บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำไย

ลำไยจัดเป็นไม้ผลไม้ผลัดใบในวงศ์ *Sapin-daceae* เป็นพืชไม้ผลเขตร้อน และกึ่งร้อน จำแนกได้เป็น 2 สายพันธุ์ (species) ขึ้นอยู่กับลักษณะของลำต้น ผล และเมล็ด และการใช้ประโยชน์ คือ สายพันธุ์ *Euphoria longana* Lamk. หรือ *Euphoria longana* Lour. หรือ *Dimocarpus longan* Lour. ซึ่งเป็นลำไยที่ปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย ในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง แพร่ น่าน พะเยา และในภาคอีสานที่จังหวัดนครราชสีมา เลย หนองคาย อีกสายพันธุ์หนึ่ง คือ ลำไยเถา *Euphoria* scandens Winit. Kerr. หรือ *Dimocarpus longan var. obtusus* ใช้เป็นไม้ประดับ โดยจะตัดเป็นพุ่มเตี้ยหรือปลูกเป็นไม้กันลม (พาวิน, 2543) ซึ่งลำไยถือเป็นไม้ผลเศรษฐกิจสำคัญเพื่อการส่งออก มูลค่าการส่งออกสูงปีละหลายพันล้านบาท ทั้งในรูปลำไยสด อบแห้ง แช่แข็ง และลำไยกระป๋อง ระหว่างปี พ.ศ. 2545-2552 ประเทศไทยผลิตลำไยได้เฉลี่ยปีละ 522,305 ตัน แหล่งผลิตลำไยที่สำคัญของไทยอยู่ใน 8 จังหวัดภาคเหนือ ได้แก่ เชียงราย เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง พะเยา แพร่ น่าน และตาก (กรมการค้าต่างประเทศ, 2553) พันธุ์ที่เกษตรกรนิยมปลูกมากที่สุดคือ พันธุ์ดอ รองลงมาคือ พันธุ์สีชมพูและเบี้ยวเขียว (กรมวิชาการเกษตร, 2551) ในเนื้อลำไยมีรสหวานโดยน้ำตาลที่พบมากในลำไยสด ได้แก่ กลูโคสและซูโครส นอกจากนี้ลำไยสดยังเชื่อว่ามีสรรพคุณแก้อาการนอนไม่หลับ ความจำสั้น ใจสั่น บำรุงร่างกาย บำรุงประสาท ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ช่วยบำรุงกำลังของสตรี ภายหลังจากการคลอดบุตร ส่วนลำไยแห้งนั้นมีสรรพคุณในการบำรุงหัวใจ ระบบประสาท ช่วยย่อยอาหาร ช่วยบำรุงกำลัง และบำรุงโลหิต (องค์การตลาดเพื่อเกษตรกร, 2553) เนื้อลำไยมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้การศึกษาของ Rangkadilok *et al.* (2005) พบว่าในเนื้อลำไยมีสารประกอบฟีนอล ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลมี 3 ชนิด คือ กรดแกลลิค (gallic acid) กรดเอลลาจิค (ellagic acid) และโคริลาจิน (corilagin) ซึ่งปริมาณที่พบจะแตกต่างกันในส่วนของเนื้อ เปลือก และเมล็ด ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของลำไย นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบฟีนอลที่พบในลำไยที่ผ่านการอบแห้งมีมากกว่าในลำไยสด แสดงว่าการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลในลำไย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Mahattanatawee *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาปริมาณฟีนอลและสารต้านอนุมูลอิสระของลำไยสด พบว่าลำไยสดมีปริมาณฟีนอล 482 ไมโครกรัมเมื่อเทียบกับกรดแกลลิคต่อกรัม (คำนวณเทียบฐานเปียก) และมีความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเทียบกับกรดแกลลิคประมาณ 70 ไมโครกรัมกรดแกลลิคต่อกรัม (คำนวณเทียบฐานเปียก) เมื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของลำไยสด และลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบ	เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยแห้ง
ความชื้น (ร้อยละ)	81.10	17.80
ไขมัน (ร้อยละ)	0.11	0.40
เส้นใย (ร้อยละ)	0.28	1.60
โปรตีน (ร้อยละ)	0.97	4.60
เถ้า (ร้อยละ)	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	16.98	72.70
ค่าพลังงานความร้อน (กิโลแคลอ	72.79	311.80
แคลเซียม (มิลลิกรัม/100 กรัม)	5.70	27.70
เหล็ก (มิลลิกรัม/100 กรัม)	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100 กรัม)	35.30	159.50
วิตามินซี (มิลลิกรัม/100 กรัม)	69.20	137.80

ที่มา : กรมวิทยาศาสตร์บริการ อ้างโดย พาวิน (2543)

ตลาดการค้าลำไยสดภายในประเทศมีทั้งตลาดในกรุงเทพฯ ซึ่งได้แก่ ตลาดมหานาค ตลาดไท ตลาดสี่มุมเมือง และปากคลองตลาด ซึ่งการบริโภคลำไยสดส่วนใหญ่เป็นลำไยเกรด A ที่เหลือจากการส่งออกและเกรด B กระจายไปยังจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ โดยพ่อค้าจะนำรถไปรับซื้อเองที่สวน หรือจุดรับซื้อแต่ละจังหวัด ซึ่งตลาดรวบรวมที่สำคัญมักอยู่ในจังหวัดที่เป็นศูนย์กลางการค้าในภูมิภาคนั้นๆ เช่น นครศรีธรรมราช หาดใหญ่ นครสวรรค์ นครราชสีมา เป็นต้น ส่วนลำไยกระป๋อง มักจะกระจายอยู่ตามร้านค้าทั่วๆ ไปหรือตามศูนย์การค้าต่างๆ และลำไยอบแห้ง มีจำหน่ายอยู่ทั่วไปตามร้านค้าหรือศูนย์การค้าต่างๆ ทั่วประเทศ ส่วนตลาดการค้าลำไยส่งออกภายนอกประเทศของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2553 แบ่งเป็น ลำไยแช่แข็งหรือสด ร้อยละ 53 ลำไยอบแห้ง ร้อยละ 36 ลำไยกระป๋อง ร้อยละ 11 ตลาดสำคัญได้แก่ จีน ฮ่องกง อินโดนีเซีย และไต้หวัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

มีสัดส่วนการส่งออกร้อยละ 39 , 31 , 16 และ 4ตามลำดับ (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและกรมศุลกากร, 2554)

2.2 ขนมขบเคี้ยว

ขนมขบเคี้ยว (snack) จัดเป็นอาหารว่างหรืออาหารที่บริโภคระหว่างมื้อหลัก เพื่อความเพลิดเพลิน บริโภคได้ง่ายและสะดวก ส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรตและไขมันปริมาณมาก ขนมขบเคี้ยวถือเป็นอาหารสำเร็จรูปประเภทของกินเล่นหรืออาหารว่างที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูง โดยเฉพาะผู้บริโภคในกลุ่มเด็กและวัยรุ่น เนื่องจากสินค้าขนมขบเคี้ยวมีรูปแบบและรสชาติที่หลากหลาย ในปี 2554 ตลาดขนมขบเคี้ยวมีมูลค่าตลาดสูงถึง 22,000 ล้านบาท มีอัตราการเติบโตกว่าปี พ.ศ. 2553 ร้อยละ 10.5 (สยามธุรกิจ, 2554) ดังนั้นจึงมีการพัฒนารูปแบบสินค้าทั้งบรรจุภัณฑ์และรสชาติอยู่ตลอดเวลา เพื่อไม่ให้ผู้บริโภคเกิดความจำเจต่อสินค้า สินค้าจะต้องมีคุณภาพและจำหน่ายในราคาไม่สูงนัก นอกจากนี้ตลาดขนมขบเคี้ยวมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น

2.2.1 ประเภทของขนมขบเคี้ยว

ขนมขบเคี้ยวสามารถแบ่งเป็น 8 ประเภท ตามส่วนแบ่งการตลาดผลิตภัณฑ์ (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, มปป.) ดังนี้

1) ขนมขบเคี้ยวขึ้นรูป (extruded snack) เป็นขนมที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งสาลี แป้งข้าวโพด มาขึ้นรูปและผ่านการอบกรอบ อาจเพิ่มรสชาติโดยการปรุงรสด้วยส่วนผสมอื่น ๆ เช่น รสซอส รสสาหร่าย ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาด ได้แก่ คอนเน่ (ร้อยละ 11.7) ตะวัน (ร้อยละ 7.4) สแน็คแจ็ค (ร้อยละ 7.6) ปาปริก้า (ร้อยละ 6.3) แจ๊กซ์ (ร้อยละ 4.9) โปเต้ (ร้อยละ 4.40) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 34

2) มันฝรั่ง (potato chip) เป็นขนมมันฝรั่งตัดให้เป็นแผ่นบางและทอด ปรุงรสต่าง เช่น รสสาหร่าย รสบาร์บีคิว ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาด ได้แก่ เลย์ (ร้อยละ 69.90) เทสโต (ร้อยละ 19.2) และมันฝรั่งพริงเกิล (ร้อยละ 7.6) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 33

3) ปลาสวรรค์ (fish snack) เป็นขนมที่ผลิตจากเนื้อปลาที่ผ่านกระบวนการย่างปรุงรสเป็นรสต่าง ๆ ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาด ได้แก่ ทาโร (ร้อยละ 68.5) ฟิชโช (ร้อยละ 15.1) และเบนโตะ (ร้อยละ 3.3) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4) ถั่ว (peanut) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากถั่วประเภทต่าง ๆ เช่น ถั่วลิสง ถั่วลันเตา เมล็ดมะม่วงหินมพานต์ อัลมอนด์ ปรุงรสต่าง ๆ ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาด ได้แก่ โก๋แก่ (ร้อยละ 32.0) ทองการ์เด้นท์ (ร้อยละ 28.3) และเจดีย์คู่ (ร้อยละ 11.5) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณ ร้อยละ 9

5) ข้าวเกรียบกุ้ง (prawn cracker) เป็นขนมที่ทำจากแป้งและปรุงรสกุ้ง ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาดได้แก่ ฮานามิ (ร้อยละ 64.3) คาลบี้ (ร้อยละ 6.6) และมโนราห์ (ร้อยละ 5.6) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 6

6) ข้าวอบกรอบ (rice snack) เป็นขนมที่ทำจากข้าวหอมมะลิอบกรอบปรุงรส ปัจจุบันสินค้าที่เป็นผู้นำตลาด ได้แก่ โดโซะ (ร้อยละ 79.2) และชินมัย (ร้อยละ 9.8) สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 4

7) อื่นๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ปลาหมึกปรุงรสต่างๆ และผลิตภัณฑ์ข้าวโพดคั่วปรุงรสชาติต่างๆ เป็นต้น สินค้าประเภทนี้มีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 5

2.2.2 คุณค่าทางโภชนาการของขนมขบเคี้ยว

ขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่จะมีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก จึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตของร่างกาย ถ้าหากมีการทอดในน้ำมันก็จะได้รับปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นด้วย และมีส่วนน้อยที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเมื่อรับประทานขนมขบเคี้ยวจะได้พลังงานจากคาร์โบไฮเดรตและไขมันเท่านั้น โดยไขมันส่วนใหญ่เป็นไขมันปาล์มซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัวค่อนข้างสูงไม่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย และทำให้ไม่ได้รับสารอาหารอย่างอื่นอย่างเพียงพอ เกิดสภาวะการบกพร่องทางโภชนาการและโรคไขมันในเลือดสูงได้ โดยขนมขบเคี้ยวบางชนิดพบว่าให้สัดส่วนของไขมันอิ่มตัวสูงถึงร้อยละ 60 อาจทำให้ร่างกายได้รับไขมันมากเกินไป จากข้อกำหนดของสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน ควรจะได้รับพลังงานจากไขมันคุณภาพดีมากกว่าร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมด ซึ่งปกติแล้วความต้องการพลังงานของวัยรุ่นขึ้นกับอัตราการเจริญเติบโตของร่างกาย และการเผาผลาญอาหารในร่างกายและกิจกรรมที่ทำ ใน 1 วันควรได้รับพลังงานประมาณ 1,700-1,850 กิโลแคลอรี่ ในวัยรุ่นหญิง และ 1,850-2,400 กิโลแคลอรี่ ในวัยรุ่นชาย ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากแป้ง และไขมันร้อยละ 50-60 ส่วนความต้องการโปรตีนพบว่าในวัยเด็กต้องการโปรตีนที่มีคุณภาพสมบูรณ์เพื่อช่วยในการเจริญเติบโต ร้อยละ 10-15 ซึ่งมากกว่าในวัยผู้ใหญ่ (จตุพร, 2550) ขนมขบเคี้ยวที่จำหน่ายในท้องตลาดนั้นให้คุณค่าทางโภชนาการต่ำแต่ให้พลังงานสูงเนื่องจากมีคาร์โบไฮเดรต และไขมันเป็นองค์ประกอบ หรืออาจจะมีโปรตีนเป็นต้น ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่นำมาผลิต การบริโภคขนมขบเคี้ยวที่ให้พลังงานสูงแต่คุณค่าต่ำมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกินไป อาจทำให้เด็กเกิดโรคอ้วนและนำไปสู่โรคอื่นๆได้เช่นกัน (Boonyasirikool and Charunuch, 2000a)

2.3 เส้นใยอาหาร

2.3.1 ความหมายของเส้นใยอาหาร

เส้นใยเป็นส่วนประกอบอยู่ในอาหารบางชนิด สมัยก่อนเรียกว่า crude fiber หมายถึง สารที่เหลืออยู่ภายหลังการย่อยด้วยกรดและด่างแล้ว ซึ่งก็คือ เซลลูโลส และลิกนิน เท่านั้น ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ทำให้ทราบว่าคาร์โบไฮเดรตมีผลดีต่อสุขภาพ จึงให้ชื่อใหม่เป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ซึ่งหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ เอนไซม์ไม่สามารถย่อยสลายพันธะไกลโคไซด์ในโมเลกุลของสารประกอบเหล่านี้ได้ เส้นใยอาหารประกอบด้วยเซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโทแซน กัม และเพคติน ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ปริมาณของเส้นใยอาหาร จึงมีค่ามากกว่า crude fiber ประมาณ 2-16 เท่า (นิธิยา, 2553) การได้รับเส้นใยอาหารในปริมาณที่เหมาะสมทำให้เกิดความสมดุลของระบบทางเดินอาหาร เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย โดย ผู้หญิงควรได้เส้นใยอาหาร วันละ 25 กรัม และผู้ชายควรได้รับวันละ 38 กรัม (ทองจุล, 2554)

2.3.2 ประเภทของเส้นใยอาหาร

เส้นใยอาหารที่พบในพืช สามารถแบ่งตามความสามารถในการละลายน้ำได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.2.1 เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือ สารเส้นใยชนิดละลายน้ำได้ มีความนิ่มสามารถที่จะอุ้มน้ำและดูดซับน้ำได้ดีมาก สามารถขยายหรือพองตัวได้ถึง 10-25 เท่าของน้ำหนักเส้นใย และกลายเป็นเมือกหล่อลื่นลักษณะเหมือนเจล ทำให้สามารถจับไขมัน คลอเลสเตอรอลและน้ำตาล ช่วยทำให้ขับเคลื่อนและเป็นสารหล่อลื่นช่วยทำให้อุจจาระไหลเลื่อนในลำไส้ ใหญ่ได้เร็วขึ้นเพื่อขับออกจากร่างกายมากขึ้น เส้นใยอาหารส่วนที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำ เส้นใยอาหารชนิดนี้มักจะปนอยู่กับส่วนที่เป็นแป้งในพืช ได้แก่ กัมเพคติน และมิวซิเลจส์ (แอน, 2546; ดวงจันทร์, 2545) ดังนั้นจึงมีผลชะลอ และลดการดูดซึมของสารดังกล่าวเข้าสู่ร่างกาย (สุรัตน์, 2534) ตัวอย่างของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ มีดังนี้

2.3.2.1.1 กัมและมิวซิเลจส์ ที่ใช้ในอาหารได้มาจากหลายแหล่งทั้งได้จากธรรมชาติ และเป็นสารสังเคราะห์ กัมเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นพอลิเมอร์สายยาว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (นิธิยา, 2543) เมื่อจับกับน้ำจะอุ้มน้ำ และเกิดความข้นหนืดได้สารที่คล้าย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วุ้น (ปาริชาติ, 2540) ปัจจุบันนิยมใช้กันแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงคุณภาพของอาหารและเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร

2.3.2.1.2 เพคติน เป็นอนุพันธ์ของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ซึ่งมีสภาพเป็นคอลลอยด์พบในผนังเซลล์พืชประกอบด้วยหน่วยของกรดแอนไฮโดรกาแลคทูโรนิค (Anhydroga-Lacturonic) โดยที่หมู่คาร์บอกซิลบางส่วนจะรวมกับหมู่เมทิลได้อยู่ในรูป เมทธิลเอสเทอร์ สารเริ่มต้นของเพคทิน คือ โปรโตเพคติน (Protopectin) ซึ่งเกิดขึ้นในพืช และมีสมบัติไมละลายน้ำ เมื่อถูกย่อยจะให้ผลเป็นเพคทิน หรือกรดเพคทินิค (สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, มปป.)

2.3.2.2 เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) เป็นพวกคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่ย่อยสลายได้ยาก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีความสามารถดูดซับสารต่างๆ ได้น้อย แต่จะจับกับน้ำแล้วเกิดการพองตัวในน้ำ ลักษณะคล้ายฟองน้ำ พบมากในผักและเมล็ดธัญพืชต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรำข้าว ดังนั้นเมื่อบริโภคเข้าไปแล้วขับถ่ายจะทำให้มีมวลอุจจาระเพิ่มขึ้น เนื้ออุจจาระนิ่ม ส่งผลให้ขับถ่ายได้สะดวก และลดระยะเวลาที่กากอาหารอยู่ในลำไส้ (สุรัตน์, 2534) ตัวอย่างของเส้นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำมีดังนี้

2.3.2.2.1 เซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีมากที่สุดในโลกเพราะเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ในผนังเซลล์พืช โดยรวมตัวอยู่กับพวกไซแลน และลิกนิน เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ ทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ กรดและด่างที่เจือจาง ถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์เซลลูโลส โมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์เป็นสายยาว ไม่มีสายแขนง สายยาวจะมาเกาะกันตามแนวราบด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลน้ำตาลกลูโคส ซึ่งทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นพอลิคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ที่แข็งแรง ยึดเกาะกันเป็นเส้นใย และเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในแต่ละหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ซึ่งจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายของพอลิเมอร์ ทำให้บางส่วนของโครงสร้างเป็นผลึก ส่วนที่เกิดผลึกนี้จะมีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนทานต่อการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ และสารเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึก (noncrystalline หรือ amorphous) นอกจากนี้ส่วนที่เป็นผลึกยังดูดน้ำได้น้อยกว่าด้วย ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ สำหรับส่วนโมเลกุลเซลลูโลสที่ไม่เป็นผลึก หรือไม่มีรูปร่าง โมเลกุลจะเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และจับตัวกันอย่างหลวมๆ ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ได้มาก และเกิดการพองตัวออกมีผลทำให้กากอาหารมีลักษณะนิ่ม (ประเสริฐ และคณะ, 2551)

2.3.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส เป็นกลุ่มของเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลตั้งแต่ 2-4 ชนิดขึ้นไป มีทั้งน้ำตาลเฮกโซส และเพนโทส น้ำตาลที่พบมาก คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

น้ำตาลไซโลส และอะราบิโนส นอกจากนั้นยังพบน้ำตาลแมนโนส กาแลกโทส และกรดกลูคูโรนิกอีกด้วย (สิริรัตน์, 2551) เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ ในทางเดินอาหารของมนุษย์ และ สัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในด่างเจือจาง (Food Network Solution, มปป.)

2.3.2.2.3 ลิกนิน ประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่รวมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก พืชจะผลิตเมื่อมีอายุมาก (ริกาญจน์, มปป.; Southgate *et al*., 1990) ลิกนินทนต่อการทำลาย และต้องการสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายลิกนิน ลิกนินจะเคลือบผนังเซลล์พืชให้มีความแข็งแรง ทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยเซลลูโลสได้ยากขึ้น และแบคทีเรียในลำไส้ไม่สามารถย่อยลิกนินได้ ประกอบกับลิกนินมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในกรดและด่าง จึงไม่สามารถย่อยและดูดซึมได้ในร่างกายมนุษย์

2.3.3 ประโยชน์ของเส้นใยอาหาร

เส้นใยอาหารมีประโยชน์ด้านการแพทย์ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำเมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหารของคน เส้นใยอาหารชนิดนี้ จะละลายอยู่ในอาหารและน้ำย่อยในกระเพาะ และกลายเป็นของเหลวหนืดหรือวุ้น ทำให้ร่างกายดูดซึมได้ยาก โดยเฉพาะทำให้ร่างกายดูดซึมไขมันและน้ำตาลได้ยากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการลดระดับคอเลสเตอรอล และการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ช่วยป้องกันโรคเบาหวาน และเส้นใยอาหารนี้จะถูกย่อยโดยแบคทีเรียในสำไส้ใหญ่ (บริษัท ฟาร์มาเนท จำกัด, มปป.) เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำเมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหารของคนเรามีลักษณะคล้ายฟองน้ำ และในเส้นใยมีประจุไฟฟ้าอยู่ด้วย จึงสามารถยึดจับกับสารอาหาร กรดน้ำดี สารพิษ และสารก่อมะเร็งต่างๆได้ดี โดยสามารถยึดเกาะได้ในขณะที่เส้นใยอาหารนี้เคลื่อนตัวไปตามระบบทางเดินอาหาร ระบบดูดซึม และย่อยอาหารของร่างกาย โดยเฉพาะในส่วนของระบบลำไส้ คุณประโยชน์ของเส้นใยอาหารที่มีต่อสุขภาพร่างกายมนุษย์ เช่น สร้างเสริมและปรับปรุงระบบการทำงานของลำไส้ในการย่อย ดูดซึมและขับถ่าย โดยช่วยทำให้ลำไส้ใหญ่ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เนื่องจากอาหารที่มีเส้นใยอาหารมีผลทำให้ลำไส้ใหญ่ลด transit time เพิ่มน้ำหนักอุจจาระและจำนวนครั้งการระบายให้บ่อยขึ้น ป้องกันและบำบัดรักษาอาการโรคท้องผูก ปรับสภาพการทำงานของระบบลำไส้ นอกจากนี้ยังพบว่าการบริโภคเส้นใยอาหารในปริมาณที่เหมาะสมช่วยลดการเกิดโรคมะเร็งในลำไส้ใหญ่ และโรคถุงตันที่ลำไส้ใหญ่ เนื่องจากการบริโภคใยอาหารน้อยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในระบบย่อยอาหาร ลดการรวมตัวของกรดน้ำดี เพิ่มเวลาของอาหารที่ตกค้างในลำไส้ใหญ่ ลดน้ำหนักและปริมาณอุจจาระตลอดจนลดความถี่ของการขับถ่าย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อุจจาระ บางทฤษฎีกล่าวว่าใยอาหารสามารถป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ คือทำให้อุจจาระผ่านออกจากลำไส้ใหญ่เร็วขึ้น จนทำให้สารก่อมะเร็งเจือจางไม่อยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อร่างกาย ส่วนโรคถุงตันนี้มีความสัมพันธ์กับความอ่อนแอของผนังลำไส้เกิดจากแรงดังของอุจจาระแข็ง จนทำให้เกิดการอักเสบของผนังลำไส้ เริ่มระคายเคืองและติดเชื้อ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มปป.)

ปัจจุบันมีการนำเส้นใยอาหารไปใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารและโภชนาการ ขึ้นอยู่กับประเภท และชนิดของอาหาร จุดประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากเส้นใยอาหาร และคุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยอาหารที่นำไปใช้ (ไพโรจน์ และเบญจวรรณ, 2539) เช่น ช่วยให้อาหารมีความข้นหนืด ช่วยให้มีอีมัลชั่น สารแขวนลอยและฟองคงตัว ช่วยให้เกิดเจลและเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มเส้นใยอาหารควรใช้ในระดับที่ผู้บริโภคยอมรับด้วยเนื่องจากการเติมเส้นใยอาหารถึงแม้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น แต่อาจมีผลกระทบทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้อยลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงในด้านขนาด รูปร่าง สี กลิ่น รสชาติ หรือลักษณะเนื้อสัมผัส จนอาจทำให้การยอมรับของผู้บริโภคลดลง (Sehneeman, 1987) เส้นใยอาหารที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ แบ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำซึ่งมักใช้เติมในอาหารว่าง อาหารเช้าจากธัญพืช ขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์ขนมอบ เช่น ขนมปัง คุกกี้ พิซซ่า เป็นต้น แหล่งของเส้นใยอาหารที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรม ได้แก่ รำข้าวสาลี รำข้าวโอ๊ต รำข้าวโพด รำถั่วเหลือง เป็นต้น ส่วนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำมักใช้เติมในอาหารที่มีลักษณะเหลว เช่น เครื่องดื่ม น้ำสลัด ไอศกรีม เป็นต้น แหล่งของเส้นใยอาหารประเภทนี้ ได้แก่ เพคติน กัม คาราจีแนน

2.4 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process) เป็นวิธีการที่รวมหลายกระบวนการเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด การเฉือน การขึ้นรูป โดยเครื่องจะอัดอาหารให้ออกมาในรูปกึ่งเหลว อาหารนี้จะถูกอัดผ่านหน้าแปลน (die) ที่อยู่ปลายเกรียวสกรู ถ้ามีการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยเรียกกระบวนการนี้ว่า การดันผ่านเกลียวอัดโดยใช้ความร้อน (extrusion cooking) การใช้เทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการโดยเฉพาะทำให้กระบวนการขึ้นรูปง่ายขึ้น พัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ โดยการทำงานของเครื่องเอง คือขณะที่วัตถุดิบเคลื่อนที่ผ่านเครื่องจะได้รับพลังงานเชิงกลและความร้อนในเวลาอันสั้น แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของอาหาร จึงมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชัน เพื่อผลิตอาหารที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมรูปร่างและลักษณะ รวมทั้งคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยวัตถุประสงค์หลักของกระบวนการเอกซ์ทรูชันคือการเพิ่มความหลากหลายของอาหารจากส่วนผสมพื้นฐานให้มี รูปร่าง สี กลิ่น รส กระบวนการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนแบบอุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้น (High Temperature Short Time) จึงช่วยยั้บยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ลดปริมาณน้ำอิสระและเพิ่มอายุการเก็บรักษาในอาหาร (จุฬาลักษณ์, 2550) กระบวนการผลิตโดยวิธีเอกซ์ทรูชัน หรือกระบวนการผลิตอาหารโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (extruder) เป็นกระบวนการทำให้เกิดรูปร่างโดยการบังคับให้วัตถุดิบอาหารที่อ่อนตัว หรือหลอมเหลวเคลื่อนที่ไปตามพื้นที่อันจำกัด แล้วเคลื่อนที่ผ่านไดด้วยการหมุนตัวของสกรู และความดันที่เกิดขึ้นภายในเอกซ์ทรูเดอร์ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ดังนั้นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จึงเป็นเครื่องมือที่ทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและรูปลักษณ์ของวัตถุดิบอาหาร ปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือสภาวะการทำงานของเครื่อง และวิทยาศาสตร์การไหล (rheology) ของอาหาร ซึ่งวิทยาศาสตร์การไหลนี้ หมายถึง วิทยาการของการเปลี่ยนสถานภาพและการไหลของสสาร สำหรับกระบวนการผลิตโดยวิธีเอกซ์ทรูชันนี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะบางประการของสารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (dough) ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือน โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ อุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิของบาร์เรล ความเร็วรอบของสกรู (ทำให้เกิดแรงเฉือนและการเสียดสีเกิดเป็นความร้อน) ความดัน (ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปลักษณ์ องศาลาดเอียงของเส้นสกรู บาร์เรล และหน้าแปลน) และอัตราการป้อนวัตถุดิบ ส่วนคุณสมบัติของวัตถุดิบก็มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส และสีของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องที่เรียกว่า เอกซ์ทรูเดท (extrudate) โดยมีปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ความชื้น ขนาดของวัตถุดิบ และองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยเฉพาะชนิด และปริมาณของแป้ง โปรตีน ไขมัน และน้ำตาลตลอดจนส่วนผสมอย่างอื่น ที่มีปริมาณเล็กน้อยที่เติมลงไปเพื่อช่วยในกระบวนการผลิต (ประชา, 2544; วิไล, 2545) จากการศึกษาของ Ding *et al*. (2005) พบว่า ความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นสูงขึ้น การพองตัวลดลง ดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ดัชนีการละลายน้ำลดลง ความแข็งสูงขึ้น และความกรอบลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาของสุนันทา (2548) พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้อัตราการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความกรอบมากขึ้นและผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากขึ้น

2.4.1 การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการแปรรูปอาหาร

ส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันประกอบด้วยธัญชาติที่ผ่านการบด สตาร์ช และโปรตีนที่ได้จากพืช นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่นๆ ที่เป็นวัตุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรดหรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี และกลิ่นรส น้ำจะเติมเข้าไปเพื่อปรับให้ส่วนผสมมีความชื้นอยู่ในระดับร้อยละ 10-40 ในบรรดาการคุกกิ้งเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่วนผสมอาหารหลังจากที่ถูกอัด จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 150-200 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงที่สุดนี้จะคงอยู่น้อยกว่า 20 วินาที เพราะจะทำให้ไหม้ เมื่อโดออกจากได ความดันถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้เกิดการพองตัว (puffing) อย่างทันทีที่อุณหภูมิสูง การพองตัวนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้ร้อนยิ่งยวด ความชื้นและความร้อนในผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เอกซทรูเดตเหล่านี้มักจะถูกตัดที่ผิวหน้าของไดด้วยใบมีดที่หมุน แล้วอบต่อในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อให้ได้ความชื้นร้อยละ 2-12 ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอาจเคลือบด้วย สี กลิ่นรส น้ำมันและ/หรือน้ำตาล ซึ่งการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณความชื้นของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิที่จุดออกจากเครื่อง ระดับของความเสียหายของส่วนผสมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไหล และลักษณะรูปร่างของรูเปิดหน้าแปลน (รุ่งนภา, 2541)

2.4.2 ขั้นตอนกระบวนการผลิตโดยวิธีเอกซ์ทรูชัน

เริ่มจากการชั่งวัตถุดิบตามสูตรส่วนผสม ผสมให้เข้ากันดีในเครื่องผสม เสร็จแล้วนำออกมาจากเครื่องผสมบรรจุลงในถุงพลาสติก หรือภาชนะที่ใช้บรรจุ จากนั้นนำไปป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ประกอบส่วนประกอบต่างๆเข้าด้วยกันแล้ว ป้อนวัตถุดิบผสมเข้าไปตรงส่วนที่รับวัตถุดิบ (feed port) วัตถุดิบจะถูกพาเข้าสู่ช่วงของการผลิต ซึ่งแบ่งได้ 3 ช่วง ดังนี้ (ประชา, 2544)

2.4.2.1 ช่วงการป้อนและการผสม (Feeding and mixing zone)

วัตถุดิบผสมนี้จะถูกพาให้เคลื่อนที่ไปทางข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง เคลื่อนที่ไปตามร่องเกลียวสกรูและช่องว่างระหว่างสันเกลียวสกรูกับผนังบาร์เรลด้านใน ดังนั้นความลาดเอียง องศาความตื้นลึกของเส้น (ร่อง) เกลียวและความสูงของสันเกลียว ตลอดจนความเร็วรอบของสกรูนั้น จึงมีบทบาทสำคัญมาก เนื่องจากสกรูมีหน้าที่ในการขนถ่าย หรือขับเคลื่อนวัตถุดิบแล้วยังทำหน้าที่ผสม นวด บด และอัด จึงก่อให้เกิดงานและความร้อนขึ้นบ้าง สกรูที่ใช้ในช่วงแรกนี้ทำหน้าที่หลัก ได้แก่ ขนถ่าย ผลักพาให้วัตถุดิบผสมเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างรวดเร็ว สกรูที่ใช้ในช่วงแรกที่เรียกว่า สกรูป้อนนี้ ต้องเป็นชนิดที่ร่องเกลียวสกรูลึก มุมลาดเอียงของเส้นเกลียวสกรูต้องลาดชัน และความกว้างระหว่างเกลียวสกรูต้องมากกว่าสกรูช่วงอื่นๆ เมื่อสกรูส่วนนี้รับส่วนผสมของวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แล้ว วัตถุดิบผสมนี้จะถูกผลักพาให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการหมุนตัวของสกรู และแรงเสียดทานวัตถุดิบผสมในช่วงนี้เปรียบเสมือนถูกลดขนาดลงในขณะที่ถูกผลักดัน อัดให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าตลอดเวลาขณะเดียวกันการผลักพาให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้านั้นทำได้ช้าลง ทั้งที่วัตถุดิบผสมนี้ถูกป้อน อัด เข้ามาด้วยอัตราและปริมาณเท่าเดิม เนื่องจากทางออก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีหน้าแปลนที่มีรูเปิดกว้างอันจำกัดปิดไว้ กอปรกับพื้นที่ของช่องว่างระหว่างผนังบาร์เรลด้านในกับผนังบาร์เรลลดลง เนื่องจากร่องเกลียวสกรูในช่วงถัดไปตื้นขึ้น จึงทำให้วัตถุดิบผสมในช่วงป้อนนี้ถูกแรงอัด ผลักดันให้รวมตัวเข้ามาชิดกันได้ดียิ่งขึ้นจนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ขนม หรือปริมาณของวัตถุดิบผสมนี้ลดลง

2.4.2.2 ช่วงการนวด (Kneading zone)

ช่วงนี้มีการออกแบบสกรูให้เป็นสกรูที่มีร่องเกลียวและความลึกที่แคบและตื้นกว่าสกรูช่วงแรก หรืออาจใช้วิธีการที่ทำให้ความสามารถในการขนถ่ายหรือผลักพาของสกรูลดลง เพื่อช่วยทำให้เกิดแรงอัดมากขึ้น ส่วนผสมของอาหารจะหมุนตัวในช่องว่างที่เป็นร่องเกลียวสกรูกับผนังบาร์เรลด้านใน และในขณะเดียวกันก็เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นจากการหมุนตัวของสกรูที่มีมอเตอร์ขนาดใหญ่ กำลังแรงม้าสูงเป็นตัวขับเคลื่อนหมุนสกรู จึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น เป็นความร้อนที่ได้มาจากการเปลี่ยนพลังงานกล (ที่มาจากการเสียดสีและเฉือน) และความร้อนนี้จะแพร่เข้าไปในส่วนผสมของวัตถุดิบที่ยังเป็นแป้งชื้น ๆ ที่เคลื่อนที่มาจากช่วงป้อนซึ่งมีผลทำให้ส่วนผสมช่วงนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วทำให้ส่วนผสมของอาหารนี้เปลี่ยนเป็นแป้งเหนียวหยุ่น มีลักษณะเหนียว หนืดยืดหยุ่นได้เหมือนกับโด

2.4.2.3 ช่วงการหุงต้ม หรือช่วงที่ทำให้ร้อนจนสุก (Final cooking zone)

สกรูส่วนนี้จะออกแบบพิเศษ เช่น ร่องเกลียวต้องตื้น มุมลาดเอียง องศาของเส้นเกลียวจะมีความชันน้อยลง มีรอยตัดหรือบากที่เส้นเกลียว หรือฝังหมุด จำนวนเส้นเกลียวมีมากขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มแรงเฉือน และช่วยให้การผสมดียิ่งขึ้น สกรูที่มีลักษณะพิเศษนี้จึงทำให้แป้งมีลักษณะเหนียว หนืด และหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงสถานะไปเป็นของเหลวที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐานเป็นของเหลวไหลได้ที่เรียกว่า เจล (gel) หรือแป้งสุก เมื่อถูกอัดผ่านพ้นหน้าแปลนออกมา และด้วยความแตกต่างของความดันบรรยากาศที่ภายนอกกับความดันสูงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จะทำให้น้ำที่อยู่ในส่วนผสมอาหารที่หลอมเหลวเป็นเจล ระเหยกลายเป็นไอน้ำลอยตัวออกไปพร้อมกับดึงเอาส่วนโครงสร้างที่เป็นแป้งเหลวสุกนี้ยืดขยายตัวออก และคงสภาพความพองไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศภายนอกขณะเดียวกันก็ถูกตัดเป็นชิ้นหรือท่อน ตามขนาดที่ต้องการด้วยใบมีด จากนั้นนำไปอบแห้งแล้วเคลือบกลิ่นรสตามแต่ละชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำ

2.4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

ตัวแปรแรกเป็นส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ได้แก่ แบบของตัวเครื่อง แบบของสกรู และแบบของหน้าแปลน ตัวแปรที่ 2 เป็นกระบวนการผลิตโดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่อง ความเร็วรอบของสกรู รูปแบบการจัดเรียงของสกรู และอัตราการป้อนวัตถุดิบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สู่เครื่อง เป็นต้น ส่วนตัวแปรสุดท้ายเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน แป้ง ไขมัน น้ำ เส้นใย น้ำตาล และเกลือ เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอุณหภูมิในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าการใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นค่อนข้างสูง (ร้อยละ 18-22) ที่อุณหภูมิปานกลาง (88-104 องศา-เซลเซียส) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะค่อนข้างแข็ง โครงสร้างเซลล์เล็กและลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเหนียว หากวัตถุดิบมีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 10-14) ที่อุณหภูมิสูง (93-121 องศาเซลเซียส) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง ลักษณะเบาและมีโครงสร้างเซลล์เปิดกว้าง เมื่อนำไปอบแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกรอบ แต่หากอุณหภูมิในการเอกซ์ทรูชัน ค่อนข้างต่ำ (65-80 องศาเซลเซียส) ปริมาณความชื้นจะไม่มีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์เซชันมากนัก แต่จะมีผลเมื่ออุณหภูมิเอกซ์ทรูชันสูง (95-110 องศาเซลเซียส) ความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อย่างพอเหมาะจะทำให้เกิดความดันไอขึ้นในเนื้ออาหาร เมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดการพองตัว มีลักษณะเป็นรูพรุนทั่วอาหาร โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ คือ ร้อยละ 13 ดังนั้นถ้าความชื้นสูงเกินไป จะทำให้อัตราส่วนการพองตัวลดลงและความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปทำให้ไอน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ไม่สามารถระเหยออกมาได้หมดในเวลาอันรวดเร็วทีผ่านผลิตภัณฑ์ผ่านพ้นหน้าแปลนจึงทำให้น้ำเหลืออยู่ในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีรอยร้าวที่ผิวซึ่งตัวแปรทั้งสาม และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบ ซึ่งส่งผลไปถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในระหว่างกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เช่น ความร้อน ความดัน และแรงเฉือนที่เกิดจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของอาหาร (แป้ง โปรตีน ไขมัน) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางโภชนาการของอาหาร (Chiang and Johnson, 1977; กมลวรรณ, 2541) ตัวแปรของกระบวนการผลิต โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถปรับให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ตามปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังนี้ คือ

2.4.3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองทันทีหลังออกจากเครื่อง เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกมาจากเครื่อง เกิดเนื่องจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการพองตัวของผลิตภัณฑ์แต่จะพองหลังจากให้ความร้อน เช่น โดยวิธีการทอด หรือ อบเป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.3.2 ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed)

ความเร็วรอบของสกรูมีผลต่อการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่อง ช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง (residence time) และแรงเฉือน การเพิ่มแรงเฉือนใกล้ทางออกของเครื่องจะเพิ่มการสูญเสียโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง มีลักษณะรูพรุนเล็ก และความทนต่อแรงกดลดลง

2.4.3.3 รูปแบบของสกรู (Screw configuration)

ชิ้นส่วนของสกรูที่ใช้ และตำแหน่งชิ้นส่วนของสกรูมีผลต่อรูปแบบของสกรู โดยเฉพาะกับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ซึ่งมีผลต่อการผสมของวัตถุดิบ เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง แรงเฉือนพลังงานกลที่ให้กับวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโดภายในเครื่อง

2.4.3.4 อัตราการป้อนวัตถุดิบ (Feed rate)

การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบสู่เครื่อง จะมีการเพิ่มความดันที่หน้าแปลน ลดพลังงานกลที่ป้อนเข้า และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.4.4 คุณสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

คุณสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ค่าความสามารถในการละลาย ลักษณะเนื้อสัมผัสและการพองตัว คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตและคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการ (ศุภชัย, 2545)

2.4.4.1 ความหนาแน่น (bulk density) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะพองตัวทันทีหลังอัดผ่านเครื่องซึ่งเป็นผลโดยตรงจากปัจจัยของความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้น หากใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูงจะส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น (Ding *et al*., 2005; Meng *et al*., 2010; Pansawat *et al*., 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเร็วสกรูอัดเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะลดลง และความหนาแน่นและสัดส่วนการพองตัวมีความสัมพันธ์แบบผกผันต่อกัน (Meng *et al*., 2010; Pansawat *et al*., 2008) ปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความหนาแน่นคือองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่แป้ง เช่น โปรตีน ไขมัน องค์ประกอบดังกล่าวส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นสูงขึ้น

2.4.4.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) เป็นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อน้ำ โดยสัมพันธ์กับการเกิดเจลาติไนซ์เซชันของแป้ง เมื่อพันธะถูกทำลายเม็ดแป้งจะเกิดการแตกออกส่งผลให้น้ำเข้าไปจับกับกลุ่มไฮดรอกซิลได้ง่ายขึ้น เกิดเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้สูง การดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นเมื่อเมื่อปริมาณความชื้นในกระบวนการผลิตสูงขึ้น (Ding *et al.*, 2005) การเพิ่มระดับของแป้งข้าวส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวสามารถเกิดเจลาติไนซ์เซชันและทำให้มีโครงสร้างเหมาะสำหรับการกักเก็บน้ำไว้ได้ดี (Yang *et al.*, 2008)

2.4.4.3 ค่าความสามารถในการละลาย (water solubility index, WSI) เป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ ความชื้นในการป้อนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อเอกซ์ทรูเดตให้มีดัชนีการละลายน้ำลดลง (Ding *et al.*, 2005) จากรายงานของ Su (2007) ซึ่งทำการศึกษาผลของการใส่เปลือกไข่ผงในเอกซ์ทรูชัน พบว่า การเติมแป้งเปลือกไข่ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้น เพราะแป้งเปลือกไข่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (grinding agent)

2.4.4.4 เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (texture characteristics) เป็นผลโดยตรงจากคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้และยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุดิบที่ดังนี้ หากวัตถุดิบที่ใช้มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดรูอากาศภายในที่มีขนาดใหญ่ และปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อนมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดต จากรายงานของ Meng *et al.* (2010) พบว่าความชื้นของวัตถุดิบที่ต่ำความเร็วรอบสกรูสูงและอุณหภูมิบาร์เรลปานกลางถึงสูง ส่งผลให้ความแข็งลดลง นอกจากนี้อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลสเพคตินยังส่งผลโดยตรงต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ หากปริมาณของอะไมโลสเพคตินสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความกรอบแข็งและมีความพองตัวสูง (Huang, 2000)

2.4.4.5 สัดส่วนการพองตัว (expansion ratio) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความชื้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบสกรู เป็นต้น เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การพองตัวลดลง (Ding *et al.*, 2005; Lazou and Krokida, 2010; Pansawat *et al.*, 2008) อุณหภูมิของบาร์เรลที่ลดลงจะส่งผลให้การพองตัวของเอกซ์ทรูเดตลดลง และการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีความพองตัวสูงขึ้น (Chaiyakul *et al.*, 2009; Meng *et al.*, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนผสมมีผลต่อการพองตัวของเอกซ์ทรูเดต เช่น การเพิ่มแป้งข้าวส่งผลให้อัตราการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น (Yang *et al.*, 2008) และการเพิ่มเปลือกไข่ผงทำให้ปริมาณความชื้นและการพองตัวแนวขวางลดลงแต่การพองตามแนวยาวเพิ่มขึ้น (Su, 2007)

นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของเอกซ์ทรูเดต โดยเฉพาะต่อสารประกอบฟีนอล เช่น White *et al.* (2010) พบว่าสารประกอบฟีนอล (Flavonols) และสารต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นในขนมขบเคี้ยวผสมแคนเบอร์รี่หลังการเอกซ์ทรูชัน เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเอกซ์ทรูชันได้ไปช่วยกระตุ้นในการสกัดสารเหล่านี้ออกมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.5 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ สามารถแบ่งได้ ดังนี้ (ประชา, 2539)

2.4.5.1 แบ่งตามความเกี่ยวข้องกับพื้นฐานหน้าที่ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา (functional characteristics)

1) Pasta extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีแรงเฉือนต่ำ มีพื้นผิวผนังบาร์เรลเรียบ ความเร็วรอบของสกรูต่ำ เกลียวสกรูลึก เพื่อให้เกลียวสกรูทำหน้าที่นวด บด อัด ผลักพาแป้งที่ชื้นนุ่มให้เคลื่อนที่ไปทางข้างหน้า แล้วอัดผ่านรูเปิดบนหน้าแปลนออกมาเท่านั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอง ต้องใช้ขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตอาหารวิธีอื่นเข้ามาช่วย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุกพร้อมที่จะนำไปรับประทานต่อไป เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้มักใช้เป็นเครื่องผสมและขึ้นรูปแบบต่อเนื่องสำหรับทำอาหารหรือทำแป้งอบกรอบ (pastry) เช่น พาย (pie) ทาร์ท (tart) พั๊ฟ (puff) คุกกี้ เนื้อสำเร็จรูป (processed meat) และขนมหวาน

2) High-pressure forming extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีแรงเฉือนต่ำ ผนังบาร์เรลเป็นร่องตรงหรือเป็นเกลียวสว่าน (grooved barrels) เพื่อมิให้การไหลลื่นเกิดขึ้นที่ผนังบาร์เรล และสกรูเป็นชนิดที่มีอัตราส่วนการอัด (compressing screw) มาก เพื่อช่วยให้ความดันเกิดขึ้นสูงในบริเวณหลังหน้าแปลน เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ใช้อัดวัตถุดิบที่เป็นโด หรือแป้งพวกธัญชาติที่เปลี่ยนสภาพเป็นเจลมาแล้ว อัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน แล้วตัดเป็นชิ้นตามขนาดและรูปทรงที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ยังไม่สุกพอง เนื่องจากการปล่อยน้ำเข้าไปหมุนเวียนในรูกลวงสกรู หรือที่ช่องว่างระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรล เพื่อลดอุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นมากเกินไปให้ต่ำลง จากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งเรียกว่า ตัวดิบ (pellet) หรือ 3 จี (3 G) ขั้นตอนต่อไป คือ การนำไปทำให้สุกพอง โดยวิธีการทอดในน้ำมัน อบหรือคั่วก่อน ขนมขบเคี้ยวที่มีจำหน่ายกันโดยทั่วไป ส่วนมากมาจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้

3) Low-shear cooking extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้เป็นประเภทที่เกิดแรงเฉือนปานกลาง ผนังบาร์เรลเป็นร่องตรง ๆ ส่วนสกรูเป็นชนิดที่มีอัตราส่วนการอัดสูง (compression screw) เพื่อเพิ่มการนวด ผสม ได้ดียิ่งขึ้น ความร้อนจะส่งผ่านมาทางบาร์เรล หรือทางสกรู เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ร้อนหรือสุก ทำลายเชื้อแบคทีเรีย และยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ เปลี่ยนเป็นแป้งดิบให้เป็นแป้งสุก (gelatinize starch) ขณะเดียวกันยังป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์สุกพองในขณะผ่านพ้นรูเปิดของหน้าแปลนออกมา

4) Collet extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้เป็นประเภทที่เกิดแรงเฉือนสูงพื้นผิวผนังบาร์เรลเป็นร่องเกลียว และร่องเกลียวสกรูตื้น มีหลากหลายขนาด มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยมาก ประมาณ 3:1 (L/D = 3:1 เรียกว่า short screw) วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คอร์นกริต ที่แยกเอาน้ำมันออกแล้ว และมีความชื้นต่ำน้อยกว่าร้อยละ 12 ความร้อนเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้มาจากการเสียดสี แล้วทำให้วัตถุดิบหรือคอร์นกริตนั้นร้อนถึง 175 องศาเซลเซียสอย่างรวดเร็ว ทำให้แป้งกลายเป็นเจล และบางส่วนเปลี่ยนเป็นเด็กซ์ตริน (dextrin) ด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วจากภายในตัวเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีความดันสูงมาก มาสู่ภายนอกที่มีความดันต่ำ (ความดันบรรยากาศ) ทำให้น้ำภายในเอกซ์ทรูเดท เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำระเหยลอยตัวออกไป ในขณะเดียวกันก็ถูกตัดด้วยใบมีดแล้วคงตัวเป็นรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่สุกและพองกรอบ วัตถุดิบที่ใช้ทำขนมขบเคี้ยวได้ดี เช่น คอร์นเคริล (corn curl) หรือข้าวโพดพองกรอบ หรือคอร์นพัพ นอกจากคอร์นกริตแล้ว ข้าวท่อน (ปลายข้าว) ก็สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้ดีเช่นกัน

5) High-shear cooking extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้เป็นประเภทที่เกิดแรงเฉือนสูง ออกแบบมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พวกที่สุกเพียงบางส่วน หรือกึ่งสำเร็จรูป หรือพวกที่ผ่านความร้อนสูง แล้วมีการจัดโครงสร้างในโมเลกุลใหม่ เช่น โปรตีนเกษตร (texturevegetable protein) เดิมได้ประยุกต์นำเอาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทำด้วยพลาสติก ที่มีอัตราส่วนของความยาวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) = 15-20:1 เป็นชนิดที่เกิดแรงอัดสูง มีบาร์เรลยาว แต่ก็สามารถทำให้เอกซ์ทรูเดท ร้อน หรือเย็นได้ โดยใช้แหล่งความร้อนความเย็นจากภายนอก โดยผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังบาร์เรล เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ใช้กับวัตถุดิบได้หลายชนิด และในช่วงความชื้นได้ต่าง ๆ กัน และสามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ในการผลิตได้ เช่น ควบคุมการสุกพอง อุณหภูมิ ความแน่นของเนื้อสัมผัส เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ได้แก่ อาหารสัตว์เลี้ยง อาหารเช้าซีเรียล อาหารจากธัญชาติพร้อมรับประทาน (ready to eat cereals) โปรตีนเกษตร และอาหารขบเคี้ยว หรือขนมกรอบ high shear cooking extruder จัดอยู่ใน HTST ส่วนมากวัตถุดิบที่นำมาใช้ก่อนป้อนเข้าเครื่อง ควรให้ความร้อนก่อนซึ่งจะเป็นไอน้ำหรือน้ำร้อนก็ได้ แล้วป้อนเข้าไปในเครื่อง เพื่อทำให้วัตถุดิบนี้เปลี่ยนเป็นเจลหรือปรับโครงสร้างภายในโมเลกุลของวัตถุดิบเสียใหม่ และการอุ่นนั้นจะช่วยให้วัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สุก และเย็นตัวลงเกือบทันทีเมื่อผลิตภัณฑ์โผล่พ้นหน้าแปลนออกมา เวลาที่ใช้ในการหุงต้มนี้ต้องสั้นมาก (short residence time)

2.4.5.2 แบ่งตามการเคลื่อนที่ของความร้อน (thermodynamic characteristics)

1) Autogenous extruder ความร้อนทั้งหมดที่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้รับ (input to the extruder) นั้น มาจากการเสียดสี (friction) คือเปลี่ยนมาจากพลังงานกล และมีเพียงปริมาณเล็กน้อย หรือไม่มีเลยของความร้อนที่เพิ่มขึ้น หรือระบายออกไปจากบาร์เรล collet extruders และ high-shear cooking extruders บางชนิดที่จัดเป็น autogenous extruder เนื่องมาจากอุณหภูมิภายใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป และการจัดรูปแบบของสกรู ดังนั้นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบ autogenous นี้จึงไม่ค่อยคล่องตัวในการที่จะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด และยังยากต่อการควบคุมการทำงานของเครื่องอีกด้วย

2) Isothermal extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ มีระบบการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันเป็นระยะตลอดความยาวของบาร์เรล forming extruders ก็จัดอยู่ในประเภทนี้ เพื่อคงสภาพความร้อนให้เท่ากัน โดยตลอดความร้อนจะถูกระบายผ่านทางช่องว่าง (jacket) ระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลที่อยู่รอบสกรู

3) Polytropic extruders เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แทบทุกชนิดเป็นประเภท polytropic คือ จะได้รับความร้อนจากทั้ง 2 ทางคือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานกล และความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาทางช่องว่างของบาร์เรล

2.4.5.3 แบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อน (moisture characteristics)

1) ความชื้นต่ำ (low moisture) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 พลังงานส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแห้งมาก และมีลักษณะที่พองมาก ทำให้กำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ยาก

2) ความชื้นปานกลาง (intermediate moisture) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นในช่วงร้อยละ 20-28 พลังงานความร้อนครึ่งหนึ่งได้จากแรงเสียดทานที่เหลือได้จากการให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น จาก steam jacket หรือจากการพ่นไอน้ำเข้าไปผสมโดยตรงกับวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นพอควร ต้องผ่านการอบแห้งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ การพองของผลิตภัณฑ์เกิดเพียงเล็กน้อย เนื้อค่อนข้างแน่น ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปร่างของผลิตภัณฑ์

3) ความชื้นสูง (high moisture) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 28 ขึ้นไป พลังงานความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานในแบบนี้จะน้อยมาก ส่วนใหญ่ได้ความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น การพ่นไอน้ำไปผสมกับวัตถุดิบโดยตรง หรือเป็นความร้อนแพร่ผ่านมาทางผนังกระบอกเหล็กสองชั้น โดยการนำจากไอน้ำ ขดลวดไฟฟ้า หรือของเหลวร้อนที่อยู่ในช่องว่างของผนังกระบอกเหล็ก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะไม่ค่อยพอง ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย หลากหลายรูปแบบ แต่ผลิตภัณฑ์นี้มีความชื้นสูง ต้องผ่านขั้นตอนการอบแห้งก่อนที่จะผ่านกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.5.4 แบ่งตามโครงสร้างของเครื่อง (structure characteristics)

1) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ประกอบด้วยสกรู 1 อัน วางยาวตลอดภายในตัวเครื่อง เมื่อสกรูหมุนจะเกิดการผสมของวัตถุดิบ และพาวัตถุดิบเคลื่อนไปตามตัวเครื่อง ความร้อนที่ส่งผ่านให้วัตถุดิบเกิดจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้ภายในเครื่อง และแรงเฉือนระหว่างสกรูกับวัตถุดิบ ความดันภายในเครื่องจะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณใกล้หน้าแปลน ซึ่งเป็นทางออกสู่สภาพบรรยากาศสภาวะปกติ สกรูที่พาดยาวภายในตัวเครื่อง ประกอบด้วย ส่วนที่ส่งวัตถุดิบเข้าไป เพื่ออัดวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนนวด เพื่อการบีบนวด ส่วนผสม และเฉือนเนื้ออาหารที่มีคุณสมบัติคล้ายพลาสติก และมีส่วนของการให้ความร้อนในเครื่องที่ใช้แรงเฉือนสูงด้วย การส่งวัตถุดิบผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวนี้ อาศัยความฝืดที่ผิวของบาร์เรล วัตถุดิบจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการทำงานของเกลียวสกรู และมีบางส่วนเคลื่อนที่ในทางกลับกัน (pressure flow และ leakage flow) ซึ่งเป็นการไหลเนื่องจากแรงดันที่เกิดด้านหลังหน้าแปลน และการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบระหว่างสกรูและบาร์เรล การใช้ผ้าแบบพิเศษหุ้มภายในบาร์เรลจะช่วยลดการลื่นไหลได้ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวใช้เงินลงทุน และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและความชำนาญในการควบคุมดูแลเครื่องน้อยกว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (กมลวรรณ, 2541; วิไล, 2545) ปัญหาที่มักเกิดขึ้น ในการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวคือ ปัญหาการลื่นไหล (slippage) และเกิดการสะอึก (surging) ปัญหาการลื่นไหลมักจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ความดันภายในบาร์เรลสูง ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการลื่นไหลระหว่างสกรูและผนังบาร์เรล ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารไม่ได้รับความร้อนเพียงพอ หรือผ่านกระบวนการผลิตไม่สมบูรณ์ ส่วนปัญหาการสะอึกซึ่งมีลักษณะคือ ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่อง มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ความดันจะเพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารพ่นออกมาเป็นฝอย หรือชิ้นเล็กๆ เมื่อผ่านพ้นหน้าแปลนออกมาโดยไม่สามารถควบคุมได้ (วิไล, 2545)

2) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin screw extruder) มีสกรู 2 สกรูวางข้าง ๆกัน โดยสกรูจะหมุนเป็นรูปเบอร์ 8 อยู่ในบาร์เรล ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบนี้แบ่งได้ตามทิศทางของการหมุน และลักษณะที่สกรูจะหมุนเจอกัน สกรูแบบที่หมุนไปในทิศทางเดียวกันเป็นแบบที่นิยมใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร การหมุนของสกรูทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่ไปตามเกลียวของเครื่อง การหมุนเจอกันช่วยในการผสม และป้องกันการหมุนของวัตถุดิบในบาร์เรล (วิไล, 2545)

ข้อดีของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่เปรียบเทียบกับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1) ผลผลิตที่ได้ไม่ขึ้นกับอัตราการส่งวัตถุดิบเข้ามา สามารถควบคุมความไม่แน่นอนของอัตราการผลิตได้โดยการปรับการทำงานของเกลียวสกรู ในขณะที่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวจะต้องมีการเติมวัตถุดิบให้เต็มเสมอเพื่อการทำงานให้มีประสิทธิภาพ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการควบคุมการถ่ายเทความร้อนดีกว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

2) สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความมัน เหนียว หรือเปียกมากหรือลื่นมาก โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบสกรูคู่มีความยืดหยุ่นในการทำงานดีกว่า

3) ใช้การลำเลียงวัตถุดิบไปข้างหน้าหรือย้อนกลับเพื่อความคุมความดันภายในบาร์เรล เช่นในการผลิตกับผลไม้ อาหารถูกให้ความร้อนและอัดโดยการลำเลียงไปข้างหน้า มีการลดความดันเพื่อลดความชื้นส่วนเกินหรือเพื่อเพิ่มส่วนผสมของอาหาร โดยการลำเลียงย้อนกลับ แล้วอาหารจะถูกอัดใหม่ต่อไป

4) มีส่วนดิสชาร์จสั้น ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดความดันสำหรับการอัดได้ ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องเกิดการสึกหรอน้อยกว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

5) อาจใช้ส่วนผสมของขนาดวัตถุดิบตั้งแต่ละเอียดเป็นผงถึงขนาดเมล็ดถั่ว ในขณะที่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวเหมาะกับขนาดอนุภาคที่เป็นเม็ด

2.4.5 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยว

โดยทั่วไปขนมขบเคี้ยวส่วนมากที่มาจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะผลิตจากข้าวโพดเกล็ด ซึ่งผลิตจากข้าวโพดที่แยกเอารำ (pericarp or barn) และคัพภะ (germ) ออก แล้วนำไปบดให้มีลักษณะเป็นเกล็ดหยาบ (corn grit) หรือโม่ละเอียดเป็นฟลาวร์ (corn flour) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนนี้ยังมี โปรตีน เกลือแร่สูง เหมาะสำหรับใช้ประกอบอาหารในอุตสาหกรรม (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546) ซึ่งข้าวโพดเกล็ดใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวที่เป็นลักษณะสุกพองทันทีโดยวิธีการเอกซ์ทรูชัน เพราะลักษณะของข้าวโพดจะมีสีเหลือง มีกลิ่นเป็นเอกลักษณ์และให้คุณสมบัติการพองตัวที่ดี แต่คุณภาพของข้าวโพดในไทยมีความแตกต่างจากต่างประเทศ และมีความไม่เหมาะสมในด้านการเคลือบกลิ่นรส (Boonyasirikool and Chanuruch, 2000b) สำหรับในประเทศไทยแป้งข้าวโพดยังไม่มีการใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นการผลิตขนมขบเคี้ยวได้มีการพัฒนาใช้วัตถุดิบท้องถิ่นในประเทศที่มีราคาถูกกว่า แต่คงคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น ข้าวหรือ ธัญพืชชนิดอื่นร่วมในการผลิต เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ และวัตถุดิบในประเทศ

ข้าวหอมมะลิ (Jasmine rice)

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย และไทยส่งออกข้าวมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ปัจจุบันตลาดการส่งออกข้าวมีการแข่งขันกันสูงขึ้น โดยที่เวียดนามและพม่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กลายเป็นผู้ส่งออกข้าวแข่งขันกับไทย (กรมการข้าว, 2554) โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิ ซึ่งข้าวหอมมะลิ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza Sativa L.* ข้าวหอมมะลิเป็นชื่อที่ผู้บริโภคนิยมเรียก เพี้ยนมาจากคำว่า ข้าวดอกมะลิ มีชื่อเป็นทางการว่า ข้าวดอกมะลิ 105 หมายถึงข้าวพันธุ์นี้จัดอยู่ในประเภทข้าวขาวเนื่องจากมีเปลือกสีขาวหรือสีฟาง และมีกลิ่นหอมคล้ายดอกมะลิ จัดเป็นข้าวพื้นเมืองถิ่นเดิมอยู่ที่ จังหวัดฉะเชิงเทรา สามารถปลูกได้ทั่วประเทศ เป็นข้าวที่มีคุณสมบัติคือ เป็นข้าวหอมชนิดเรียวยาว (long gain rice) ขาว ใส เป็นเงาแกร่ง มีท้องไข่น้อย เก็บเกี่ยวได้เร็ว คุณภาพการขัดสีดีได้ขนาดมาตรฐานข้าวชั้นหนึ่ง ถ้าเป็นข้าวที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ๆ จะมีกลิ่นหอมมาก เมื่อหุงเป็นข้าวสุกจะได้ข้าวลักษณะเม็ดเลื่อมมัน อ่อนนุ่มและเหนียว มีกลิ่นหอมรับประทานมีรสชาติดี ถ้าเก็บเป็นข้าวเก่า เมื่อนำมาหุงต้มก็ยังคงความนุ่ม แต่ความเหนียวและกลิ่นหอมอาจลดลง และมีอะไมโลสต่ำ (เกษตรวิจัย, 2541) ข้าวเมล็ดเต็ม (whole kernels) หมายถึงเมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ไม่มีส่วนใดหักและรวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป (มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) โดยทั่วไปมีการใช้ประโยชน์จากข้าวทั้งการบริโภคโดยตรง และการนำปลายข้าวหักไปแปรรูปเป็นแป้ง พบว่าปลายข้าวหักมีองค์ประกอบเบื้องต้นคือ แป้งร้อยละ 79.2 โปรตีนร้อยละ 7.0 ไขมันร้อยละ 0.4 เถ้าร้อยละ 0.5 ความชื้นร้อยละ 12 ส่วนที่เหลือร้อยละ 0.5 (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากมาย ส่วนใหญ่จะเป็นข้าวประเภทที่มีอะไมโลสสูงเพราะเมื่อนำไปประกอบอาหาร เช่น ทอด จะให้ความกรอบแข็ง หรือนำไปนึ่งเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดแผ่นฟิล์ม เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ดังนั้นปลายข้าวหอมมะลิจึงไม่นิยมนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมแป้ง และในกลุ่มประเทศตะวันตกไม่นิยมใช้ข้าวในการทำขนมขบเคี้ยวแต่ใช้ข้าวโพดเป็นหลัก ส่วนในประเทศญี่ปุ่นกลับมีการใช้ข้าวหรือแป้งข้าวในการทำขนมขบเคี้ยว (Elaine, 1998) เมื่อนำข้าวมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวพบว่า ข้าวมีลักษณะให้การพองตัวที่ดี สีขาว ไม่มีรสชาติเหมาะแก่การใช้เป็นองค์ประกอบหลักของตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเคลือบกลิ่นรสต่างๆได้ และเมื่อใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการอัดพอง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสที่กรอบแน่นนุ่ม ใกล้เคียงกับกับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าวโพดเกล็ด นอกจากนี้มีความคงตัวในการเก็บที่ดีกว่า (Matz, 1984; รุ่งนภา, 2541) โดยมีคุณค่าทางโภชนาการไม่น้อยไปกว่าข้าวโพดเกล็ด แม้ว่าข้าวจะมีโปรตีนร้อยละ 8.5 ซึ่งต่ำกว่าข้าวโพดเกล็ดที่มี ร้อยละ 9.97 แต่เป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดีกว่าข้าวโพดเกล็ด (ประชา และจุฬาลักษณ์, 2540) และยังมีราคาถูกโดยเฉพาะปลายข้าวหรือข้าวหักที่มีความสามารถในการนำไปแปรรูปต่ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved