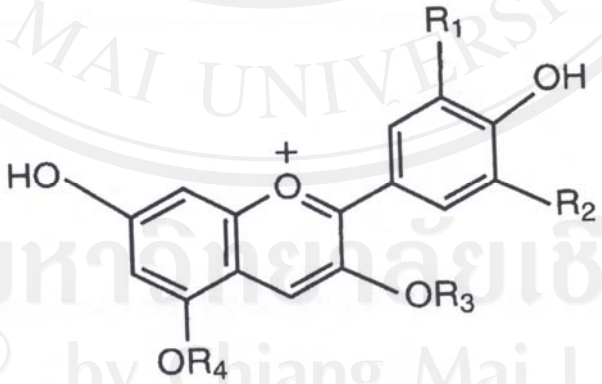
โครงสร้างของแอนโธไซยานิน ในพื้นฐานประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำตาลที่สร้างพันธะไกลโคไซด์กับโครงสร้างวงแวน 3 วง ซึ่งประกอบไปด้วยอนุพันธ์โพลีไฮดรอกซีและโพลีเมทอกซี ที่เชื่อมกันกับสารประกอบ 2-phenylbenzopyrylium หรือ flavylium salts (ภาพ 2.1) โดยความจำเพาะเจาะจงของอนุพันธ์แอนโธไซยานิน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เทธิล สารแอนโธไซยานินมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีไปตามค่าความเป็นกรด-ด่างของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารละลายในแวคคิวโอลที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้าค่า pH เท่ากับ 1 ทำให้มีสีแดงส้ม ค่า pH น้อยกว่า 6 ทำให้ไม่มีสี ค่า pH มากกว่า 6 มีสีม่วงหรือน้ำเงิน และค่า pH เป็นด่างมากเกินไปโครงสร้างของแอนโธไซยานินเสียไปนอกจากนี้สีของแอนโธไซยานินยังถูกควบคุมด้วย โครงสร้างของแอนโธ-ไซยานิน หากในโครงสร้างวงแหวนฟีนิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมธอกซิล (-OCH_3) มากขึ้นทำให้แอนโธไซยานินมีสีเข้มขึ้นและสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นด้วยการเพิ่มหมู่เมธอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3′ และ5′ ทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น (Yoshinaga *et al*., 1999)

ตาราง 2.1 โครงสร้างทางเคมีของแอนโธไซยานิน

ชนิดของแอนโทไซยานิน	R′1	R′2	R′3	R′4	R′5
Pelargonidin (Pg)	-H	-OH	-H	-OH	-H
Cyanidin (Cy)	-OH	-OH	-OH	-OH	-H
Peonidin (Pn)	-OCH_3	-OH	-OCH_3	-OH	-H
Delphinidin (Dp)	-OH	-OH	-OH	-OH	-OH
Petunidin (Pt)	-OH	-OH	-OCH_3	-OH	-OH
Malvidin (Mv)	-OCH_3	-OH	-OCH_3	-OH	-OCH_3



C3G: Cyanidin 3-glucoside, P3G: Peonidin 3-glucoside (Ryu, *et al*., 1998)

ภาพ 2.1 องค์ประกอบ และโครงสร้างโมเลกุลของแอนโธไซยานิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รงควัตถุในกลุ่มแอนโธไซยานิน มีการกระจายไปตามส่วนต่างๆ ของต้นข้าวในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันตามสายพันธุ์ ส่วนใหญ่รงควัตถุให้สีในทุกส่วนของต้นข้าวที่เป็น ลำต้นและใบ (vegetative part) และเกือบทุกส่วนของช่อดอก (floral part) ยกเว้นในส่วนของต้นอ่อน หรือเอนโด-สเปิร์ม ที่ไม่พบการกระจายของรงควัตถุ แต่พบการสะสมของรงควัตถุในเมล็ด โดยเฉพาะในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด (pericarp) และระดับความเข้มของสีม่วงก็มีความแตกต่างกัน (สุณิสา, 2542)

พันธุกรรมที่ควบคุมการแสดงออกของแอนโธไซยานิน

Reddy (1996) พบว่ามียีนหลายตัวที่ควบคุมการแสดงออกของแอนโธไซยานินในส่วนต่างๆ ของต้นข้าว สำหรับการศึกษา inheritance ของแอนโธไซยานินในส่วนต่างๆ ของต้นข้าว เริ่มมีการศึกษาในปี ค.ศ. 1940-1950s Nagao and Takahashi (1947) และ Ramiah and Rao (1953) สรุปได้ว่าลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมการเกิดสีในต้นข้าว เกิดจากการทำงานร่วมกันของยีน 2 คู่ โดยคู่ที่ 1 เกี่ยวข้องกับการสร้าง chromogen ซึ่งให้ลักษณะเป็น C ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตรงควัตถุ และยีนอีกหนึ่งคู่คือ ยีน A (activator) ทำหน้าที่เป็นเปลี่ยน chromogen ไปเป็นรงควัตถุในการเกิดสี หากยีนคู่ใดหายไปทำให้ไม่เกิดสีขึ้น โดยยีนต้องอยู่ในสภาพ homozygous นอกจากนี้ยังมียีน P เป็นตัวควบคุมการกระจายตัวหรือกำหนดตำแหน่งแอนโธไซยานินในส่วนต่างๆของพืชและมี inhibitor gene (I-) เป็นตัวยับยั้งการกระจายตัวของ ยีน และเมื่อเปรียบเทียบขนาดโครโมโซมของข้าวเหนียวก่ำและข้าวขาวพบว่าข้าวเหนียวก่ำมีขนาดโครโมโซมใหญ่กว่าข้าวขาว (สุณิสา, 2542)

การแสดงออกของสีม่วงในลำต้นและใบ

รงควัตถุในกลุ่มแอนโธไซยานิน ให้สีบนต้นข้าวที่แตกต่างกันออกไป และมีการกระจายไปยังตามส่วนต่างๆ ของต้นข้าวที่แตกต่างกันตามสายพันธุ์ (Dhulppanavar, 1973; Dhulppanavar *et al*., 1975)

โดยปกติการสร้างสีของแอนโธไซยานินในส่วนของลำต้นและใบ เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการปรากฏสีในส่วนของปลายยอดดอก (apiculus) เท่านั้น ซึ่งโดยมากไม่พบข้าวที่มีสีในลำต้นและใบแต่ปลายยอดดอกไม่มีสี (Oka, 1990) โดยยีนที่ให้สีม่วงเป็นลักษณะเด่นข่มสีเขียวและสีขาว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การแสดงออกของสีเยื่อหุ้มเมล็ด

สีของเปลือกเมล็ดพัฒนามาจากกลีบดอกชั้นใน (inner glume) และชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) พัฒนามาจากรังไข่ มิได้มีส่วนสัมพันธ์กันอย่างแต่อย่างใด ดังนั้น สีม่วงของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องเป็นลักษณะเฉพาะ (unique characteristic) ของข้าวเหนียวก่ำ และการแสดงสีของลักษณะนี้

เป็นอิสระไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ กับพรรณพฤกษ์ของลักษณะอื่นๆ ของต้นแต่อย่างใด สีดำ หรือสีม่วงของเมล็ดข้าวที่ปรากฏอยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด (Abdel-Aal *et al*., 2006 ; Ryu *et al*., 1998 ; Cho *et al*., 1996) สุณิสา (2542) พบว่าลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมการเกิดสีในเยื่อหุ้มเมล็ดมีการแสดงปฏิกิริยาระหว่างยีนเป็นแบบ incomplete dominance Zhang *et al*. (1995) ศึกษาผลของพันธุกรรมต่อปริมาณรงควัตถุ ที่สะสมอยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ด ใน black rice grain พบว่าปริมาณรงควัตถุในเยื่อหุ้มเมล็ด ควบคุมด้วย quantitative inheritance โดยพบว่า high pigment content แสดงลักษณะข่มต่อ low pigment content ส่วน deep black แสดงลักษณะข่มต่อ light black และ black pericarp แสดงลักษณะข่มต่อ non – pigment สีของเยื่อหุ้มเมล็ดควบคุมด้วย ยีน Pb อยู่บนโครโมโซมแท่งที่ 4 สีม่วงและลักษณะเด่นต่อสีขาว (Wang and Shu, 2007)

ความแตกต่างของปริมาณแอนโธไซยานินที่สะสมในเมล็ด

ข้าวในแต่ละพันธุ์มีปริมาณสารแอนโธไซยานินที่แตกต่างกันซึ่ง Ryu *et al*. (1998) ได้ศึกษาปริมาณสารแอนโธไซยานินในข้าวชนิดจาโปนิกา จำนวน 9 พันธุ์ พบความแตกต่างของปริมาณแอนโธไซยานินสะสมตั้งแต่ 0–480 มิลลิกรัม/100 กรัม โดยพบไซยานิดิน ในสัดส่วนมากที่สุด และพีโอนิดิน รองลงมา จักรฤกษ์ (2550) ศึกษาความหลากหลายทางพันธุ์กรรมของปริมาณสารไซยานิดิน 3- กลูโคไซด์ ในข้าวเหนียวก่ำพันธุ์พื้นเมือง พบว่ามีสารไซยานิดิน 3- กลูโคไซด์ตั้งแต่ 16.23 – 256.01 มิลลิกรัม/100 กรัม และพบว่าสีของเปลือกหุ้มเมล็ดที่มีความใกล้เคียงกัน ไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณสารดังกล่าวได้ และไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสารกับลักษณะทางคุณภาพของเมล็ดอื่นๆ ด้วย Hiemori *et al*. (2009) ได้ทำการศึกษาผลของการหุงต้มต่อปริมาณแอนโธไซยานินในข้าวเหนียวดำชนิดจาโปนิกา โดยปริมาณแอนโธไซยานินที่พบมากที่สุดคือไซยานิดิน 3- กลูโคไซด์ (572.47 ไมโครกรัม/กรัม ; 91.13% of total) และ พีโอนิดิน 3- กลูโคไซด์ (29.78 ไมโครกรัม/กรัม ; 4.74% of total) และผลการหุงต้มทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินลดลงถึง 79.8%

ปัจจัยๆ อื่นที่มีผลต่อการแสดงของสีม่วงในข้าวเหนียวก่ำ

1. ปัจจัยแสง (light factor)

เป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการสะสมและการสลายตัวของแอนโธไซยานินมากที่สุด ซึ่งแสงมีผลต่อการสร้างหรือการสังเคราะห์รงควัตถุ ถ้าพืชได้รับแสงมาก จะทำให้การสังเคราะห์รงควัตถุมากขึ้นด้วย เช่น ผลแอปเปิ้ลที่อยู่บริเวณร่มเงาของต้นที่ไม่โดนแสงหรือได้รับแสงน้อย การพัฒนาของสีแดงของเปลือกจะน้อยลงและลดลงกว่าผลที่ได้รับแสงเต็มที่ (Magness, 1928) และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การสะสมของแอนโธไซยานินจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มของแสงมากขึ้น Siegelman and Hendricks (1958) และ Reddy *et al*. (1994) ได้ศึกษาผลของแสงต่อการสร้างแอนโธไซยานินโดยศึกษาในต้นกล้าของข้าวพันธุ์ purple puttu พบว่าต้นกล้าที่ได้รับแสงต่างกันมีการสะสมแอนโธไซยานินที่แตกต่างกัน ส่วนข้าวที่ขึ้นเจริญเติบโตในที่มืด พบว่าไม่มีการสะสมแอนโธไซยานินและยังพบว่าต้นกล้าที่มีอายุน้อยกว่ามีการตอบสนองต่อแสงแดดมากกว่า โดยที่แสงไปมีผลต่อเอนไซม์ phenylalanine ammonium lyase (PAL) ซึ่งเป็นเอนไซม์ตัวหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แอนโธไซยานิน Sarma (1999) ทำการทดลองอีกครั้งเพื่อเป็นการยืนยันว่าแสงเป็นตัวชักนำการทำงานของเอนไซม์ PAL ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างแอนโธไซยานินในข้าว

2. ปัจจัยอุณหภูมิ (Temperature factor)

อุณหภูมิมีผลต่อการสังเคราะห์แอนโธไซยานิน โดยอุณหภูมิต่ำจะกระตุ้นการสังเคราะห์แอนโธไซยานิน และอุณหภูมิสูงจะยับยั้งการสังเคราะห์แอนโธไซยานิน Phoka *et al*. (2005) พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญของการสะสมปริมาณแอนโธไซยานิน ในเมล็ดข้าวโดยที่ข้าวที่ปลูกในฤดูหนาวหรือปลูกที่อุณหภูมิต่ำนั้น มีปริมาณแอนโธไซยานินสะสมมากกว่าข้าวที่ปลูกในฤดูร้อนและอุณหภูมิสูง Cheon chae *et al*. (2004) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ ในช่วงที่ข้าวกำลังสุกแก่ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 18, 21, 24 และ 27 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในช่วงสุกแก่ต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของการสะสมสารไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ปริมาณสารไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ ของพันธุ์ Heugjinjubyeo และพันธุ์ Heugnambyoe มีปริมาณไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ มากที่สุดที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ เท่ากับ 1,837 มิลลิกรัม/100 กรัม ในพันธุ์ Heugjinjubyeo และในพันธุ์ Heugnambyoe มีปริมาณไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ เท่ากับ 361 มิลลิกรัม/100 กรัม ส่วนในพันธุ์ Ilpumbyeo พบว่าไม่มีไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์

3. ปัจจัยความอุดมสมบูรณ์ของดิน และความชื้นในดิน (soil fertility and soil moisture)

ความอุดมสมบูรณ์ของดิน และความชื้นในดินช่วยกระตุ้นการสร้างแอนโธไซยานิน และในสภาพพื้นที่ที่แห้งแล้ง หรือในฤดูที่อากาศแห้งแล้ง มีความชื้นในดินต่ำ พบว่าการสังเคราะห์แอนโธไซยานินจะลดลง (Saure, 1990) ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการสร้างแอนโธไซยานิน แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปการสร้างแอนโธไซยานินลดลง (Kliewer, 1977) นอกจากนี้ฟอสฟอรัส แคลเซียม โพแทสเซียม ยังมีผลต่อการสร้างแอนโธไซยานินด้วย โดยข้อมูลในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาในผักและผลไม้เป็นส่วนมาก ข้อมูลของข้าวโดยตรงยังไม่มีแน่ชัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4. ระยะการเจริญเติบโตของพืช (growth stage)

ปริมาณหรือความเข้มของแอนโธไซยานินที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของการเจริญเติบโตของพืช เช่น ในการงอก (germination) มักไม่พบแอนโธไซยานิน เนื่องจากในช่วงนี้เกิดขบวนการ hydrolysis ซึ่งแอนโธไซยานินสามารถละลายได้ในน้ำ และในช่วงหลังออกดอกพบว่าแอนโธไซ-ยานินไปสะสมรวมกันในส่วนของใบ เปลือก และเมล็ดมากกว่าส่วนอื่นๆ (สรศักดิ์, 2531) ในอุ่นการสร้างแอนโธไซยานิน เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกของการเจริญและมีปริมาณลดลง เมื่อถึงระยะสุกแก่เต็มที่ (Riberau-Gayon, 1982) Phoka *et al*. (2005) พบว่าหลังจาก ที่ข้าวมีการผสมพันธุ์แล้ว ระดับแอนโธไซยานินในเมล็ดข้าวจะเพิ่มมากขึ้นจนถึง 10 วันก่อนการเก็บเกี่ยว หรือ 20 วันหลังการผสมเกสร ส่วนในใบข้าวปริมาณแอนโธไซยานินเพิ่มขึ้นจาก 5-20 มิลลิกรัม/100 กรัม ในช่วงที่กำลังสุกแก่ และในช่วง senescence จะพบความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญระหว่างคลอโรฟิลล์และปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด (Mazza and Miniati, 1993)

5. ค่า pH

Fossen *et al*. (1998) ได้สกัดไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ ในข้าวแล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 23 องศาเซลเซียส มีค่า pH อยู่ในช่วงต่างๆ ตั้งแต่ 1-9 และ 1-12 (Cabrita *et al*., 2000) จากทั้งสองการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ถ้าค่า pH ต่ำๆ สารไซยานิดิน 3-กลูโคไซด์ จะมีความคงตัวของสีสูงอยู่ 70% หลังจากเก็บรักษาได้ 60 วัน และถ้าค่า pH มากกว่า 3 เป็นต้นไป จะทำให้ความคงตัวของสีลดลงเรื่อยๆ ที่ค่า pH ระหว่าง 5-6 ความคงตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากเก็บได้เพียง 8 วัน และลดลงมากที่สุดที่ค่า pH เท่ากับ 7.0 (ใช้เวลาในการสลายตัวจนหมด 2 วัน) หลังจากนั้นความคงตัวจะค่อยเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งจนกระทั่ง pH เท่ากับ 8.6 และที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ได้ทำการศึกษาเช่นเดียวกันกับที่ 10 องศาเซลเซียส พบว่าความคงตัวของแอนโธ-ไซยานินจะสูงกว่าที่ 10 องศาเซลเซียส

จากรายงาน Hu *et al*. (2003) พบว่าสารพฤกษเคมีที่พบในข้าวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด เช่น แอนโธไซยานิน ฟลาโวนอยด์ โทโคฟีรอล เบต้า-แคโรทีน และกรดเฟอรูลิก เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติลดความเสี่ยงในการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคชรา และโรคมะเร็ง รวมทั้ง ช่วยส่งเสริมสุขภาพที่ดีให้แก่ผู้บริโภคสารพฤกษเคมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารในกลุ่ม secondary metabolite ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการเจริญเติบโต และขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนเบนซีนที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซี (-OH) เกาะอยู่อย่างน้อย 1 กลุ่ม มักรวมอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซน์ (glycoside) โดยเชื่อมต่อกับ โมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) โดยเฉพาะกลุ่มของฟลาโวนอยด์ ซึ่งมักรวมกับน้ำตาล และพบได้น้อยในส่วนของแวควิคโอลภายในเซลล์ ในปัจจุบันพบสารประกอบฟีนอลิกมากกว่า 8,000 ชนิด ในธรรมชาตินับจากโมเลกุลอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก ฟีนิลโปรพานอยด์ และฟลาโวนอยด์ ไปจนถึงโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน เช่น ลิกนิน เมลานิน และแทนนิน เป็นต้น

การแบ่งชนิดของสารประกอบฟีนอลิก แบ่งเป็น 3 ชนิด ตามจำนวน phenol rings ที่มีอยู่ (ญาติกา, 2552)

1. โมโนไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols) มี 1 phenol ring ที่พบทั่วไปในพืช ได้แก่ gallic acid, ellagic acid, tannic acid, vanillin, catechol, resorcinol , salicylic acid, phenol, hydro-quinone และ p-hydroxycinnamicacid

2. ไดไซคลิกฟีนอล (dicyclic phenols) มี 2 phenol rings ได้แก่ hydroxycinnamic acids (ferulic acid, caffeic acid หรือ coumaric acid), coumarins (umbelliferone, scopoletin, aesculetin หรือ psoralen), lignans (pinoresinol, eugenol หรือ myristicin)

3. โพลีไซคลิกฟีนอล (polycyclic phenols) หรือ polyphenol ได้แก่ catechins, proanthocyanins,anthocyanidins, flavones, flavonols, flavonones และ isoflavones

นอกจากนั้นยังจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้รับจากภายนอกและพบได้มากในธรรมชาติ ได้แก่ พืชผัก ผลไม้ ธัญพืชต่างๆ กาแฟ ชาเขียวและไวน์แดง เป็นต้น ในข้าวพบว่ามีสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิดในสารสกัดจากส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวในส่วนของรำข้าว มีสารประกอบฟีนอลิกชนิด ferulic acid, *p*-coumaric acid และ synapic acid (Yoshiza *et al*., 1981) ส่วนในข้าวขาวพบสารประกอบฟีนอลิกชนิด guaiacol, phenol, *p*-cresol, 4-vinylguaiacol และ 4-vinylphenol (Yajima, 1978) แม้ว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกในธรรมชาติจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน แต่พบว่าปริมาณโดยเฉลี่ยที่มนุษย์ได้รับต่อวันจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 มิลลิกรัม ถึง 1 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าปริมาณวิตามินอีที่ได้รับต่อวัน ซึ่งพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่แตกต่างกันเนื่องจากกระบวนการสร้างมีปัจจัยทางพันธุกรรม และสิ่งแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นระยะหรือฤดูกาล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เก็บเกี่ยว วิธีการเพาะปลูก ระดับความสุก กระบวนการแปรรูป และวิธีการเก็บรักษา ล้วนแต่มีผลต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งสิ้น (Yu *et al*., 2004 ; Zhou *et al*., 2004)

สารประกอบฟีนอลิกมีคุณสมบัติที่ได้รับความสนใจอย่างมาก และเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการสารต้านการออกซิเดชัน นอกจากนั้นยังมี ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ต้านการแพ้ และมีคุณสมบัติในการสลายลิ่มเลือด รวมไปถึงการเป็นสารต้านการก่อมะเร็ง ต้านโรคภูมิแพ้ กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน และสามารถลดความดันโลหิตจากฤทธิ์ขยายหลอดเลือด เป็นต้น อีกทั้งยังทำหน้าที่กำจัดโมเลกุลของอนุมูลอิสระ และกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษต่อเซลล์ ป้องกันกระบวนการสร้างอนุมูลอิสระภายในเซลล์ รวมถึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน และโมเลกุลอื่นๆ ด้วย เนื่องจากอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงไม่เกิดปฏิกิริยากับสารอื่นต่อไป (ญาติกา, 2552)

อนุมูลอิสระ (free radicals)

อนุมูลอิสระ คือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (unpair electron) อยู่รอบนอก ซึ่งมีระดับพลังที่สูง เป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียร และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) แล้วกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป ส่วนมากแล้วเกิดกับโมเลกุลของออกซิเจน (จักรพงษ์, 2542) เช่น superoxide anion radical (O•2) hydroxyl radical (HO•) peroxide radical (ROO•) hydrogen peroxide (H_2O_2) เป็นต้น อนุมูลอิสระเกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกายมนุษย์ และเกิดจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นมลพิษ เช่น ควันเสียจากเขม่าเครื่องยนต์ ควันบุหรี่ สารเคมีต่าง ๆ รังสี UV และจากการรับประทานอาหารปิ้ง ย่างที่ไหม้เกรียม ส่งผลให้เกิดการสะสมของอนุมูลอิสระในสิ่งมีชีวิตเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดภาวะที่เรียกว่า oxidative stress ที่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ เช่น เซลล์ถูกทำลาย เกิดการเสื่อมของเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการแก่ (aging) และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีเอ็นเอ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อหุ้มเซลล์ รุนแรงไปถึงการเกิดเป็นโรค เช่น โรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน เป็นต้น มนุษย์สามารถป้องกันการทำลายจากอนุมูลอิสระเหล่านี้ได้ (Yuan and Walsh, 2006)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant)

สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นคำศัพท์ที่แปลมาจากคำว่า antiradicle ปัจจุบันคำศัพท์นี้ได้ถูกบัญญัติใหม่เป็นสารขจัดหรือกำจัดอนุมูล (radical scavenger) คือ สารที่มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ โดยเป็นสารที่มีโครงสร้างที่สามารถจับอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวของอนุมูลอิสระ

ทำให้ไม่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ลดอัตราการเกิดโรคร้ายแรงต่าง ๆ ที่เกิดจากอนุมูลอิสระเป็นต้นเหตุ (Packer *et al*., 1999)

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับทั่วไปว่า การทำลายหรือควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระ จะช่วยในการป้องกัน หรือรักษาโรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาจำนวนมากยืนยันถึงการลดอัตราเสี่ยง และการเพิ่มอัตราการป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคที่เกี่ยวกับหลอดเลือด และหัวใจรวมถึงโรคอื่นๆ ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่รู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก ไวตามินซี ไวตามินบีเบ้ตา-คาโรทีน และ สารคาโรทีนอยด์ นอกจากนี้ยังมีสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ เช่น Flavanones, Flavones, gallic acid, ellagic acid, Flavonols, Catechins และแอนโธไซยานิน เป็นต้น (Halliwell and Gutteridge, 1999) ซึ่งสารเหล่านี้พบมากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช

ชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระ

1. สารต้านอนุมูลอิสระที่พบภายในเซลล์สัตว์(intracellular antioxidant) ได้แก่ สารในกลุ่มเอนไซม์ เช่น เอนไซม์คาตาเลส (Catalase, CAT) เอนไซม์ซุปเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (Superoxide dismutase, SOD) เอนไซม์กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione peroxidase, GPx) Glutathione reductase (GSR) และ glutathione s-transferase (GST) โดยเอนไซม์เหล่านี้จะทำงานร่วมกันกับสารต้านอนุมูลอิสระที่มาจากภายนอกร่างกาย และสารต้านอนุมูลอิสระที่พบได้ภายในร่างกาย ได้แก่ histones, lipoic acid, ceruloplasmin, transferin, hemopexin, กรดยูริค บิลิรูบิน และ สารในกลุ่ม thiol protein โดยเฉพาะสารกลูตาไธโอน ทำหน้าที่สำคัญร่วมกับไวตามินอี และไวตามินซี ในการป้องกันเซลล์จากสารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น

2. สารต้านอนุมูลอิสระที่มาจากภายนอกเซลล์สัตว์ (extracellular antioxidant) เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าสารต้านอนุมูลอิสระในร่างกาย เช่น ไวตามินซี ไวตามินอี แคโรทีนอยด์ และสารในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (Packer *et al*., 1999) เช่น แอนโธไซยานิน (Sarma and Sharma, 1999 ; Ling *et al*., 2001 ; Wang *et al*., 1997)

สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์ ได้แก่ ไวตามินอี เบต้า-แคโรทีน ubiquinine (Coenzyme Q) ส่วนสารที่พบในระบบหมุนเวียนเลือดที่ได้จากอาหาร ได้แก่ ไวตามินอี แคโรทีนอยด์ แอสคอร์เบทอิออน โพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ glucosinolates ไซยานิดิน และสารที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระอย่างอ่อน ได้แก่ albumin, transferring และ lactoferrin นอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระที่สังเคราะห์ได้แก่ butyrated hydroxytoluene (BHT) และ butyrated hydroxyanisole (BHA) (Sarma and Sharma, 1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การตรวจวัดความสามารถในต้านอนุมูลอิสระ

ในปัจจุบันสารต้านอนุมูลอิสระได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ได้มีการนำสารต้านอนุมูลอิสระมาใช้ในการส่งเสริมสุขภาพ ป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เพราะเชื่อว่าสามารถลดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านการเกิดอนุมูลอิสระได้ (Molyneux, 2004) การทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีความสำคัญ เพื่อใช้บอกประสิทธิภาพการในต้านอนุมูลอิสระ หากความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูง แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการต้านการเกิดอนุมูลอิสระสูงด้วยเช่นกัน วิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีหลายวิธี เช่น oxygen radical absorbance capacity (ORAC), 2,2-diphennyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) free radical declorization assay เป็นต้น Chaovanalikit (2004) ได้ทำการทดลองเรื่อง สารรงควัตถุแอนโธไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในผลไม้บลูฮันนี่ซักเกิล ได้มีการสกัดและวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในผลไม้บลูฮันนี่ซักเกิล 10 พันธุ์ พบว่า ผลไม้บลูฮันนี่ซักเกิลมีปริมาณแอนโธไซยานิน 116-593 มิลลิกรัม/100 กรัม ต่อน้ำหนักสด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 440-1142 มิลลิกรัมของกรดแกลลิคสมมูล/100 กรัม ต่อน้ำหนักสด การวัดความสามารถต้านอนุมูลอิสระใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน การวัดความสามารถต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ORAC เท่ากับ 18-104 ไมโครโมลาร์ Trolox/กรัม ต่อน้ำหนักสด และวิธี FRAP 38-94 ไมโครโมลาร์ Trolox/กรัม ต่อน้ำหนักสด และได้หาความสัมพันธ์ของโดยใช้วิธีทางสถิติ พบว่า ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอนโธไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิก

วิธีที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

1.) 2,2-diphennyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical scavenging assay)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยใช้สาร DPPH เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย สารสกัด หรือสารออกฤทธิ์สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุมูลอิสระ (DPPH) วิธี DPPH มีหลักการคือ อิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ (unpaired electron) ในโมเลกุลของอนุมูล DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 517 นาโนเมตร ทำให้มองเห็นเป็นสีม่วง และเมื่ออนุมูล DPPH ถูกรีดิวซ์โดยสารต้านอนุมูลอิสระที่มีคุณสมบัติเป็น hydrogen donor อนุมูล DPPH จะเปลี่ยนเป็น DPPH-H ซึ่งการสูญเสียอิเล็กตรอนดังกล่าว ทำให้อนุมูล DPPH สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้น้อยลง สารดังกล่าวจึงเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (ปิยาภัทร, 2549; Brand-William *et al*., 1995) ซึ่งเกิดปฏิกิริยากันดังสมการนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

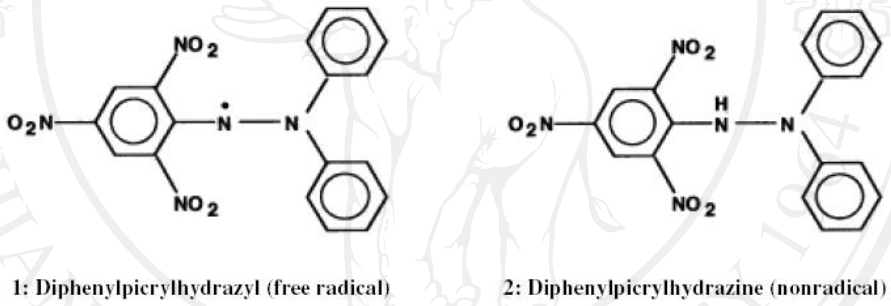
$$DPPH^{\cdot} + (AH) \longrightarrow DPPH\text{-}H + (A^{\cdot})$$

อนุมูลอิสระใหม่ที่เกิดขึ้น (A•) จะทำปฏิกิริยาต่อไป (radical-radical interaction) โดยกระบวนการ radical disproportionation จนกระทั่งได้เป็นโมเลกุลที่มีความคงตัว (A-A) ดังสมการนี้

$$DPPH^{\cdot} + A^{\cdot}_{(n)} \longrightarrow DPPH\text{-}A_{(n)}$$

$$A^{\cdot} + A^{\cdot} \longrightarrow A\text{-}A$$

เมื่ออนุมูลอิสระ DPPH• ได้รับโปรตอนจากสารต้านอนุมูลอิสระที่นำมาทดสอบ สารละลาย DPPH ก็จะเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีเหลือง ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 nm ลดลง (ภาพ 2.2)

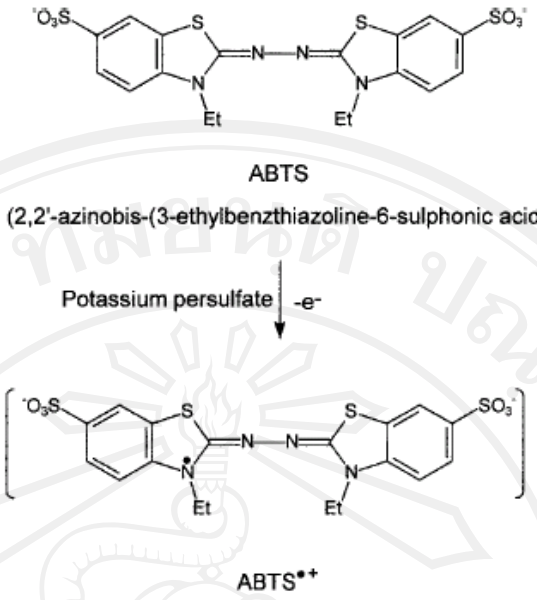


ภาพ 2.2 แสดงโครงสร้างของ DPPH ที่เป็นอนุมูลอิสระ (1) และไม่เป็นอนุมูลอิสระ(2) (Molyneux, 2004)

2.) 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) free radical decolorization assay

วิธี ABTS เป็นการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ มีหลักการคล้ายกับวิธี DPPH คือ สร้างอนุมูลอิสระที่มีสีขึ้น โดยสร้างอนุมูลอิสระจากการทำปฏิกิริยาของสารละลาย ABTS กับ oxidizing agent คือ สารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เมื่อ ABTS ถูกออกซิไดซ์ ด้วย oxidizing agent จะเกิด ABTS free radical ($ABTS^{\cdot+}$) สารต้านอนุมูลอิสระที่ต้องการนำมาทดสอบขจัด $ABTS^{\cdot+}$ ที่เกิดขึ้นแล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm (ภาพ 2.3) (เฉลิมพงษ์และไชยวัฒน์, 2547) โดยหากค่าการดูดกลืนแสงลดลงมากหรือสีของสารละลายจางลงมากแสดงถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี (อนุพงษ์ และคณะ, 2547)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2.3 สูตรโครงสร้างของ ABTS ที่อยู่ในรูปไม่เป็นอนุมูลอิสระ (A) เป็นอนุมูลอิสระ(B)

ผลของแอนโธไซยานินกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant capacity)

แอนโธไซยานินมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง ortho-dihydroxyphenyl ของ B ring เช่นเดียวกับสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์อื่นๆ (Rice-Evans *et al*., 1996; Tsuda *et al*., 1996, Burda and Oleszek, 200; Hou *et al*., 2003) แอนโธไซยานินอนุพันธุ์ต่างๆ ที่มีในพืชจะทำงานแบบเสริมฤทธิ์กัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (Stintzing *et al*., 2002) และสามารถใช้ทดแทนไวตามินซีและอี เพื่อป้องกันการออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในระหว่างการปรุงอาหาร การเก็บรักษาและระหว่างกระบวนการย่อยอาหารในร่างกาย (Frank *et al*., 2002; Miller *et al*., 2002) จากการศึกษาพบว่าสารสกัดแอนโธไซยานินที่ได้จากข้าวสีดำ (*Oryza sativa* L. indica) ช่วยกำจัดอนุมูลอิสระ และช่วยป้องกันไม่ให้สายดีเอ็นเอสายคู่ (supercoiled DNA strand) ถูกทำลายโดย peroxyl radical และ hydroxyl radicals เพราะแอนโธไซยานินจับตัวรวมกับโมเลกุลดีเอ็นเอได้เป็น cyandin-DNA-copigmentation เพื่อป้องกันดีเอ็นเอไม่ให้ถูกออกซิเดชัน (Sarma and Sharma, 1999) ดังนั้นแอนโธไซยานินที่มีในต้นพืช นอกจากมีสีดึงดูดแมลงให้ผสมเกสร แล้วยังทำหน้าที่ในกลไกของการต้านทานโรค (Escribano-Bailion *et al*., 2004) เมื่อคนและสัตว์ได้รับแอนโธไซยานินเข้าสู่ร่างกาย แอนโธไซยานินซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่ป้องกันการออกซิเดชันของไลโปโปตีนความหนาแน่นต่ำ (low density lipoprotein: LDL) โดยทำหน้าที่คล้ายกับไวตามินซี เนื่องจากแอนโธไซยานินมีคุณสมบัติละลายได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในน้ำ (Meyer *et al*., 1998; Ramirez-Tortosa *et al*., 2001; Viljanen *et al*., 2004) โดยปริมาณที่แนะนำให้บริโภค วันละ 180-215 กรัม การป้องกันการสร้าง plaque ที่บริเวณหลอดเลือดซึ่งจะนำมาสู่การเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (Miller *et al*., 2002) โรคเบาหวาน (Qureshi *et al*., 2002; Morimitsu *et al*., 2002) รวมถึงยับยั้งการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็งโดยยับยั้งกระบวนการ phosphorylation ของเอนไซม์ protein kinase ในวิถี extracellular singnal-regulated protein kinase (ERK) และ c-jun N-terminal kinase (JNK pathway) (Mitogen-activated protein kinase; MAPK) (Hou *et al*., 2003, 2004; Konczak-Islam *et al*., 2003) นอกจากนี้แอนโธไซยานินยังมีคุณสมบัติช่วยลดการอักเสบ เป็นสารต้านการเจริญของแบคทีเรีย (antibacterial agents) (Kong *et al*., 2003) และช่วยให้เซลล์ประสาททำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรรณิการ์, (2550) ได้ทำการศึกษาผลของรำข้าวเหนียวก่ำ ต่อการผลิตแอนติบอดี และการดูดซึมธาตุเหล็กในลูกสุกรหย่านม พบว่ารำข้าวเหนียวก่ำมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของลูกสุกรดีขึ้น และส่งผลต่อการ ดูดซึมธาตุเหล็กในลูกสุกรทำให้มีสะสมน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มมากขึ้น วิไลวรรณ, (2550) ได้ทำการศึกษาการใช้สารต้านอนุมูลอิสระจากรำข้าวเหนียวก่ำ เพื่อยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน พบว่ารำข้าวเหนียวก่ำ ช่วยเพิ่มระดับกลูตาไธโอนในเลือดของสุกร มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระดีกว่าข้าวขาว และทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตดีและร่างกายแข็งแรง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved