

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

การหมักและการย่อยในระบบทางเดินอาหารส่งผลต่อปริมาณสารสำคัญในอาหาร โดยพบว่าวิตามินอีและโพลีฟีนอลมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่แอนโทไซยานินมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังการหมัก แต่มีปริมาณลดลงเมื่อผ่านการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร ในขณะที่แกมมาโอโรซานอลมีปริมาณลดลงหลังจากการหมักและการจำลองการย่อย รวมถึงพบว่า ข้าวหมากที่ผ่านการจำลองการย่อยมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระและสามารถยับยั้งการหลั่ง IL-8 ในเซลล์ลำไส้ได้ดีกว่า ข้าวหมากที่ไม่ผ่านการย่อย และข้าวเหนียวดำสุก ตามลำดับ

อภิปรายผล

ปริมาณวิตามินอี โพลีฟีนอลทั้งหมด แอนโทไซยานินทั้งหมด และแกมมาโอโรซานอลในข้าวเหนียวดำสุก ข้าวหมากที่ไม่ผ่านและผ่านการจำลองการย่อยในร่างกายมนุษย์

ผลการหาปริมาณวิตามินอี โพลีฟีนอลทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมด พบว่า ข้าวหมากมีสารดังกล่าวสูงกว่าข้าวเหนียวดำสุก โดยข้าวหมากที่ผ่านการจำลองการย่อยมีปริมาณวิตามินอี และโพลีฟีนอลทั้งหมดมากที่สุด ในขณะที่ข้าวหมากที่ไม่ผ่านการจำลองการย่อยมีปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดมากที่สุด ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Fernandez-Orozco และคณะ (2007) ที่พบว่าถั่วเหลืองที่หมักด้วย *Aspergillus oryzae* หรือ *Rhizopus oryzae* มีปริมาณวิตามินอีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถั่วเหลืองดิบ ปริมาณโพลีฟีนอลทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้นในข้าวหมากให้ผลเช่นเดียวกับผลการศึกษาในข้าวหมากที่ผลิตจากข้าวสีของ Plaitho และคณะ (2013) และโคจิ (koji) ที่ได้จากการหมักถั่วดำกับ *Aspergillus awamori* ของ Lee และคณะ (2007) นอกจากนี้ ยังพบว่า รำข้าว รำข้าวสาลี ข้าวสาลี ข้าวกล้อง ข้าวโพด และข้าวโอ๊ตที่หมักด้วยเชื้อรา *Rhizopus spp.* หรือ *Aspergillus spp.* (Oliveira และคณะ, 2012; Bhanja Dey และ Kuhad, 2014; Zhang และคณะ, 2014) ซาด้า และโกจิเบอรี่ที่หมักด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* (dos Reis และคณะ, 2014) มีปริมาณโพลีฟีนอลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอาหารที่ไม่ผ่านการหมัก ปริมาณวิตามินอี โพลีฟีนอลทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นในข้าวหมากอาจเนื่องมาจากระหว่างกระบวนการหมักเชื้อราที่อยู่ในลูกแป้งข้าวหมาก เช่น *Aspergillus oryzae*, *Mucor spp.*, หรือ *Aspergillus spp.* สร้างเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส (Takii และคณะ, 2005; Tako และคณะ, 2010; Raza และคณะ, 2011; Lima และคณะ, 2013) สลายพันธะเบต้า 1,4 โกลโคซิดิกในโมเลกุลของเซลลูโลสได้กลูโคส (Singhanian และคณะ, 2013) เมื่อเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชถูกทำลายจึงส่งผลให้วิตามินอี โพลีฟีนอล และแอนโทไซยานินที่อยู่ภายในผนังเซลล์ (DellaPenna, 2005; Padayachee และคณะ, 2013) สามารถออกมาได้มากขึ้น รวมถึงเชื้อราดังกล่าวสามารถสร้างเอนไซม์ไลเปส (Gopinath และคณะ,

2005) โปรตีนเอส (de Souza, 2005) และอะไมเลส (Saleem และ Ebrahim, 2014) ย่อยไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตในวัตถุดิบส่งผลให้วิตามินอี โพลีฟีนอล หรือแอนโทไซยานินที่อาจจับอยู่กับ สารอาหารเหล่านั้นถูกปลดปล่อยเป็นอิสระมากขึ้น

ผลการหาแกมมาโอโรซานอล พบว่า ข้าวเหนียวดำสุกมีปริมาณแกมมาโอโรซานอลมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการหมักมีผลทำให้สารดังกล่าวมีปริมาณลดลงซึ่งให้ผลคล้ายกับการหมักรำข้าวด้วย *Lactococcus lactis*, *Pediococcus pentoseus* หรือ *Aspergillus oryzae* (Rashid และคณะ, 2015; Sirilun และคณะ, 2015) ปริมาณแกมมาโอโรซานอลที่ลดลงอาจเนื่องมาจากระหว่างการหมัก เชื้อจุลินทรีย์สร้างเอนไซม์ที่สามารถสลายพันธะในโมเลกุลของแกมมาโอโรซานอลได้เป็นสารอื่น เช่น กรดเฟอร์ริก สเตอรอล หรือสารประกอบไตรเทอร์พีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohol) Sirilun และคณะ พบว่า เชื้อรา *Aspergillus oryzae* ที่ใช้หมักรำข้าวสามารถสร้างเอนไซม์ เพอร์อกซิเดส เอสเทอเรส (ferulic acid esterase) สามารถสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของแกมมาโอโรซานอล ได้กรดเฟอร์ริกอิสระส่งผลให้รำข้าวหมักมีแกมมาโอโรซานอลลดลง (Sirilun และคณะ, 2015)

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหาร พบว่า ข้าวหมากที่ผ่านการจำลองการย่อย มีปริมาณวิตามินอีและโพลีฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 94.45 และ 68.97 ตามลำดับเทียบกับข้าวหมากที่ไม่ผ่านการย่อย ซึ่งคล้ายกับการศึกษาในข้าวกล้องสุกและข้าวขาวสุก (Ti และคณะ, 2015) กลไกสำคัญอาจเป็นผลจากเอนไซม์ ความเป็นกรด-ด่างในระบบทางเดินอาหาร ที่มีส่วนช่วยสลายพันธะที่จับกันระหว่างวิตามินอีหรือโพลีฟีนอลกับสารประกอบอื่นในอาหาร เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เซลลูโลส หรือลิกนิน ส่งผลให้วิตามินอีหรือโพลีฟีนอลอยู่ในรูปอิสระมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน พบว่า ข้าวหมากที่ผ่านการจำลองการย่อยมีปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และแกมมาโอโรซานอลลดลง คิดเป็นร้อยละ 11.48 และ 31.47 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับข้าวหมากที่ไม่ผ่านการย่อย ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดที่ลดลงหลังผ่านการจำลองการย่อยคล้ายกับการศึกษาในน้ำทับทิม และน้ำแบล็คเคอร์แรนท์ (Pérez-Vicente และคณะ, 2002; Uzunović และ Vranić, 2008) ซึ่งเป็นผลจากสภาวะกรด-ด่างในระบบทางเดินอาหารที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของแอนโทไซยานิน เมื่อแอนโทไซยานินอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดในกระเพาะอาหาร (pH 2) แอนโทไซยานินจะอยู่ในรูป flavylium cation ซึ่งมีสีแดง เมื่ออยู่ในสภาวะต่างในลำไส้เล็ก (pH 6-6.5) โครงสร้างของแอนโทไซยานินเปลี่ยนจาก flavylium cation เป็น chalcone ซึ่งไม่มีสี หรืออาจเนื่องมาจากแอนโทไซยานินถูกเมแทบอลิซึมได้เป็นสารไม่มีสี หรือถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารอื่น (Pérez-Vicente และคณะ, 2002) ส่วนการลดลงของแกมมาโอโรซานอลอาจเป็นผลมาจากเอนไซม์ เปปซิน กรดไฮโดรคลอริกในกระเพาะอาหาร และเอนไซม์แพนกรีเอตินในลำไส้เล็ก (Huang, 2003)

การต้านอนุมูลอิสระของข้าวเหนียวดำสุก ข้าวหมากที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการจำลองการย่อยในร่างกายมนุษย์

ศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระเป็นผลมาจากวิตามินอี โพลีฟีนอล แอนโทไซยานิน และแกมมาโอโรซานอลที่พบในตัวอย่าง กลไกสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระของสารดังกล่าวมาจากความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ (radical scavenging) โดยการให้อิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ เช่น $ROO\cdot$ $OH\cdot$ $O_2\cdot^-$ H_2O_2 และ DPPH \cdot (Huang, 2003; Farbstein และ

คณะ, 2010; Suganya Devi และคณะ, 2012) หรือความสามารถในการหยุดปฏิบัติการสร้างอนุมูลอิสระ (chain-breaking) โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากอนุมูลอิสระ (Burton และ Traber, 1999; Rojano และคณะ, 2008) ส่งผลให้อนุมูลอิสระมีความเสถียรขึ้น การศึกษาครั้งนี้ให้ผลคล้ายกับที่พบในธัญชาติหมัก (ข้าวสาลี ข้าว ข้าวโอ๊ต ข้าวฟ่าง ข้าวโพด) ถั่วหมัก (ถั่วดำ และ ถั่วมะแฮะ) และ Haria (เครื่องดื่มที่ได้จากการหมักข้าวของอินเดีย) (Zhai และคณะ, 2015; Lee และคณะ, 2007; Lee, 2015; Ghosh และคณะ, 2015) รวมถึงพบว่า ข้าวหมากที่ผ่านการจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหารมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าข้าวหมากที่ไม่ผ่านการย่อยซึ่งให้ผลในทิศทางเดียวกับการศึกษาในข้าวขาว ข้าวกล้อง และข้าวสาลี (Ti และคณะ, 2015; Liyanapathirana และ Shahidi, 2004) ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการหมักและการนำไปผ่านการย่อยในระบบทางเดินอาหารสามารถเพิ่มศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ ซึ่งเป็นผลมาจากเอนไซม์จากการหมักหรือการย่อย รวมถึงสภาวะกรด-ด่างที่ใช้ในการย่อยอาหารช่วยสกัดสารสำคัญ เช่น วิตามินอี และ โพลีฟีนอลออกจากองค์ประกอบของอาหารได้มากขึ้น อีกทั้ง Chen และคณะ (2016) พบว่า ศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณวิตามินอีและโพลีฟีนอลในอาหาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิตามินอี และโพลีฟีนอลมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่าง

การป้องกันการเกิดภาวะเครียดจากออกซิเดชันในเซลล์ลำไส้ (Caco-2)

ภาวะเครียดจากออกซิเดชันมีสาเหตุมาจากการมีอนุมูลอิสระในปริมาณมากเกินไป ความสามารถของร่างกายในการกำจัดอนุมูลอิสระ ส่งผลให้เซลล์ได้รับความเสียหายจนเกิดการอักเสบ เมื่อเกิดการอักเสบ เซลล์เม็ดเลือดขาวจะหลั่งสารในกลุ่มอินเทอร์ลิวคิน เช่น IL-8 ออกมา เพื่อเป็นการตอบสนองต่อภาวะการอักเสบ จากผลการศึกษาพบว่า เซลล์ลำไส้ที่ได้รับสารสกัดตัวอย่างร่วมกับ H_2O_2 มีปริมาณการหลั่ง IL-8 ลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมผลบวกซึ่งอาจเป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของวิตามินอี โพลีฟีนอล แอนโทไซยานิน และแกมมาโอโรซานอลที่พบในตัวอย่างดังที่ได้กล่าวข้างต้น Chohan และคณะ (2012) พบว่าศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณโพลีฟีนอลที่พบในโรสแมรี่ (rosemary) เสง (sage) และไทม์ (thyme) มีความสัมพันธ์กับการยับยั้งการหลั่ง IL-8 ในเซลล์เม็ดเลือดขาว (peripheral blood lymphocytes) และเซลล์ลำไส้ (Caco-2) ที่ถูกกระตุ้นด้วย tumor necrosis factor ($TNF-\alpha$) หรือ H_2O_2 การศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีการหลั่ง IL-8 ลดลง โดยพบว่า เซลล์ลำไส้ที่ได้รับสารสกัดข้าวหมากที่ผ่านการย่อยมีปริมาณการหลั่ง IL-8 น้อยกว่าเซลล์ลำไส้ที่ได้รับสารสกัดจากข้าวหมากที่ไม่ผ่านการย่อย และข้าวเหนียวดำสุก อาจเป็นผลมาจากวิตามินอี และโพลีฟีนอลที่เพิ่มขึ้นระหว่างการผลิตและการย่อยในระบบทางเดินอาหาร H_2O_2 เป็นสารตั้งต้นของอนุมูลออกซิเจน (oxygen radical) ที่เหนี่ยวนำให้เซลล์หลั่ง IL-8 ผ่านกระบวนการส่งสัญญาณในวิถี mitogen-activated protein kinases (MAPK) โดยอาศัย extracellular signal-regulated kinases (ERKs) Jun N-terminal kinase (JNK) และ p38 (Lee และคณะ, 2008) Matsuoka และคณะ (2002) รายงานว่า สารสกัดโพลีฟีนอลจากชาเขียวสามารถยับยั้งการทำงานของ JNK และ p38 จึงส่งผลให้เซลล์ปอด (A549 cell) ที่ได้รับ H_2O_2 หลั่ง IL-8 ลดลง นอกจากนี้ da Silveira Vargas และคณะ

(2014) พบว่า เซลล์โพรงประสาทฟัน (MDPC-23) ที่ได้รับวิตามินอีร่วมกับ H_2O_2 มีชีวิตรอดมากกว่ากว่ากลุ่มที่ได้รับ H_2O_2 เพียงอย่างเดียว ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาที่พบในเซลล์หลอดเลือด (HMECs) (Tong และ Meydani, 2001) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิตามินอี สามารถป้องกันเซลล์โพรงประสาทฟัน และเซลล์หลอดเลือดไม่ให้ถูกทำลายด้วย H_2O_2 ได้

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

ผลจากการวิจัยที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอาหารเพื่อสุขภาพที่มีข้าวหมากเป็นส่วนผสม เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่สนใจรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ข้าวหมากมีฤทธิ์ลดภาวะเครียดจากออกซิเดชัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคเรื้อรัง เช่น โรคมะเร็ง โรคไขมันในเลือดสูง

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

เพื่อเป็นการส่งเสริมการบริโภคข้าวหมากหรือนำข้าวหมากไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพจึงควรศึกษาถึงประสิทธิภาพของข้าวหมากในด้านการลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่างๆ เช่น การลดระดับน้ำตาล หรือระดับไขมันในเลือด โดยอาจศึกษาในเซลล์หรือในสัตว์ทดลองต่อไป