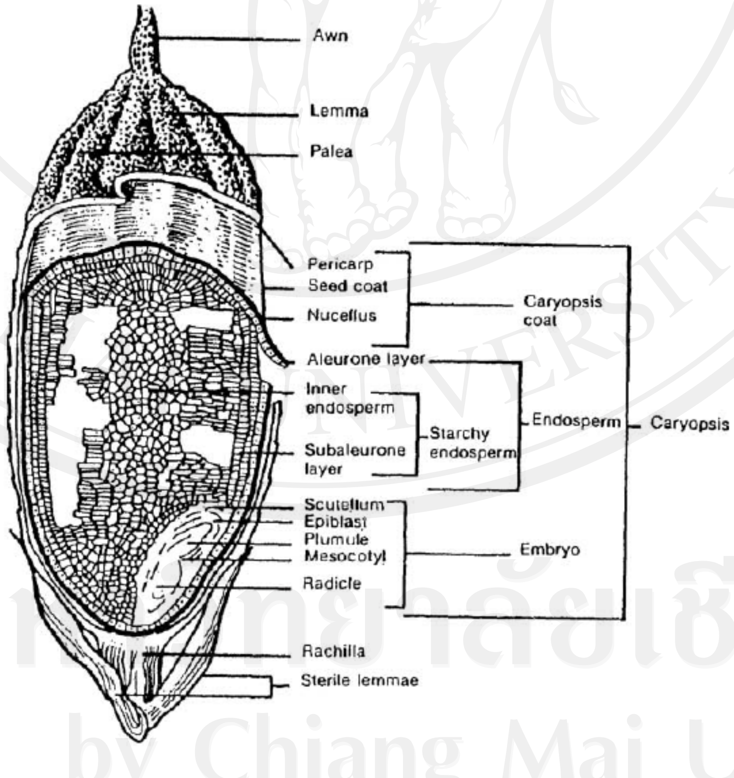
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวกล้อง (brown rice)

ข้าวกล้องคือ ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออกเท่านั้น จึงเป็นการนำข้าวมาผ่านการขัดสีเพียงครั้งเดียว ข้าวที่ได้จึงเป็นข้าวที่มีสีขาวขุ่น (อรอนงค์, 2547) จากการศึกษาทางกายภาพและทางชีวเคมีพบว่า เมล็ดข้าวประกอบด้วย เปลือกหุ้มเมล็ดหรือแกลบ (hull หรือ husk) ซึ่งจะหุ้มเมล็ดข้าวกล้องไว้ ในเมล็ดข้าวกล้องประกอบด้วยจมูกข้าวหรือคัพภะ (germ หรือ embryo) รำข้าว (เยื่อหุ้มเมล็ด) และเมล็ดข้าวขาวหรือเมล็ดข้าวสาร (endosperm) ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งสารอาหารในเมล็ดข้าวประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีโปรตีน วิตามินบี วิตามินอี และแร่ธาตุที่แยกไปอยู่ในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าว นอกจากนี้ ยังพบสารอาหารประเภทไขมันซึ่งพบได้ในรำข้าวเป็นส่วนใหญ่ (Watanabe *et al*., 2004)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: Zhou *et al.* (2002)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การบริโภคข้าวกล้องจะได้คุณค่าทางอาหารหลายอย่าง ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตซึ่งให้พลังงานแก่ร่างกาย โปรตีนช่วยเสริมสร้าง และซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ได้ไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวที่ให้พลังงาน และความอบอุ่นแก่ร่างกาย นอกจากนี้ยังได้รับประโยชน์จากสารอาหารอื่น ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีอยู่มาก เป็นส่วนใหญ่ในข้าวคือ วิตามินต่างๆ ข้าวกล้องมีวิตามินและแร่ธาตุมากกว่าข้าวขาว 2-3 เท่าตัว อย่างไรก็ตาม การนำข้าวกล้องมาแช่น้ำเพื่อให้เกิดการงอก จะทำให้ข้าวกล้องมีสารอาหารที่มีประโยชน์เพิ่มขึ้น ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มฟีโนลิก วิตามินบี และเส้นใยอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการแช่ให้เกิดการงอก (Komatsuzaki *et al*., 2007)

2.2 ข้าวกล้องงอก (germinated brown rice)

ข้าวกล้องงอก คือข้าวที่ผ่านกรรมวิธีการสีเพียงหนึ่งครั้งเพื่อให้เปลือกหลุดออกไป ดังนั้นจึงยังเหลือจมูกข้าว และเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวที่เห็นเป็นสีน้ำตาลและแดง จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการเพาะงอกด้วยการแช่น้ำจนกลายเป็นข้าวกล้องงอก (พัชรี, 2553) ซึ่งมีสารอาหารที่มีประโยชน์มากมาย มีส่วนช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง (Oh and Oh, 2004) เบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัว (Lee and Liu, 2008) เป็นต้น ซึ่งปัจจุบัน กระแสความนิยมในผลิตภัณฑ์จากข้าวกล้องงอกมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากข้าวกล้องงอก ซึ่งมีสารอาหารที่สำคัญ ได้แก่ กรดแกมมาอะมิโนบิวทูริก (gamma-aminobutyric acid, GABA), วิตามินบี1 และเส้นใยอาหาร ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการแช่ให้เกิดการงอก นอกจากนี้การทำข้าวกล้องงอกยังช่วยให้ได้ข้าวนุ่มขึ้น และง่ายต่อการรับประทานยิ่งขึ้น (Ohtsubo *et al*., 2005)

2.2.1 กระบวนการงอก (germination)

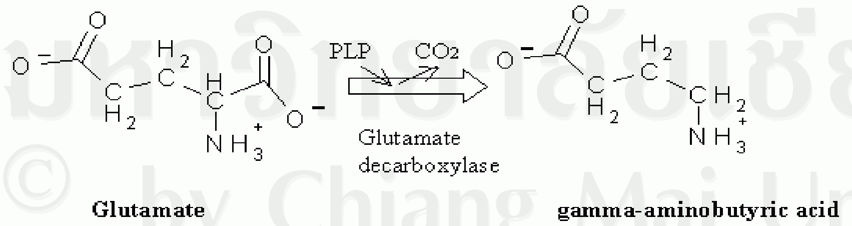
กระบวนการงอกเป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านชีวเคมีและทางโภชนาการที่สำคัญ เมื่อข้าวอยู่ในสภาวะที่มีการเจริญเติบโตจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี การเปลี่ยนแปลงจะเริ่มขึ้น เมื่อน้ำได้แทรกเข้าไปในเมล็ดข้าว ในสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม มีออกซิเจนเพียงพอในการหายใจเพื่อให้พลังงาน มีแสงแดดและแร่ธาตุจากดิน เพื่อก่อให้เกิดกระบวนการเจริญเติบโต โดยการแบ่งตัวและกลายเป็นต้นอ่อนต่อไป ในกระบวนการงอกนี้น้ำเป็นส่วนสำคัญที่สุด เพราะก่อให้เกิดกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) เพื่อส่งถ่ายสารอาหารจากส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยเฉพาะส่วนเนื้อในเมล็ดมาสู่ส่วนคัพภะ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสังเคราะห์โปรตีน การเพิ่มขึ้นของใยอาหาร วิตามินและส่วนประกอบอื่นๆ นอกจากน้ำแล้วเอนไซม์ต่างๆ ภายในเมล็ดจะทำหน้าที่ในการย่อยสลาย และเสริมสร้างอาหารชนิดต่างๆ โดยมีน้ำเป็นส่วนสำคัญในการทำงาน หรือที่เรียกว่าเอนไซม์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ไฮโดรไลติก ซึ่งน้ำจะไปกระตุ้นให้เอนไซม์ภายในเมล็ดข้าวทำงาน เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มงอก (malting) สารอาหารที่ถูกเก็บไว้ในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมี จนเกิดเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กลง (oligosaccharide) และน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) นอกจากนี้ โปรตีนภายในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยให้เกิดเป็นกรด อะมิโนและเปปไทด์ รวมทั้งยังพบการการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆ เช่น โทโคฟีรอล (tocopherol) โทโคไตรอีนอล (tocotrienol) และโดยเฉพาะ GABA (พัชรี, 2553)

2.3 กรดแกมมาอะมิโนบิวทูริก (gamma-aminobutyric, GABA)

GABA หรือ γ-aminobutyric acid หรือ 4-aminobutanoic acid มีสูตรโมเลกุล $C_4H_9NO_2$ จัดเป็นกรดอะมิโนอิสระที่ไม่ใช่โปรตีน เป็นกรดอะมิโนที่ได้จากกระบวนการ decarboxylation ของกรดกลูตามิก และย่อยสลายโดยเอนไซม์ glutamate decarboxylase (GAD) ดังภาพที่ 2.2 กรดนี้จะมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง (glutametergic) และเกี่ยวข้องกับความจำ แต่ถ้ามีการผลิตในปริมาณที่มากเกินไป จะทำลายเซลล์สมอง และทำให้เกิดโรคเอแอลเอส (amyotrophic lateral sclerosis, ALS) หรือที่เรียกว่า Lou Gehrig’s disease เป็นโรคที่เกิดจากการเสื่อมสลายของเซลล์ประสาทที่ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อ บริเวณที่มักเกิดโรคเอแอลเอสอยู่ที่แกนสมอง และไขสันหลัง ทำให้ผู้ป่วยมีกล้ามเนื้อแขนขา และลำตัวอ่อนแรง กลืนลำบาก และพูดไม่ชัด (Lambert *et al*., 2008) นอกจากนี้ GABA ยังถือเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (inhibitor) ทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย (Harvey and Stephens, 2004) อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (growth hormone) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับ และเกิดสาร lipotropic เช่น choline และ inostal เป็นต้น ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน (Daemen *et al*., 2008)



ภาพที่ 2.2 กลไกการเกิดกรดแกมมาอะมิโนบิวทูริก (gamma-aminobutyric acid, GABA)
ที่มา: Goto *et al*. (1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สาร GABA นั้นเป็นที่รู้จักมานาน ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติของอาหารหลายประเภท และจะมีปริมาณแตกต่างกันออกไป เช่น ข้าวกล้องงอก ข้าวโพด ถั่วเหลือง ฟักทอง มีปริมาณ GABA เท่ากับ 10, 6.5, 7 และ 9.7 ตามลำดับ (คัดนางค์, 2554) แต่อาจมีปริมาณไม่คงที่ และไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะทำให้เกิดผลตามที่ผู้บริโภคหวังได้ ดังนั้นจึงมีการเติมสาร GABA ลงในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับในปริมาณที่เพียงพออย่างแท้จริง โดยการบริโภคสาร GABA เพื่อให้มีประสิทธิผล (effective dose) ในการผ่อนคลายความเครียดควรมีปริมาณ 20-30 มิลลิกรัม แต่ในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดร้อยละของปริมาณการได้รับสาร GABA ในแต่ละวัน (% daily value) อย่างเป็นทางการ ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมบางชนิดจึงมีการเพิ่มสาร GABA ถึง 500 มิลลิกรัม เพื่อให้ได้ประโยชน์อย่างถึงที่สุด Nakamura *et al.* (2009) ศึกษาการบริโภคช็อกโกแลต 10 กรัม ที่มีการผสมสาร GABA ที่ผลิตจากกรดกลูตามิก ปริมาณ 0.28 มิลลิกรัม ให้ผู้ที่ผ่านการเพิ่มความเครียดโดยการทำแบบทดสอบทางคณิตศาสตร์รับประทานช็อกโกแลตดังกล่าว หลังจากนั้นทำการตรวจวัดค่า heart rate variability (HRV) และ salivary chromogranin A (CgA) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการเต้นของหัวใจ ของผู้ทดสอบภายในระยะเวลาที่กำหนด คือ 45 และ 50 นาทีตามลำดับ พบว่าในกลุ่มผู้ทดลองที่ได้รับช็อกโกแลตผสมสาร GABA ที่ผลิตจากกรดกลูตามิก มีค่า HRV และ CgA ต่ำกว่ากลุ่มผู้ทดลองที่เป็นกลุ่มควบคุม ซึ่งแสดงว่าช็อกโกแลตผสมสาร GABA มีส่วนช่วยให้ความเครียดลดลงได้

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณสาร GABA ในข้าวกล้องงอก

2.3.1.1 ชนิดและสายพันธุ์ข้าว

ชนิดของข้าวมีผลต่อปริมาณสาร GABA ซึ่งจากการศึกษาของ Haraldsson *et al.* (2005) พบว่ามีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและกรดอะมิโนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการงอก รวมทั้งในข้าวบาเลย์ (Rimsten *et al.*, 2003) ข้าวสาลี (Yang *et al.*, 2003) และข้าวโอ๊ต (Mikola *et al.*, 2001) โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเท่ากับ 36.41, 89.40 และ 63.00 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ แม้แต่การงอกข้าวเหมือนกันแต่ต่างกันที่สายพันธุ์ยังพบว่าส่งผลต่อปริมาณของสาร GABA เช่นกัน Varanyanond *et al.* (2005) ศึกษาปริมาณ GABA ในสายพันธุ์ข้าวของประเทศไทย พบว่าข้าวพันธุ์ขาวหอมมะลิ 105 มีปริมาณ GABA มากที่สุดเท่ากับ 186.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาได้แก่ ข้าวสายพันธุ์ประทุมธานี 1 พันธุ์ชัยนาท 1 พันธุ์เหลืองประทิว 123 และพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ซึ่งมีปริมาณ GABA เท่ากับ 154.6, 144.5, 113.4 และ107.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ Komatsuzaki *et al.* (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณ GABA ในข้าว 2 สายพันธุ์ (สาย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พันธุ์ Nipponbare และ Haiminori) พบว่า ข้าวสายพันธุ์ Haiminori ให้ปริมาณ GABA มากกว่าสายพันธุ์ Nipponbare

2.3.1.2 คัพภะและรำข้าวกล้อง

ขนาดและปริมาณของรำข้าวก็มีความสำคัญต่อปริมาณ GABA เช่นเดียวกัน โดยการใช้ข้าวกล้องที่มีคัพภะขนาดใหญ่ 2 สายพันธุ์คือ Japonica : Haiminori และ Oou 359 เปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่มีคัพภะปกติ 3 สายพันธุ์ คือ Koshi-hikari, Yumetsukushi และ Nipponbare (เก็บเกี่ยวในปี 1999-2001) พบว่า ข้าวที่มีคัพภะขนาดใหญ่ (Haiminori) มีปริมาณสาร GABA สูงสุดเท่ากับ 24.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (Komatsuzaki *et al*., 2007) และพบปริมาณสาร GABA ในรำข้าวจากข้าวบาเลย์และรำข้าวจากข้าวสาลีเท่ากับ 11.0 และ 3.9 ตามลำดับ (Limure *et al*., 2008)

2.3.1.3 อุณหภูมิและเวลาการบ่มเพาะเมล็ด และสภาวะที่เกี่ยวข้อง

จากการวิจัยที่มีการศึกษาปัจจัยในการผลิตข้าวกล้องงอกเพื่อให้ได้สาร GABA ปริมาณสูง พบว่ามีปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการแช่น้ำ pHของน้ำที่ใช้แช่ การเติมก๊าซขณะปล่อยให้งอก กล่าวคือ เมื่อแช่ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 ในน้ำที่มี pH 5 ได้ปริมาณสาร GABA สูงสุดเท่ากับ 21.93 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และเพาะให้งอกที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 36 ชั่วโมง มีปริมาณ GABA สูงสุดเท่ากับ 96.36 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง (Sunte *et al*., 2007) การแช่ข้าวกล้องงอก 3 สายพันธุ์ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105, กข 23 และชัยนาท แช่น้ำที่อุณหภูมิ 35±0.5 องศาเซลเซียส นาน 2, 3 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ ปล่อยให้งอกนาน 24 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณสาร GABA เท่ากับ 76, 77 และ 186 มิลลิกรัมต่อจมูกข้าว 100 กรัมตามลำดับ (ปาริชาติ และวรรณา, 2551) การแช่ข้าวกล้องสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในน้ำพีเอช 6 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ได้ข้าวกล้องงอกที่มีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ โดยมีปริมาณ GABA กรดไฟติก และวิตามินบี 1 เท่ากับ 16.50, 501.06 และ 0.526 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งของข้าวกล้องงอกตามลำดับ แต่สำหรับข้าวกล้องงอกสายพันธุ์ชัยนาท มีเท่ากับ 14.51, 486.03 และ 0.436 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง (วัฒนา และคณะ, 2007)

2.3.1.4 กระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งมีผลต่อปริมาณสาร GABA ซึ่งจากการศึกษาของ Yoshihiro *et al.* (2006) ในการศึกษาปริมาณสาร GABA ในข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโอ๊ตที่ทำให้งอกโดยการแช่น้ำ และปล่อยให้งอก 2/3 เท่าของความยาวเมล็ด แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 37, 45, 55 และ 85

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อทำแห้งเมล็ดข้าวงอกแบบ freeze-dried จะมีปริมาณ GABA สูงสุด และที่อุณหภูมิอบแห้ง ระหว่าง 42-55 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณสาร GABA สูงกว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งโดยทั่วไป สำหรับข้าวกล้องงอกที่กำลังงอก กิจกรรมของเอนไซม์ภายในเมล็ดข้าวจะทำให้เกิดสาร GABA เพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีกระบวนการให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวที่อุณหภูมิสูง เช่น การอบแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาเมล็ดข้าวให้นานขึ้น จะมีผลทำให้อัตราส่วนในการงอกลดลง

2.3.1.5 กระบวนการหมัก

การเพิ่มปริมาณสาร GABA สามารถทำได้ด้วยกระบวนการหมัก Aoki *et al*. (2003) ได้ศึกษาวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์คล้ายเทมเป้ โดยนำถั่วเหลืองมานึ่งให้สุก ผสมเชื้อรา *Rhizopus microspores var. oilgosporus* IFO 8631 บ่มในสภาวะที่มีอากาศ นาน 20 ชั่วโมง และบ่มต่อในสภาวะที่มีอากาศและก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 30 และ 370 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งของ ถั่วเหลืองหมักตามลำดับ และเมื่อได้ศึกษาต่อพบว่าเชื้อ *Rhizopus microspores var. oilgosporus* IFO 32002 และ 32003 สามารถผลิตสาร GABA ได้เท่ากับ 1,740 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งของถั่วเหลืองหมักตามลำดับ

2.3.1.6 กระบวนการแช่เยือกแข็ง

กระบวนการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อปริมาณกรดอะมิโนอิสระในเมล็ดข้าวบาร์เลย์งอกสายพันธุ์ *Hordeum vulgare* L. ที่เก็บในสภาพแช่เย็นและแช่แข็ง พบว่า เมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการแช่แข็งมีปริมาณกรดอะมิโนสูงกว่าเมล็ดข้าวบาร์เลยที่ผ่านการแช่เย็น 3 เท่า เนื่องจากสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำสามารถเหนี่ยวนำให้อัตราการสังเคราะห์โปรตีนลดลง แต่เมื่อเปลี่ยนสภาวะเป็นการแช่เยือกแข็ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสารกลูตาเมตอิสระไปเป็นสาร GABA (Sergio *et al*, 2004)

2.3.2 ประโยชน์ของสาร GABA

2.3.2.1 สารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้งในระบบประสาท

สาร GABA ทำหน้าที่ส่งไอออนคลอไรด์กระจายเข้าสู่ภายในเซลล์ประสาท หรือส่งไอออนบวกของโพแทสเซียมออกจากเซลล์ ทำให้เนื้อเยื่อมีขั้วประจุเพิ่มขึ้น และเกิดการกระตุ้นเซลล์ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า hyperpolarizing inhibition ในขณะที่บางเซลล์มีปริมาณไอออนคลอไรด์อยู่สูงกว่าระดับสมดุลย์ ซึ่งทำให้เกิดกระแสคลอไรด์ภายใน และทำให้สูญเสียประจุจากเนื้อเยื่อ (depolarization) Daemen *et al*. (2008) พบว่า การบริโภคข้าวกล้องงอกที่มีสาร GABA มากกว่าข้าวกล้องปกติ 15 เท่า จะสามารถป้องกันการทำลายสมองในหนูทดลองได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

GABA มาใช้ในวงการแพทย์เพื่อการรักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่างๆ เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ โรคลมชัก เป็นต้น นอกจากนี้ ผลการวิจัยด้านสุขภาพบ่งชี้ว่า ข้าวกล้องงอกที่ประกอบด้วย GABA มีส่วนช่วยในการลดความดันโลหิต ลดปริมาณ low density lipoprotein (LDL) ลดอาการอัลไซเมอร์ ลดน้ำหนัก ทำให้ผิวพรรณดี ตลอดจนใช้บำบัดโรคเกี่ยวกับระบบประสาทส่วนกลางได้

2.3.2.2 รักษาสมดุลในสมอง

สาร GABA มีส่วนช่วยในการหยุดการกระตุ้นสื่อประสาทที่ทำให้จิตใจเกิดความ กระวนกระวาย จึงนำมาใช้เป็นยากล่อมประสาทเพื่อลดความเครียด ความวิตกกังวล และการนอนไม่หลับ เช่นเดียวกับ valium ซึ่งเป็นยานอนหลับ สำหรับการใช้สาร GABA เป็นสารสื่อนำประสาทหรือนิวโรทรานสมิตเตอร์ (neurotransmitter) จะช่วยให้เซลล์สมองเกิดการตื่นตัว ถ้าสมองขาด GABA จะมีผลทำให้เกิดโรคลมบ้าหมู (สำนักข่าวต่างประเทศ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2554)

2.3.2.3 ช่วยลดความดันโลหิต

จากรายงานของ Okada *et al.* (2000) พบว่า การได้รับ GABA ติดต่อกันนาน 8 สัปดาห์จะช่วยลดความดันโลหิต และทำให้นอนหลับดีขึ้น รวมทั้งช่วยให้ร่างกายผู้สูงอายุทำงานเป็นปกติดี

2.3.2.4 ป้องกันโรคอ้วน

สาร GABA มีส่วนช่วยในการลดปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ในตับและในกระแสโลหิต ทำให้น้ำหนักลดลง กระตุ้นต่อมไร้ท่อ ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต สร้างเนื้อเยื่อ สร้างสารป้องกันการสะสมของไขมัน และ low density lipoprotein (Fujibayashi *et al.*, 2008)

2.3.2.5 ป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์

ในวัยชรา ผู้ป่วยจะสูญเสียความทรงจำ เนื่องจากมีเปปไทด์ชนิด beta-amyloid peptide ในสมองทำให้สมองทำงานไม่เป็นปกติ โดยทำให้สมองด้านความจำทำงานได้ลดลง จากการศึกษาโดยทดลองให้หนูกินข้าวกล้องที่แช่น้ำ ซึ่งมีปริมาณสาร GABA สูงกว่าข้าวขาวปกติถึง 15 เท่า พบว่าภายในสมองของหนูทดลองจะเกิดการป้องกันการทำลายสมองจาก beta-amyloid peptide (Saikusa *et al.*, 1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 อาหารเช้าธัญพืช (breakfast cereal)

การบริโภคอาหารมื้อเช้ามีความสำคัญกับพฤติกรรมของคนทั่วไป เพราะส่งผลกระทบต่อสมาธิความสามารถในการเรียนรู้และทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเด็กวัยเรียนที่มีงานวิจัยค้นพบว่าการรับประทานอาหารมื้อเช้ามีผลต่อพฤติกรรมการเรียนรู้ของเด็ก (Mahoney *et al*., 2005) จะเห็นได้ว่าอาหารมื้อเช้าเป็นมื้อที่สำคัญที่สุด ดังนั้นอาหารเช้าที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ในยุคสังคมปัจจุบัน คืออาหารเช้าธัญพืชที่อยู่ในรูปของอาหารเช้าสำเร็จรูปต่างๆ หรืออาหารเช้าธัญพืชพร้อมบริโภค (ready-to-eat breakfast cereal) ซึ่งมีวิธีการเตรียมที่สะดวกไม่ยุ่งยากเพียงเติมนมลงไปเท่านั้นก็พร้อมรับประทานได้ทันที ด้วยเหตุนี้อาหารเช้าธัญพืชพร้อมบริโภคในปัจจุบันจึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยตลอด

เนื่องจากกลุ่มผู้บริโภคอาหารเช้าธัญพืชส่วนใหญ่เป็นกลุ่มเด็ก ผู้ผลิตจึงต้องคำนึงถึงคุณค่าทางโภชนาการเป็นสำคัญ เด็กที่มีอายุ 2-12 ปี ต้องการคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 91 ของปริมาณที่แนะนำต่อวัน เด็กที่มีอายุ 13-18 ปี ต้องการคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 75 ของปริมาณที่แนะนำต่อวัน และอายุมากกว่า 18 ปี ต้องการคุณค่าทางโภชนาการร้อยละ 61 ของปริมาณที่แนะนำต่อวัน (จิตธนา และคณะ, 2540) ดังนั้นอาหารเช้าธัญพืชจึงเหมาะสำหรับเด็ก และบุคคลทั่วไป เพราะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีไขมัน และคลอ-เลสเตอรอลต่ำ มีวิตามินโดยเฉพาะกลุ่มของวิตามินบี และแร่ธาตุ เช่น เหล็ก แมกนีเซียมและสังกะสีมาก แต่ธัญพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารเช้ามักขาดกรดอะมิโนประเภทไลซีน การบริโภคอาหารเช้าธัญพืชร่วมกับนมจะทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไป เพราะนมเป็นแหล่งของไลซีนที่ดี นอกจากนี้การรับประทานอาหารเช้าธัญพืชร่วมกับนมจะทำให้ร่างกายได้รับคุณค่าทางโภชนาการที่ดี และเหมาะสม ทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้นเนื่องจากสารอาหารบางชนิดมีมากในธัญพืช เช่น วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี และธาตุเหล็กในขณะที่นมมีปริมาณสารเหล่านี้น้อยกว่าแต่มีปริมาณโปรตีน แคลเซียม ฟอสฟอรัส และวิตามินดีสูง (สุลาลักษณ์, 2549)โดยอาหารเช้าธัญพืชสามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามลักษณะต่างๆ ได้ 4 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ชนิดของวัตถุดิบ และกลุ่มผู้บริโภค ดังนี้

1) **อาหารเช้าธัญพืชแบ่งตามลักษณะของผลิตภัณฑ์** อาหารเช้าธัญพืชสามารถแบ่งตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ 5 ลักษณะ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น (flaked products) ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะพองกรอบ (puffed products) ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นชิ้น (shredded product) ผลิตภัณฑ์ที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

มีลักษณะเป็นเม็ด (granular product) และผลิตภัณฑ์ที่เคลือบด้วยน้ำตาล (sugar-coated product) (พัชรินทร์ และสุจิรา, 2542)

2) อาหารเช้าธัญพืชแบ่งตามชนิดวัตถุดิบ อาหารเช้าธัญพืชแบ่งตามชนิดวัตถุดิบ ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าว หรืออาจทำจากรำของธัญพืชชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือรวมกันหลายชนิด (อรอนงค์ และลินดา, 2536) นอกจากการใช้แป้งข้าวเป็นส่วนผสมหลักยังมีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เพื่อการยอมรับของผู้บริโภค เช่น การพัฒนาขนมขบเคี้ยวจากข้าวบาร์เลย์ผสมกากผลไม้ (Altan *et al*., 2008) และเกล็ดข้าวโพด (Holguin-Acuna *et al*., 2008)

3) อาหารเช้าธัญพืชแบ่งตามกลุ่มผู้บริโภค แบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ อาหารเช้าธัญพืชประเภทพื้นฐาน (basic) เป็นอาหารเช้าธัญพืชประเภทรสจืด อาหารเช้าธัญพืชประเภทรสชาติสำหรับเด็ก (child taste) เป็นอาหารเช้าธัญพืชที่มีรสหวาน อาหารเช้าธัญพืชประเภทเพื่อสุขภาพ (health) เป็นอาหารเช้าธัญพืชที่มุ่งเน้นคุณค่าทางโภชนาการเพื่อสุขภาพ และอาหารเช้าธัญพืชผสมผลไม้อบแห้งเป็นอาหารเช้าธัญพืชที่ผสมผลไม้อบแห้ง เช่น มะละกอ แอปเปิ้ล หรือกีวีอบแห้ง เป็นต้น (Baublis *et al*., 2000)

2.4.1 วัตถุดิบในการแปรรูปอาหารเช้าธัญพืช

2.4.1.1 แป้งข้าว

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสารอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมันและเกลือแร่น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีองค์ประกอบอื่นอยู่มากจะเรียกว่า ฟลาว์ (flour) (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543) ซึ่งหน้าที่ของแป้งข้าวในผลิตภัณฑ์อาหารเช้าธัญพืช คือ แป้งข้าวกล้อง (ข้าวเจ้า) ให้คุณค่าทางอาหารหลายชนิดและแป้งข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบที่สำคัญต่อการแปรรูปอาหารเช้าธัญพืช เนื่องจากแป้งข้าวกล้อง และแป้งข้าวเหนียวจะมีหน้าที่ในการเป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์และทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบและพอง

2.4.1.2 แป้งข้าวโพด

แป้งข้าวโพดผลิตจากการสกัดเอาแป้งจากเมล็ดข้าวโพดที่แก่ และแห้งแล้วโดยการแยกส่วนคัพและเปลือกออก เหลือเอนโดสเปิร์มซึ่งเป็นส่วนของเนื้อแป้งไว้ แป้งข้าวโพดที่ได้มี 3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลักษณะ คือ ชนิดหยาบ เรียกว่า corn grit ค่อนข้างละเอียด เรียกว่า corn meal และชนิดละเอียด เรียกว่า แป้งข้าวโพด (corn flour) นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งข้าวโพดในรูปแบบต่างๆ เช่น เป็นอาหารเช้า และขนมปังข้าวโพด ใช้เป็นแป้งชุบทอด (ขวัญชนก และจารุพันธ์, 2548)

2.4.1.3 น้ำตาล

น้ำตาลโดยทั่วไปหมายถึง น้ำตาลซูโครส น้ำตาลมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ น้ำตาลทรายแดง น้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลไอซิ่งและน้ำตาลแบะแซ ซึ่งหน้าที่ของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหารเช้าธัญพืช คือ ให้กลิ่นรสและความหวานของผลิตภัณฑ์ ช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความชุ่มชื้นเก็บได้นาน ช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและช่วยทำให้ปริมาณน้ำอิสระลดลง (จิตธนา และคณะ, 2540)

2.4.1.4 เกลือ

บทบาทหน้าที่สำคัญของเกลือต่อการปรุงรสอาหารและมีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะ วิธีการใช้ไม่ยุ่งยากและราคาถูก การใช้เกลือในระดับอุตสาหกรรมอาหารได้ใช้เกลือเป็นสารเพิ่มกลิ่นรส เกลือมีความสามารถในการป้องกันการบูดเสียของอาหารได้ เพราะเกลือช่วยลดความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระของอาหารลง (กล้าณรงค์, 2521) ซึ่งหน้าที่ของเกลือในผลิตภัณฑ์อาหารเช้าธัญพืช คือ ช่วยเพิ่มรสชาติให้แก่ผลิตภัณฑ์โดยให้รสเค็มในผลิตภัณฑ์ ช่วยให้โดมีกำลังในการยืดตัว และช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยเกลือจะไปลดปริมาณน้ำอิสระลง (จิตธนา และคณะ, 2540)

2.5 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process)

การผลิตอาหารเช้าธัญพืชพร้อมบริโภค สามารถผลิตได้หลายรูปแบบ โดยอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตอาหารเช้าธัญพืชในอุตสาหกรรมอาหาร คือ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีข้อดี คือ สามารถทำการผลิตได้รวดเร็ว และใช้ระยะเวลาในการผลิตน้อย มีอัตราการผลิตสูง ผลิตได้จำนวนมาก พื้นที่และแรงงานที่ต้องใช้ในการผลิตต่อหนึ่งหน่วยการผลิตมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ ต้นทุนการผลิตต่ำ ยืดหยุ่นได้หลากหลายทั้งในแง่ของวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิต และการปรับเปลี่ยนสภาวะการผลิต, สามารถ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ปรับเปลี่ยนสภาวะการผลิต และรูปแบบหน้าแปลนที่ใช้ และการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบได้หลากหลาย ทำให้เกิดคุณประโยชน์ในด้านเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการตลอดจนลักษณะเนื้อสัมผัสที่หลากหลาย ซึ่งไม่อาจจะทำได้ในกระบวนการผลิตแบบอื่น (Patil *et al*., 2007)

2.5.1 ประเภทของอาหารเช้าธัญพืชโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

2.5.1.1 แบบ direct expanded

กระบวนการผลิตแบบ direct expanded เป็นกระบวนการผลิตแบบอัดขึ้นรูปวัตถุดิบโดยตรง เกิดรูปร่างในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้ มีลักษณะสุกและพองหลังออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทันที มีรูปร่างผลิตภัณฑ์เหมือนหน้าแปลนที่ใช้ ซึ่งสามารถทำการผลิตได้อย่างรวดเร็ว และใช้แรงงานในการผลิตน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปเคลือบด้วยน้ำเชื่อม แต่งกลิ่นและอบแห้ง (จุฑาลักษณ์, 2553) ซึ่งการผลิตแบบ direct expanded ส่วนมากจะใช้เกล็ดข้าวโพดเป็นวัตถุดิบหลัก เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเกล็ดข้าวโพด โดยใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าในสูตรที่มีปริมาณเกล็ดข้าวโพดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 93 เมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูเดตแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความกรอบพองที่ดี ผู้บริโภคให้การยอมรับกว่าร้อยละ 80 (Boonyasirikol and Charunuch, 2000)

2.5.1.2 แบบ indirect expanded

กระบวนการผลิตแบบ indirect expanded เป็นกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เพื่อทำให้แป้งโดสุก และเกิดรูปร่างในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่า direct expanded เนื่องจากอุณหภูมิต่ำ ทำให้ปริมาณความชื้นในแป้งเกิดการกระจายตัวได้ยาก และยังคงเหลืออยู่เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านรูเปิดหน้าแปลนออกมาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงยังไม่พองหรือพองน้อย มักต้องนำมาผ่านกระบวนการ gun puffing หรือ flaking process กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นี้จึงเกิดแรงเสียดทานน้อยกว่า direct expanded breakfast cereal ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้บางครั้งเรียกว่า half-product Choi *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ puffed snack จากแป้งถั่วลิสง พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันแล้วได้ผลิตภัณฑ์ half-product ที่มีความชื้นร้อยละ 11 การทดแทนแป้งถั่วลิสงที่ร้อยละ 50 ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบมากกว่า 6 คะแนน (ชอบเล็กน้อย) ในทุกคุณลักษณะที่ทำการประเมิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบ ที่ใช้ในสูตรของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการปรับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (จุฬาลักษณ์, 2553; กมลวรรณ, 2541) โดยมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.5.2.1 วัตถุดิบ

- ข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นวัสดุที่สามารถพองตัวได้ดีและให้กลิ่นรสที่ดีหลังการเอกซ์ทรูชัน ผลิตภัณฑ์มีความกรอบ นิยมมากเนื่องจากมีราคาถูก โดยทั่วไปนิยมใช้ในรูปของเกล็ดข้าวโพด (corn grit) ซึ่งเป็นชนิดเกรดดีที่ผ่านการแยกส่วนฐานของเมล็ดทางด้านนอกซึ่งเป็นส่วนของก้านดอกสั้นๆ ที่เรียกว่า ทิพแคพ (tip caps) และจมูกข้าวโพด (germ) ออกแล้วนำมาทำความสะอาด บด และคัดขนาด ประชา และจุฬาลักษณ์ (2550) ได้พัฒนาอาหารเช้าธัญพืชที่มีเกล็ดข้าวโพดเป็นองค์ประกอบหลักด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ เพื่อหาปริมาณแป้งถั่วเหลืองที่เสริมลงไปแทนเกล็ดข้าวโพดแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสดี มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ราคาถูก โดยสามารถเสริมแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันร้อยละ 16 ในข้าวโพดเกล็ดร้อยละ 77 น้ำตาลร้อยละ 5 แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 วิตามินเกลือแร่ร้อยละ 1 และโกโก้ผงร้อยละ 2 ของส่วนประกอบทั้งหมด

- ข้าว

ข้าวให้คุณสมบัติที่ดีในการเอกซ์ทรูชัน เช่นเดียวกับข้าวโพด พองตัวได้ดี เนื้อสัมผัสกรอบ แต่ให้กลิ่นรสค่อนข้างจืด (bland) เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเติมรสชาติอื่นๆ นิยมใช้ในรูปของปลายข้าวหรือข้าวที่นำมาบด เพราะเหมาะสมต่อการป้อนเข้าเครื่องเอกซทรูเดอร์ และปลายข้าวมีราคาถูกทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ มาฤดี และจุฬาลักษณ์ (2550) ศึกษาลักษณะทางเคมี-กายภาพของปลายข้าว ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณลักษณะของเอกซ์ทรูเดทที่ผลิตได้ พบว่าการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบ ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนการขยายตัวลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันส่งผลให้ค่า setback ของผลิตภัณฑ์ลดลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- ธัญพืช

มีการใช้ธัญพืชชนิดอื่นๆ เป็นวัตถุดิบ เช่น ถั่วแบบฝัก (Alonso *et al.*, 2000) ข้าวโพด (Adrian *et al.*, 2008) ถั่วเหลือง (Yeu and Lee 2008) และงา (Mukhopadhyay and Bandyopadhyay, 2003) เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้สารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายในผลิตภัณฑ์ครบถ้วน

2.5.2.2 ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

อนุภาคที่ใช้หากมีขนาดละเอียดเกินไปมักเกิดปัญหาในการป้อน (feed) เข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้เกิดการหยุดชะงัก อุดตันและไหม้ได้ แต่ถ้าขนาดหยาบเกินไปอาจทำให้แป้งในวัตถุดิบสุกได้ไม่ทั่วถึง ได้เนื้อสัมผัสหยาบกระด้างไม่กรอบนุ่ม (Mohamed, 2007)

2.5.2.3 ปริมาณไขมันในส่วนผสมของวัตถุดิบ (fat content)

ปริมาณไขมันในส่วนผสมของวัตถุดิบส่งผลต่อโครงสร้าง และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไขมันจะเกิดการรวมตัวกับแอมิโลสในแป้ง เกิดเป็นสารเชิงซ้อนของแอมิโลส-ไขมัน (amylose-lipid complex) ส่งผลให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง (Hoan *et al.*, 2008) นอกจากนี้ไขมันยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างลักษณะเป็นโพรงอากาศขนาดเล็ก และมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ Iwe (1998) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันโดยการผันแปรอัตราส่วนของ full-fat soybean และมันเทศ พบว่า เมื่ออัตราส่วนของ full-fat soybean ลดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการพองตัวเพิ่มขึ้น

2.5.2.4 ปริมาณเส้นใยอาหาร (fiber content)

เส้นใยอาหารมีผลต่อโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เพราะจะทำหน้าที่เหมือน solid filler ทำให้ลักษณะการพองของโมเลกุลของแป้งพองตัวได้ยากขึ้น (Stojesska *et al.*, 2008a) ดังนั้นความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น Altan *et al.* (2008b) ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยจากกากองุ่นในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า เมื่อปริมาณของเส้นใยจากกากองุ่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราส่วนการพองตัวลดลง และค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.2.5 ความชื้นของวัตถุดิบขณะป้อน (feed moisture)

ในกรณีที่มีความชื้นสูงเกินไปน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารไม่สามารถระเหยได้ดี เกิดการพองตัวน้อย ได้เนื้อสัมผัสค่อนข้างกรอบแข็ง เนื้อแน่น แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนมากทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาล Stojesska *et al.* (2008b) ศึกษาผลของการผันแปรปริมาณความชื้นของการป้อนวัตถุดิบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ที่มีส่วนผสมจากแป้งสาลี และสตาร์ชจากข้าวโพด พบว่า เมื่อระดับความชื้นของการป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ค่าสี L* ของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่มีค่าสี a* เพิ่มขึ้นแสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีค่าความหนาแน่น และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

2.5.2.6 อุณหภูมิของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (barrel temperature)

อุณหภูมิของกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 คือช่วงการป้อนและการผสม มีอุณหภูมิเท่ากับ 115 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 คือช่วงการนวด มีอุณหภูมิเท่ากับ 140 และช่วงที่ 3 คือช่วงการหุงต้มหรือช่วงทำให้ร้อนจนสุก มีการผันแปรอุณหภูมิในช่วงนี้เท่ากับ 150-180 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงที่ 3 นี้ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์อย่างมาก โดยการใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความชื้นค่อนข้างสูง ทำให้เนื้อสัมผัสค่อนข้างเหนียว (tough) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไหม้ได้ เช่น ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองทันทีหลังออกจากเครื่องเนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกมาจากเครื่องเกิดเนื่องจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นต้น เพื่อป้องกันการพองตัวของผลิตภัณฑ์ แต่จะพองหลังจากให้ความร้อน เช่น โดยวิธีการทอด หรืออบ (Arhaliass *et al*., 2007)

Chiang and Johnson (1977) ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิในกระบวนการเอกซ์ทรูชันว่า การใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นค่อนข้างสูง (ร้อยละ 18-22) ที่อุณหภูมิปานกลาง (88-104 องศาเซลเซียส) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะค่อนข้างแข็ง มีรูอากาศขนาดเล็ก และเนื้อสัมผัสค่อนข้างเหนียว หากวัตถุดิบมีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 10-14) ที่อุณหภูมิสูง (93-121 องศาเซลเซียส) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง ลักษณะเบาและมีรูอากาศที่กว้างขึ้น เมื่อนำไปอบแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกรอบนุ่ม ซึ่งถ้าใช้อุณหภูมิในการเอกซ์ทรูชันค่อนข้างต่ำ (68-80 องศาเซลเซียส) ปริมาณความชื้นจะไม่มีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันมากนัก แต่จะมีผลเมื่ออุณหภูมิ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกซ์ทรูชันสูง (95-110 องศาเซลเซียส) ความชื้นจะเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อย่างพอเหมาะ โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 13 ถ้าความชื้นสูงเกินไป จะทำให้อัตราส่วนการพองตัวลดลง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรอยร้าวที่ผิว Chaiyakul *et al.* (2008) ได้ศึกษาผลของสภาวะการผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณภาพทางเคมี และกายภาพของข้าวโปรตีนสูง พบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องเพิ่มขึ้น วัตถุดิบที่มีสารประกอบไนโตรเจนประเภทที่ไม่ใช่โปรตีน (non-protein nitrogen) จะมีความชื้นลดลง แต่วัตถุดิบที่มีโปรตีนประเภทไลซีน (lysine) จะมีความชื้นเพิ่มขึ้น โดยเมื่อวัตถุดิบมีความชื้นสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์จะมีความหนาแน่นสูงขึ้น อัตราส่วนการพองตัวลดลง และมีค่าความแข็งมากขึ้น

2.5.2.7 ความเร็วรอบของสกรู (screw speed)

ความเร็วรอบของสกรูเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งการผันแปรความเร็วรอบของสกรูสูงจะทำให้วัตถุอาหารถูกเสียดสี เกิดแรงเฉือนค่อนข้างสูงภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้ปริมาณน้ำในวัตถุอาหารระเหยได้ดี ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่จะพองมากขึ้น (Gaosong and Vasanthan, 2000) Chevanan *et al.* (2007) ได้ศึกษาผลความเร็วของสกรูและปริมาณ distillers dried grains with soluble (DDGS) ที่ได้มาจากกระบวนการหมักเอทานอลจากข้าวโพด ในกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่อปริมาณ DDGS ในสูตรการผลิต และความเร็วรอบของสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่น และอัตราส่วนการพองตัว เพิ่มขึ้นร้อยละ 5 จากสูตรพื้นฐาน

2.5.2.8 รูปแบบของสกรู (screw configuration)

ชิ้นส่วนของสกรูที่ใช้ และตำแหน่งชิ้นส่วนของสกรูมีผลต่อรูปแบบของสกรู โดยเฉพาะกับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ซึ่งมีผลต่อการผสมของวัตถุดิบขณะที่วัตถุดิบยังคงอยู่ในเครื่อง รวมทั้งแรงเฉือน พลังงานกลที่ให้กับวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโดภายในเครื่อง (Veronica et al., 2006) ซึ่ง Altan *et al.* (2008) พบว่าการเลือกใช้สกรูที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวบาร์เลย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสภาวะที่ใช้สกรูแบบขนาดกลาง มีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสภาวะที่ใช้สกรูแบบขนาดใหญ่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.3 ขั้นตอนกระบวนการผลิตโดยวิธีเอกซ์ทรูชัน

เริ่มจากการชั่งวัตถุดิบตามสูตรส่วนผสม ผสมให้เข้ากันดีในเครื่องผสม เสร็จแล้วนำออกมาจากเครื่องผสมบรรจุลงในถุงพลาสติก หรือภาชนะที่ใช้บรรจุ จากนั้นนำไปป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ประกอบส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันแล้ว ป้อนวัตถุดิบผสมเข้าไปตรงส่วนที่รับวัตถุดิบ (feed port) วัตถุดิบจะถูกพาเข้าสู่ช่วงของการผลิต (ภาพที่ 2.3) ซึ่งแบ่งได้ 3 ช่วง ดังนี้ (ประชา, 2550)

2.5.3.1 ช่วงการป้อนและการผสม (feeding and mixing zone)

ช่วงการป้อนและการผสมนี้ เป็นช่วงที่ส่วนผสมจะถูกพาให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง เคลื่อนที่ไปตามร่องเกลียวสกรู และช่องว่างระหว่างสันเกลียวสกรูกับผนังบาร์เรลด้านในส่วนผสมที่ผ่านช่วงนี้จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากในช่วงนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่า ช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ซึ่ง Chang and Ng (2009) พบว่าช่วงการป้อนและการผสมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.5.3.2 ช่วงการนวด (kneading zone)

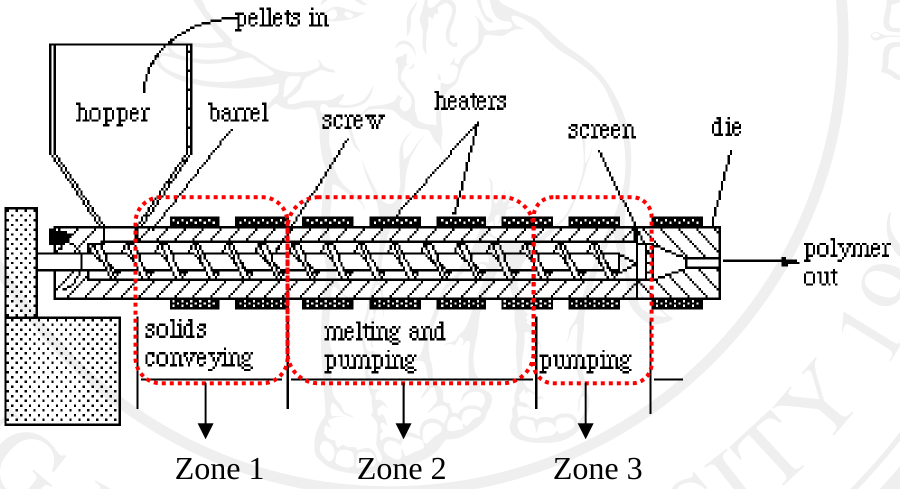
ส่วนผสมจากช่วงการป้อนและการผสมยังคงถูกบด อัด นวด ผลักดัน เฉือน เสียดสีเหมือนเดิมแต่มากกว่า ความร้อนจากการหมุนของมอเตอร์จะแพร่เข้าไปในส่วนผสมของวัตถุดิบที่ยังเป็นแป้งที่มีความชื้น ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิในส่วนผสมนี้สูงขึ้น แล้วทำให้ส่วนผสมเปลี่ยนเป็นแป้งเหนียวหยุ่น มีลักษณะเหนียว หนืด ยืดหยุ่นได้เหมือนโด (dough) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปยังช่วงที่ 3 ต่อไป (Chang and Ng, 2009)

2.5.3.3 ช่วงการหุงต้ม หรือช่วงที่ทำให้ร้อนจนสุก (final cooking zone)

วัสดุที่เหนียว หนืด ยืดหยุ่นจากช่วงการนวด จะเปลี่ยนแปลงสถานะไปเป็นของเหลวที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐานเป็นของเหลวไหลได้ที่เรียกว่าเจล (gel) หรือแป้งสุก เมื่อถูกอัดผ่านพ้นรูเปิดหน้าแปลนออกมา และด้วยความแตกต่างของความดันบรรยากาศที่ภายนอกกับความดันสูง ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะทำให้น้ำที่อยู่ในส่วนผสมอาหาร ที่หลอมเหลวเป็นเจลระเหยกลายเป็นไอน้ำลอยตัวออกไป พร้อมกับดึงเอาส่วนโครงสร้างที่เป็นแป้งเหลวสุกนี้ยืดขยายตัวออก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และคงสภาพความพองไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศภายนอก ขณะเดียวกันก็ถูกตัดเป็นชิ้น หรือท่อนตามขนาดที่ต้องการด้วยใบมีด ประชา และจุฬาลักษณ์ (2550) ได้พัฒนาอาหารเช้าธัญพืชที่มีเกล็ดข้าวโพดเป็นองค์ประกอบหลักด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ พบว่า มีสภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือ ใช้ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที ผลิตภัณฑ์เคลือบด้วยน้ำเชื่อมรสช็อกโกแลตหลังการอบแห้งแล้วมีความหนาแน่นเท่ากับ 119.7 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนการพองตัวเท่ากับ 3.42 มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.16 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของอาหารที่กำหนดไว้ นอกจากนี้การผันแปรอุณหภูมิในช่วงนี้ ยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นลดลง ซึ่ง Chang and Ng (2009) ทำการผันแปรอุณหภูมิช่วงที่ 3 พบว่าการผันแปรอุณหภูมิช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 105 120 135 และ 150 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลงในช่วงร้อยละ 6.2-5.8 และยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (zone 1 = feeding and mixing zone, zone 2 = kneading zone and zone 3 = final cooking zone)

ที่มา: Hilton *et al.* (1981)

2.5.4 ผลกระทบของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต่อคุณภาพของอาหาร

2.5.4.1 ลักษณะทางประสาทสัมผัส

กระบวนการเอกซ์ทรูชันทำในสภาวะ high temperature short time (HTST) มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อสี กลิ่น และรสชาติธรรมชาติของอาหาร สีของผลิตภัณฑ์อาหารจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ หรือได้รับความร้อนสูงเกินไป หรือทำปฏิกิริยากับโปรตีน น้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugar) หรืออิออนของโลหะ นอกจากนี้อาจมีปัญหาในเรื่องของการเติม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารปรุงแต่งกลิ่นก่อนการทำ cold extrusion ซึ่งกลิ่นรสดังกล่าวจะระเหยหายไปเมื่อนำผลิตภัณฑ์ออกมาจากแม่พิมพ์ จึงมีการนำสารปรุงแต่งรสชาติมาทำให้อยู่ในรูปของอนุภาคที่กักเก็บกลิ่นรส (microencapsulate) ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาแพง ดังนั้นสารปรุงแต่งกลิ่นที่นิยมใช้กับผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์มักอยู่ในรูปของอิมัลชัน หรือของเหลวข้นหนืด (viscous slurry) เมื่อเติมลงไปแล้วอาจทำให้เกิดความเหนียวเหนอะที่ผิวด้านนอกในผลิตภัณฑ์บางชนิดจึงต้องอบให้แห้งอีกครั้ง (วิไล, 2545)

2.5.4.2 คุณค่าทางโภชนาการ

การสูญเสียกรดอะมิโน ไลซีน ซีสตีน และเมไธโอนีนในผลิตภัณฑ์จากข้าว ผันแปรอยู่ในช่วงร้อยละ 50-90 ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผลิต (วิไล, 2545) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในแป้งถั่วเหลือง (soy flour) จะขึ้นอยู่กับสูตร และกระบวนการแปรรูป การใช้อุณหภูมิสูงและมีส่วนผสมของน้ำตาลจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard browning reaction) และทำให้คุณภาพของโปรตีนลดลง การใช้อุณหภูมิต่ำ และลดความเข้มข้นของน้ำตาลให้น้อยลงจะช่วยให้ความสามารถในการย่อย (digestibility) ของโปรตีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากโปรตีนมีการเรียงตัวของโครงสร้างใหม่ (Faller *et al*., 2000) ส่วนกระบวนการเอกซ์ทรูชันในผลิตภัณฑ์จากถั่ว ความร้อนจะช่วยทำลายสารต้านโภชนาการ และสารพิษถั่วตามธรรมชาติ เช่น ทำลายสารต้านการทำงานของเอนไซม์ทริพซินทำให้คุณค่าทางโภชนาการของโปรตีนในถั่วเพิ่มขึ้น (Alonso *et al*., 2000)

ในแง่ของแร่ธาตุ กระบวนการผลิตอาหารเช้าธัญพืช มีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยการผลิตอาหารเช้าธัญพืชพร้อมบริโภคจากธัญพืชประเภทพองกรอบ และประเภทแผ่นบางจะสูญเสียกรดไฟติกไปประมาณร้อยละ 70 และ 30 ตามลำดับ และสูญเสียแร่ธาตุและวิตามินบางตัวด้วย วิตามินบีหนึ่งที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิตอาหารเช้าจากข้าวสาลีแบบชิ้นร้อยละ 50 ส่วนวิตามินบีหนึ่งในอาหารเช้าประเภทพองกรอบ และแบบแผ่นบางจะสูญเสียไปทั้งหมด โดยวิตามินบีหนึ่งจะสูญเสียโดยความร้อน และมีความคงตัวไม่ดีที่สภาวะเป็นกลาง และค่าความเป็นกรดสูง ส่วนไรโบฟลาวิน และไนซีนจะสูญเสียบางเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดค่างของผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป ดังนั้นการผลิตอาหารเช้าธัญพืชจึงมักมีการเติมแร่ธาตุ และวิตามินลงไประหว่างการผลิต เพื่อชดเชยการสูญเสีย และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ (สุลาลักษณ์, 2549) สภาวะต่างๆ เช่น ความร้อน และความดันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสูญเสียของแร่ธาตุ ส่วนวิตามินเป็นตัวที่สามารถเปลี่ยนแปลงตามสภาวะต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการถูกทำลายของวิตามิน วิตามินที่ละลายน้ำได้ เช่น วิตามินซี จะถูกทำลายโดย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ความร้อนได้ง่ายที่สุด และยังถูกทำลายได้ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย ส่วนวิตามินที่ละลายในไขมัน เช่น วิตามินเอ และอี จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับสารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) หรือสารอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน อัตราความเร็วของการถูกทำลายของวิตามินจะลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเป็นการช่วยให้วิตามินถูกทำลายน้อยลง (จรูญ, 2541)

2.5.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชันเกี่ยวข้องกับการทำให้ส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนสุก ทำให้รูปร่างเนื้อสัมผัส และเกิดการพองอย่างเต็มที่ (puffing) หรือเกิดการขยายตัว กระบวนการเอกซ์ทรูชันแตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ คือ ขั้นตอนต่างๆ ของการแปรรูปเหล่านี้เกิดขึ้นที่ความชื้นค่อนข้างต่ำภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และแรงเฉือนสูงมากเป็นเวลาสั้นๆ ซึ่งภายใต้สภาวะเช่นนี้ แป้ง และโปรตีนที่ยังมีลักษณะตามธรรมชาติ (raw) จะมีการเปลี่ยนรูปเพื่อให้ได้อาหารที่มีโครงสร้างใหม่ (รุ่งนภา, 2541) ซึ่งวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตอาหารเช้าธัญพืชแบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.5.5.1 แป้ง (flour)

แป้งเป็นส่วนผสมหลักในการทำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และอาหารเช้าธัญพืชพร้อมรับประทาน (ready-to-eat, RTE) ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน กริทของอาหารเช้าธัญพืชที่สกัดเอาเจิมออก (de-germed grit) แล้วจะใช้เป็นวัตถุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มากกว่าการใช้แป้งบริสุทธิ์เพื่อให้โปรตีน ไขมัน และเส้นใยบางส่วนยังมีอยู่ในส่วนผสมของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง โดยในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งขึ้นกับผลของความร้อน และแรงเฉือนทางกลร่วมกัน เม็ดแป้งจะถูกเฉือนขณะที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ การกระทำทางกลนี้จะเปิดกรานูลภายในของแป้งออก (Arhaliass *et al*., 2007) การไหลของส่วนผสมต่างๆ ที่เหนี่ยวในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต้องอาศัยพลังงานทางกลจำนวนมากเพื่อใช้หมุนสกรูซึ่งจะปล่อยออกมาเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลแป้งที่ใหญ่กว่าบางโมเลกุลจะแตกออกเป็นโมเลกุลที่เล็กลง (de-texturization) เนื่องจากการเฉือน และแสดงความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า ผลของการเจลาติไนซ์เซชัน (gelatinization) คือ ได้โดที่เหนียวหรือโดที่หลอมซึ่งสามารถเอกซ์ทรูดผ่านรูเปิดหน้าแปลน เพื่อขึ้นรูปและพองตัว เมื่อความชื้นภายในที่มีอุณหภูมิสูงเปลี่ยนไปเป็นไอน้ำหลังออกจากรูเปิดหน้าแปลนแล้ว นอกจากนี้ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรู-ชัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขึ้นกับปริมาณของการเปลี่ยนรูปของแป้งระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างที่แข็งกว่า เงากว่า และมีขนาดของรูใหญ่กว่า เป็นลักษณะเฉพาะของการทำให้สุกด้วยการเฉือนที่ต่ำภายใต้สภาวะความชื้นที่สูงกว่า ความเสียหายของแป้งจะลดลงเมื่อให้พลังงานกลแก่ผลิตภัณฑ์น้อยลง และให้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น โดยการพ่นไอน้ำ หรือการถ่ายเทความร้อนผนังบาร์เรล ผลิตภัณฑ์ที่นุ่ม และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (hydratable) มีแนวโน้มที่จะเหนียวติดฟัน เมื่อรับประทานจะมีขนาดของรูภายในเอกซ์ทรูเดตที่เล็กกว่า และผนังเซลล์บางกว่า ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการผลิตในสภาวะที่มีการเฉือนสูง (Hagenimana *et al*., 2006)

2.5.5.2 โปรตีน (protein)

โปรตีนถั่วเหลืองที่สกัดไขมันออกแล้ว สามารถเปลี่ยนให้มีโครงสร้างใหม่ในเครื่องเอกซ์-ทรูเดอร์ เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่คล้ายเนื้อเป็นชั้นๆ เช่น โปรตีนถั่วเหลืองที่เรียกว่า textured soy protein (TSP) ผลิตจากแป้งถั่วเหลืองที่สกัดไขมันออก และมีโปรตีนประมาณร้อยละ 50 การทำให้เกิดเนื้อสัมผัส (texturization) เกี่ยวข้องกับการปรับโครงสร้างใหม่ของโมเลกุลโปรตีน ไปเป็นมวลที่มีไขว้ (cross linked) เป็นชั้นๆ ที่ต้านทานต่อการแตก เมื่อมีการให้ความร้อน (การแปรรูป) ต่อไป โปรตีนถั่วเหลืองจะมีความชื้นร้อยละ 33-45 และได้รับความร้อน และการเฉือนในการหมุนช่วงต้นของสกรูของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้โปรตีนที่เป็นธรรมชาติ (native globular) เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลที่ไม่มีการพับซ้อน (unfold) ด้วยการทำลายพันธะเคมีที่ยึดโครงสร้างตติยภูมิที่เป็นธรรมชาติ โมเลกุลโปรตีนที่ไม่ได้พับซ้อนนี้จะจัดเรียงเป็นเส้นตรงเองในทิศทางการไหลของร่องเกลียวของสกรู และช่องว่างหลังรูเปิดหน้าแปลน การไหลเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้โมเลกุลนี้มีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง (alignment) และเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น 140-160 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาทางเคมีก็เกิดขึ้นอีกเพื่อให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเส้นใย และเป็นชั้นซึ่งเลียนแบบโครงสร้างของเนื้อสัตว์ (Chevanan *et al*., 2007)

2.6 ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

ค่าดัชนีน้ำตาล คือ ดัชนีที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ซึ่งหลังรับประทาน และเข้าสู่ระบบการย่อยและดูดซึมของร่างกายสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากหรือน้อยโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานคือ น้ำตาลกลูโคส หรือขนมปังขาวซึ่งมีค่า GI เท่ากับ 100 โดยอัตราการดูดซึมคาร์โบไฮเดรตยิ่งช้า การเพิ่มขึ้นของระดับกลูโคสในเลือดและค่าดัชนีน้ำตาลยิ่งต่ำลง โดยลักษณะการเปรียบเทียบการตอบสนองของระดับน้ำตาลในเลือดต่ออาหารที่ใช้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อ้างอิงที่มีค่าคาร์โบไฮเดรตเท่าๆ กันดังภาพที่ 2.3 ทั้งนี้สามารถแบ่งกลุ่มอาหาร ซึ่งเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตตามค่า GI ออกเป็น 3 กลุ่มคือ (Radulian *et al.*, 2009)

1) อาหารที่มีค่า GI ต่ำ เป็นอาหารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 55 หรือ น้อยกว่าเมื่อเปรียบกับสารมาตรฐาน อาหารที่มีค่า GI ต่ำ เช่น ถั่วชนิดต่างๆ ผักและอาหารที่มีเส้นใยสูง ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ โยเกิร์ตไขมันต่ำ และไม่หวาน เกรฟฟรุต แอปเปิล และมะเขือเทศ เป็นต้น นอกจากนี้ยังส่งผลดีต่อผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนักเนื่องจากช่วยให้อิ่มท้อง ไม่หิวเร็ว และช่วยลดการเพิ่มของระดับอินซูลินในร่างกาย จึงช่วยชะลอการสร้างไขมันประเภทไตรกลีเซอไรด์ในเลือด ซึ่งถือว่าเป็นการป้องกันหรือลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ โรคเบาหวานและภาวะแทรกซ้อนต่างๆ (Aston, 2006)

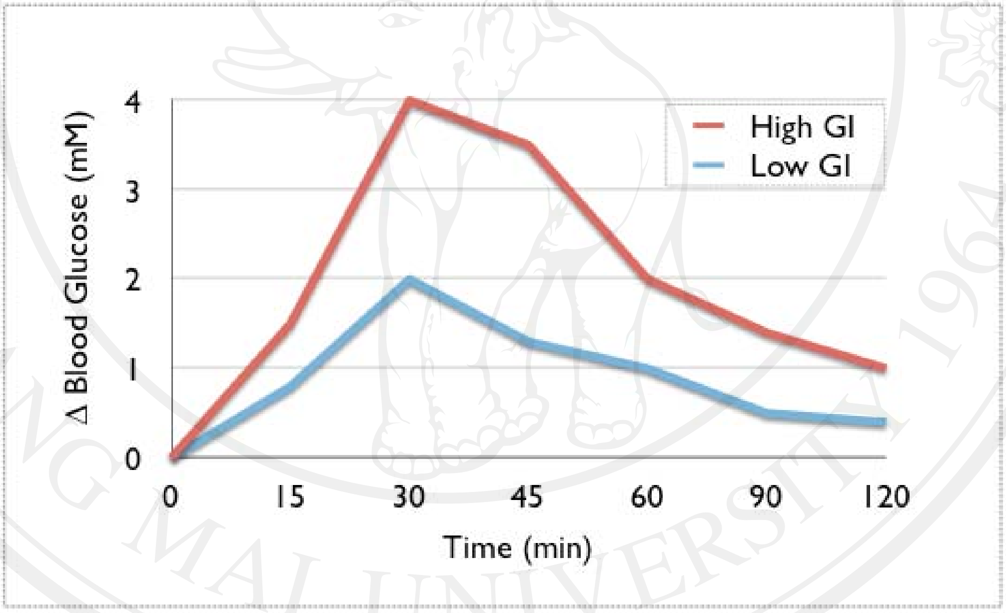
2) อาหารที่มีค่า GI ปานกลาง เป็นอาหารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 56-69 เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน อาหารที่มีค่า GI ปานกลางจะเป็นอาหารประเภทเส้น (pasta) ถั่วคั่ว ถั่วฝักเขียว มันเทศ น้ำส้มคั้น บลูเบอรี ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว ซุปถั่ว Whole wheat และข้าวกล้อง เป็นต้น (Aston, 2006)

3) อาหารที่มีค่า GI สูง เป็นอาหารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 70 หรือ มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ประเภทของอาหารที่มีค่า GI สูงได้แก่ ขนมปังขาว ข้าวเมล็ดสั้น มันฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด (French fries) ไอศกรีม ลูกเกด ผลไม้อบแห้ง กล้วย แครอท ผลไม้ที่มีรสหวาน เช่น แตงโม เป็นต้น (Radulian *et al.*, 2009)

ทั้งนี้ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารต่างๆ (ตารางที่ 2.1) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นั่นคือ ขนาดอนุภาค การปรุง กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนประกอบผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ ที่มีอยู่ (เช่น ไขมัน โปรตีน เส้นใยอาหาร) สัดส่วนและชนิดของน้ำตาลและแป้ง รวมถึงโครงสร้างของสตาร์ช (starch) ซึ่งมีผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารอย่างเดียวกันมีความแตกต่างกันไปตามประเทศที่ผลิต (Araya *et al.*, 2002) ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมอาหารมีแนวคิด ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำด้วยการใช้ส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย รวมทั้งการปรับเปลี่ยนกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร มีการพบว่า เครื่องปรุงอาหารที่ชาวญี่ปุ่นใช้กันโดยทั่วไป เช่น น้ำส้มสายชู และถั่ว มีส่วนทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ลดลง (Keogh *et al.*, 2007)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลิตภัณฑ์อาหารเช้าธัญพืชที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจากการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งอื่นๆ เช่น แป้งข้าวบาเลย์ (King *et al*., 2007) ในปัจจุบัน กระบวนการเทคโนโลยีด้านอาหารได้ใช้ส่วนผสมอาหารที่คิดค้นขึ้นใหม่หรือจากธรรมชาติ (ใยอาหารจากข้าวสาลี จมูกข้าวสาลี เมล็ดมัสตาร์ด เมล็ดงา เมล็ดลินิน เบตากลูแคน) มาช่วยปรับเปลี่ยนการขึ้นลงของระดับน้ำตาลซึ่งได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ เราสามารถลดระดับกลูโคสในช่วงระยะเวลากว่า 24 ชั่วโมงได้โดยง่ายด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงอาหารที่เรียกว่า การทดแทนอาหารค่าดัชนีน้ำตาลสูงด้วยอาหารค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ สำหรับผู้ป่วยเบาหวานอาหารชนิดนี้มีผลทำให้เกิดความรู้สึกอิ่มง่ายและนาน เกิดผลดีต่อการควบคุมระดับอินซูลินให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (Brand-Miller *et al*., 2002)



ภาพที่ 2.4 การเปรียบเทียบการตอบสนองของระดับน้ำตาลในเลือดต่ออาหารที่ใช้อ้างอิง ที่มีค่าคาร์โบไฮเดรตเท่าๆ กัน

ที่มา: Ludwig *et al*. (1999)

2.6.1 การวิเคราะห์ค่า GI ของอาหาร

2.6.1.1 วิธี *in vivo*

การวิเคราะห์ค่า GI โดยวิธี *in vivo* เป็นการวัดระดับน้ำตาลในกระแสเลือด ซึ่งอาจใช้สัตว์ทดลอง หรือผู้ทดสอบที่มีสุขภาพร่างกายแข็งแรง และสามารถรับประทานอาหารได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หลากหลาย ไม่มีโรคภูมิแพ้อาหาร ซึ่งการทดสอบจะให้ผู้ทดสอบรับประทานอาหารที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นทำการตรวจวัดระดับน้ำตาลในกระแสเลือด และเปรียบเทียบกับอาหารที่มีค่า GI เท่ากับ 100 ได้แก่ ขนมปังขาวหรือน้ำตาลกลูโคส เป็นต้น (Radulian *et al.*, 2009) Fujita and Yamagami (2001) ศึกษาผลของการรับประทานอาหารหมักจากถั่วเหลืองต่อปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือด พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือดของผู้ที่รับประทานอาหารหมักจากถั่วเหลือง มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสต่ำกว่าผู้ที่รับประทานอาหารที่มีส่วนผสมของแป้งข้าว

2.6.1.2 วิธี *in vitro*

เป็นการวัดอัตราการย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ในหลอดทดลอง ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ค่า GI ในผลิตภัณฑ์อาหาร Goni *et al.* (1997) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่า GI ที่วัดด้วยวิธี *in vitro* กับวิธี *in vivo* การวิเคราะห์ทำโดยวิธีการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ α – amylase และ amyloglucosidase อัตราการย่อยแป้งแสดงในรูปของร้อยละ total starch ที่ถูกย่อยในเวลาต่างกัน จากนั้นนำมาเขียนกราฟ hydrolysis เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ จาก 0-180 นาที จากนั้นคำนวณหา hydrolysis index (HI) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ (area under curve, AUC) ของอาหารและ AUC ของอาหารอ้างอิง (white bread) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HI และ GI ได้เป็นสมการ $GI = 39.21 + 0.803(H_{90})$ ค่า H_{90} คือ ร้อยละของแป้งที่ถูกย่อยเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที Mahasukhonthachat et al. (2010) ศึกษาค่า GI ที่วัดด้วยวิธี *in vitro* ในผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูชันจากข้าวฟ่าง โดยวิธีการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ α – amylase เอนไซม์ pepsin เอนไซม์ pancreatin และเอนไซม์ amyloglucosidase วัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วย glucometer ทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่นาทีที่ 0-180 จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการ kinetics เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ จาก 0-180 นาที จากนั้นคำนวณหา digestion glucose (DG) พบว่า สมการของอัตราการย่อยสตาร์ชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงอิทธิพลของการเพิ่มอินนูลินต่อลักษณะเฉพาะทางด้านโภชนาการของแป้งพาสต้า (pasta flour) พบว่า การย่อยน้ำตาลระหว่างกระบวนการการย่อยแป้งในสภาวะ *in vitro* เป็นไปอย่างช้าๆ และการทำนายค่า GI ลดลงถึงร้อยละ 15 (Brennan *et al.*, 2008)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 ค่า GI ในอาหารชนิดต่างๆ

อาหาร	ค่า GI
ขนมปังขาว	100
คอนแฟลกซ์	83
ข้าวขาว	64
ข้าวโอ๊ต	58
ข้าวกล้อง	55
ข้าวไรย์	46

ที่มา: Aston (2006)

2.7 สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล (sugar substitutes)

สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลเป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีบทบาทในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ (Kroger *et al*., 2006)

กลุ่มแรก คือ สารที่ให้ความหวานพลังงานต่ำ (low-calorie sweeteners) เป็นสารให้แคลอรีเป็นศูนย์ บางครั้งเรียกว่าน้ำตาลเทียม มีความหวานมากกว่าน้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทราย) ตั้งแต่ 30 ถึง 8,000 เท่า เช่น แอสพาเทม (aspartame) แซคคาริน (saccharin) ซูคราโลส (sucralose) เป็นต้น สารกลุ่มนี้เหมาะนำมาใช้ในกรณีต้องการควบคุมน้ำหนัก

กลุ่มที่สอง คือ สารให้ความหวานที่ลดพลังงาน (reduced-calorie sweeteners) ได้แก่ น้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohols) หรือ พอลิออล์ (polyols) สารกลุ่มนี้ต่างกับกลุ่มแรก คือให้ความหวานเหมือนน้ำตาลซูโครส แต่ให้พลังงานต่ำกว่า (ประมาณ 1.6 ถึง 2.6 กิโลแคลอรีต่อกรัม) และไม่ทำให้น้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากน้ำตาลแอลกอฮอล์จะถูกย่อยเปลี่ยนเป็นกลูโคสช้ามาก และไม่ต้องใช้อินซูลิน แต่การบริโภคสารกลุ่มนี้มากเกินกว่าระดับที่กำหนดอาจก่อให้เกิดการระบาย หรือท้องเสียได้ (laxative effect) สารในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำตาลไอโซ-มอลทูโลส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.1 น้ำตาลไอโซมอลทูโลส

น้ำตาลไอโซมอลทูโลส (isomaltulose) ผลิตได้จากน้ำตาลซูโครส โดยผ่านกระบวนการทางชีวเคมี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาล ซึ่งทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคล และฟรุกโตสแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้มีการย่อยสลายและดูดซึมได้ช้าลงภายในระบบทางเดินอาหาร (alimentary system) ของร่างกายได้ช้า ดังนั้นน้ำตาลไอโซมอลทูโลส จึงมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (low GI) (Cheetham *et al*., 1982) ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้คงที่ สม่ำเสมอกว่าคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ พลังงานที่สม่ำเสมอนี้ ช่วยให้สมองและกล้ามเนื้อทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคเบาหวานและภาวะแทรกซ้อนต่างๆ (Arai *et al*., 2007) และมีคุณสมบัติพิเศษไม่ทำให้ฟันผุ (tooth friendly) เนื่องจากจุลินทรีย์ในช่องปากที่เป็นสาเหตุของ ฟันผุ ไม่สามารถย่อยสลายน้ำตาลไอโซมอลทูโลสได้ จึงไม่เกิดการสร้างกรดมาทำลายสารเคลือบฟัน (Ooshima *et al*., 1983)

ไอโซมอลทูโลส ให้ความหวานร้อยละ 50 ของน้ำตาลซูโครส มีรสชาติหวานหอมเหมือนน้ำตาลซูโครส ไม่มีรสขม (after-test) น้ำตาลไอโซมอลทูโลสสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง (Cheetham *et al*., 1982) ธีรารัตน์ และคณะ (2553) ศึกษาผลของการใช้ไอโซมอลทูโลส หรือน้ำตาลพาลาทีน (palatyne™) ต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์คุกกี้ โดยใช้ palatyne™ ทดแทนน้ำตาลในสูตร พบว่า เมื่อระดับการแทนที่ของไอโซมอลทูโลสเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าความชื้น และสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า คุกกี้ที่ทดแทนด้วย palatyne™ ร้อยละ 30 ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุด จากผลการทดลองโดยรวมพบว่าน้ำตาลไอโซมอลทูโลสสามารถใช้ทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ขนมอบได้

ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้น้ำตาลไอโซมอลทูโลสร่วมกับน้ำตาลประเภทอื่นๆ เช่น น้ำตาลที่ให้ความหวานสูง ฯลฯ และเนื่องจากน้ำตาลไอโซมอลทูโลสมีความคงตัวสูง (Lina *et al*., 2002) จึงเหมาะกับการแปรรูปอาหาร หลากหลายรูปแบบ โดยน้ำตาลไอโซมอลทูโลสมีความคงตัวต่อความเป็นกรด-ด่างที่ pH มากกว่า 3.0 และทนอุณหภูมิในการแปรรูปสูงถึง 140 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำตาลชนิดนี้ได้จัดอยู่ในหมวดอาหารทั่วไป โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของประเทศไทย ปัจจุบันน้ำตาลไอโซมอลทูโลส ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม โดยเฉพาะเครื่องดื่มสำหรับผู้ออกกำลังกาย (energy drink) อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เพิ่ม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทางเลือกทางโภชนาการในรูปแบบดัชนีน้ำตาลต่ำให้กับผู้บริโภคสมัย ใหม่ และผู้บริโภคที่ต้องการลดความเสี่ยงต่อโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และโรคอ้วน เป็นต้น

2.8 การประเมินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหาร

ในการเลือกรับประทานอาหารของผู้บริโภคในปัจจุบัน สิ่งที่สำคัญต่อผู้บริโภค คือ ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้ผู้บริโภคมีความปลอดภัยมากขึ้น สถาบันอาหาร (The Institute of Food Technologists, IFT) ของสหรัฐอเมริกา ได้ให้นิยามของอายุการเก็บ คือ ช่วงเวลาของผลิตภัณฑ์อาหารจากผู้ผลิตถึงผู้ค้าปลีก ที่ผลิตภัณฑ์ยังมีคุณภาพเป็นที่พึงพอใจ แต่เนื่องจากการกำหนดคุณภาพที่พึงพอใจนั้น เป็นการกำหนดได้ไม่ชัดเจน ในประเทศอังกฤษจึงได้ให้ความหมายของอายุการเก็บ หมายถึง ระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์อาหารมีความปลอดภัย โดยมีคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทางเคมี ทางกายภาพ ทางจุลินทรีย์เป็นที่ยอมรับ และ เป็นไปตามฉลากและข้อมูลโภชนาการ โดยผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องเก็บในสภาวะที่กำหนด (Kilcast and Subramaniam, 2000) ดังนั้น การประเมินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารจึงมีความสำคัญ การระบุอายุการเก็บที่ไม่เหมาะสม มักนำไปสู่การไม่ยอมรับ และการร้องเรียนจากผู้บริโภค รวมถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ หรืออย่างน้อยที่สุด ความไม่พอใจของผู้บริโภคอาจมีผลต่อการยอมรับของตราสินค้าของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้

2.8.1 การเสื่อมเสียของอาหาร

การเสื่อมเสียของอาหาร หมายถึง การที่อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะและคุณภาพซึ่งรวมถึง สี กลิ่นรส รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร และคุณค่าทางโภชนาการ ผลจากกลไกเหล่านี้ อาจทำให้คุณภาพของอาหารจะเปลี่ยนไปอยู่ในระดับที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค หรืออาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ ผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดนั้นจะเกิดการเสื่อมเสียได้เร็วช้าต่างกัน แบ่งอาหารตามความยากง่ายของการเน่าเสียได้ 3 ประเภท ดังนี้ (รุ่งนภา, 2540)

2.8.1.1 อาหารประเภทเน่าเสียยาก คืออาหารที่มีความคงตัวดี มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำมาก ตัวอย่างเช่น ธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้ง น้ำตาล และแป้ง อาหารประเภทนี้เก็บไว้ได้นานหลายเดือนหรือเป็นปี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.8.1.2 อาหารประเภทเน่าเสียเร็วปานกลาง คืออาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีค่อนข้างมาก เช่น ผักและผลไม้ที่แก่เต็มที่ ถึงแม้ว่าอาหารเหล่านี้จะมีปริมาณน้ำมากก็ตามแต่มีเนื้อเยื่อเกาะยึดกันแน่น และอาหารส่วนใหญ่มีเปลือกหุ้มจึงเก็บไว้ได้เป็นเวลาค่อนข้างนาน ส่วนอาหารบางชนิดจะเน่าเสียภายใน 1-2 สัปดาห์

2.8.1.3 อาหารประเภทเน่าเสียเร็ว คืออาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมาก เช่น ผัก ผลไม้ นมสด เนื้อสัตว์ และอาหารทะเล ซึ่งจะเกิดการเน่าเสียขึ้นได้ภายใน 1-2 วันเท่านั้น

อาหารทั้ง 3 ประเภทดังกล่าวมีปริมาณน้ำแตกต่างกัน ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าปริมาณน้ำในอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเน่าเสียของอาหาร (ปรียา และสุดสาย, 2546) สาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร คือ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (physical changes) เช่น การเกิดรอยช้ำหรือรอยขีดข่วนเนื่องจากการขนถ่ายวัตถุดิบ การขนส่ง และการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical changes) เช่น การเกิดสีน้ำตาลในอาหาร การเหม็นหืน และการเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลินทรีย์ (microbiological changes) (ธีรพร, 2545)

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร

2.8.2.1 แสง

เป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิด free radical ขึ้นในผลิตภัณฑ์ กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแก่ไขมัน การเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ และการสลายตัวของวิตามินบางชนิด ดังนั้นหากเป็นอาหารชนิดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้น ผู้ผลิตสามารถเลือกใช้ภาชนะบรรจุชนิดโปร่งใส เพื่อแสดงลักษณะปรากฏที่ดีของผลิตภัณฑ์ และเป็นการดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคได้ แต่ถ้าเป็นอาหารชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะต้องเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่สามารถป้องกันแสงได้ (รัชดา, 2542)

2.8.2.2 ออกซิเจน

เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ (respiration) ของผลิตผลการเกษตร ปฏิกิริยาสีน้ำตาล ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โปรตีนและวิตามิน ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์ การป้องกันออกซิเจนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกวัสดุที่ป้องกันการซึมผ่านของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ออกซิเจนได้มาทำภาชนะบรรจุ การเพิ่มความหนาของภาชนะบรรจุให้มากขึ้น และการบรรจุแบบสุญญากาศ หรือเติมแก๊สเฉื่อย เป็นต้น (สุมาลี, 2541)

2.8.2.3 ความชื้น

ความชื้นของอาหารและสิ่งแวดล้อมหากมีความแตกต่างกัน จะมีการถ่ายเทความชื้นระหว่างกัน จนกระทั่งเกิดสภาพสมดุลในที่สุด หากไม่มีการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสม อาหารแห้งจะมีความชื้นสูงขึ้น ในขณะที่อาหารที่มีความชื้นสูงกว่าบรรยากาศจะสูญเสียความชื้นออกไป ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดนั้นๆ ได้ (ธีรพร, 2545)

2.8.2.4 อุณหภูมิ

เป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาต่างๆ ปฏิกิริยาเคมี และชีวเคมีทุกชนิดสามารถถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นหรือช้าลงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการของ Arrhenius ดังสมการที่ 2.1 (Hidalgo and Brandolini, 2008)

$$k = k_0 e^{-Ea/RT} \qquad 2.1$$

โดยที่ k_0 = ค่าคงที่ โดยทั่วไปมักเรียกว่า pre-exponential หรือ frequency factor)

k = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา

Ea = ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) หรือพลังงานก่อกัมมันต์ (J/mol)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (องศาเคลวิน, K)

2.8.3 การศึกษาอายุการเก็บในสภาวะเร่ง (accelerated shelf life testing)

ในการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำผลิตภัณฑ์เก็บในสภาวะปกติที่วางจำหน่าย แล้วเก็บข้อมูลตามอายุการเก็บจริง ซึ่งอาจใช้เวลาหลายปีจึงจะได้ผลที่ต้องการ การพัฒนาอาหารที่มีอายุการเก็บนานจึงต้องการผลการทดสอบหาอายุการเก็บในเวลาที่สั้นเพื่อให้ตรงกับกำหนดเวลาที่ผลิตภัณฑ์จะออกจำหน่าย ดังนั้น เทคนิคที่ใช้สภาวะเร่งต่างๆ เช่น เร่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

อุณหภูมิ เร่งความชื้น จึงถูกนำมาใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมเสียเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับสภาวะการเก็บปกติ ทำให้สามารถประเมินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น (รุ่งนภา, 2550)

หลักการพื้นฐานของการทดสอบอายุการเก็บในสภาวะเร่ง เป็นหลักการทางจลนพลศาสตร์ทางเคมีซึ่งใช้ในการประมาณผลของปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น บรรยากาศของแก๊สและแสง ที่มีต่ออัตราของปฏิกิริยาการเสื่อมเสีย โดยการให้อาหารอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุม และให้ปัจจัยภายนอกหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งปัจจัยอยู่ในระดับที่สูงกว่าระดับปกติ ทำให้อัตราการเสื่อมเสียถูกเร่งให้เร็วขึ้น มีผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับในช่วงเวลาสั้นขึ้น และสามารถคำนวณอายุการเก็บที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะปกติ ทำการประเมินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการเร่ง (accelerated shelf life testing) ด้วยความชื้น (Barbosa-Canovas *et al*., 2007) ทำนายอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์โดยใช้ sorption isotherm สามารถคำนวณดังสมการที่ 2.2 (Bell and Labuza, 2000)

$$\theta_s = \mathrm{In}\ [(m_e\text{-}m_i) - (m_e\text{-}m_c)]/(P/\mathrm{x})(\mathrm{A}/\mathrm{W}_s)(P_o/\mathrm{b}) \qquad 2.2$$

โดยที่	m_e	=	ความชื้นสมดุล (กรัมออกซิเจนต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง)
	m_i	=	ความชื้นเริ่มต้นของอาหาร (ร้อยละ)
	m_c	=	ความชื้นวิกฤต (ร้อยละ)
	P/x	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (กรัมต่อตางรางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท)
	A	=	พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (ตารางเมตร)
	W_s	=	น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)
	p_0	=	ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ณ.อุณหภูมิการเก็บรักษา (มิลลิเมตรปรอท)
	b	=	ความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของ moisture sorption isotherm
	θ_s	=	อายุการเก็บรักษา (วัน)

วิธีการหาอายุการเก็บในสภาวะเร่งได้ใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านยามานานแล้ว เนื่องจากอายุการเก็บ และประสิทธิภาพของยามีความสัมพันธ์กันมาก ปัจจุบันได้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เช่น เยาวดี และคณะ (2544) ทำการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารเช้าที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง พบว่า ผู้บริโภคไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์หลังการเก็บรักษา 2 เดือน เนื่องจากผลิตภัณฑ์เริ่มมีกลิ่นหืน บรรจุภัณฑ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งรัชดา (2542) พบว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

บรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/Metallized/PET สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารเช้าพร้อมบริโภคอัดแท่งจากธัญพืชได้นาน 64 วัน อาจเนื่องมาจากบรรจุภัณฑ์สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย

Siripatrawan and Jantawat (2008) ศึกษาคุณภาพของบรรจุภัณฑ์ที่มีผลต่อความชื้นในขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมมะลิ มีการกำหนด moisture sorption isotherm ที่สภาวะ ควบคุมความชื้นสัมพันธ์ที่ประมาณร้อยละ 10 ถึงประมาณร้อยละ 95 เก็บที่ 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้ว 10 คน ประเมินผลิตภัณฑ์ในด้านระดับความชื้น วัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และ critical moisture control (CMC) ในแต่ละตัวอย่าง โดยศึกษาบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด คือชนิดพอลิพรอพิลิน (polypropylene, PP) และชนิดพอลิเอทิลิน (polyethylene, PE) บรรจุตัวอย่างในถุงทั้ง 2 ชนิดนี้แล้วเก็บรักษาที่ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 75 สังเกตลักษณะความคงตัวของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปก็ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นที่ทุกการเก็บถุงชนิด PP มีอายุการเก็บรักษาสูงกว่าถุงชนิด PE วัดค่า water vapor transmission rate (WVTR) ของบรรจุภัณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่ง Siripatrawan (2009) พบว่าอายุการเก็บรักษาของแครกเกอร์จากข้าวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในถุงชนิด PP ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และร้อยละ 80 มีอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 40 เป็น 31 วัน และในถุงชนิด PE ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และร้อยละ 80 มีอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 36 เป็น 27 วัน

นอกจากการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่ดีแล้ว การบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สภาพบรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และออกซิเจน เป็นต้น ที่แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ สามารถชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหาร ที่สำคัญคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเมื่อเกิดกับไขมันจะทำให้เกิดการเหม็นหืน วิวัฒน์ (2554) ทำการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่ง ในถุงอลูมิเนียมฟอล์ยภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน 24 สัปดาห์ พบว่าในสัปดาห์ที่ 16 ผู้ทดสอบร้อยละ 50 ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ในด้านความกรอบและกลิ่นหืนและผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษา 14 สัปดาห์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved