บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ความหมายของเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) และเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant dietary fiber, AODF)

2.1.1 เส้นใยอาหาร (Dietary fiber)

เส้นใย (Fiber) เป็นส่วนประกอบในอาหารหลายชนิด เดิมเรียกว่าเส้นใยหยาบ (Crude fiber) ซึ่งหมายถึง สารที่หลงเหลืออยู่ภายหลังการย่อยด้วยกรดและด่าง นั่นคือเซลลูโลส และลิกนินเท่านั้น ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ทำให้พบว่ามีคาร์โบไฮเดรตบางประเภทที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และส่งผลดีต่อสุขภาพ จึงให้ชื่อคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้เสียใหม่ว่าเป็นเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ดังนั้น ความหมายที่แท้จริงของเส้นใยอาหารจึงแตกต่างจากเส้นใยหยาบ ทั้งนี้สามารถนิยามเส้นใยอาหารได้ว่าคือคาร์โบไฮเดรตทุกชนิดที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ และในอาหารทั่วไปพบว่าเส้นใยอาหารมักมีค่ามากกว่าเส้นใยหยาบประมาณ 2-16 เท่า (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551) ในปี ค.ศ. 2004 Van der Kamp et al. ให้ความหมายของเส้นใยอาหารอ้างอิงตาม American Association of Cereal Chemists (2001) ไว้ว่า เส้นใยอาหาร คือ ส่วนของพืชที่สามารถรับประทานได้หรือเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ทนต่อการย่อยและการดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ แต่จะเกิดการหมักบางส่วนหรือทั้งหมดภายในลำไส้ใหญ่ ทั้งนี้เส้นใยอาหารประกอบไปด้วย โพลีแซ็คคาไรด์ โอลิโก แซ็คคาไรด์ ลิกนิน และสารประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ได้แก่ การระบาย การลดคลอเลสเตอรอลในเลือด และการลดปริมาณกลูโคสในเลือด

2.1.2 เส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant dietary fiber, AODF)

เส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ คือ ผลิตผลที่ประกอบด้วยเส้นใยอาหารและสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ โดยต้องมีปริมาณเส้นใยอาหารมากกว่าร้อยละ 50 (น้ำหนักแห้ง) และ 1 กรัมของเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระควรมีความสามารถในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้เท่ากับวิตามินอีอย่างน้อย 200 มิลลิกรัม และขับอนุมูลอิสระเท่ากับวิตามินอีอย่างน้อย 50 มิลลิกรัม และนอกจากนี้ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacity) ต้องเป็นคุณสมบัติจากภายในที่เกิดขึ้นเองจากองค์ประกอบโดยธรรมชาติของวัตถุดิบ ไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ สารเคมี หรือเอนไซม์ใดๆ ทั้งสิ้น (Saura-Calixto, 2003) ซึ่งเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในปริมาณที่เพียงพอสามารถลดปริมาณของไลโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low density lipoprotein; LDL) ในกระแสเลือดได้ และช่วยป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (Saura-Calixto, 1998)

2.2 ประเภทของเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ในการแบ่งประเภทของเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สามารถแบ่งได้เช่นเดียวกับการแบ่งประเภทของเส้นใยอาหารทั่วไป ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามคุณลักษณะ 2 คุณลักษณะ ได้แก่ การแบ่งตามหน้าที่ และการแบ่งตามการละลาย

2.2.1 การแบ่งตามหน้าที่

ปัจจุบันเส้นใยอาหารแบ่งตามหน้าที่ออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) โครงสร้างที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Structural polysaccharides) คือ เส้นใยอาหารที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์และทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์พืช ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคตินบางส่วน

2) โครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Structural non-polysaccharides) คือ เส้นใยอาหารที่ไม่ใช่พอลิแซ็กคาไรด์ แต่ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างของผนังเซลล์พืช ได้แก่ ลิกนิน

3) พอลิแว็กคาไรด์ที่ไม่เป็นโครงสร้าง (Non-structural polysaccharides) คือ เส้นใยอาหารที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ แต่ไม่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พืช ได้แก่ กัม และมิวซิเลจ (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551)

2.2.2 การแบ่งตามการละลาย

1) เส้นใยอาหารประเภทที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; IDF)

เส้นใยอาหารประเภทที่ไม่ละลายน้ำ เป็นส่วนสร้างความแข็งแรงของผนังเซลล์พืช และเป็นโครงสร้างของเนื้อไม้ในพืช เส้นใยอาหารเหล่านี้พบได้ในพืชผักทั่วไป ร่างกายไม่สามารถย่อยและดูดซึมเส้นใยอาหารเหล่านี้ได้ การลำเลียงจากกระเพาะอาหารสู่ลำไส้ใหญ่จึงรวดเร็ว และพร้อมที่จะขับถ่ายออกมา เส้นใยอาหารเหล่านี้จะดูดน้ำไว้กับตัว และเพิ่มปริมาณกากอาหาร ทำให้ขับกากอาหารออกไม่ตกค้างอยู่ในลำไส้ใหญ่นาน จัดเป็นใยอาหารชนิดที่ช่วยขับถ่าย ป้องกันและรักษาอาการท้องผูกเป็นหลัก (นุชนาฏ กิจเจริญ, 2006) เส้นใยอาหารประเภทนี้มีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวติน และไข เป็นต้น โดยเส้นใยอาหารจากธัญพืชจะมีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่าผักและผลไม้ (Figuerala et al., 2005)

2) เส้นใยอาหารประเภทละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber; SDF)

เส้นใยอาหารประเภทละลายน้ำได้ เป็นส่วนของเส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ และสามารถดูดซับสารที่ละลายในน้ำไว้กับตัว โดยเมื่อสัมผัสน้ำจะละลายเกิดเป็นสารข้นหนืดที่สามารถเคลือบผนังกระเพาะอาหารและลำไส้ ผนังกระเพาะอาหารและลำไส้จึงหนามากขึ้น ส่งผลให้รบกวนการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่มีประจุ เช่น แป้ง น้ำตาล และไขมัน เป็นต้น จึงมีผลช่วยป้องกันหรือชะลอการดำเนินของโรคเบาหวานและโรคไขมันในเลือดสูงด้วย และการที่โมเลกุลของเส้นใยอาหารมีส่วนที่เป็นกรดอิสระอยู่ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุกับสารอื่นๆ ที่มากับอาหารหรืออาจเป็นสารพิษที่มีการปนเปื้อนมา กลุ่มของกรดอิสระจะช่วยดูดซับและดึงเอาสารพิษออกได้ จากการเกิดเป็นสารข้นหนืด จึงทำให้เส้นใยอาหารสามารถเพิ่มความหนืดของอาหารโดยรวมด้วย มีผลให้อาหารเคลื่อนตัวได้ช้าลง ซึ่งทำให้อาหารอยู่ในระบบทางเดินอาหารนานขึ้นตามไปด้วย จึงรู้สึกอิ่มได้นานขึ้น และนอกจากนี้เส้นใยอาหาร

ที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะถูกแบคทีเรียในลำไส้ย่อยสลายเป็นกรดไขมันชนิดสายสั้น (Short–chain fatty acid) และถูกดูดซึมได้ จึงเหลือเป็นกากอาหารที่จะเพิ่มปริมาณเนื้ออุจจาระน้อยกว่ากลุ่มเส้นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ แต่หากรับประทานเส้นใยอาหารนี้มากเกินไป หรือรับประทานติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารต่างๆ โดยเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดน้อยลงได้ (กุลศิริ ช.ศิริปุณย์, 2541; นุชนาฏ กิจเจริญ, 2006) ตัวอย่างเส้นใยอาหารประเภทนี้ เช่น เพคติน เบต้า-กลูแคน และกัมชนิดต่างๆ เป็นต้น เส้นใยอาหารเหล่านี้พบได้ในพืช ผัก และผลไม้ ซึ่งในผักและผลไม้จะมีส่วนของเส้นใยที่ละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ (Figuerala et al., 2005) โดยเพคตินพบได้ในผลไม้ตระกูลส้ม เช่น ส้ม ฝรั่ง แอปเปิ้ล ผัก พืชตระกูลถั่ว และพืชราก (หัวบีทและมันฝรั่ง) ส่วนเบต้า-กลูแคน พบในธัญพืชพวกข้าวโอ๊ต ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรย์ ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ข้าว และข้าวโพด (Devries, n.d)

ตาราง 2.1 ปริมาณเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำได้ของสาหร่ายทะเล ผลไม้ ผัก และธัญพืชบางชนิด (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)

แหล่งของเส้นใยอาหาร	**เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ**	**เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ**
สาหร่ายทะเล		
ฮิจิกิ (Hijiki)	32.9	16.3
อะราเมะ (Arame)	59.7	14.9
โนริ (Nori)	17.9	16.8
อัลวา ริจิดะ (Ulva rigida)	19	21
ผลไม้		
แอปเปิ้ล	5.8	7.5
ส้ม	9.8	5.2
พีช	7.1	6.4
มะเขือเทศ	7.4	11.4
อินทผลัม	5.16-6.68	9.19-11.7
ผัก		
แครอท	14.9	11.1
มันฝรั่ง	2.12	4.97
ธัญพืช		
ข้าว	0.19	0.75
ข้าวโอ๊ต	4.21	5.66

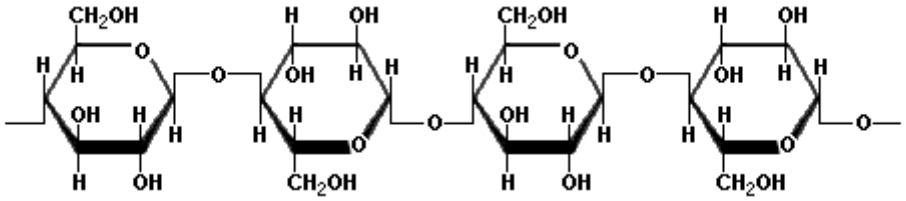
ที่มา : ดัดแปลงจาก Elleuch et al. (2011)

2.3 ชนิดของเส้นใยอาหาร

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์สายตรงของน้ำตาลกลูโคส และเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุด เนื่องจากเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช โดยรวมตัวอยู่กับไซแลน (Xylan) และลิกนิน (Lignin) เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ ทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ กรด และด่างที่เจือจาง ถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ร่างกายคน และสัตว์บางชนิดไม่มีเอนไซม์เซลลูเลสในระบบย่อยอาหาร ทำให้ไม่สามารถย่อยเอนไซม์เซลลูโลสจากพืชเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนสัตว์พวกที่กินพืชเป็นอาหาร (Herbivorous animal) เช่น โค และกระบือ สามารถย่อยเซลลูโลสได้ เนื่องจากในกระเพาะมีจุลินทรีย์ (Rumen microflora) ซึ่งมีเอนไซม์เซลลูเลสช่วยย่อยเซลลูโลสได้ โมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β-D-(1$\rightarrow$4) ซึ่งแตกต่างจากโมเลกุลของสตาร์ชที่น้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α-D-(1$\rightarrow$4) โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นสายยาวไม่มีสายแขนง สายยาวเกาะกันตามแนวราบด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นพอลิคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) ที่แข็งแรงยึดเกาะกันเป็นเส้นใย (Fibrous) เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งแสนถึงสองล้าน สูตรโมเลกุลโดยย่อคือ

$$\text{เซลลูโลส} = (\text{เซลโลไบโอส})_n$$

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในแต่ละหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ซึ่งจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายของพอลิเมอร์ ทำให้บางส่วนของโครงสร้างเป็นผลึก ส่วนที่เกิดผลึกนี้จะมีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนต่อการถูกไฮโดรไลซ์ และสารเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Noncrystalline หรือ Amorphous) นอกจากนี้ส่วนที่เป็นผลึกยังดูดน้ำได้น้อยกว่าด้วย ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ โมเลกุลของเซลลูโลสที่มีดีกรีของส่วนที่เป็นผลึก (Degree of crystallinity) สูงมีความยืดหยุ่น และมีแรงต้าน (Tensile strength) ของเส้นใยเซลลูโลสมากขึ้น ทำให้อาหารที่มีเซลลูโลสในปริมาณมากมีลักษณะเนื้อสัมผัสเหนียว สำหรับส่วนของโมเลกุลเซลลูโลสที่ไม่เป็นผลึกหรือไม่มีรูปร่าง สามารถดูดน้ำ และพองตัวได้มาก เมื่อโมเลกุลเซลลูโลสนี้ได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย มีผลให้โมเลกุลสามารถดูดน้ำได้มากขึ้น ทำให้ส่วนของโมเลกุลที่เป็นผลึกมีปริมาณลดลงด้วย ในทางตรงกันข้ามการลดปริมาณน้ำให้น้อยลง เช่น การอบแห้ง อาจทำให้ส่วนของโมเลกุลที่ไม่เป็นผลึกเปลี่ยนไปเป็นผลึกได้ ดังนั้นจึงพบว่าผักอบแห้งมักมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียวมากขึ้นมี มีค่าความเป็นพลาสติก (Plasticity) และการพองตัวลดลง (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551)

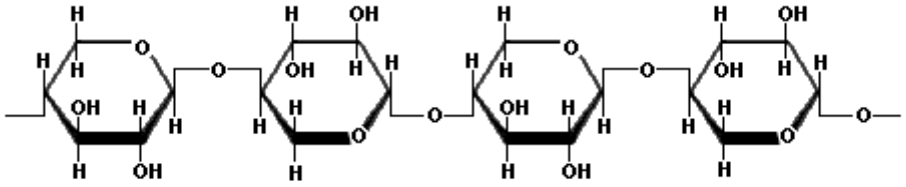


ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เฮมิเซลลูโลสเป็นกลุ่มของเฮทเทอโร พอลิแซ็กคาไรด์ที่ในโมเลกุลประกอบด้วย น้ำตาลตั้งแต่ 2-4 ชนิดขึ้นไป มีทั้งน้ำตาลเฮกโซสและเพนโทส น้ำตาลที่พบมากคือ น้ำตาลไซโลส (D-xylose) และอะราบิโนส (L-arabinose) นอกจากนั้นยังพบน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) แมนโนส (D-mannose) กาแล็กโทส (D-galactose) กรดกลูโคโลนิก (D-glucoronic acid) และ 4-O-methy-D-glucoronic acid ด้วย

เฮมิเซลลูโลสจำแนกออกตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุลได้เป็นไซแลน (Xylans) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลส แมนแนน (Mannans) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแมนโนส การแล็กแทน (Galactans) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกาแล็กโทส อะราบิโนกาแล็กแทน (Arabinogalactans) กลูโคแมนแนน (Glucomannans) และอะราบิโนไซแลน (Arabinoxylans) สำหรับไซแลน เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลสที่ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β-(1 $\longrightarrow$ 4) เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช โดยรวมอยู่กับลิกนินและเซลลูโลส มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารละลายด่าง (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551)



ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html

2.3.3 สารประกอบเพคติน (Pectin substances) เป็นกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบใน Middle lamellae ของผนังเซลล์พืช โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์ สารประกอบเพคตินที่ถูกสร้างขึ้นในพืช คือ โปรโทเพคติน (Protopectin) พบมากในผักและผลไม้ โดยเฉพาะผลไม้ดิบ

สารประกอบเพคตินเป็นพอลิเมอร์สายยาวของกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) หรือ α-D-galactopyranosyluronic acid) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β-(1→4) โดยหมู่ คาร์บอกซิล (-COOH) ในโมเลกุลกรดกาแล็กทูโรนิกบางส่วนจะถูกเอสเทอริไฟด์ด้วยหมู่เมทิลได้เป็นเมทอกซิลเอสเทอร์ และมีบางส่วนยังคงเหลือเป็นหมู่คาร์บอกซิลอิสระ นอกจากนั้นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่คาร์บอนตำแหน่ง 2 และ 3 อาจถูก Acetylated ได้ ในโมเลกุลของสารประกอบ เพคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติยังมีน้ำตาลชนิดอื่นๆปนอยู่ด้วย เช่น น้ำตาลไซโลส กาแล็กโทส อะราบิโนส และแรมโนส โดยโมเลกุลของน้ำตาลจะเกาะอยู่เป็นสายแขนง น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบเพคตินผันแปรอยู่ในช่วงประมาณ 10,000-400,000 ดาลตัน และมีกรดกาแล็กทูโรนิก ประมาณ 300-800 หน่วยต่อโมเลกุลของสารประกอบเพคติน

สารประกอบเพคติน เป็นกลุ่มของสารประกอบเชิงซ้อน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

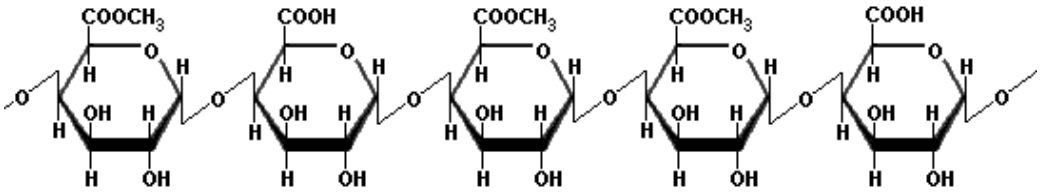
1) โปรโทเพคติน เป็นสารประกอบเพคตินที่ไม่ละลายน้ำ และพบมากในผลไม้ดิบ ในโมเลกุล โปรโทเพคตินมีหมู่เมทอกซิลอยู่ประมาณร้อยละ 9-12 หากเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ จะมีหมู่เมทอกซิลอยู่ในโมเลกุลของโปรโทเพคตินประมาณร้อยละ 16 จัดว่ามี Degree of methoxylation เป็นร้อยละ 100 แต่จะไม่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้ โปรโทเพคตินจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์หรืออาจใช้ด่างจะทำให้หมู่เมทิลถูกแยกออกไปบางส่วนได้เป็นหมู่คาร์บอกซิลอิสระ เรียกว่า กรดเพกทินิก (Pectinic acid) เป็นสารประกอบเพคตินที่ละลายได้ในน้ำ

2) กรดเพกทินิก เป็นสารประกอบเพคตินหรือพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิกที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์เหลืออยู่บางส่วน และเมื่อถูกไฮโดรไลซ์เอาหมู่เมทิลออกจนหมดจะได้กรดเพกทิก (Pectic acid)

3) กรดเพกทิก เป็นสารประกอบเพคตินหรือพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิกที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์อยู่ในโมเลกุลเลย

ดังนั้นสารประกอบเพคตินหรือเพกทิก จึงเป็นการเรียกชื่อรวมๆของกรดเพกทินิกที่มีร้อยละ ของหมู่เมทอกซิล หรือ degree of methoxylation แตกต่างกัน เพคตินเป็น gelling agent ที่ดี สมบัติในการเกิดเจลของเพคตินขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ ความยาวของสายพอลิเมอร์ และ degree of methoxylation และจะเกิดเจลได้ในภาวะที่มีกรดและน้ำตาล โครงสร้างโมเลกุลของเพคตินจะเป็นเกลียว (Coiled) มากกว่าสายตรง และมีพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่าพวกพอลิเมอร์สายยาว เช่น เซลลูโลส สาเหตุอาจเนื่องจากลักษณะและรูปร่างของสาย คือ หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C_2 และ C_3 ซึ่งมีประจุจะไม่เกิดแรงดึงต่อกันกับหมู่ –OH หรือ $–CH_3$ และประจุที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิล

การเกิดเจลของเพคตินจะต้องมีสารช่วยดูดน้ำออกจากโมเลกุล (Dehydrating agent) เช่น น้ำตาล จะช่วยลดการละลายของเพคตินให้น้อยลง และมีกรดในปริมาณที่เหมาะสม โดยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากกรดจะช่วยลดจำนวนประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลให้น้อยลง ทำให้ลดการผลักกันระหว่างปะจุลบที่หมู่คาร์บอกซิล ทำให้สายของเพคตินเข้ามาใกล้กันได้และเกาะตัวกันเป็นตาข่ายเพคตินที่เกิดเจลดีที่สุดคือ เพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลในโมเลกุลประมาณร้อยละ 8 คือ Degree of methoxylation ประมาณร้อยละ 50 (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551)



ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างของเพคติน

ที่มา : http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html

2.3.4 กัม (Gum) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ หรือ สเตบิไลเซอร์ (Stabilizer) ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลหลายประการ ที่ทราบกันดีก็คือใช้กัมเป็นสารให้ความข้นหนืด หรือทำให้เกิดเจล (Gel) นอกจากนั้นกัมยังช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและความรู้สึกเมื่อเคี้ยวอาหาร และช่วยให้อนุภาคในอาหารที่กระจายตัวได้ยากเกิดการกระจายตัวได้ง่ายขึ้น หรือทำให้ของแข็งกระจายตัวได้ในน้ำหรืออิมัลชัน (Emulsion) และเกิดฟอง (ก๊าซกระจายในน้ำ)

กัมมีความสามารถในการยึดเกาะกับน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารข้นหนืดและทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่แข็งช้า ควบคุมการคายน้ำระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนั้นไม่ทำให้ค่า Water activity ลดลง โดยปกติกัมจะมีมวลโมเลกุลสูงและใช้ในปริมาณน้อย เพียงใส่ลงไปในน้ำเล็กน้อยก็จะเกิดเป็นเจลได้ เมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้มีกำไรมากขึ้น เนื่องจากเกิดความข้นหนืดและสามารถเปลี่ยนน้ำจากสภาพของไหลเป็นกึ่งของแข็งหรือเจล

1) กัมจากเมล็ดพืช

เป็นกลุ่มของกาแล็กโทแมนแนนกัมที่สกัดได้จากเมล็ดของพืชตระกูลถั่ว Ceratonia และ Cyamopsis มี 2 ชนิด ได้แก่

โลคัสต์บีนกัม ได้จากเอนโสเปิร์มของเมล็ดจากต้น Carob หรือ Locust bean (Ceratonia siliqua) ซึ่งเป็นไม้ยืนต้นในพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่ง มีขนาดใหญ่สูงประมาณ 40-50 ฟุต มีเมล็ดอยู่ในฝักประมาณ 10 เมล็ดต่อฝัก อาจเรียกว่า carob seed gum ก็ได้ โครงสร้างโมเลกุลของกัมทั้งสองชนิดคล้ายกัน คือ มีโครงสร้างหลักเป็นพอลิเมอร์สายยาวของพอลิแมนแนน ประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนสต่อกันด้วยพันธะ β-(1$\rightarrow$4) และมีแขนงแยกเป็นน้ำตาลกาแล็กโทสโมเลกุลเดี่ยวต่างกันด้วยพันธะ (1$\rightarrow$ 6) โครงสร้างโมเลกุลของโลคัสต์บีนกัมมีอัตราส่วนของน้ำตาลแมนโนสต่อกาแล็กโทสเป็น 4 ต่อ 1 มีน้ำหนักโมเลกุล 310,000 ดาลตัน

โลคัสต์บีนกัมไม่ละลายในน้ำเย็น ต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดเมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำให้เย็นลง โลคัสต์บีนกัมไม่สามารถเกิดเจลได้ต้องนำมาผสมกับแซนแทนกัมจึงจะเกิดเจลได้ และเมื่อรวมกับแคปปา-คาร์ราจีแนนจะเพิ่มความแข็งแรงของเจล ทำให้มีลักษณะเนื้อเปลี่ยนไป และลดการเกิดซินเนอรีซิส หน้าที่หลักของโลคัสต์บีนกัม คือ เพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชัน และช่วยยับยั้งการเกิด

ซินเนอรีซิส ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดที่ใช้โลคัสต์บีนกัม ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอส ขนมหวาน บาร์บีคิวซอส เครื่องดื่ม เนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อ ในเนยแข็งโลคัสต์บีนกัมจะช่วยเร่งให้เกิด Coagulaton เร็วขึ้น และทำให้ได้เนื้อตะกอนของโปรตีนนมเพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 10 ในไอศกรีมโลคัสต์บีนกัมจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อเนียน

กัวร์กัม ได้จากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดจากต้น Guar (Cyamopsis trtragonolobus) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน เป็นพืชตระกูลถั่วเช่นเดียวกัน แต่ทนแล้งได้ดี กัวร์กัมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเมื่อราวปี ค.ศ. 1950 เนื่องจากขาดแคลนโลคัสต์บีนกัมโครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัม เป็นพอลิเมอร์สายยาวของกาแล็กโทแมนแนน มีน้ำหนักโมเลกุล 220,000-250,000 ดาลตัน ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนสที่ต้อกันด้วยพันธะ β-(1→4) และมีแขนงของน้ำตาลกาแล็กโทสหนึ่งโมเลกุลต่อทุกๆ 2 โมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ (1→6) ทำให้อัตราส่วนของน้ำตาลแมนโนสต่อกาแล็กโทสเป็น 2 ต่อ 1 แสดงว่ากัวร์กัมมีแขนงของน้ำตาลกาแล็กโทสมากกว่าโลคัสต์บีนกัม

กัวร์กัมไม่สามารถเกิดเจลได้ แต่อุ้มน้ำและกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น สารละลายที่ได้มีความหนืดสูง และจะให้ความหนืดสูงสุดภายหลังเวลาได้ 2 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะอุ้มน้ำได้มากขึ้นและมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ เมื่อใช้ร่วมกับแซนแทนกัมจะทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช เวลา ความเข้มข้น การคน และขนาดของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกัวร์กัมไม่แตกตัวเป็นไอออนและทนต่อพีเอชได้ช่วงกว้าง คือ พีเอช 4-10 โดยที่ความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่าร้อยละ 5 จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและการเกิดเจล กัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่พีเอช 7.5-9.0 ผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้กัวร์กัม ได้แก่ ขนมหวาน ซอส ซุป ไอศกรีม น้ำสลัด ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำกีวี น้ำสลัด และซุปที่อยู่ในรูปผง

2) กัมจากยางไม้

กัมอะราบิก เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่โมเลกุลอัดกันแน่นมาก โครงสร้างหลักของโมเลกุลเป็นสายยาวประกอบด้วยหน่วยย่อยของเบต้า-กาแล็กโทไพราโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1→3 และแยกแขนงเป็นจำนวนมากด้วยกรดกลูโคโลนิก ซึ่งต่อกันด้วยพันธะ 1→6 ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์น้ำตาล 6 ชนิด คือ น้ำตาลกาแล็กโทส แรมโนส อะราบิโนไพราโนส อะราบิโนฟูราโนส กรดกลูคูโรนิก กรด 4-O เมทิลกลูคูโรนิก และมีโปนตีนอยู่ใยกัมอะราบิกอีกบ้างเล็กน้อย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 240,000-300,000 ดาลตัน

กัมอะราบิกละลายได้ดีทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายกัมอะราบิกที่ความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 40 จะมีความหนืดต่ำมาก และความหนืดของสารละลายกัมอะราบิกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 40-50 สามารถละลายได้ความเข้มข้นสูงสุดถึงร้อยละ 55 จึงเป็นสมบัติพิเศษที่ดีของกัมอะราบิก ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจลของกัมอะราบิกคล้ายสตาร์ช คือ ต้องใช้ความร้อนช่วย สารละลายกัมอะราบิกเจือจางที่ความเข้มข้น

ประมาณร้อยละ 10 เมื่อทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 32.5 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะให้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่สูงที่สุด

กัมแกตติ เป็นยางใสที่ได้จากพืชตระกูล Combretaceae พบมากในประเทศศรีลังกาและอินเดีย บางครั้งเรียก Indian gum ยางที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้ม สีอ่อนมีคุณภาพดีกว่าสีเข้ม กัมแกตติ เป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วยน้ำตาลอะราบิโนส กาแล็กโทส แมนโนส ไซโลส และกรดกลูคูโรนิก ในอัตราส่วน 10 : 6 : 2 : 1 : 2 และมี 6-ดีออกซีเฮกโซส (Deoxyhexose) อีกเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 1 โครงสร้างของโมเลกุลเป็นกรดแอลโดไบโอยูโรนิก (Aldobiouronic acid) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 12,000 ดาลตัน ในโมเลกุลมีส่วนที่ละลายได้และส่วนที่ละลายไม่ได้ในน้ำ แต่สามารถกระจายตัวในน้ำ อนุภาคจะพองตัวออกมีลักษณะคล้ายเป็นเจลได้ และสามารถกระจายตัวได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน และความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สารละลายที่ได้จะมีความหนืดสูงสุดที่พีเอชช่วง 5-7 อย่างไรก็ตาม สารละลายกัมแกตติมีความหนืดน้อยกว่ากัมคารายา แต่มากกว่ากัมอะราบิก

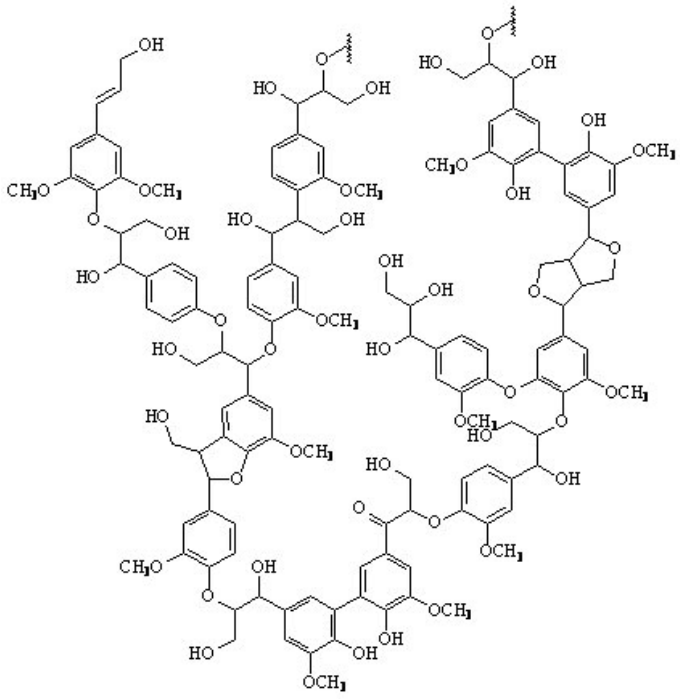
กัมคารายา (Sterdulia gum หรือ Indian Tragacanth) กัมคารายาเป็น Acetylated polysaccharide เชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในโมเลกุลประกอบด้วยกรดกาแล็กทูโรนิก น้ำตาลแรมโนส และกาแล็กโทส ต่อกันเป็นสายหลักและมีสายแขนงเป็นกรดกลูคูโรนิก มีหมู่กรดยูโรนิก ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ และมีหมู่แอซิติลอยู่ประมาณร้อยละ 13.4-22.7 ขึ้นอยู่กับอายุและแหล่งที่ปลูกต้นไม้ กัมคารายามีน้ำหนักโมเลกุล 9,500,000 ดาลตัน ละลายน้ำได้น้อยที่สุด แต่เมื่อทำเป็นผงละเอียดจะเป็นตัวอุ้มน้ำและดูดน้ำได้ดี เมื่อกัมคารายากระจายตัวอยู่ในน้ำสามารถพองตัวออกได้ 70-100 เท่าของปริมาตรเดิม ได้เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ความหนืดของสารละลายจะผันแปรโดยตรงกับ ความเข้มข้น คือเมื่อความเข้มข้นมากสารละลายจะมีความหนืดสูง ถ้าความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 4 จะมีลักษณะเป็น Paste-like gel จึงใช้สมบัตินี้เป็น Strong adhesiveness เมื่อใช้ที่ความเข้มข้นสูงๆ ทำให้ได้สารละลายที่มีความหนืดสูงมากและสมบัติของสารละลายกัมคารายายังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคด้วย การกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าในน้ำร้อน ถึงแม้อุณหภูมิสูงจะทำให้การละลายดีขึ้นก็ตาม การเติมอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง หรืออยู่ในภาวะที่เป็นกรดหรือด่างมากจะทำให้ความหนืดลดลง

กัมทรากาแคนต์ เป็นพอลิแซ็กคาไรด์หลายๆชนิดผสมกัน ในโมเลกุลประกอบด้วยกรด กาแล็กทูโรนิก น้ำตาลกาแล็กโทส ไซโลส และอะราบิโนส เกาะอยู่กับโลหะไอออน คือ แมกนีเซียม แคลเซียม และโพแทสเซียมไอออน มีน้ำหนักโมเลกุล 310,000 ดาลตัน ในโมเลกุลของ กัมทรากาแคนต์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเรียกว่า Basorin มีอยู่ประมาณร้อยละ 60-70 เป็นพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่กระจายตัวในน้ำ แต่อุ้มน้ำและพองตัวได้ดีกลายเป็นเจล อีกส่วนหนึ่งมีปริมาณน้อย เรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่ในโมเลกุลประกอบด้วยกรด กลูคูโรนิก 3 โมเลกุล และน้ำตาลอะราบิโนส 1 โมเลกุล เป็นพอลิเมอร์วงแหวน

กัมทรากาแคนต์กระจายตัวได้ในน้ำเย็น มีความคงตัวต่อความร้อนและทนกรดได้เป็นอย่างดีจนถึง พีเอช 2 นิยมใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์และสารเพิ่มความคงตัวให้กับน้ำสลัด มายองเนส และซอส ส่วนมัสตาร์ดเหลวและซอสมะเขือเทศจะใช้กัมทรากาแคนต์เป็นสารเพิ่มความคงตัวและเพิ่มความหนืด (นิธิยา รัตนปานนท์, 2551)

2.3.5 ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่รวมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดและอายุของไม้โดยไม้ที่มีลิกนินมาก จะมีความแข็งสูงและในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน ลิกนินสามารถกำ จัดอนุมูลอิสระได้และช่วยดึงเอาสารพิษที่ปนเปื้อนเข้าไปกับอาหาร ร่วมกับการที่เส้นใยลดความหมักหมมของกากอาหารในลำไส้ด้วยทำให้ลดการเป็นมะเร็งในลำไส้ (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล, ม.ป.ป.)



ภาพประกอบ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา : www.research.uky.edu/odyssey/win...rgy.html

2.3.6 แป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch) แป้งที่ทนต่อการย่อยชนิดสอง (RS2) เป็นแป้งที่ยังคงรูปร่างหรือคงสภาพอยู่ในเม็ดแป้งและมีความทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ วัดปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยจากความแตกต่างของปริมาณกลูโคสที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างตัวอย่างอาหารที่ผ่านกระบวนการทำให้ความร้อนและทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Boiled homogenized food sample) กับตัวอย่างอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ (Unboiled nonhomogenized food sample) ในแป้งดิบทั่วไปโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง

มีการอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของเม็ดแป้งและดูดความชื้นได้ง่าย ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ตัวอย่างของแป้งชนิดนี้คือ แป้งจากกล้วยดิบ (Sajilata et al., 2006)

2.4 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร

ในปี ค.ศ. 2011 Elleuch และคณะ รายงานว่า หนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของเส้นใยอาหารคือการเลือกวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ให้เหมาะสมกับชนิดของอาหารซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกัน วิธีการวิเคราะห์เส้นใยอาหารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) วิธีที่ไม่ใช้เอนไซม์ และการชั่งน้ำหนัก (Non-enzymatic-gravimetric method), 2) วิธีใช้เอนไซม์ และการชั่งน้ำหนัก (Enzymatic-gravimetric method) และ 3) วิธีการใช้เอนไซม์และการวิเคราะห์ทางเคมี (Enzymatic chemical method) ในปัจจุบันวิเคราะห์เส้นใยอาหารด้วย Enzymatic-gravimetric method เป็นวิธีมาตรฐานซึ่งแนะนำโดย Association of Official Analytical Chemists (AOAC) และ Enzymatic-chemical method ซึ่งเป็นวิธีของ Southgate (1969)

2.4.1 Non-enzymatic-gravimetric method

วิธีนี้เป็นวิธีแรกในการใช้วิเคราะห์เส้นใยอาหาร มีข้อด้อยที่สำคัญคือไม่สามารถวัดองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นจึงได้ปริมาณเส้นใยที่เป็นค่าโดยประมาณ เส้นใยหยาบเป็นองค์ประกอบที่เหลืออยู่หลังจากกำจัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยการย่อยหรือการเกิดออกซิเดชัน การวิเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีนี้ เป็นการแสดงถึงปริมาณรวมทั้งหมดของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่ไม่ละลายในกรด ขณะที่วิธีการวิเคราะห์เส้นใยด้วยสารชะล้างที่เป็นกลางจะแสดงถึงผลรวมของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารชะล้างที่เป็นกลาง (Elleuch et al., 2011)

วิธี Non-enzymatic-gravimetric นิยมใช้ในการวิเคราะห์เส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber; TDF) ของผลไม้ และผัก ซึ่งมีปริมาณสตาร์ชต่ำและหลายชนิดมีการบริโภคโดยไม่ผ่านการหุงต้ม การวิเคราะห์ TDF ด้วยวิธีนี้เป็นการนำตัวอย่างมากระจายและให้แขวนลอยในน้ำ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นตกตะกอนตัวอย่างด้วยเอทธานอลร้อยละ 95 ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมากรอง ชั่งน้ำหนัก และนำไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน และเถ้า ปริมาณ TDF ที่ได้จะให้ผลแม่นยำมากขึ้นเมื่อมีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Enzymatic-gravimetric โดยสรุปแล้วการวิเคราะห์ด้วยวิธี Non-enzymatic-gravimetric มีความเหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์ TDF ในอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชต่ำ (Jeon and Ikins, 1995)

2.4.2 Enzymatic-gravimetric method

การวิเคราะห์เส้นใยอาหารทั้งหมดด้วยวิธีนี้คือการวิเคราะห์โดยใช้เอนไซม์ ได้แก่ เอนไซม์โปรติเอส (Protease) เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α-Amylase) และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase) เพื่อกำจัดสตาร์ช และโปรตีน จากนั้นทำให้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตกตะกอนด้วยเอทธานอลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบร่วมด้วย แล้วกรองและชั่งน้ำหนักเส้นใยอาหารส่วนที่เหลือ อีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโปรตีนและเถ้า การวิเคราะห์เส้นใยอาหารทั้งหมด

ด้วยวิธีนี้ เป็นการวัดเพื่อหาปริมาณของสารประกอบในกลุ่มของโพลีแซ็คคาไรด์ ลิกนิน แป้งที่ทนต่อการย่อยบางชนิด และองค์ประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แว็กซ์ สารประกอบฟีนอลิก และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด แต่ไม่สามารถหาปริมาณโอลิโกแซ็คคาไรด์ และแป้งที่ทนต่อการย่อยชนิดอื่นๆได้ การวิเคราะห์ด้วยวิธี Enzymatic-gravimetric สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ และเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ซึ่งทำให้ทราบปริมาณของเส้นใยอาหารในอาหารหลายชนิดได้อย่างแม่นยำ และนอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างอาหารได้โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอนไซม์ เวลาในการบ่ม ชนิดของบัฟเฟอร์ และรีเอเจนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Elleuch et al., 2011; Jeon and Ikins, 1995)

2.4.3 Enzymatic chemical method

วิธี Enzymatic chemical เป็นวิธีการวิเคราะห์เส้นใยอาหารจำพวกโพลีแซ็คคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (Non-starch polysaccharide) ซึ่งคิดค้นโดย Southgate ในปี ค.ศ. 1969 การวิเคราะห์ในขั้นตอนแรกเริ่มด้วยการใช้เอนไซม์เพื่อย่อยสตาร์ช และโปรตีน จากนั้นตกตะกอนเส้นใยอาหารด้วยเอทธานอลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ หรือสารที่ใช้สำหรับคัดแยกเส้นใยอาหารที่เป็นโพลีแซ็คคาไรด์ที่ละลายน้ำจากน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสตาร์ช ทั้งนี้การแยกเส้นใยอาหารที่เป็นโพลีแซ็คคาไรด์ที่ละลายน้ำออกจากน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยสารคัดแยกนี้มีข้อดีเหนือกว่าการตกตะกอนด้วยเอทธานอล คือช่วยลดการสูญเสียเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลที่เป็นกลางซึ่งได้จากการย่อยโพลีแซ็คคาไรด์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Gas-liquid chromatography (GLC) หรือ High-performance liquid chromatography (HPLC) นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปของปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) หรือกรดยูโรนิก (Uronic acid) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Colourimetric method และตรวจวัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดได้โดยใช้ Spectrophotometer ส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลือหลังจากการย่อยโพลีแซ็คคาไรด์ทั้งหมดหรือโพลีแซ็คคาไรด์ที่ไม่ละลายน้ำจะถูกนำมากรองและตรวจวัดหาปริมาณของลิกนิน ด้วยวิธี Klason lignin gravimetrically

ปริมาณน้ำตาลที่เป็นกลาง กรดยูโรนิก และลิกนินวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี Uppsala ซึ่งเริ่มต้นด้วยการกำจัดน้ำตาลในตัวอย่างอาหาร แล้วนำเส้นใยอาหารทั้งหมด (เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำและลายน้ำได้) ไปตกตะกอนด้วยเอทธานอลร้อยละ 80 ปั่นเหวี่ยงรวบรวมตะกอนซึ่งเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำได้ จากนั้นนำไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และนำไปหาปริมาณของน้ำตาลที่เป็นกลางด้วย GLC หาปริมาณกรดยูโรนิก และลิกนินด้วย Colourimetric method และ Klason lignin gravimetrically method ต่อไป

Enzymatic method เป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ได้เพียงโพลีแซ็คคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช และ ลิกนินเท่านั้น ส่วนโอลิโกแซ็คคาไรด์ และแป้งที่ทนต่อการย่อยจะไม่สามารถตรวจวัดหาปริมาณได้ เนื่องจากการใช้เอทธานอลร้อยละ 80 ทำให้โพลีแซ็คคาไรด์เกิดการตกตะกอน และไดเมทธิลซัลฟอกไซด์ (Dimethy sulfoxide ; DMSO) จะละลายสตาร์ชทั้งหมด (ทั้งแป้งส่วนที่ทนต่อการย่อย และแป้งที่ไม่ทนต่อการย่อย) สตาร์ชทั้งหมดในตัวอย่างอาหารจะถูกย่อยโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการวิเคราะห์เส้นใยอาหารด้วยวิธี Enzymatic chemical จะประเมินปริมาณเส้นใยอาหารต่ำ

กว่าความเป็นจริง เนื่องจากเกิดการสูญเสียโพลีแซ็คคาไรด์ระหว่างการย่อย หรือ โพลีแซ็คคาไรด์บางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นอนุพันธุ์ของโพลีแซ็คคาไรด์เหล่านั้น เมื่อใช้เทคนิคในการวิเคราะห์เป็น GLC

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์หาเส้นใยอาหารทั้งสามวิธี ได้แก่ Non-enzymatic-gravimetric Enzymatic-gravimetric method และ Enzymatic chemical method พบว่าทั้งสามวิธีตรวจวัดได้ปริมาณเส้นใยอาหารแตกต่างกัน โดยวิธี Non-enzymatic-gravimetric ของ AOAC ให้ปริมาณเส้นใยอาหารมากที่สุด และวิธี Enzymatic chemical method เป็นวิธีที่ตรวจพบปริมาณเส้นใยอาหารต่ำที่สุด

2.5 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

2.5.1 การละลาย

เส้นใยอาหารแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ซึ่งเส้นใยอาหารจะอยู่ในรูปใดนั้นจะทราบได้เมื่อมีการผสมกับน้ำ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ ได้แก่ สารประกอบเพคติน กัม มิวซิเลจ และเฮมิเซลลูโลสบางชนิด ขณะที่เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสชนิดอื่นๆ และลิกนินจะเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งความสามารถในการละลายเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโพลีแซ็คคาไรด์ ซึ่งจะสามารถละลายได้หรือไม่สารมารถละลายได้ขึ้นอยู่กับ Back bone หรือขนาดของสายโซ่ (Side chain) โดยพบว่าการมีกลุ่มที่เข้ามาแทนที่ เช่น COOH หรือ SO_4^{2-} ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของเส้นใยอาหารได้ นอกจากนี้ความสามารถในการละลายยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความแรงของไอออนด้วย

โพลีแซ็คคาไรด์มีความสามารถในการละลายที่ค่อยข้างมาก บางชนิดสามารถละลายได้ในน้ำเย็นและบางชนิดสามารถละลายได้เพียงในน้ำร้อนเท่านั้น ส่วนประเภทที่ไม่ละลายน้ำแม้จะละลายในน้ำเดือดก็ไม่สามารถละลายได้ โครงสร้างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลเป็นสองปัจจัยที่มีความสำคัญในการละลายได้ของโพลีแซ็คคาไรด์ และนอกจากนี้ สายโซ่ของโพลีแซ็คคาไรด์มีหมู่ไฮดรอกซิล อะตอมของออกซิเจน และหมู่อื่นๆ จำนวนมาก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ ปฏิกิริยาดังกล่าวควบคุมความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร ซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของอาหาร (Cui, 2005)

2.5.2 คุณสมบัติในการจับกับน้ำ (Hydration properties) และความสามารถในการจับกับน้ำมัน (Oil-binding capacity)

คุณสมบัติในการจับกับน้ำของเส้นใยอาหาร ตรวจวัดได้จากความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) และการพองตัว (Swelling) ของเส้นใยอาหาร ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำหมายถึงปริมาณน้ำที่เส้นใยอาหารสามารถดูดซับเข้าไป การดูดซับน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยอาหารที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของรูพรุนบนพื้นผิวของเส้นใยอาหาร

ความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหาร หมายถึงปริมาณของน้ำที่เส้นใยอาหาร 1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) สามารถสะสมไว้ได้ ภายใต้สภาวะเจาะจงของอุณหภูมิ เวลาที่ใช้แช่เส้นใยอาหารในน้ำ และความเร็วของการปั่นเหวี่ยง อย่างไรก็พบว่ามีการสูญเสียของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ระหว่างการวิเคราะห์ การสูญเสียนี้ส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ ปริมาณของน้ำที่วัดได้จาก

การปั่นเหวี่ยงทั่วไปจะมีปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำที่ดูดซับด้วย Baumann apparatus ส่วนในด้านคุณสมบัติการพองตัว สามารถวัดได้จากเทคนิคการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งวัดการพองตัวของเส้นใยโดยการแช่เส้นใยน้ำข้ามคืนภายในกระบอกตวงที่มีปริมาตรคงที่ (Volumetric cylinder) คุณสมบัติในการจับน้ำของเส้นใยอาหารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบของโพลีแซ็คคาไรด์ และปัจจัยอื่นๆ เช่น ความพรุน ขนาดของอนุภาค รูปของไอออน ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความแรงของไอออน ชนิดของไอออนในสารละลาย และความเครียดของเส้นใยอาหาร ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง ความแรงของไอออน ชนิดของไอออนมีผลต่อเส้นใยอาหารที่มีองค์ประกอบของสารพวกโพลีอิเล็กโทรไลท์ (Polyelectrolytes)

การพองตัว และการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหาร เป็นคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์สำหรับการนำเส้นใยอาหารไปประยุกต์ใช้ในในอาหาร ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับน้ำช่วยบ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของเส้นใยในอาหารหรือระหว่างที่เคลื่อนที่อยู่ในลำไส้ได้ องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายวิภาค และลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอาหารมีผลต่อค่าการพองตัวและการดูดน้ำ และนอกจากนี้กระบวนการในการแปรรูป เช่น การบด การทำแห้ง การให้ความร้อน หรือการอัดรีดในระหว่างการปรุง ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ จึงส่งผลต่อคุณสมบัติในการจับกับน้ำด้วย และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหารจากอาหารแต่ละชนิดพบว่า เส้นใยอาหารจากสาหร่ายมีความสัมพันธ์กับน้ำ และน้ำมันสูงกเส้นใยอาหารจากผลพลอยได้ของน้ำผลไม้ ธัญพืชมีความสัมพันธ์กับน้ำและน้ำมันต่ำที่สุด ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้มีความเกี่ยวข้องกับกับคุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยอาหาร

ความสามารถในการจับกับน้ำมัน เป็นคุณสมบัติที่บอกถึงปริมาณของน้ำมันที่สะสมในเส้นใยอาหารหลังจากการผสม และบ่มเส้นใยอาหารในน้ำมัน จากนั้นปั่นเหวี่ยงแยกน้ำมันออก ความสามารถในการจับกับน้ำมันของเส้นใยอาหารจากธัญพืช เช่น รำข้าวสาลี เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติบนพื้นผิวอนุภาคของเส้นใยอาหาร และอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโดยรวม รวมไปถึงความชอบน้ำขององค์ประกอบในเส้นใยอาหาร เช่นใน แอลจิเนต (Alginate) และฟุกแคน (Fucan) ในสาหร่าย (Elleuch et al., 2011)

ตาราง 2.2 ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมันของผลไม้และผักบางชนิด

แหล่งของเส้นใย	การอุ้มน้ำ (g water/g)	การอุ้มน้ำมัน (g oil/g)
เส้นใยเข้มข้นจากส้ม	7.3	1.27
เส้นใยเข้มข้นจากพีช	12.1	1.09
เส้นใยเข้มข้นจากอินทผลัม	15.6	9.75
เปลือกมะนาว	6.96-12.84	-
รำข้าวปราศจากไขมัน	4.89	4.54
ชานอ้อย	7.5	11.3
เส้นใยเข้มข้นจากมะม่วง	11	1
เส้นใยจากแครอท	18.6	5.5
หน่อไม้ฝรั่ง	11.4-20.3	5.28-8.53

ที่มา : ดัดแปลงจาก Elleuch et al. (2011)

2.5.3 ความหนืด

ความหนืดของของเหลว คือการต้านการไหลของของเหลวนั้นๆ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน และแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพระหว่างโพลีแซ็คคาไรด์ในสารละลาย โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น สารละลายโพลีแซ็คคาไรด์ส่วนใหญ่มีลักษณะการไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-newtonian flow) ทั้งนี้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำเป็นองค์ประกอบหลักที่ช่วยเพิ่มความหนืดของสารละลาย โดยความหนืดขึ้นอยู่กับลักษณะภายในของโพลีแซ็คคาไรด์ (ปริมาณของพื้นที่ที่เกิดจากโพลิเมอร์ทั่วไป) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโพลีแซ็คคาไรด์ ตัวทำละลาย และอุณหภูมิ โดยโพลีแซ็คคาไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ โมเลกุลสามารถแยกจากกันได้ดี ทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปได้อย่างอิสระ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของโพลีแซ็คคาไรด์สัมผัสกันได้มากขึ้น และแรงของโมเลกุลจะผ่านเข้าไประหว่างโมเลกุลของกันและกันเกิดเป็นเครือข่ายที่เชื่อมพันกัน เมื่อเกิดการเชื่อมพันกันขึ้นความหนืดของสารละลายโพลีแซ็คคาไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เวลาเดียวกันพบว่าความหนืดมีค่าขึ้นกับอัตราเฉือนมากกว่า ในระบบการย่อยอาหารของมนุษย์ อนุภาคที่เป็นของแข็งสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหลได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีแซ็คคาไรด์ที่ละลายน้ำความหนืดภายในที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าของเหลวในระบบการย่อย (กระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก) ที่มีปริมาณของโพลีแซ็คคาไรด์ที่แตกต่างกันจะเป็นตัวกำหนดความหนืดโดยรวมความเข้มข้นในลูเมน (Lumen) อาจมีความแตกต่างกันจากการรับประทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาตรรวมของการย่อยจะมีการปรับตัวในการตอบสนองการย่อยของสารละลายที่หนืด โพลีแซ็คคาไรด์สามารถเกิดการแตกตัวของโมเลกุลโพลิเมอร์ได้เมื่อผ่านระบบทางเดินอาหารส่วนบน (Guillon and Champ, 2000)

2.5.4 คุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant properties)

อนุมูลอิสระ (Free radical) คือสารที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว (ไม่มีคู่) ที่อยู่วงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล เป็นโมเลกุลที่มีอะตอมที่ไม่เสถียร เนื่องจากขาดอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัว มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ปกติแร่ธาตุในร่างกายจะมีอิเล็กตรอนอยู่วงรอบเป็นเลขคู่ ซึ่งทำให้โมเลกุลนั้นคงตัว ในกรณีที่มีการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือรับอิเล็กตรอนมาอีกหนึ่งตัว จะทำให้โมเลกุลนั้นไม่เสถียร กลายเป็นสารที่มีความอันตราย และเกิดการแย่งอิเล็กตรอนมาจากอะตอมของสารอื่น และทำให้สารอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระต่อไปอีกเรื่อยๆ

ในสภาวะปกติร่างกายมีกระบวนการควบคุมอนุมูลอิสระไม่ให้มีในปริมาณที่มากเกินไป โดยอาศัยสารต้านอนุมูลอิสระทั้งที่ร่างกายสร้างขึ้นเอง เช่น กลุ่มของเอนไซม์ ได้แก่ Superoxide dismutase Glutatathaione peroxidase และ Catalase เป็นต้น และกลุ่มของโปรตีนที่สามารถจับโลหะได้ (Metal binding proteins) ได้แก่ Ferritin Ceruloplasmin Transferrin และ Uric acid หากกระบวนการเหล่านี้ต่ำลงหรือมีภาวะที่ทำให้อนุมูลอิสระสูงขึ้นมากในร่างกาย จะส่งผลให้สมดุลของร่างกายเสียไป เรียกภาวะนี้ว่า “การเครียดจากออกซิเดชัน” (Oxidation stress) เมื่ออยู่ในภาวะเครียดจากออกซิเดชันร่างกายจะทำลายสารชีวโมเลกุล ได้แก่ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และสารพันธุกรรม เป็นเหตุให้เกิดอันตรายต่อเซลล์ และเนื้อเยื่อต่างๆ ดังนั้นมนุษย์จึงต้องได้รับสารที่สามารถช่วยกำจัดอนุมูลอิสระเพิ่มเติมจากภายนอกร่างกาย เช่น อาหารจำพวกผัก ผลไม้ และสมุนไพร เป็นต้น อาหารเหล่านี้มีสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ เช่น สารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี วิตามินอี และเบต้าแคโรทีน เป็นต้น (อนุชิตา มุ่งงาม, 2553)

ผลไม้ ผัก และเครื่องดื่มบางชนิด เป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติที่มีความสำคัญ เช่น ฟลาโวนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิกชนิดต่างๆ โดยสารเหล่านี้มีผลทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ สามารถยับยั้งการรวมตัวของเกล็ดเลือด ช่วยต้านจุลินทรีย์ และช่วยต้านปฏิกิริยาการอักเสบ อาหารที่มีฟลาโวนอยด์เป็นองค์ประกอบเกี่ยวข้องกับการลดความเสี่ยงโรคหลอดเลือดหัวใจและมะเร็ง (Saura-Calixto, 1998)

ตาราง 2.3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของผลไม้บางชนิด

ชื่อผลไม้	FRAP value (μmol Fe(II)/g)	TEAC (μmol Trolox/g)	ปริมาณฟีนอลิก (mg GEA/100g)
แอปเปิ้ล (เขียว)	9.34	4.98	68.29
แอปเปิ้ล (แดง)	5.90	4.62	73.96
อะโวกาโด	2.76	1.16	21.86
กล้วย	5.33	3.44	57.13
แคนตาลูป	4.51	2.56	31.5
ซิตรัส (ประเทศไทย)	8.92	3.71	69.91
ทุเรียน	7.41	4.98	79.15
องุ่น (เขียว)	4.95	1.27	23.20
องุ่น (แดง)	6.70	3.95	80.28
ฝรั่ง	23.80	15.18	194.11
มะนาว	6.06	2.54	61.47
มังคุด	0.11	3.34	43.68
สับปะรด	14.50	5.93	94.04

ที่มา : ดัดแปลงจาก Fu et al. (2011)

2.6 ผลกระทบจากกระบวนการแปรรูปต่อคุณสมบัติของเส้นใยอาหาร

กระบวนการแปรรูปอาหารมีหลายรูปแบบ ได้แก่ กระบวนการทางเคมี เชิงกล ความร้อน และเอนไซม์ พบว่ากระบวนการแปรรูปอาหารเหล่านี้มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใยอาหาร เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี เคมีกายภาพ สารอาหาร และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหาร นอกจากนี้ยังมีผลในด้านสรีระวิทยาของเส้นใยอาหาร ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ ผลกระทบของกระบวนการแปรรูปอาหารชนิดต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยอาหารมีดังนี้

2.6.1 กระบวนการเชิงกล

การใช้กระบวนการเชิงกล เช่น การกวน เป็นการเปิดโครงสร้างด้วยการเฉือนเชิงกล ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระจากเซลลูโลสสามารถจับกับน้ำได้ ส่วนการบดสามารถส่งผลต่อคุณสมบัติของเส้นใยด้วย โดยทำให้เกิดความเสียหายแก่บริเวณที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ทำให้ลดความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใย นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเป็นผลให้เพิ่มพื้นที่บริเวณพื้นผิว การบดสามารถเพิ่มหรือลดคุณสมบัติในการจับกับน้ำของวัตถุดิบบางชนิดได้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (Elleuch et al., 2011) ดังแสดงในตาราง 2.4

ตาราง 2.4 ผลของขนาดอนุภาคต่อคุณสมบัติในการจับกับน้ำของเส้นใยบางชนิด

แหล่งของเส้นใย	ขนาดอนุภาค (μm)	การพองตัว (ml g^{-1})	ความจุน้ำ (g water g^{-1} dry pellet)	การดูดน้ำ (ml water g^{-1} dry fiber)
หัวบีท	500-200	11.5	26.5	
		19.3	32.9	
	390	14.7	19.7	
	385	21.4	22.6	8.8
	205	15.9	19.2	7.3
	540	11.0	26.6	
	600	13.5	7.2	
พืชตระกูลส้ม	540	15.7	10.4	7.0
	235	13.3	8.6	7.0
	420	14.7	10.4	
	139	10.4	10.7	4.6
แอปเปิ้ล	500	6.0	7.1	2.4
	80	5.6	7.1	2.7
	950	9.9	4.3	1.9
	300	7.8	6.2	2.8
	100	6.5	3.9	3.3
	61	6.6	3.8	3.7
แป้งที่ทนต่อการ	40	5.6	3.5	3.0
ย่อย	80	7.4	3.1	3.9

ที่มา : ดัดแปลงจาก Guillon and Champ (2000)

2.6.2 การหมักและการใช้เอนไซม์

การหมัก เป็นการเปลี่ยนแปลงด้วยการกระตุ้นจากกิจกรรมของเอนไซม์ เอนไซม์ที่ตรวจพบส่วนใหญ่คือ อะไมเลส (Amylase) โปรติเอส (Protease) โพลีกาแลคตูโรเนส (Poligalacturonase) เซลลูเลส (Cellulase) และเบต้า-กาแลคโตซิเดส (β-galactosidase) การใช้เอนไซม์สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ โดยการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่เป็นวัตถุดิบ และธรรมชาติของเอนไซม์ เอนไซม์ทำให้โพลีแซ็คคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ลดลงแตกต่างกัน ส่วนใหญ่จะเกิดการสูญเสียเส้นใยอาหารส่วนที่ละลายน้ำ ได้แก่ โพลีแซ็คคาไรด์ที่เป็นกลาง และเพคติน (Redriguez et al., 2006)

2.6.3 การใช้ความร้อน

กระบวนการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่มักเป็นการประยุกต์ใช้ความร้อนในอาหาร ได้แก่ การหุงต้ม และการบรรจุกระป๋อง การใช้ความร้อนทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของเส้นใยอาหาร ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงผลของความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและสรีระวิทยาของเส้นใย และพบว่าการต้มที่โดยทั่วไปใช้เวลาสั้น เป็นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยน้ำที่ 100 องศาเซลเซียส ด้วยไอน้ำหรือไมโครเวฟ กระบวนการแปรรูปอาหารกระบวนการนี้มีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย อย่างไรก็ตาม พบว่าการให้ความร้อนด้วยกระบวนการนี้อาจส่งผลให้อาหารเกิดลักษณะที่ไม่พึงปรารถนาบางอย่าง เช่น เนื้อเยื่อของพืชมีความอ่อนนุ่มมากจนเกินไป สูญเสียสี และรสชาติ หรือเกิดสี และรสชาติที่ผิดปกติ (Rodriguez et al., 2006) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การใช้ความร้อนด้วยวิธีการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ และปริมาณโพลิฟีนอล แทนนิน แอนโทไซยานิน และโปรตีนในเส้นใยอาหาร (Figuerola et al., 2005)

2.7 มะม่วง

2.7.1 ลักษณะทั่วไป

มะม่วงแก้วเป็นมะม่วงพื้นบ้านทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางของประเทศไทย อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Mangifera indica L. มะม่วงแก้วมีชื่อเรียกกันอีกหลายชนิดพันธุ์ตามคุณลักษณะผลและแหล่งปลูกแต่ยังคงเรียกชื่อว่า “แก้ว” นำหน้าอยู่ทุกพันธุ์ เช่น แก้วดำ แก้วแดง แก้วขาว แก้วเขียว และแก้วจุก เมื่อผลยังดิบผิวเปลือกของมะม่วงแก้วมีสีเขียวเข้ม เนื้อสีนวล หยาบ มีเปอร์เซ็นต์แป้งในผลมาก รสเปรี้ยว แต่เมื่อแก่จัดมีรสมันอมเปรี้ยว ผลลักษณะกลมป้อมเมื่อสุกผิวมีเปลือกสีเขียวปนเหลือง สีเนื้อเหลือง ลักษณะเนื้อหยาบ รสออกหวานอมเปรี้ยว เมล็ดใหญ่มีเนื้อในเมล็ดเต็ม พันธุ์มะม่วงของไทยแบ่งออกตามประโยชน์ที่ใช้ได้ 3 ประเภท คือ

1) มะม่วงกินสุก ผลของมะม่วงประเภทนี้ขณะที่ดิบอยู่จะมีรสเปรี้ยวมาก แต่พอเริ่มสุกแป้งจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาล พอสุกได้ที่รสจะหวานอร่อย ตลาดโลกส่วนใหญ่รู้จักแต่มะม่วงกินสุกเท่านั้น นอกจากจะใช้ประโยชน์ในรูปรับประทานผลสุกแล้ว ยังใช้ประกอบอาหารหวานได้อีกหลายอย่าง พันธุ์มะม่วงกินสุกของไทย เช่น อกร่อง ทองแดง แรด น้ำดอกไม้ โชคอนันต์ เป็นต้น

2) มะม่วงมันหรือมะม่วงกินดิบ ใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่ระยะยังไม่แก่จนถึงแก่จัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ บางพันธุ์ต้องปล่อยให้ผลอยู่ในสภาพแก่จัดเสียก่อนจึงจะอร่อย มะม่วงมันมีตลาดอยู่อย่างจำกัด ส่วนใหญ่เราใช้บริโภคภายในประเทศ มีส่งออกไปขายตลาดต่างประเทศบ้างไม่มากนัก พันธุ์มะม่วงมันของไทย เช่น พิมเสนมัน เขียวเสวย ศาลายา ฟ้าลั่น หนองแซง เป็นต้น

3) มะม่วงแปรรูป ผลมะม่วงอาจนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง เช่น มะม่วงดอง แยมมะม่วง ไวน์มะม่วง มะม่วงตากแห้ง เป็นต้น มะม่วงทุกพันธุ์ไม่สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ทุกชนิด ผลิตภัณฑ์บางชนิดต้องการพันธุ์มะม่วงที่มีลักษณะเฉพาะโดยพันธุ์มะม่วงที่มีบทบาทในการแปรรูปนั้น จะต้องเป็นพันธุ์ที่ปลูกกันมากและราคาไม่แพงจนเกินไป

2.7.2 คุณค่าทางโภชนาการ

คุณค่าทางอาหารของมะม่วงเมื่อคิดจากส่วนที่เป็นเนื้อมะม่วงที่รับประทานได้ จำนวน 100 กรัมแสดงไว้ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 คุณค่าทางอาหารในส่วนที่รับประทานได้ของมะม่วงดิบปริมาณ 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย	สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
น้ำ	81.71	กรัม	โพแทสเซียม	156	มิลลิกรัม
พลังงาน	65	กิโลแคลอรี่	วิตามินซี	27.7	มิลลิกรัม
โปรตีน	0.51	กรัม	ไทอะมีน	0.06	มิลลิกรัม
ไขมันทั้งหมด	0.27	กรัม	ไรโบฟลาวิน	0.06	มิลลิกรัม
คาร์โบไฮเดรต	17	กรัม	ไนอาซิน	0.58	มิลลิกรัม
ใยอาหาร	1.80	กรัม	กรดเพนโธทินิก	0.16	มิลลิกรัม
เถ้า	0.50	กรัม	โฟเลต	14	ไมโครกรัม
แคลเซียม	10	มิลลิกรัม	วิตามินบี 6	0.13	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.13	มิลลิกรัม	วิตามินบี 12	-	ไมโครกรัม
แมกนีเซียม	9	มิลลิกรัม	วิตามินเอ	3894	ไอยู
ฟอสฟอรัส	11	มิลลิกรัม	วิตามินอี	1.13	มิลลิกรัม

ที่มา : รุ่งอรุณ หอมดอก (2545)

มะม่วงมีปริมาณน้ำตาลและกรดแตกต่างกันตามสายพันธุ์ และความแก่ของผล คาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่ในมะม่วงสุกอยู่ในรูปของน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตส นอกจากนี้ยังพบมอสโตสอยู่บ้าง พบคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชเป็นองค์ประกอบในปริมาณเล็กน้อย คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และแพคติน มะม่วงดิบอ่อนมีแป้งเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง แป้งในผลมะม่วงที่กำลังแก่มักถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งบางส่วนของน้ำตาลรีดิวซ์นี้จะถูกสังเคราะห์ไปเป็นซูโครส ในระยะหลังผลสุกซูโครสจะสลายตัวเป็นไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ผลมะม่วงที่แก่เต็มที่แต่ยังไม่สุกมักประกอบไปด้วยกรดซิตริก กรดมาลิค กรดอ๊อกซาลิค กรดซัคซินิค และกรดอื่นอีก 2 ชนิด ทั้งนี้พบกรดซิตริกในปริมาณสูงกว่ากรดชนิดอื่น ในระหว่างที่ผลมะม่วงเริ่มสุก ความเป็นกรดจะลดลง และเหลืออยู่ในปริมาณต่ำที่สุดขณะผลสุก นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ในมะม่วงได้ ซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน

1) เซลลูโลส เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ ที่ตำแหน่ง β-1,4 เป็นสายโซ่ยาวตั้งแต่ 200-14,000 โมเลกุล ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์

2) เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด ทั้งน้ำตาลเฮกโซส และแพนโทส ได้แก่ ไซโลส อะราบิโนส กลูโคส แมนโนส และกาแล็กโตส

โดยเฮมิเซลลูโลสจะแทรกตัวและยึดเกาะโมเลกุลของเซลลูโลสในผนังเซลล์จึงให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ด้วยเช่นกัน

3) สารประกอบเพคติน โมเลกุลของเพคตินส่วนใหญ่จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของผนังเซลล์เรียกว่า Middle lamella เพคตินจึงทำหน้าที่เชื่อมยึดแต่ละโมเลกุลในผนังเซลล์เข้าด้วยกัน เพคตินเป็นพอลิเมอร์ของกรดกาแลคทิวโรนิก ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกาแล็กโตสเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง β-1,4 ซึ่งคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 6 อยู่ในหมู่คาร์บอกซิลอิสระ นอกจากนี้คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 และ 3 ยังอาจถูก Acetylated ได้ในโมเลกุลของเพคติน ยังประกอบด้วยน้ำตาลอีกหลายชนิด เช่น น้ำตาลไซโลส อะราบิโนส และแรมโนส โดยโมเลกุลของน้ำตาลจะเกาะอยู่เป็นสายแขนง น้ำหนักโมเลกุลของเพคตินผันแปรอยู่ในช่วงประมาณ 10,000-400,000 และมีกรดกาแลคทิวโรนิกประมาณ 300-800 หน่วยต่อโมเลกุล

คุณสมบัติในการละลายน้ำของเพคตินขึ้นกับความยาวของสายพอลิเมอร์และจำนวนหมู่เมธิลที่อยู่ในโครงสร้าง ถ้าสารประกอบเพคตินมีสายโมเลกุลสั้นและมีหมู่เมธิลน้อย นั่นคือมีหมู่คาร์บอกซิลอิสระมากก็จะละลายน้ำได้ดี ในระหว่างกระบวนการสุกของมะม่วง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพคติน เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์กลุ่มเพคติเนส โดยทำให้โปรดตเพคตินในผลไม้ดิบเปลี่ยนเป็นกรดเพคตินิกในผลไม้ห่ามและเปลี่ยนเป็นกรดเพคติกในผลไม้สุกตามลำดับ ดังนั้นเมื่อผลไม้อยู่ในระยะแก่จัดจนถึงสุกจะเกิดการอ่อนตัวของเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ (รุ่งอรุณ หอมดอก, 2545)

กรดอะมิโนที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ กรดแอสปาร์ติค กรดกลูตามิค อะลานีน ไกลซีน เมธิโอนีน ลูซีนน์ และอาจมีกรดชนิดอื่นเป็นองค์ประกอบด้วย เช่น ซีลดิน และ บิวทาริก ผลมะม่วงสุกเป็นแหล่งวิตามินเอที่สำคัญ นอกจากนี้มะม่วงยังมีวิตามินซีในปริมาณ นอกจากนี้ยังพบว่า เบตาคาโรทีน และเซนโธฟิลล์ เป็นเม็ดสีหลักในมะม่วงสุก เอนไซม์หลักในมะม่วง คือ แคตตาเลสและเพอร์อ๊อกซิเดส ซึ่งจะมีกิจกรรมสูงสุดเมื่อผลเจริญเต็มที่ ประมาณ 115 วัน หลังจากติดผล (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

2.8 ฝรั่ง

2.8.1 ลักษณะทั่วไป

ฝรั่งเป็นผลไม้ที่อยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ Psidium guajava L. ชื่อสามัญคือ Guava มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาเขตร้อน เป็นพืชที่เจริญเติบโตในสภาพภูมิอากาศทั่วไปในเขตร้อน และกึ่งร้อน ดังนั้น จึงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย ฝรั่งเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง มีกิ่งเหนียว มีทรงพุ่มสูง 3-5 เมตร สามารถให้ผลผลิตได้หลังปลูก 1 ปี เป็นพืชที่เจริญเติบโต และให้ผลผลิตสม่ำเสมอในท้องที่ที่มีแสงแดดทั่วถึง ฝรั่งนับจากดอกบานถึงผลแก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยวได้ใช้เวลาประมาณ 4-5 เดือน ผลผลิตประมาณ 170 ผล/ต้น/ปี โดยเฉลี่ยผลหนึ่งจะมีน้ำหนักประมาณ 300-500 กรัมฤดูกาลเก็บเกี่ยวปกติอยู่ในช่วงเดือน มีนาคม – พฤษภาคม (มากที่สุด) โดยปกติแล้วฝรั่งจะให้ผลผลิตเกือบตลอดทั้งปี สามารถแบ่งพันธุ์ฝรั่งตามการใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) กลุ่มรับประทานสด ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามท้องถิ่นก่อนนำเข้ามาในประเทศไทย ได้แก่ ฝรั่งพันธุ์พื้นเมือง คือ พันธุ์ขี้นก ฝรั่งพันธุ์จีน คือ พันธุ์บางเสาธงหรือพันธุ์หลวงท่องสื่อ ฝรั่งพันธุ์เวียดนาม ได้แก่ กลมสาลี่ กลมสาลีทอง แป้นสีทอง ยาวเศวต หรือศรีวิชัย 1 และกลมทูลเกล้า หรือ ศรีวิชัย 2 ฝรั่งพันธุ์อินเดีย ได้แก่ พันธุ์มีเมล็ดและไร้เมล็ด เช่น พันธุ์ผลกลม พันธุ์ผลรูปสาลี่ พันธุ์เนาว์เบอร์ 16 พันธุ์ฮาลาฮามัด พันธุ์อินเดียค่อม และพันธุ์อีแห้ว ฝรั่งพันธุ์อินโดนีเซีย มีเพียงพันธุ์เดียว คือ พันธุ์สาลี่ทอง และฝรั่งพันธุ์ผสม ได้แก่ บางกอกแอปเปิ้ล ฝรั่งแดงบางกอก และสาลี่สามสี

2) กลุ่มฝรั่งแปรรูป เป็นพันธุ์ฝรั่งนำเข้า มี 2 พันธุ์ คือ พันธุ์โบมองต์ และพันธุ์คาฮัวคูลา ผลมีขนาดกลาง รูปร่างกลม ผิวเรียบ เนื้อสีชมพู เนื้อไม่แน่น ฉ่ำน้ำมาก กลิ่นหอม

3) กลุ่มฝรั่งประดับ มี 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ใบเล็ก และพันธุ์จิ๋วใบจีบ ลักษณะเป็นทรงพุ่ม ใบมีขนาดเล็ก ผลมีขนาดเล็กมาก ผลกลม ผิวเรียบ เนื้อบาง นิยมปลูกในครัวเรือนเท่านั้น

2.8.2 คุณค่าทางโภชนาการ

เนื่องจากฝรั่งมีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีคุณค่าทางอาหารสูง จึงมักถูกเรียกว่า “Apple of the tropic” ฝรั่งเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากอุดมไปด้วยวิตามิน โดยเฉพาะ วิตามินซีซึ่งพบในปริมาณที่สูงกว่ามะนาว และส้มถึง 4 เท่า หรือ 10 – 20,000 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม วิตามินวิตามิน นอกจากนี้สารอาหารที่พบในเนื้อฝรั่ง ประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรตที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ ระยะการสุกแก่ของผล และฤดูกาล ส่วนแร่ธาตุในผลฝรั่งประกอบด้วยแคลเซียมและเหล็ก (ชุติภัสร์ เรืองวุฒิ, 2008) สำหรับคุณค่าทางโภชนาการนั้น ฝ่ายวิเคราะห์อาหารและโภชนาการ (2535) ได้ศึกษาคุณค่าทางอาหารไว้ ดังแสดงในตาราง 2.6

ตาราง 2.6 คุณค่าทางอาหารของฝรั่งสดในสัดส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

สารอาหาร	หน่วย	ปริมาณ	สารอาหาร	หน่วย	ปริมาณ
วิตามินบี 2	มิลลิกรัม	0.13	ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัม	25
วิตามินซี	มิลลิกรัม	160	คาร์โบไฮเดรต	เปอร์เซ็นต์	11.6
วิตามินเอ	หน่วยสากล	89	โปรตีน	เปอร์เซ็นต์	0.9
ค่าพลังงานความร้อน	กิโลแคลอรี	51	เส้นใย	เปอร์เซ็นต์	6
แคลเซียม	มิลลิกรัม	13	ไขมัน	เปอร์เซ็นต์	0.1

ที่มา : ชุติภัสร์ เรืองวุฒิ (2008)

ส่วนประกอบทางเคมีของผลฝรั่งขึ้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพแวดล้อม และการปฏิบัติทางเกษตรกรรม น้ำตาลที่พบในฝรั่งมีปริมาณร้อยละ 6 – 11 ประกอบด้วย น้ำตาลฟรุกโตส กลูโคส และน้ำตาลซูโครส ในปริมาณร้อยละ 59, 36 และ 5 ตามลำดับ

ปริมาณน้ำตาลที่พบในฝรั่งจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการพัฒนาของผล โดยมีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลฟรุกโตสอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ น้ำตาลกลูโคสจะค่อยๆเพิ่มปริมาณมากขึ้น ฝรั่งเป็นแหล่งที่ดีที่สุดของกรดแอสคอร์บิก หรือ วิตามินซี ที่ป้องกันโรคเลือดออกตามไรฟัน พบว่าผลฝรั่งในฤดูหนาวประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคมจะมีปริมาณกรดแอสคอร์บิก ประมาณ 325 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งมากกว่าฝรั่งในฤดูฝนประมาณเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคมที่มีประมาณ 140 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณวิตามินซีจะมีการสะสมมากที่สุดให้ระยะผลแก่เต็มที่มีสีเขียวและลดลงเมื่อผลเริ่มสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ปริมาณที่พบมากที่สุดอยู่บริเวณผิวของผล และลดลงในส่วนของเนื้อ จากการวิเคราะห์พบว่า ในเนื้อฝรั่งมี 286 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม และในแกนเมล็ดมี 122 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม วิตามินซี ซึ่งมีอยู่ในฝรั่งจำนวนมากนั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ฝรั่ง บางพันธุ์มีวิตามินเฉลี่ยได้ 95 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักฝรั่งสด 100 กรัม แต่จากการวิเคราะห์ พบว่าฝรั่งขี้นกมีวิตามินซีที่สุด (จารุพันธุ์ ทองแถม และคณะ, 2543)

2.9 แป้ง (Starch)

2.9.1 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

การจัดระเบียบของอนุภาคแป้ง ขนาดเม็ดแป้ง รูปร่าง สัณฐาณ องค์ประกอบ และโครงสร้างของโมเลกุล ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของแป้งแต่ละชนิด โดยทั่วไปเม็ดแป้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1-100 ไมโครเมตร ทั้งรูปร่างปกติ (ได้แก่ ทรงกลม ทรงรูปไข่ เชิงมุม) หรือรูปร่างผิดปกติ เม็ดแป้งประกอบด้วยอนุภาคส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) เป็นหลัก โดยมีโฮโมพอลิเมอร์ของกลูโคไพราโนสด้วยโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอะไมโลสที่ประกอบด้วยหน่วยของ D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-D-(1-4) และอะไมโลเพคตินที่เป็นพอลิเมอร์แบบกิ่งก้านของแป้งที่มีกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-D-(1-4) และยังประกอบด้วยหน่วยกลูโคสที่เป็นกิ่งก้านที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-D-(1-6) อะไมโลสมีพอลิเมอร์เส้นตรงเป็นหลัก อะไมโลสประกอบด้วยเกลียวของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic helix) ซึ่งสามารถเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับกรดไขมันอิสระได้ (Amylose lipid complex) ซึ่งกรดไขมันอิสระประกอบด้วย กลีเซอร์ไรด์ แอลกฮอล์บางชนิด และไอโอดีน ในแป้งปกติทั่วไปอะไมโมเพคตินมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส โดยมีสายโซ่ที่จัดว่ามีขนาดเล็ก สายโซ่ขนาดเล็กมีค่าเฉลี่ยของระดับพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Polymerization; DP) ประมาณ 15 และสายโซ่ที่มีขนาดสายโซ่ใหญ่จะมี DP มากกว่า 45 ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นการจัดระเบียบในการสร้างส่วนของผลึกตามธรรมชาติของเม็ดแป้ง ส่วนของผลึกเป็นการแสดงให้เห็นการจัดระเบียบของโมเลกุลอะไมโลเพคตินภายในเม็ดแป้ง ขณะที่อะไมโลสส่วนใหญ่เกิดขึ้นในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) โดยกระจัดกระจายอยู่ในอะไมโลเพคติน ภายใต้แสงโพลาไลซ์เม็ดแป้งแสดงลักษณะเฉพาะตัวคือมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นกากบาท (Birefringent) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลและการนำแสง และสามารถยืนยันผลด้วยเลนส์เอ็กซเรย์ (Bertolini, 2010)

2.9.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะร้อน (Pasting behavior)

เมื่อเม็ดแป้งถูกให้ความร้อนในขณะที่มีน้ำอยู่จนถึงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน เม็ดแป้งจะเกิดการสูญเสียส่วนของผลึก และเกิดการดูดซึมน้ำได้ปริมาณมากขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งเพิ่มขึ้นจากขนาดเริ่มต้น เมื่อเม็ดแป้งพองตัวในช่วงอุณหภูมิหนึ่งอะไมโลส และอะไมโลเพ

คตินจะถูกชะออกมาจากเม็ดแป้ง ซึ่งการชะออกมาของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินนี้มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อเม็ดแป้งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆในที่สุดเม็ดแป้งจะถูกทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้แรงเฉือนร่วมด้วย จึงมีผลให้เกิดการก่อตัวของแป้งเปียก (Starch paste) ขึ้น แป้งเปียกที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยเฟสต่อเนื่องของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินที่ละลายได้ และเฟสไม่ต่อเนื่องของเม็ดแป้งที่พองตัวหรือเศษของเม็ดแป้ง Granule ghosts และ Fragments หลังจากเม็ดแป้งถูกทำลายแล้วมีผลทำให้ความหนืดลดลง การเพิ่มขึ้นและลดลงของความหนืดของแป้งเปียกสามารถบันทึกได้ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ตัวอย่างเช่น Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งสามารถบันทึกความหนืดได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Angkana, 2009)

2.9.3 การเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้ง (Gelatinization)

การเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งเกี่ยวข้องกับการละลายของเม็ดแป้งในสภาวะที่มีน้ำภายใต้การให้ความร้อน ในสภาวะที่มีน้ำเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทน้ำในสารแขวนลอยซึ่งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของแป้ง ได้แก่ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน เมื่ออุณหภูมิของแป้งสูงถึง 60-70 องศาเซลเซียส เม็ดแป้งส่วนที่ละลายจะถูกทำลายด้วยพลังงานที่ให้เข้าไป ส่งผลให้เกิดการสูญเสียการจัดรูปแบบของโมเลกุล และสูญเสียส่วนของผลึก กระบวนการนี้ทำให้ความหนืดและการละลายของแป้งเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่สามารถผันกลับได้ ได้แก่ การทำลายส่วนของเม็ดแป้งและโครงสร้างส่วนกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และทำให้เกิดการสูญเสีย Birefringence ของเม็ดแป้งด้วย Biliaderis et al. (1980) ได้ศึกษาการเกิดเจลลาติไนเซชันด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) และอธิบายกระบวนการการเกิดเจลลาติไนเซชันในระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอว่า เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวที่ส่วนอสัณฐาน (Amorphous regions) แล้วไปมีผลให้ส่วนผลึกของแป้งเกิดการละลายได้ง่ายขึ้น การพองตัวของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการทำลายส่วนของผลึกในที่สุด ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและสูญเสียส่วนกากบาทของเม็ดแป้ง (Granule birifringence) และในระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอนี้เทอร์โม แกรมของ DSC แสดงการเปลี่ยนแปลง Endothermic เพียงแบบเดียวหรือให้พีคของการเกิดเจลิติไนเซชันเพียงพีคเดียวนั่นเอง ในขณะที่ระบบของแป้งที่มีปริมาณน้ำจำกัดเทอร์โมแกรมของ DSC แสดงการเปลี่ยนแปลง Endothermic สองแบบ Endotherm แบบแรก คือพีคที่ 1 หรือ G Endotherm พบที่อุณหภูมิต่ำเกิดจากการทำลายพันธะในส่วนของอสัณฐาน และส่วนของผลึกบางส่วน และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงส่วนผลึกของเม็ดแป้งถูกทำลายเพิ่มเติมส่งผลให้เกิด Endotherm ที่สอง (M1 endotherm) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำเท่าไรก็ตาม G Endotherm ของการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งชนิดเดิมมักเกิดที่อุณหภูมิคงที่เสมอ ในปี ค.ศ. 2000 Waigh และคณะ ได้เสนอกลไกการเกิดเจลลาติไนเซชันว่าเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ในการทำลายเกลียวของอะไมโลเพคติน (Amylospectin helix) นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการแยกจากกันของเกลียวอะไมโลเพคติน และพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงของม้วนเกลียวอะไมโลเพคติน โดยในระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอ (มากกว่าร้อยละ 40 น้ำหนักต่อน้ำหนัก) Endotherm ของ DSC ของการแยกกัน และการเปลี่ยนแปลงของม้วนเกลียวอะไมโลเพคตินจะเกิดการรวมกันเนื่องจากมีการสูญเสียส่วนของผลึก และเกิดแยกกันของเกลียวพร้อมๆ กัน แต่ในสภาวะที่มีน้ำ

อยู่ในปริมาณที่จำกัด (ร้อยละ 5-40 น้ำหนักต่อน้ำหนัก) อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงม้วนเกลียวของอะไมโลเพคตินสูงกว่าอุณหภูมิในการแยกกันของเกลียวอะไมโลเพคติน ดังนั้นจึงพบว่าเทอร์โมแกรมของ DSC แสดงการเปลี่ยนแปลง Endothermic สองแบบโดย G Endotherm เป็นพีคที่เกิดจากการแยกกันของเกลียวอะไมโลเพคติน และ M1 endotherm เป็นการเปลี่ยนแปลงของม้วนเกลียวอะไมโลเพคติน (Angkana, 2009)

2.9.4 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

Differential scanning calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางความร้อนของแป้งที่ประกอบไปด้วยการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิการเกิด Glass transition และการเกิดผลึก (Crystallization) คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างให้ความร้อนต่อแป้งหรือผลิตภัณฑ์แป้ง ซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับการเกิด เจลลาติไนเซชัน การละลาย การเกิด Glass transition การเกิดผลึก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก การขยายปริมาตร การสลายของโมเลกุล และการเคลื่อนที่ของน้ำ คุณสมบัติทางความร้อนทั้งหมดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น และน้ำที่เป็นองค์ประกอบในแป้งที่ไม่เสถียรระหว่างให้ความร้อน นอกจากนี้การนำความร้อนของแป้งยังต่ำมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเม็ดแป้งเนื่องจากความหนาแน่นที่ต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่เสถียร (Yu and Christie, 2001)

การเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งตรวจวัดได้ด้วยกระบวนการเอนโดเทอร์มิก (Endotermic process) และแสดงเป็นค่าเอนทาลปี (Enthalpy) ในช่วง 10 ถึง 20 J/g DSC เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการศึกษาการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ในการศึกษาเพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางความร้อน (Thermal behavior) ของระบบที่แป้งและน้ำซึ่งจะช่วยในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงของอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน และศึกษาอัตราส่วนของแป้งต่อน้ำในการเกิดเจลลาติไนเซชัน และยังเป็นวิธีที่ใช้ประมาณการการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีในการเกิดเจลลาติไนเซชัน ข้อมูลที่ได้จาก DSC เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของพลังงานไฟฟ้าของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงและอุณหภูมิ ซึ่งเรียกว่า เทอร์โมแกรม (Thermogram) กราฟที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน (Heat capacity) ของสารตัวอย่าง โดยที่พื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมแกรมนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (ΔH) ในสารตัวอย่าง (ธนบูรณ์ ธัชศฤงคารสกุล, 2553) ซึ่งถือว่าเป็นค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (The enthalpy; ΔH) นั่นเอง นอกจากนี้คุณสมบัติทางความร้อนที่รายงานด้วยเครื่อง DSC ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับการเกิดเจลลาติไนเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิด เจลาติไนเซชัน (The onset temperature; T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลาติไนเซชัน (The peak temperature; T_{peak}) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน (The conclusion temperature; $T_{conclusion}$) คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งที่วัดด้วยเครื่อง DSC มีผลจากหลายๆปัจจัย ได้แก่ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง ตัวถูกละลายที่ไม่เป็นไอออนิก (Non-ionic solutes) เช่น น้ำตาล และตัวถูกละลายที่เป็นไอออนิก (Ionic solutes) (Angkana, 2009)

ในปี ค.ศ. 1971 Stevens และ Elton ได้นำเทคนิค DSC มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งเป็นครั้งแรก ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนของแป้ง

ต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2 และให้ความร้อนจาก 5-100 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบพีคเอนโดเทอร์มิก (Endothermic peak) ได้อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิระหว่าง 54-73 องศาเซลเซียส และได้กำหนดเป็นอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้ง ต่อมาในปี ค.ศ. 1979 Donovan ได้รายงานการพบ Endothermic peak 2 พีค เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งสาลี และแป้งมันฝรั่ง โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบร้อยละ 27 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแป้งที่มี 2 ชนิดหรือสภาพที่แตกต่างกัน 2 แบบที่พบในแป้ง นอกจากนี้จากรายงานของ Eliason (1980) ได้พบพีค 3 พีค เมื่อผสมแป้งสาลีกับน้ำด้วยปริมาณน้ำระหว่างร้อยละ 35-80 และให้ความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบกับ DSC แต่จากการทดสอบด้วย DSC ไม่สามารถอธิบายได้ที่พีคตำแหน่งที่ 2 การศึกษาเหล่านี้จึงได้ให้ความสนใจที่พีคที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส) โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปร่างพีคที่ปรากฏที่อุณหภูมิระหว่าง 50-75 องศาเซลเซียส มีรายงานเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ให้สำคัญกับพีคที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 150 องศาเซลเซียส) ในปี ค.ศ. 1992 Shogren ได้ศึกษาการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งข้าวโพด โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบร้อยละ 11-50 พบว่าเกิดเจลลาติไนซ์ (การละลาย) ที่อุณหภูมิ 190-200 องศาเซลเซียส ในปริมาณน้ำร้อยละ 11-30 และเมื่อมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 30 ทำให้ส่วนอสัณฐาน (Amorphous) เริ่มเกิดเจลลาติไนซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส (Yu and Christie, 2001)

2.9.5 สมบัติทางรีโอโลจี (Rheological properties)

สมบัติทางรีโอโลจี หมายถึง สมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) หรือการไหล (Flow) ของวัสดุ เมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุนั้น ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง พฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นของแข็งจะแสดงออกมาในรูปของความยืดหยุ่น (Elastic) หรือการกลับคืนรูปร่างของโครงสร้างหลังจากการให้แรง ในขณะที่การไหลเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของเหลว จะแสดงออกมาในรูปของความหนืด (Viscous) หรือแรงต้านทานต่อการไหล

2.9.5.1 วิธีการวัดสมบัติทางรีโอโลจี

วิธีการวัดสมบัติทางรีโอโลจีสามารถแบ่งวิธีการวัดคุณสมบัติได้เป็น 2 แบบ คือ แบ่งตามลักษณะการเสียรูป และแบ่งตามเทคนิคการทดสอบ

1) วิธีการทดสอบสมบัติทางรีโอโลจีแบบแบ่งตามลักษณะการเสียรูป แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ แบบการเสียรูปมาก (Large deformation) และ การเสียรูปน้อย (Small deformation)

(1) Large deformation วิธีการทดสอบแบบนี้ เป็นการทดสอบสมบัติทางรีโอโลจีโดยให้แรงเป็นจำนวนมากแก่วัสดุ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและโครงสร้างของวัสดุขณะเกิดการแตกหัก เช่น การทดสอบแบบ Stress relaxation และ Creep เป็นต้น ซึ่งวิธีการทดสอบนี้มีข้อดีตรงที่พฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุต่อแรงมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะจริง เนื่องจากโดยมากวัสดุจะได้รับแรงเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต เช่น ในช่วงของการผสมวัตถุดิบ และการขึ้นรูปเป็นต้น ข้อเสียของวิธีทดสอบนี้คือในขณะทดสอบโครงสร้างของวัสดุจะถูกทำลาย

(2) Small deformation วิธีการทดสอบนี้ จะเป็นการทดสอบที่ใช้แรงปริมาณน้อยโครงสร้างของวัสดุจะถูกทำลายเพียงเล็กน้อย การทดสอบนิยมตั้งค่าความเค้น (Stress)

ที่ให้กับวัสดุคงที่ตลอดการทดสอบ หรือตั้งค่าอัตราเฉือน (Strain rate) ที่วัสดุได้รับคงที่ตลอดการทดสอบพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุจึงสม่ำเสมอ โดยวิธีการทดสอบแบบ Small deformation ที่นิยมใช้ในงานวิจัยต่างๆ ได้แก่ การทดสอบแบบ Oscillatory (สวรักษ์ จันทรเทพธิมากุล, 2551)

2) วิธีการวัดค่าคุณสมบัติทางรีโอโลจีแบ่งตามเทคนิคการทดสอบ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ Descriptive Empirical และ แบบ Fundamental

(1) การวัดสมบัติทางรีโอโลจี แบบ Descriptive Empirical การวัดแบบนี้เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจี โดยใช้เครื่องมือสำเร็จรูปที่ออกแบบโดยเฉพาะสำหรับวัสดุแต่ละประเภท ซึ่งผลที่ได้ออกมาในรูปของตัวเลขหรือกราฟที่ผู้ทดสอบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นวิธีที่ง่ายต่อการใช้งานและผู้ทดสอบไม่ต้องใช้ทักษะมาก สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เครื่องมือวัดมีราคาไม่แพงนักแต่ให้ผลไม่ละเอียด และผลการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการพื้นฐาน ทำให้ไม่สามารถแปลงเป็นค่าพารามิเตอร์ทางรีโอโลจี เช่น ความเค้น ความเครียด และความหนืดได้ การวัดแบบ Descriptive Empirical มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น Extensigraph, Farinograph, Amylograph และ Mixograph เป็นต้น

(2) การวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจี แบบ Fundamental การวัดแบบนี้เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจีที่สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีพื้นฐานทางรีโอโลจีได้ ข้อมูลที่ได้สามารถแปลงเป็นค่าพารามิเตอร์ทางรีโอโลจี เช่น ความเค้น ความเครียด และความหนืดได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือเป็นวิธีที่ค่อนข้างยาก เสียเวลาในการวัด และเครื่องมือวัดมีราคาแพง การวัดแบบนี้สามารถวัดได้หลายวิธี เช่น Stress relaxation, Pararallel plate และ Creep เป็นต้น (สวรักษ์ จันทรเทพธิมากุล, 2551)

การทดสอบแบบ Oscillatory

การทดสอบแบบ Oscillatory เป็นการทดสอบทางพลวัตโดยวัสดุถูกให้ความเค้นหรือความเครียดแปรผันตามช่วงเวลา ผลที่ได้จากการทดสอบแปรผันต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุ โดยสามารถปรับสภาวะทดลองได้หลายสภาวะ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณแรงและความถี่ของแรง เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบแบบ Oscillatory นิยมใช้ทดสอบเพื่ออธิบายโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุวัสดุประเภท Viscoelastic ในอาหารโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จากแป้ง และสามารถอธิบายการเกิดกลไกต่างๆของแป้งได้ เช่น การเกิดการเจลาติไนซ์ในแป้ง การพองตัว ความแข็งแรงของเจล การจับตัวเป็นก้อนของโปรตีน และการสลายตัวของโปรตีน เป็นต้น Viscoelastic parameter ได้แก่ Storage modulus ($G'(\omega)$), Loss modulus ($G''(\omega)$) และ Loss tangent ($\tan \delta$) (สวรักษ์ จันทรเทพธิมากุล, 2551)

ค่า Storage modulus แสดงถึงปริมาณของพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด ดังนั้นวัสดุ Hookean จึงสามารถเก็บพลังงานไว้ได้ทั้งหมด ขณะที่วัสดุไหลหนืดไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้เลย พลังงานที่ได้รับจะสูญสลายไปกับการเคลื่อนที่แบบไหลหนืดทั้งหมด ส่วน Loss modulus แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด และค่า Loss tangent จะแสดงถึงสัดส่วนของการแสดงสถานะการเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น (อัมพวัน ตั้นสกุล, 2551)

2.9.5.2 คุณสมบัติทางรีโอโลจีของเจลแป้ง

เจลแป้งเป็นระบบที่เกิดขึ้นในการเกิดเจลลาติไนเซชั่นของเม็ดแป้ง และ/หรือส่วนที่อยู่ภายใน และถูกเสริมสร้างขึ้นด้วยเจลของอะไมโลส ซึ่งหลุดออกมาจากเม็ดแป้งระหว่างเกิดเจลลาติไนเซชั่น และรวมตัวกันเป็นโครงร่างสามมิติเมื่อแป้งเปียกเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง โครงร่างพอลิเมอร์ที่ซับซ้อนเป็นเจลวีสโคอิลาสติก (Viscoelastic gel) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลทางกายภาพเป็นหลัก เกี่ยวข้องกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่มากกว่าพันธะโคเวเลนซ์ โครงสร้างของเจลแป้งสามารถวัดลักษณะเฉพาะได้ด้วยรีโอโลจีทางพลวัต ในการทดลองรีโอโลจีทางพลวัตคุณสมบัติ Viscoelastic ของเจลแป้งสามารถอธิบายลักษณะเฉพาะด้วยพารามิเตอร์ทางรีโอโลจี 2 พารามิเตอร์ การยืดหยุ่น (Elastic) หรือโมดูลัสสะสม (Storage modulus; G') และความหนืด (Viscous) หรือโมดูลัสที่สูญเสีย (Loss modulus; G'') ซึ่งได้จากการทดสอบแบบ Small deformation ในระหว่างการวิเคราะห์แบบ Harmonic (Angkana, 2009)

$$\gamma\ (t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \qquad \text{สมการ 2.1}$$

เมื่อ γ = ความเครียดที่เวลาใดๆ

γ_0 = ความเครียดสูงสุด

ω = ความถี่เชิงมุม เมื่อ $\omega = 2\pi f$ โดย f = ความถี่ของการสั่น, Hz และ t = เวลา

สำหรับความยืดหยุ่นของของแข็งในอุดมคติ เมื่อ shear strain ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับตัวอย่าง shear stress จะมีการตอบสนองทันทีและเป็นไปตามสัดส่วนของความเครียด สัดส่วนที่คงที่คือ shear modulus

$$\sigma = G\gamma \qquad \text{สมการ 2.2}$$

เมื่อ σ = ความเค้น

γ = ความเครียด

G = Shear modulus

ดังนั้น Oscillating strain;

$$\sigma(t) = G'\ \gamma_0 \sin(\omega t) \qquad \text{สมการ 2.3}$$

เมื่อ G' = Elastic หรือ Storage modulus

ความหนืดของของเหลวในอุดมคติมีการตอบสนองต่อความเค้นที่ภายนอกของเฟส โดยเฟสของมุม δ กับความเครียด

$\sigma(t) = G''\gamma_0 \cos(\omega t)$ สมการ 2.4

เมื่อ G'' = Viscous หรือ Loss modulus

วัสดุ Viscoelastic ตอบสนองต่อความเค้นสามารถแยกได้เป็นส่วนของ Elastic และส่วน Viscous:

$\sigma(t) = \gamma_0 [G' \sin(\omega t) + G''\cos(\omega t)$ สมการ 2.5

ดังนั้นการตอบสนองความเค้นของวัสดุ Viscoelastic และเฟสของมุม δ ระหว่างความเค้นกับความเครียด:

$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cos\delta \sin\omega t + \sigma_0 \sin\delta \cos\omega t$ สมการ 2.6

เปรียบเทียบสมการที่ 2.4 และ 2.5 จะได้พลวัตที่เหมาะสม 2 พลวัต
$G' = (\sigma_0/\gamma_0) \cos \delta$

และ

$G'' = (\sigma_0/\gamma_0) \sin \delta$

ความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสสะสม (G') เป็นการวัดการสะสมพลังงานและการนำกลับมาใช้ใหม่ต่อรอบการสั่น (Oscillation) ซึ่งเป็นความเต้นในเฟสกับความเครียดใน sinusoidal shear ที่เกิดความผิดปกติจากความเครียด ความหนืดหรือโมดูลัสที่สูญเสีย (G'') วัดจากพลังงานความร้อนที่กระจายต่อรอบของ sinusoidal ที่ความเค้น 90 องศาเซลเซียสภายนอกเฟสกับความเครียด

ความต้านทานทั้งหมดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในปริมาณที่ซับซ้อน โดยแสดงในรูปแบบของคอมเพล็กโมดูลัส (Complex modulus; G*)

$G^* = G' + iG''$, สมการ 2.9

$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$ สมการ 2.10

คุณลักษณะของเจลแป้งที่อุณหภูมิห้องหลังจากเกิดเจลลาติไนเซชันแสดงพฤติกรรมแบบ Shear thinning การวัดทางพลวัตแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางดานความถี่ของความหนืดและโมดูลัสสะสมซึ่งเป็นของเจลชนิดอ่อน พฤติกรรมด้านการไหลของเจลแป้งมีผลมาจากหลายปัจจัย ตัวอย่างเช่น แหล่งของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิ และอัตราการให้ความร้อน เจลของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวแสดงพฤติกรรม Viscoelastic แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เจลแป้งของแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าจะแสดงค่า G′ ที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมคล้ายของเหลวมากกว่าเจลของแป้งข้าวเจ้านั่นเอง (Angkana, 2009)

2.10 การย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุดในพืช ประกอบด้วยโมเลกุลสองชนิดได้แก่ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน แป้ง และผลิตภัณฑ์อาหารที่ประกอบด้วยแป้งสามารถแบ่งได้ตามประเภทของการย่อย ซึ่งการย่อยได้ของแป้ง เป็นความสามารถในการถูกย่อยของแป้งโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของร่างกาย (Frei et al., 2003) โดยทั่วไปคุณสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับอัตรา และช่วงเวลาของปฏิกิริยาไกลซิมิค Singh, Dartois และ Kaur (2010) จำแนกองค์ประกอบของแป้งออกเป็น 3 ส่วนตามความสามารถในการย่อยได้ของแป้งตามวิธีของ Englyst, Kingman และ Cummings (1992) ได้ดังนี้

1) แป้งที่ถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (Rapid digesting starch; RDS) ปริมาณกลูโคสถูกย่อยภายใน 20 นาที

2) แป้งที่ถูกย่อยได้อย่างช้าๆ (Slowly digesting starch) ปริมาณกลูโคสถูกย่อยภายใน 20-120 นาที

3) แป้งที่ทนทานต่อการย่อย (Resistant starch) ปริมาณของกลูโคสที่ไม่ถูกย่อยภายใน 120 นาที

การย่อยได้ของแป้งโดยเอนไซม์อะไมเลสที่ลำไส้เล็กในร่างกาย หากเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่าการย่อยอย่างรวดเร็ว การย่อยแตกต่างกันตามชนิดของอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ และเกี่ยวข้องกับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานที่ไม่ขึ้นอยู่กับระดับอินซูลิน (Frei et al., 2003) แป้งที่ถูกย่อยได้อย่างรวดเร็วทำให้ผู้บริโภคมีระดับกลูโคสในเลือดเริ่มต้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที หลังจากการบริโภคอาหาร นั่นคือทำให้การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในเลือดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงมาก แต่แป้งที่ถูกย่อยได้อย่างช้าๆจะปลดปล่อยน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่า (Hu et al., 2004) ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งมีหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น 1) ปริมาณอะไมโลส โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ จะย่อยได้เร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง 2) สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยทำให้แป้งสุกแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้แป้งเกิดการคืนตัว ทำให้กระบวนการย่อยแป้งเกิดช้าและค่า GI ลดลง (Sasaki et al., 2009) 3) โครงสร้างโดยละเอียดของอะไมโลเพคติน พบว่าแป้งที่มีส่วนของอะไมโลเพคตินสายโซ่ยาว และอะไมโลเพคตินสายโซ่ปานกลางและสายโซ่สั้นสูง และมีส่วนของอะไมโลเพคตินสายโซ่สั้น

มากต่ำ จะทำให้ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly digestible starch; RDS) ลดลง และปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (Slowly digestible starch, SDS) เพิ่มขึ้น

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chau and Huang (2003) เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของส่วนประกอบที่มีเส้นใยอาหารในปริมาณสูง (Fiber-rich fractions; FRFs) ที่ได้จากเปลือกของส้ม (Citrus sinensis L. cv. Liucheng) เมื่อ FRFs นี้ประกอบด้วย เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fibers; SDF) เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fibers; IDF) ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (Alcohol-insoluble solid; AIS) และของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Water-insoluble solid; WIS) ผลการทดลองพบว่าส่วนเปลือกของส้มประกอบด้วย RFRs ที่ไม่ละลายน้ำในปริมาณสูง (IDF, AIS และ WIS 475-515 กรัมต่อกิโลกรัมของเปลือกส้ม) ซึ่งองค์ประกอบหลักของ RFRs นี้คือสารประกอบเพคติน และเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบ SDS ที่ประกอบด้วยโพลีแซ็กคาไรด์ในรูปของเพคตินสูง (94.1 กรัมต่อกิโลกรัมของเปลือก) RFRs ที่ไม่ละลายน้ำนี้มีความสามารถในการอุ้มน้ำเป็น 15.5-16.7 มิลลิลิตรต่อกรัม ความสามารถในการดูดน้ำมัน 2.35-5.09 กรัมต่อกรัม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation-exchange capacities) 454-997 มิลลิกรัมสมมูลย์ต่อกิโลกรัม และมีความสามารถในการพองตัวเป็น 14.6-21.2 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีค่าสูงกว่าเซลลูโลส ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าควรบริโภค FRFs ที่ไม่ละลายน้ำซึ่งได้จากเปลือกส้มเพื่อเป็นแหล่งของเส้นใยอาหาร เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ดี หรืออาจนำ FRFs ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของอาหารที่มีปริมาณแคลอรี่ต่ำ รวมทั้งสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการดูดซับหรือเก็บกักน้ำมัน และความชื้นไว้

ในปี ค.ศ. 1992 Gourgue et al. ศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยอาหารจากผลพลอยได้ของมะม่วง และผลของเส้นใยอาหารนี้ต่อภาวะน้ำตาลในเลือดสูง (Hypoglycemic) ผลการทดลองพบว่าเส้นใยอาหารจากส่วนเปลือก และเยื่อใยจากเนื้อของมะม่วงหลังทำให้บริสุทธิ์ด้วยเอทธานอลมีปริมาณเส้นใยอาหารที่สูง (ร้อยละ 74 น้ำหนักแห้ง) มีอัตราส่วนของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำเข้าใกล้หนึ่ง และมีปริมาณกรดยูโรนิกร้อยละ 15-20 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเส้นใยอาหารนี้สามารถลดการย่อยได้ของแป้งทั้งหมด และทำให้อัตราการย่อยอะไมโลสของแป้งในมันฝรั่งบดลดลง ทำให้การย่อยของอะไมโลสเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในสภาวะที่มีเส้นใยอาหารจากมะม่วงพบว่าการแพร่ของกลูโคสเกิดได้ช้าลงจากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าผลพลอยได้จากมะม่วงเป็นแหล่งที่ดีของเส้นใยอาหาร และเส้นใยอาหารนี้อาจมีศักยภาพในการช่วยควบคุมปริมาณกลูโคสในกระแสเลือดได้

Figuerola et al. (2005) ศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ และศักยภาพของเส้นใยอาหารเข้มข้นที่สกัดจากกากแอปเปิ้ล และเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม ได้แก่ เกร๊ปฟรุต มะนาว และส้ม เพื่อใช้เป็นแหล่งของเส้นใยอาหารที่เสริมเข้าไปในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ สกัดและนำเส้นใยอาหารเข้มข้นจากผลไม้ทั้งสี่ชนิดไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน และเถ้า คุณสมบัติด้านความร้อน คุณสมบัติเชิงหน้าที่ ได้แก่ ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water retention

capacity, WRC) ความสามารถในการพองตัว (Swelling ability) ความสามารถในการดูดซึมไขมัน (Fat adsorption capacity, FAC) และลักษณะเนื้อสัมผัส นอกจากนี้ยังศึกษาถึงองค์ประกอบของเส้นใยอาหารอีกด้วย ผลการทดลองพบว่า เส้นใยอาหารเข้มข้นจากผลไม้ทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณเส้นใยอาหารสูง (44.2-89.2 กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) โดยมีอัตราส่วนของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายสูง ปริมาณโปรตีน และไขมันมีค่าอยู่ระหว่าง 3.12-8.42 และ 0.89-4.46 กรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เส้นใยอาหารเข้มข้นให้พลังงานต่ำมาก (50.8-175 กิโลแคลอรีต่อ100 กรัม หรือ 213-901 กิโลจูลต่อ100 กรัม) เส้นใยอาหารเข้มข้นจากเกร็ปฟรุตมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงที่สุด (2.09-2.26 กรัมน้ำ/กรัมน้ำหนักแห้ง) มีค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการดูดซึมน้ำมันที่สูง พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นใยอาหารขึ้นกับขนาดอนุภาคของเส้นใยอาหาร จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าเส้นใยอาหารนี้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดี และมีศักยภาพในการนำไปใช้เพื่อพัฒนาอาหารที่มีการเติมเส้นใยอาหารในปริมาณสูงต่อไป

Larrauri et al. (1996) ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี และความสามารถในการต้านออกซิเดชันของเส้นใยอาหารจากผงของเปลือกส้มกับเปลือกมะนาว และรายงานว่าเส้นใยอาหารจากเปลือกผลไม้ทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณเส้นใยอาหารรวมสูง (ร้อยละ 61-69) ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ร้อยละ 50 ของกรดลิโนเลอิกที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อวัดด้วยวิธี Ferric-thiocyanate ส่วนเส้นใยของเปลือกมะนาว (ร้อยละ 2.4 น้ำหนักต่อปริมาตร) มีค่าครึ่งหนึ่งของ **α**-tocopherol (ร้อยละ5.8 น้ำหนักต่อปริมาตร) และ Butylated hydroxyanisole (BHA) (ร้อยละ 1.3 น้ำหนักต่อปริมาตร) ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นใยมะนาว ปริมาณโพลิฟีนอลที่สกัดได้จากเปลือกส้มและมะนาววิเคราะห์โดยการใช้เครื่อง HPLC พบว่ามีกรดคาเฟอิก (Caffeic) และ เฟอรูรูริก (Ferulic) นอกจากนี้ยังพบสารนาริจิน (Naringin) เฮสเปอร์ริดิน (Hesperidin) และไมริซิติน (Myricetin) ในเส้นใยของผลไม้ทั้งสองชนิด ความแตกต่างของสารต้านอนุมูลอิสระจากเส้นใยเปลือกมะนาวคือ มีกรดเอลลาจิก (Ellagic) ควอซิติน (Quercetin) และแคมป์เฟอร์รอล (Kaempferol) ที่เป็นสารกลุ่มโพลีฟอนอลที่มีความความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูง แต่ไม่พบในเส้นใยจากเปลือกส้ม

Larrauri et al. (1997) ศึกษาแหล่งของเส้นใยอาหารจากเปลือกสับปะรด โดยทำเส้นใยอาหารให้อยู่ในลักษณะที่เป็นผง พบว่า ปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดมีปริมาณเท่ากับเส้นใยอาหารจากแอปเปิ้ลและผลไม้ตระกูลส้ม (ร้อยละ 70.6) นอกจากนี้คุณสมบัติทางด้านประสาทสัมผัส (สีและรสชาติ) ดีกว่าเส้นใยอาหารจากผลไม้ทั้ง 2 ชนิด เส้นใยอาหารที่แยกออกมาจากสับปะรดเป็นเส้นใยที่ไม่สารมารถละลายน้ำร้อยละ 99 ของเส้นใยอาหารทั้งหมด ซึ่งเส้นใยอาหารมีน้ำตาลทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ ได้แก่ ไซโลส (ร้อยละ 36 ของน้ำตาลทั้งหมด) และกลูโคส (ร้อยละ 43 ของน้ำตาลทั้งหมด) กรดยูโรนิกทั้งหมดร้อยละ 5.1 และ Klason lignin ร้อยละ 11.2 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเป็นคุณสมบัติที่ได้จากสารประกอบพวกออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งเกี่ยวข้องกับเส้นใยอาหาร โดยที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมของผงตัวอย่าง/100 มิลลิลิตรของส่วนผสมที่ใช้วิเคราะห์ เส้นใยสับปะรดมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ 86.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าเส้นใยจากเปลือกส้ม (ร้อยละ 34.6) ขณะที่เส้นใยจากแอปเปิ้ลและมะนาวไม่มีฤทธิ์ในการต้าน ไมริซิติน (Myricetin) เป็นสารพวกโพลีฟีนอลที่สำคัญในเส้นใยสับปะรด และมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้

Martin-Cabrejas et al. (1995) ศึกษาปริมาณเส้นใยอาหารในกากของกีวีและลูกแพร์ กากของกีวีและลูกแพร์เป็นผลพลอยได้ที่เหลือจากการผลิตน้ำกีวีและน้ำลูกแพร์เข้มข้น เตรียมตัวอย่างโดยนำกากที่ได้มาทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และบดให้ละเอียด จากนั้นวัดปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด เส้นใยอาหารที่ละลายและไม่ละลายน้ำด้วยวิธี AOAC gravimetric และวัดสารประกอบกลูโคสด้วย Colorimetric วิธี GLC และ Klason lignin จากการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งพบว่า เส้นใยอาหารทั้งหมดของกากลูกแพร์ มีปริมาณร้อยละ 43.9 ขณะที่กากของกีวีมีปริมาณร้อยละ 25.8 ในกากของผลไม้ทั้งสองชนิดมีเพคตินซึ่งเป็นเส้นใยที่ละลายน้ำประมาณร้อยละ 7 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำในลูกแพร์มีร้อยละ 36.3 และกีวีมีร้อยละ 18.7 ลิกนินมีปริมาณร้อยละ 5.2 และ 3.2 น้ำหนักแห้งของกากลูกแพร์และกีวี โปรโทเพคติน (Protopectin) และเมททอกซิล เพคติน (Methoxyl pectin) ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำและละลายน้ำตามลำดับเป็นสารประกอบเพคตินที่พบในกากของผลไม้ทั้งสองชนิด

Vergara-Valencia et al. (2007) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความสามารถในการดูดซับน้ำมันปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงดิบ รวมถึงการประยุกต์ใช้เส้นใยอาหารเข้มข้นนี้ให้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงมีปริมาณไขมันต่ำ แต่มีปริมาณแป้งสูง และมีอัตราส่วนของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในระดับสมดุลที่ดี เส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดีเช่นเดียวกันกับเส้นใยอาหารจากผลไม้ชนิดอื่นๆ แต่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่ต่ำ ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่เตรียมจากเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงมีความสมดุลของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในระดับที่ดี และมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูง ผลการทดสอบการย่อยได้ของแป้งในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงเป็นองค์ประกอบชี้ให้เห็นว่าการเติมเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงช่วยลดค่าดัชนีไกลซิมิค (GI) ดังนั้นเส้นใยอาหารเข้มข้นจากมะม่วงจึงเป็นทางเลือกสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีความสมดุลของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำในระดับที่ดี และช่วยให้ค่า GI ของผลิตภัณฑ์อาหารลดลง

Eim et al. (2007) ได้ศึกษาผลของการเติมเส้นใยอาหารจากแครอทต่อกระบวนการทำให้สุกด้วยการทำแห้งไส้กรอกจากเนื้อหมูติดมัน โดยมีการเติมเส้นใยอาหารจากแครอทในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ร้อยละ 3, 6, 9, และ 12 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และบันทึกข้อมูลในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของไส้กรอกที่เติมเส้นใยอาหารอยู่ในช่วงวิกฤต ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเส้นใยอาหาร โดยไส้กรอกที่เติมเส้นใยอาหารร้อยละ 6, 9 และ 12 มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงระหว่างการทำให้สุก คือ ค่ากรด-ด่างที่เริ่มต้นเท่ากับ 5.76 และ 4.85 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ส่วนไส้กรอกที่เติมเส้นใยอาหารร้อยละ 3 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 5.75 และ 5.11 ในอุตสาหกรรมไส้กรอกค่าความเป็นกรดด่างเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 4.2-5.3 นอกจากนี้ในด้านเนื้อสัมผัส เช่น ความแข็ง และการอัดแน่น มีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเติมเส้นใยอาหารที่มากกว่าร้อยละ 3 และยังส่งผลต่อกระบวนการ Lipolytic ด้วยเช่นกัน โดยเมื่อปริมาณของเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการรวมตัว โดยไส้กรอกที่เติมเส้นใยอาหารร้อยละ 3 และ 6 มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรดไขมันอิสระที่ใช้เป็นตัวควบคุมในกระบวนการทำให้สุก ดังนั้นการเติมเส้นใยอาหารร้อยละ 3 จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเติมเส้นใยอาหาร

จากแครอทในไส้กรอกหมู เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับไส้กรอกมาตรฐานมากที่สุด และการเติมที่ปริมาณมากขึ้นมีผลให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสลดลง

Sun-waterhouse et al. (2008) ได้ศึกษาผลของผนังเซลล์แอปเปิ้ลและสารสกัดที่ได้จากผนังเซลล์แอปเปิ้ลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยนำแอปเปิ้ลไปผ่านกระบวนทำแห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งในไนโตรเจนเหลว และบดให้ได้ขนาด 50 ไมโครเมตรด้วยมอทาร์ หลังจากนั้นบ่มด้วย Quercetin ใน N-2-hydroxyethylpiperazine-N'-2-ethanesulfonic acid (HEPES) buffer (pH 6.5) ที่37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นการสกัดเพคติน และนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ Cyclic voltammetry (CV) พบว่า ทั้งเพคตินที่แยกได้จากผนังเซลล์ของแอปเปิ้ลและเพคตินทางการค้าทำให้วิตามินซีมีความคงตัว แต่สามารถป้องกันการออกซิเดชันของ Quercetin ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Trinidad et al. (2010) ศึกษาดัชนีไกลซิมิคของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีการบริโภคโดยทั่วไปในประเทศฟิลิปปินส์ โดยจำแนกอาหารออกเป็น 14 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากขนมปังกรอบ/เบเกอรี่/ ข้าว เส้นก๋วยเตี๋ยว แป้งจากรากพืช/พืชหัว ถั่ว/เมล็ดพืช ผลไม้/ผลไม้อบแห้ง ผัก น้ำตาล/น้ำเชื่อม และเครื่องดื่มกลูโคสมาตรฐาน อาหารควบคุมและทดสอบที่รับประทานได้จากการสุ่มจากความต้องการหลังจากมีการอดอาหารข้ามคืน ตัวอย่างเลือดจะถูกรวบรวมและนำไปอ่านค่าหาปริมาณกลูโคสในเครื่องวิเคราะห์ Clinical Chemistry พบว่า ผลิตภัณฑ์จากขนมปังกรอบ/เบเกอรี่/ ข้าว เป็นอาหารที่มีค่า GI สูง (มากกว่าหรือเท่ากับ 70) ยกเว้นขนมปังกรอบที่มีการเสริมเส้นใยอาหารและ mammon เส้นก๋วยเตี๋ยว Sotanghon ที่ค่า GI อยู่ในระดับปานกลาง (56-69) ส่วนเส้นก๋วยเตี๋ยวอื่นๆมีค่า GI ต่ำ (น้อยกว่า 55) เช่นเดียวกันกับแป้งจากรากธัญพืช ถั่วหรือเมล็ดพืช ผัก น้ำตาลน้ำมะพร้าวหรือน้ำเชื่อม ดังนั้นเส้นใยอาหารหรือส่วนประกอบต่างๆของคาร์โบไฮเดรตจากอาหารและโครงสร้างของสตาร์ชจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาหารมีค่า GI ต่ำ

Sun-Waterhouse et al. (2010) ศึกษาผลของการเติม เส้นใยอาหาร และสารประกอบโพลีฟีนอลต่อคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของขนมขบเคี้ยวชนิดแท่ง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งต่อไป ทั้งนี้ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วนคือ แท่งขนม (Snack bar base) และไส้ขนม (Snack bar filling) ผลิตแท่งขนมที่มีหรือไม่มีการเติมเส้นใยอาหารจากสองแหล่ง คือ อินนูลิน (Inulin) และเส้นใยอาหารจากแอปเปิ้ล (Apple dietary fiber; ADF) และผลิตไส้ขนมที่มี และไม่มีการเติมสารสกัดโพลีฟีนอลจากแอปเปิ้ล (ฤpple polyphenol extract; APE) ผลการศึกษาพบว่าขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งที่มีการเติม ADF ให้ปริมาณเส้นใยอาหารสูงที่สุด (ประมาณร้อยละ 5.3 น้ำหนักต่อน้ำหนัก) สารประกอบฟีนอลิกในแท่งขนมที่มีการเติม ADF และ APE แม้ผ่านการอบแล้วยังคงพบในปริมาณสูงเช่นเดิม ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งที่ไส้ขนมมีการเติม APE และแท่งขนมมีการเติม ADF หรืออินนูลินนั้นมีสารประกอบฟีนอล (2.87 และ 2.22 mg catechin equivalent (CtE)/g bar) ในปริมาณสูงกว่าเมื่อแท่งขนมไม่มีการเติม ADF หรืออินนูลิน (1.45 mgCtE/g bar) ผลการศึกษาองค์ประกอบของฟีนอลในขนม

ขบเคี้ยวชนิดแท่งโดย HPLC ชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของฟีนอลในขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งมีลักษณะใกล้เคียงกับที่พบใน APE ในส่วนของสี นั้นพบว่าการเติม APE ไม่ทำให้สีน้ำตาลของขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งเพิ่มขึ้น ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งมีค่า Aw ต่ำ บ่งชี้ว่าขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งนี้มีอายุการเก็บรักษานาน จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งที่มีการเติม ADF และ APE เป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่สะดวกในการบริโภค และเป็นแหล่งที่ดีของเส้นใยอาหารและสารโพลีฟีนอลจากแอปเปิ้ล