

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำไย

ลำไยจัดเป็นพืชอยู่ในตระกูล Sapindaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์หลายชื่อ คือ *Euphoria longana* Lam., *Euphoria longan* Strendl., *Nephelium longana* Camb. และ *Dimocarpus longan* Lour. (พาวิณ, 2543) เป็นไม้ผลที่พบทั่วไปในเขตร้อน (Tropical) และเขตกึ่งร้อน (Subtropical) ของเอเชีย ลำไยเป็นไม้พื้นเมืองของอินเดียและพม่า จากอินเดียถูกนำไปปลูกในเกาะมลายู (Malay archipelego) ประเทศจีนตอนใต้ และแพร่ไปยังเขตร้อนของอเมริกาแถบทางตอนใต้ของแคลิฟอร์เนีย และฟลอริดา (พิชัย, 2531) การปลูกเพื่อการค้าอยู่ในประเทศจีนตอนใต้ ภาคกลางของไต้หวัน และทางภาคเหนือของประเทศไทย (Tongdee, 1997) โดยจังหวัดที่ปลูกลำไยมากได้แก่ เชียงใหม่ ลำพูน เชียงราย แพร่ น่าน ลำปาง และตาก

ลำไยเป็นผลไม้ชนิดบ่มไม่สุก (Non-climacteric) มีรสหวาน มีกลิ่นหอม ไม่มีรสเปรี้ยว มีความหวานประมาณ 16-20 องศาบริกซ์ ค่าพีเอช 6.7-6.9 (ชนันท์, 2545) เนื้อลำไยสดประกอบด้วยน้ำตาลหลัก 3 ชนิด คือ กลูโคส ฟรักโทส และซูโครส กรดอินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ กรดกลูโคนิก กรดมาลิก กรดซิตริก และมีกรดอะมิโน 9 ชนิด ทำให้ลำไยมีสรรพคุณทางยา คือ ใช้เป็นยาบำรุงในคนที่เป็นโรคประสาทอ่อนๆและนอนไม่หลับ บำรุงม้าม และบำรุงหัวใจ ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของลำไยสด และลำไยอบแห้ง แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อลำไยสดและเนื้อลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบ		เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยอบแห้ง
ความชื้น	ร้อยละ	81.10	17.80
ไขมัน	ร้อยละ	0.11	0.48
เส้นใย	ร้อยละ	0.28	1.60
โปรตีน	ร้อยละ	0.97	4.60
เถ้า	ร้อยละ	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต	ร้อยละ	16.98	72.70
พลังงานความร้อน	กิโลแคลอรี/100 กรัม	72.79	311.80
แคลเซียม	มิลลิกรัม/100 กรัม	5.70	27.70

ตาราง 2.1 (ต่อ) คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อลำไยสดและเนื้อลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบ		เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยอบแห้ง
เหล็ก	มิลลิกรัม/100 กรัม	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัม/100 กรัม	35.50	159.50
โซเดียม	มิลลิกรัม/100 กรัม	-	4.50
โปตัสเซียม	มิลลิกรัม/100 กรัม	-	2,0120.00
ไนอาซีน	มิลลิกรัม/100 กรัม	-	3.03
กรดแพนโททีนิก	มิลลิกรัม/100 กรัม	-	0.57
วิตามินบีสอง	มิลลิกรัม/100 กรัม	-	0.37
วิตามินซี	มิลลิกรัม/100 กรัม	69.20	137.80

ที่มา: กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2521)

จากตาราง 2.1 จะเห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีที่มีปริมาณมากในลำไย คือ คาร์โบไฮเดรต ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำตาลชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงทำให้ลำไยมีรสหวานจัด นอกจากปริมาณความชื้นที่มีมากแล้ว องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่พบได้แก่ โปรตีน เส้นใย ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามินในกลุ่มของวิตามิน บี และซี

พันธุ์ลำไยที่นิยมปลูกมาก คือพันธุ์กระโหลก พันธุ์อีดอ พันธุ์สีชมพู พันธุ์เหั่ว และพันธุ์เบี้ยวเขียว โดยเฉพาะพันธุ์อีดอจะเป็นพันธุ์ที่ชาวสวนนิยมปลูกมากที่สุด เพราะออกดอกและเก็บเกี่ยวผลได้ก่อนพันธุ์อื่น ทำให้ได้ราคาดี เป็นพันธุ์ที่ตลาดต่างประเทศนิยม และเหมาะสำหรับแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น อบแห้ง น้ำเข้มข้น แช่แข็ง แช่ฉ่ำ และลำไยกระป๋อง เป็นต้น (พาวิณ, 2543) จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์แปรรูปต่างๆของลำไยมีหลากหลายชนิด

2.2 ผลิตภัณฑ์ลูกกวาด (Confectionery product)

ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดถือว่าเป็นสินค้าในกลุ่มอาหารที่ไม่นับเป็นอาหารหลัก เริ่มมีมาตั้งแต่เมื่อสองพันปีก่อนคริสตศักราช ปัจจุบันพบว่าอุตสาหกรรมการผลิตลูกกวาดมีขนาดใหญ่เป็นอันดับที่ 9 ของอุตสาหกรรมอาหารทั้งหมด เป็นอุตสาหกรรมที่มีความเป็นวิทยาศาสตร์และศิลปะซ่อนอยู่มากมายและเป็นอุตสาหกรรมกลุ่มที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างรูปแบบมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (สายสนมและสิริ, 2539)

1. sugar confectionery เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เคลือบด้วยน้ำตาล

2. chocolate confectionery เป็นผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เคลือบผิวด้วยช็อกโกแลต

3. flour confectionery เป็นผลิตภัณฑ์ที่อาจจัดอยู่ในพวกขนมอบ ส่วนใหญ่เป็นพวกขนมเค้กชนิดพิเศษ คูกี้ เวเฟอร์ รวมถึงพวกบิสกิต

ในประเทศสหรัฐอเมริกากำหนดให้ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดจัดอยู่ในสองกลุ่มแรกเท่านั้นและนิยมใช้คำว่าแคนดี้ (candies) มากกว่าคำว่า คอนเฟกชันนารี (confectionery) และสามารถแบ่งกลุ่มของแคนดี้ตามลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้ (สายสนมและสิริ, 2539)

1. ลูกกวาดชนิดแข็ง (hard candies หรือ high-boiled sweet) เป็นลูกกวาดที่มีความแข็งคงรูปแน่นอน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากการเคี่ยวน้ำตาลให้มีความเข้มข้นสูงมากๆ แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 1 ส่วนประกอบหลักของลูกกวาดชนิดนี้คือ น้ำตาลทราย น้ำตาลคัดแปร (invert sugar) หรือกลูโคสไซรัป ในการผลิตลูกกวาดมักใช้น้ำตาลทั้งสองชนิดร่วมกัน

2. ลูกกวาดแบบเคี้ยว (chewy confectionery) เป็นลูกกวาดที่มีส่วนประกอบของไขมันและ/หรือ milk solid ผสมกับน้ำตาลทรายและกลูโคสไซรัป เคี้ยวจนกระทั่งมีความชื้นเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ร้อยละ 12-15 ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แข็งมาก มีลักษณะเหนียวหนึบ และมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ได้แก่ คาราเมลที่ไม่มีผลึก (non grain caramel หรือ chewy caramel) กัมและเยลลี่

3. ลูกกวาดแบบมีฟองอากาศ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีฟองอากาศกระจายอยู่ในเนื้อ ทำให้โครงสร้างมีความโปร่งและมีเนื้อสัมผัสที่เบาตัวอย่างของลูกกวาดแบบมีฟองอากาศเช่น ฟัดจ์ (fudge) มาร์ชแมลโลว์ (marshmallow) เป็นต้น

ลูกกวาดชนิดที่ทำให้เกิดเจล (gelled confectionery) จัดเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ลูกกวาดที่มีการขยายตัวทางการตลาด และมีการพัฒนารูปแบบของผลิตภัณฑ์ไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสามารถปรับปรุงหรือดัดแปลงลักษณะของเนื้อสัมผัสได้อย่างหลากหลาย โดยการผสมผสานกันของสารที่ทำให้เกิดเจลชนิดต่างๆ และใช้ระดับความเข้มข้นของสารและวิธีการผลิตที่แตกต่างกันออกไป (Poppe, 1997)

ผลิตภัณฑ์เยลลี่จัดเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาด (confectionery product) ชนิดที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมหลัก (sugar confectionery) เป็นลูกกวาดแบบเคี้ยว (chewy confectionery) และยังเป็นลูกกวาดชนิดที่ทำให้เกิดเจล (gelled confectionery) (สุวรรณา, 2543)

ในปัจจุบันคำนิยามหรือคำจำกัดความของกลุ่มผลิตภัณฑ์เยลลี่ยังไม่แน่นอนเท่าใดนัก ลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้คือ มีความยืดหยุ่น นุ่มเหนียว ต้องเคี้ยวกิน ไม่ได้อมแบบลูกกวาด มีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันไปตั้งแต่อ่อนนุ่มแต่มีความยืดหยุ่นสูง ไปจนถึงเหนียวแข็งกัดขาดได้ยาก ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีความชื้นค่อนข้างสูงอยู่ระหว่างร้อยละ 10-25 เนื่องจากมีสมบัติในการจับตัวกับน้ำ (water-binding) ของไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งมีส่วนทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงสามารถใช้ปริมาณความชื้นเป็นตัวชี้บ่งชนิดของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้ (สุวรรณา, 2543)

1. ผลิตภัณฑ์เยลลี่ ความชื้นร้อยละ 18-25 เนื้อสัมผัสนุ่ม กัดขาดได้ง่าย ใช้มีดตัดได้โดยไม่มีเหนียวติดใบมีด
2. ผลิตภัณฑ์กัมชนิดแข็ง (hard gum) ความชื้นร้อยละ 10-13 เนื้อสัมผัสแข็งเหนียว กัดขาดยาก
3. ผลิตภัณฑ์กัมชนิดนุ่ม (soft gum) ความชื้นร้อยละ 16-20 เนื้อสัมผัสนุ่มเหนียว มีความยืดหยุ่นสูง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ได้แบ่งผลิตภัณฑ์เยลลี่เป็น 3 ประเภท และได้ให้ความหมายของเยลลี่แต่ละประเภทดังนี้

1. เยลลี่เหลว หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธรรมชาติ หรือสมุนไพร มาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะเหลว อาจผสมกรดผลไม้และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธรรมชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยวให้มีความชื้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสีและกลิ่นรสด้วยก็ได้ บรรจุในภาชนะที่ปิดได้สนิท

2. เยลลี่อ่อน หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ัญชาติ หรือสมุนไพร มาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะกึ่งแข็ง อาจผสมกรดผลไม้และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ัญชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยวให้มีความข้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสีและกลิ่นรสด้วยก็ได้ บรรจุในภาชนะที่ปิดได้สนิท

3. เยลลี่แข็ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ัญชาติ หรือสมุนไพร มาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาร์ราจีแนน วุ้น ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะแข็งและเหนียว อาจผสมกรดผลไม้และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ัญชาติ หรือสมุนไพร เคี้ยวให้มีความข้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจแต่งสีและกลิ่นรสด้วยก็ได้ อาจเติมฟิมพ์หรือตัดเป็นชิ้นหลังจากทิ้งไว้ให้เย็นแล้วอาจคลุกด้วยน้ำตาลหรือแป้งบริโภค

2.3 ส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตเยลลี่

2.3.1 น้ำตาล (sugar)

น้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดและเป็นสารให้รสหวานแก่ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมลูกกวาด ได้แก่

1. น้ำตาลซูโครส (sucrose) (สายสนมและสรี, 2543)

น้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทรายที่ผลิตเป็นอุตสาหกรรมจะผลิตจากอ้อย (sugar cane)

น้ำตาลที่ใช้ในอุตสาหกรรมลูกกวาดมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามขนาดของผลึกได้ดังนี้

น้ำตาลกรวด (candy sugar)	มีขนาดผลึก	7-35	มิลลิเมตร
น้ำตาลทราย (granulated sugar)	มีขนาดผลึก	0.2-2.5	มิลลิเมตร
น้ำตาลคาสเทอร์ (caster sugar)	มีขนาดผลึก	0.075-0.3	มิลลิเมตร
น้ำตาลไอซิง (icing sugar)	มีขนาดผลึก	< 0.13	มิลลิเมตร
น้ำตาลไมโครคริสทอล (microcrystalline sugar)	มีขนาดผลึก	5-20	ไมโครเมตร

การเลือกใช้น้ำตาลชนิดต่างๆจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ น้ำตาลที่นิยมใช้ในการผลิตส่วนใหญ่คือ น้ำตาลทราย แต่ในกรณีที่มีการผลิตแบบต่อเนื่องจะใช้น้ำตาลที่สามารถละลายได้เร็ว จึงเลือกน้ำตาลไมโครคริสทอล ซึ่งสามารถละลายได้ง่าย ส่วนในการเคลือบลูกกวาดจะนิยมใช้น้ำตาลคาสเทอร์ เป็นตัวดูดซับความชื้นและขัดให้ผิว

ของเมล็ดลูกกวาดเรียบ นอกจากนี้ยังนิยมใช้น้ำตาลคาสเทอร์ในการคลุกกับขนมประเภทกัมและเยลลี่ เพื่อเกาะติดผิวขนมให้มีลักษณะแวววาว ส่วนน้ำตาลไอซิง จะใช้คลุกเพื่อเคลือบผิวหมากฝรั่งชนิดแผ่น หรือเคลือบมาร์ชเมลโลว์เพื่อป้องกันการเกาะติดกัน

2. น้ำตาลตัดแปร (invert sugar)

น้ำตาลตัดแปรเป็นน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์น้ำตาลซูโครสให้เป็นน้ำตาลรีดิวิงส์คือ กลูโคส และฟรักโทส หน้าที่ของน้ำตาลชนิดนี้คือเป็นสารให้ความชุ่มชื้น ช่วยเพิ่มการละลายของส่วนผสม และป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลซูโครส โดยเฉพาะในอาหารที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูง

3. กลูโคสไซรัป (glucose syrup, corn syrup, liquid glucose)

กลูโคสไซรัปหรือที่รู้จักโดยทั่วไปว่าเบะแซ ประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 20 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 80 ประกอบด้วยกลูโคส มอลโทส โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosacchrides) และน้ำตาลโมเลกุลใหญ่อื่นๆ กลูโคสไซรัปได้จากการย่อยสลายหรือไฮโดรไลซ์แป้งเช่น แป้งข้าวโพดหรือแป้งมันสำปะหลัง การไฮโดรไลซ์อาจทำได้โดยการใช้น้ำหรือการใช้กรด กลูโคสไซรัปที่ใช้ในอุตสาหกรรมลูกกวาดโดยทั่วไปจะเป็นชนิดที่มีการใช้กรดในการไฮโดรไลซ์ กลูโคสไซรัปที่มีจำหน่ายในอุตสาหกรรมจะผ่านการไฮโดรไลซ์ในระดับที่ไม่เท่ากัน โดยดูได้จากค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, D.E.) ค่า D.E. คือค่าที่บอกจำนวนหน่วยรีดิวิงส์ (reducing unit) ในรูป ดี-กลูโคสที่มีในน้ำหนักแห้งทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ ถ้าแป้งถูกไฮโดรไลซ์มากจะมีน้ำตาลโมเลกุลเล็กเช่น กลูโคสและมอลโทส เป็นปริมาณมาก จะให้ค่า D.E. สูง แต่ถ้าแป้งถูกไฮโดรไลซ์น้อย จะมีกลูโคสน้อย และมีโอลิโกแซคคาไรด์มาก จะให้ค่า D.E. ต่ำ

หน้าที่ที่สำคัญของกลูโคสไซรัปในอุตสาหกรรมลูกกวาดคือ

1. การป้องกันการตกผลึกของซูโครส

2. ช่วยเพิ่มปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid) ในลูกกวาด ทำให้ลูกกวาดมีความเสถียรต่อการเสื่อมเสียด้วยจุลินทรีย์ในกรณีที่ใช้น้ำตาลทรายเพียงอย่างเดียวในการผลิตเมื่อผิวหน้าลูกกวาดดูดความชื้นจากสภาพแวดล้อมและอยู่ในสภาพสารละลายอิ่มตัว จะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ไม่มากพอที่จะยับยั้งจุลินทรีย์ที่เจริญได้ในสภาพที่ความชื้นต่ำ การใช้กลูโคสไซรัปในการผลิตจะทำให้สารละลายอิ่มตัวที่เกิดขึ้นมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูงกว่าการใช้น้ำตาลทรายเพียงอย่างเดียวและเพียงพอที่จะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

ตาราง 2.2 สมบัติและหน้าที่ของกลูโคสไซรัปในลูกกวาด

สมบัติและหน้าที่	D.E. ของกลูโคสไซรัป				
	20-38	38-48	48-58	58-68	68 ขึ้นไป
ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล	น้อย				มาก
ดูดความชื้น	น้อย				มาก
ความหวาน	น้อย				มาก
การให้เนื้อ	มาก				น้อย
การเหนียวติดกัน	มาก				น้อย
ป้องกันไม่ให้น้ำตาลตกผลึก	มาก				น้อย
ความหนืด	มาก				น้อย
ส่วนที่ให้คุณค่าทางอาหาร			เท่ากัน		
ทำให้ผลิตภัณฑ์แฉะวาว			เท่ากัน		
ผลต่อการละลาย			เท่ากัน		
สามารถควบคุมการตกผลึก			เท่ากัน		

ที่มา: Jackson and Howling (1995)

จากตาราง 2.2 จะเห็นว่ากลูโคสไซรัปมีสมบัติแตกต่างกันไปตามค่าของ D.E. และหน้าที่ในผลิตภัณฑ์ โดยกลูโคสไซรัปที่มีค่า D.E. ต่ำ จะมีความหนืดสูง มีความหวานต่ำ ช่วยป้องกันการตกผลึกได้ดี มีการดูดความชื้นต่ำ จึงเหมาะจะนำไปเป็นส่วนผสมในสารที่ใช้เคลือบผิว ช่วยให้มีความนุ่ม สัมผัสเรียบเนียน และมีความเลื่อมมัน ทนต่อการแตกหักได้ดี กลูโคสไซรัปที่มีค่า D.E. สูงขึ้นจะมีความหวานเพิ่มขึ้น แต่ความหนืดจะลดลง ดูดความชื้นได้ดี และมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ง่ายกว่าแบบที่มีค่า D.E. ต่ำ

มอลโทเดกซทริน (maltodextrin) ซึ่งบางทีเรียกว่าสตาร์ชกัม (starch gum) หรือ สตาร์ชไซรัป (starch syrup) มีองค์ประกอบคล้ายกลูโคสไซรัปมาก มีค่า Dextrose Equivalent น้อยกว่า 20 เนื่องจากแป็งถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลเพียงเล็กน้อย ที่ผลิตจำหน่ายจะทำในลักษณะเป็นผงสีขาว ความชื้นประมาณร้อยละ 6 สามารถละลายน้ำได้ดีมาก มีรสหวานเล็กน้อย ในอุตสาหกรรมลูกกวาดนิยมทำเป็นส่วนใส่ ใช้ในการผลิตทอฟฟี่ชนิดเคี้ยว และคาราเมลบางชนิด โดยใช้ประมาณร้อยละ 5-10 ข้อดีของมอลโทเดกซทรินคือ สามารถยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาล เป็นสารให้ความคงตัวกับผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยหดตัว ทำให้ควบคุมการผลิตได้ง่ายและช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ รวมถึงปรับปรุงทางด้านความรู้สึกในปาก (mouth feel) (Minifie, 1989)

Khouryieh *et al.* (2005) ใช้มอลโทเดกซทรินร้อยละ 3.14 เป็นส่วนผสม ในการผลิต เยลลี่ ชนิดปราศจากน้ำตาล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและความรู้สึกในปาก น้ำตาล ถูกใช้โดยทั่วไปในอาหารประเภทเจลเพื่อเป็นสารให้ความหวานและเพื่อให้เกิด ลักษณะที่ดีแก่ผลิตภัณฑ์ โดยน้ำตาลซูโครส ถือเป็นสารให้ความหวานตัวหลักในผลิตภัณฑ์ประเภท เจลและยังมีผลต่อโครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัสของเจล

Gamero *et al.* (1993) ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำตาลต่อสมบัติทางรีโอโลยีของ เจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและ โลกัสต์บีนกัม โดยให้น้ำตาลมีระดับความเข้มข้นเป็น 18.3 36.6 และ 55 องศาบริกซ์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลมากขึ้น ค่า initial force (F_0) จะมีค่ามาก ขึ้นนั่นคือเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ที่ความเข้มข้น 55 องศาบริกซ์ เจลจะมีค่า F_0 ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fiszman and Duran (1992) โดยพบว่าเจลจะมีความแข็งแรงลดลง เมื่อมีความเข้มข้นของน้ำตาลมากกว่าร้อยละ 50 ต่อมา Papageorgiou and Kasapis (1995) ศึกษาผลของการเติมน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพของเจลผสมระหว่างเจลแลน (gellan) และเจลาติน (gelatin) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสจนถึงร้อยละ 50 จะช่วยให้เจล มีความคงตัวและมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่ Nishinari *et al.* (1995) ศึกษาผลของน้ำตาล ต่อสมบัติทางรีโอโลยีของอะการ์โรส (agarose) และคาร์ราจีแนน พบว่า การเติมน้ำตาลซูโครสจะ ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในอะการ์โรสเจล และแคลปา-คาร์ราจีแนนเจล โดยน้ำตาล จะไปช่วยเพิ่ม จังก์ชันโซนโดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโพลีเมอร์และกลุ่มไฮดรอกซิลของน้ำตาล และทำให้ จังก์ชันโซนเกิดความคงตัว ต่อมา Whittaker *et al.* (1997) ศึกษาผลของน้ำตาลต่อสมบัติทางรี- โอโลยีของเจลแลนกัม ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสร้อยละ 30 จะทำให้เจลแลนกัม เกิดเจลได้ง่ายขึ้นและช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจล แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น ของน้ำตาลซูโครสเป็นร้อยละ 40-60 จะทำให้เจลมีโครงสร้างอ่อนแอลง เนื่องจากน้ำตาลจะไป แย่งจับโมเลกุลของน้ำ ทำให้มีน้ำไม่เพียงพอต่อการพองตัวของไฮโดรคอลลอยด์ มีให้เกิดเจลอย่าง ไม่สมบูรณ์ เจลที่ได้จึงมีโครงสร้างที่อ่อนแอ นอกจากนี้ Bayari *et al.* (2004) ได้ศึกษาผลของ น้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเจลผสม โดยใช้วิธีการทดสอบแบบสั่น (oscillatory test) พบว่าเจลผสมระหว่างแคลปา-คาร์ราจีแนนและ โลกัสต์บีนกัม ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 1.2 มีค่า G' และ G'' ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสจากร้อยละ 10 เป็น ร้อยละ 20 ในขณะที่ Braga and Cunha (2004) ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส ต่อ สมบัติทางรีโอโลยีของเจลผสมระหว่างโซเดียมเคซิเนต (sodium caseinate) และแซนแทนกัม (xanthan gum) โดยใช้วิธีการทดสอบการพักความเค้น พบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสมิบบทบาท สำคัญต่อโครงสร้างตาข่ายของเจลและมีผลต่อความยืดหยุ่นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยเจลผสมที่มี

ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสร้อยละ 7.5 จะได้เจลที่มีความคงตัวและมีความยืดหยุ่นสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเป็นร้อยละ 7.5-15 พบว่าเจลที่ได้มีความคงตัวลดลง

2.3.2 ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids)

ไฮโดรคอลลอยด์ เป็นโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ละลายในน้ำปริมาณมากได้ดี หน้าที่เบื้องต้นของไฮโดรคอลลอยด์ในระบบอาหารต่างๆ ไปได้คือ ความสามารถในการตัดแปรพฤติกรรมของน้ำในอาหาร ที่สำคัญคือทำให้โมเลกุลของน้ำบางส่วนไม่เคลื่อนที่ ส่วนที่ถูกจับไว้ในไฮโดรคอลลอยด์ก็จะไม่หลุดออกมา ส่วนหน้าที่อื่นๆที่เด่นชัดคือ ช่วยลดอัตราการระเหยของน้ำ เปลี่ยนแปลงจุดเยือกแข็ง ตัดแปรการเกิดผลึกน้ำแข็งในระหว่างเก็บในสภาพแช่เยือกแข็ง ควบคุมและปรับสมบัติในการไหล พยุงอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำให้แขวนลอยอยู่ในระบบได้ ทำให้โฟม (foam) และอิมัลชัน (emulsion) คงตัวและทำให้หยดน้ำมันกระจายตัวอยู่ในระบบที่มีไฮโดรคอลลอยด์อยู่ด้วยได้ ในส่วนของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์อย่างกว้างขวางจนถึงกับเรียกผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเหล่านี้ว่า hydrocolloid confectionery โดยทั่วไปแล้วไฮโดรคอลลอยด์จะทำหน้าที่ 3 ประการคือ

1. ทำให้สารละลายข้นหนืด เกิดจากการที่โมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์ดูดซับน้ำแล้วคลายตัวออก ไม่เกาะเกี่ยวกันอย่างแน่นหนาต่อไป กลายเป็นโมเลกุลสายตรงยาวๆ
2. ทำให้เกิดเจล โดยการสร้างจังก์ชัน (junction) ระหว่างโมเลกุลใหญ่ขึ้นภายใต้สภาวะจำเพาะ โครงสร้างนั้นจะเป็นตัวบอกความแข็งแรงของเจลที่ได้ด้วย และเรียกไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำหน้าที่นี้ว่า สารทำให้เกิดเจล (gelling agents)
3. ทำให้เกิดความคงตัว โดยการอุ้มสารอื่นๆทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำที่อยู่ในระบบไว้ในรูปของการแขวนลอย ไม่มีการแยกชั้น ไฮโดรคอลลอยด์พวกนี้จะไม่สร้างเจลแต่เวลาละลายน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ตัวอย่างสารพวกนี้คือ กัม (gum) และสารทำให้ข้นหนืด (thickener) พวกสารทำให้เกิดเจลส่วนมากจะทำหน้าที่นี้ด้วย โดยการ โอบอุ้มอนุภาคอื่นๆเข้าไปอยู่ในร่างแห 3 มิติขณะที่เกิดเจล

ไฮโดรคอลลอยด์มีอยู่มากมายหลายชนิด โดยมากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากธรรมชาติทั้งจากสัตว์และพืช และมีบางชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด มีหน้าที่เฉพาะในผลิตภัณฑ์นั้นๆ บางชนิดอาจทำหน้าที่ได้เพียงอย่างเดียว แต่บางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้มากกว่าหนึ่งหน้าที่ ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 หน้าที่ของไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

ไฮโดรคอลลอยด์	หน้าที่		
	thickener	gelling agent	stabilizer
กัวร์กัม	+	-	-
โลคัสต์บีนกัม	+	-	-
เพกติน	-	+	+
แอลจินेट	+	+	+
อะการ์	-	+	+
คาร์ราจีแนน	-	+	+
กัมทรากาแคนต์	+	-	-
กัมอะราบิก	+	-	+
สตาร์ช	+	-	+
แซนแทนกัม	+	-	+

หมายเหตุ : + ทำหน้าที่ - ไม่ทำหน้าที่

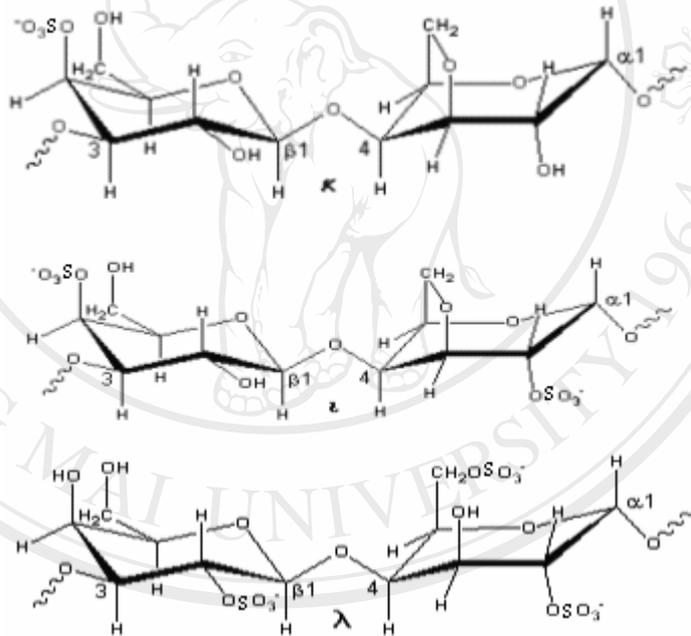
ที่มา : นิธิยา (2545)

ไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาดได้แก่ แอลจินेट วุ้น กัมอะราบิก คาร์ราจีแนน กัวร์กัม กัมทรากาแคนต์ โลคัสต์บีนกัม และแซนแทนกัม เป็นต้น โดยจะใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียวหรือมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันก็ได้ (ศิwapร, 2535) ในขอบเขตของการพัฒนาด้านอาหาร การผสมผสานกันของไฮโดรคอลลอยด์มากกว่า 1 ชนิด เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และปรับปรุงลักษณะทางประสาทสัมผัส เพื่อดัดแปลงสมบัติทางรีโอโลยี และเพื่อแก้ปัญหาทางด้านการผลิตบางอย่างในอุตสาหกรรม (Norziah *et al.*, 2006)

สุธาณี (2543) ได้ศึกษาการใช้แป้งนุกร่วมกับคาร์ราจีแนนในผลิตภัณฑ์เยลลี่ พบว่า เยลลี่ที่ใช้แป้งนุกผสมคาร์ราจีแนนในอัตราส่วน 60 : 40 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 ปริมาณน้ำตาลซูโครสร้อยละ 30 และใช้น้ำฝรั่งทดแทนน้ำที่เติม พบว่าจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีและได้รับคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสสูงสุด ในขณะที่ Khouryieh *et al.* (2005) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ชนิดปราศจากน้ำตาลที่ใช้แซนแทนกัมร่วมกับโลคัสต์บีนกัม พบว่า การใช้แซนแทนกัมร่วมกับโลคัสต์บีนกัมในอัตราส่วน 1 : 1 นอกจากจะช่วยให้เพิ่มความคงตัวและความยืดหยุ่นแล้วยังสามารถลดการเกิดการแยกน้ำ (syneresis) ได้อีกด้วย

สำหรับสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. คาร์ราจีแนน หรือไอรินมอส เป็นโพลีแซคคาไรด์ซัลเฟตที่สกัดจากสาหร่ายสีแดง คือ *Chondrus crispus* และ *Gigartina stellata* ด้วยสารละลายด่างเจือจาง โดยคาร์ราจีแนนแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ แคลปลา-คาร์ราจีแนน ไอโอดา-คาร์ราจีแนน และแลมปีดา-คาร์ราจีแนน ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) ที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ตำแหน่งและระดับต่างๆ กัน เช่น แคลปลา-คาร์ราจีแนนเป็น 1→3 ดี-กาแล็กโทส-4-ซัลเฟต และ 1→4 3,6-แอนไฮโดร-ดี-กาแล็กโทสสลับกัน ส่วนโครงสร้างของไอโอดา-คาร์ราจีแนนในโมเลกุลประกอบด้วย 1→3 ดี-กาแล็กโทส-4-ซัลเฟต และ 1→4 3,6-แอนไฮโดร-ดี-กาแล็กโทส-2-ซัลเฟตสลับกัน สำหรับแลมปีดา-คาร์ราจีแนน ประกอบด้วย 1→3 ดี-กาแล็กโทส-2-ซัลเฟต และ 1→4 กาแล็กโทส-2,6-ไดซัลเฟต สลับกัน (อรุณี, 2547) ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 โครงสร้างของแคลปลา ไอโอดาและแลมปีดาคาร์ราจีแนน

ที่มา : Imeson (1997)

แคลปลา-คาร์ราจีแนนละลายได้ดีในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เจลที่ได้จะมีลักษณะเปราะและเกิดการแยกตัวของน้ำได้ง่าย จึงมักใช้ร่วมกับกัมตัวอื่น เช่น โคล์คัสต์บินกัม เพื่อแก้ปัญหาส่วนนี้สำหรับไอโอดา-คาร์ราจีแนนจะละลายในน้ำอุ่น 55 องศาเซลเซียส เจลมีความยืดหยุ่น (elastic gel) โดยไม่มีการแยกตัวของน้ำ ส่วนแลมปีดา-คาร์ราจีแนนนั้นสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดเท่านั้นเนื่องจากมีสมบัติไม่เกิดเจล (สุวรรณ, 2543)

2. โลคัสต์บีนกัม เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ได้จากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดพืชตระกูลถั่ว มีชื่อสามัญว่า Carob (*Ceratonia siliqua* L.) มีโครงสร้างหลักเป็นโพลีแมนแนน (polymannan) ประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนส (mannose) ต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4 และมีแขนง แยกเป็นน้ำตาลกาแล็กโทสโมเลกุลเดี่ยวต่อกันด้วยพันธะ 1,6 โครงสร้างโมเลกุลของโลคัสต์บีนกัมมีอัตราส่วนของน้ำตาลแมนโนส ต่อน้ำตาลกาแล็กโทสเป็น 4 ต่อ 1 มีน้ำหนักโมเลกุล 310,000 คาลตัน โลคัสต์บีนกัมมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็นแต่ละลายในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเกิดเจลได้เอง การเกิดเจลต้องผสมกับกัมชนิดอื่น

การใช้โลคัสต์บีนกัมผสมกับแคปปา-คาร์ราจีแนน จะช่วยเสริมให้เจลมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เปลี่ยนเนื้อสัมผัสเจล จากเปราะและแตกง่ายเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่นสูง และป้องกันการแยกตัวของน้ำ อัตราส่วนที่เหมาะสมของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อโลคัสต์บีนกัม คือ 2 : 1 จะทำให้เกิดเจลที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด และอัตราส่วน 1 : 4 จะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำน้อยที่สุด นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น fish gels และ dessert gels

โลคัสต์บีนกัมสามารถก่อเจลร่วมกับ แคปปา-คาร์ราจีแนน จะได้เจลมีลักษณะคล้ายเจลที่เกิดจาก เจลาติน คือมีความยืดหยุ่น และค่อนข้างเสถียรในขณะเก็บรักษา ดังนั้นการผลิตเจลจากผลิตภัณฑ์จากพืช จึงเหมาะกับผู้รับประทานอาหารมังสวิรัตซึ่งไม่สามารถรับประทานผลิตภัณฑ์จากสัตว์ เช่น เจลาตินได้ (อรุณี, 2547) Christensen and Trudsoe (1980); Arnaud *et al.* (1989); Turquois *et al.* (1992) พบว่าอันตรกิริยาระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม จะทำให้ได้เจลที่มีความแข็งแรง มีความคงตัว และความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บีนกัมคือ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการของผู้บริโภค คือตั้งแต่เจลเปราะ (brittle gel) จนถึงเจลเหนียวยืด (elastic gel)

การใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บีนกัมถูกศึกษามานานแล้ว ตั้งแต่มีการพบว่า โลคัสต์บีนกัมสามารถทำให้สารละลายคาร์ราจีแนนที่มีความเข้มข้นต่ำมาก ๆ เกิดเจลได้ สามารถเกิดเป็นเจลได้ (Dea and Morrison, 1975)

เป็นที่โต้เถียงกันเกี่ยวกับสมบัติในการเสริมฤทธิ์กันของเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม โดยมีหลายทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายซึ่งพอจะสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้

Dea *et al.* (1972) พบว่าเกิดการจับคู่กันระหว่าง mannan backbone ที่ยังไม่ถูกแทนที่กับ helic ของคาร์ราจีแนน ก่อให้เกิดจังก์ชันโซนที่มีจำนวนมากขึ้น ในขณะที่ Cairns *et al.* (1987) พบว่าไม่มีความเฉพาะเจาะจงของปฏิกิริยาระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม มีเพียงการแทรกตัวของโลคัสต์บีนกัมเข้าไปในโครงสร้างของคาร์ราจีแนนเท่านั้น ต่อมา Rochas *et al.*

(1990) ใช้ $^{13}\text{C-NMR}$ ในการศึกษาและพบข้อขัดแย้งเกิดขึ้น โดยพบว่า กาแล็กโทแมนแนน (galactomannan) จะสูญเสียความสามารถในการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่ามีความเฉพาะเจาะจงของปฏิกิริยาระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม โดยเจลผสมจะประกอบด้วย coupled network ที่มีลักษณะของจังก์ชัน โชนเฉพาะของคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม สอดคล้องกับ Turquois *et al.* (1992) ที่ใช้เทคนิคทางรีโอโลยีในการศึกษา และพบว่าเป็นไปได้ที่การสูญเสียความสามารถในการเคลื่อนที่ของ กาแล็กโทแมนแนน เกิดจาก self-aggregation ของโลคัสต์บีนกัม ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคาร์ราจีแนน ต่อมา Piculell *et al.* (1994) ใช้ $^{113}\text{Cs-NMR}$ ในการหาเหตุผลมาสนับสนุนการเชื่อมต่อระหว่าง helic ของ คาร์ราจีแนนกับกาแล็กโทแมนแนนในขณะที่ Viebke (1995) ศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ในสภาวะที่มีไอออน โดยใช้เทคนิค light scattering พบว่า การเชื่อมต่อระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมจะเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีการกระตุ้นให้คาร์ราจีแนนเกิด self-association โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมโพแทสเซียมคลอไรด์ และ โซเดียมไอโอไดด์ เพื่อเป็นตัวกระตุ้น โดยก่อนหน้านั้น Tako and Nakamura (1986) ได้ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติก พบว่า ปฏิกิริยาการเสริมฤทธิ์กันระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม จะเกิดในสภาวะที่มีโพแทสเซียมไอออนเท่านั้น โดยโซเดียมไอออนและแคลเซียมไอออนจะไม่มีผลให้เกิดปฏิกิริยาเสริมฤทธิ์กัน และการเกิด self-association ของคาร์ราจีแนนจะเกิดได้ต้องมีปริมาณคาร์ราจีแนนที่มากเกินไป Stading and Hermansson (1993) พบว่าเมื่อให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนมากกว่า 0.10 โมลาร์ ความแข็งแรงของเจลผสมจะไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Turquois *et al.* (1992) พบว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเสริมฤทธิ์กันอยู่ในช่วง 0.05-0.10 โมลาร์ นอกจากนี้ Murayama *et al.* (1995) ตั้งเกตว่าการเติมโลคัสต์บีนกัม สัดส่วนน้อยๆ ลงในคาร์ราจีแนน จะสามารถตัดแปลงพฤติกรรมทางรีโอโลยี และได้เจลที่มีความคงตัวและมีความยืดหยุ่นสูง โดย Lundin and Hermansson (1995) ศึกษาผลของโลคัสต์บีนกัมต่อโครงสร้างของคาร์ราจีแนน พบว่า random coil ของโลคัสต์บีนกัมจะขัดขวางการเกิด self-aggregation ของคาร์ราจีแนน และนำมาซึ่งสมบัติทางวิสโคอิลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไป

2.4 การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร

2.4.1 การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้ความรู้สึกของมนุษย์

ผู้ทดสอบชิมหรือผู้ชิม เป็นเครื่องมือในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ไม่มีเครื่องมือชนิดใดมาทดแทนได้ สามารถแสดงความรู้สึกได้ทั้งจากการรับประทาน และการสัมผัสด้วยมือ เช่นความนุ่มของขนมปังเมื่อใช้นิ้วสัมผัส แต่ผลที่ได้จากผู้ทดสอบจะมีความผันแปรมากจึงต้องมีวิธีคัดเลือกและฝึกฝน เพื่อให้ได้ผลการตัดสินการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่แม่นยำและเชื่อถือได้ การอธิบายเนื้อสัมผัสจำแนกตามความรู้สึกในปาก จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนตามลำดับ (Cardello and Maller, 1987)

ขั้นที่ 1 ความรู้สึกเมื่อกัดอาหารครั้งแรก (initial or first bite) เช่นความแข็ง ความเปราะ หรือ ความหนืด

ขั้นที่ 2 ความรู้สึกเมื่อเคี้ยวหรือบดอาหาร (masticatory or chewing) เช่น ความเหนียว หนืด ความยืดหยุ่น

ขั้นที่ 3 ความรู้สึกหลังจากการเคี้ยว (residual phase) เช่นการเคลือบในปาก

2.4.2 การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือ

วิธีการทดสอบเพื่อชี้บ่งสมบัติหรือลักษณะเนื้อสัมผัสโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี

1. Empirical methods เป็นวิธีการทดสอบทางกายภาพที่กระทำกับตัวอย่างที่วัดในทิศทางเดียว และเป็นวิธีทดสอบที่สร้างขึ้นจากผลการทดลองและการสังเกต ที่ขาดหลักอ้างอิงพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์เท่าที่ควร แต่มีคุณภาพเพียงพอที่จะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพของลักษณะเนื้อสัมผัสในอุตสาหกรรมอาหารได้ ตัวอย่างเครื่องมือทดสอบดังกล่าวเช่น

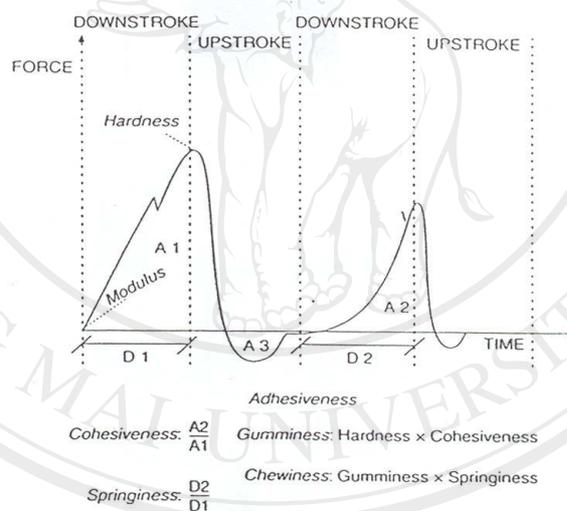
- Adam's consistometer : เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการควบคุมคุณภาพของเนื้อแอปเปิ้ลดิบและข้าวโพดชนิดครีม โดยทำการวัดระยะทางที่ตัวอย่างไหลแผ่ออกไปในเวลาที่กำหนด ซึ่งระยะทางที่ไหลแผ่ออกไปจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวอย่าง ได้แก่ รูปร่าง ขนาด อนุภาค แรงตึงผิวของตัวอย่าง

- Bloom Gelometer : เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้วัดค่า Bloom strength ของเจลาตินในโรงงานอาหาร และอุตสาหกรรมอื่นๆเพื่อแบ่งเกรดเจลาติน โดยเป็นการวัดแรงที่ใช้กดหัวกรรปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ลงไปในเจลาตินมาตรฐานที่ระยะความลึก 4 มิลลิเมตร (Rosenthal, 1999)

แม้ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือดังกล่าวนี้ จะไม่ใช่ค่าทางวิทยาศาสตร์ที่ชี้บ่งถึงพฤติกรรมกรรปไหลของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ แต่เป็นค่าที่สัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างดี โดยต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง และกำหนดค่าของการวัดให้แน่นอนและเป็นมาตรฐาน

2. Imitative methods เป็นวิธีการทดสอบที่มีกลไกเลียนแบบจังหวะการบดเคี้ยวอาหารของมนุษย์ โดยเป็นการวัดค่าแรงกดหรือการเปลี่ยนรูปในแต่ละลำดับการทดสอบ วิธีการนี้ให้ค่าที่เป็นมาตรฐานของเนื้อสัมผัสอาหาร ได้แก่ Texture Profile Analysis (TPA) มีกลไกการเลียนแบบการบดเคี้ยว 2 ครั้ง และให้ค่าที่สัมพันธ์กับการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมมากที่สุด

วิธีการนี้ทำได้โดยใช้หัวกดปลายแบนกดลงบนตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่ ตามอัตราการเปลี่ยนรูปที่เกิดไว้ ค่าแรงต้านการกดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างอาหาร จะถูกวัดเมื่ออาหารถูกกด หลังจากการบดเคี้ยวครั้งแรกนี้ หัวกดจะถูกยกขึ้นเพื่อปล่อยให้ตัวอย่างคลายตัว ในขณะที่แรงดึงที่เกิดจากความเหนียวของชิ้นอาหารที่ทำให้ติดกับหัวกดขึ้นไปจะถูกวัดค่า และในการบดเคี้ยวครั้งที่สอง เมื่อตัวอย่างถูกกดอีกครั้ง จะเกิดแรงต้านขณะที่ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนรูป (Smewing, 1999) กราฟที่ได้จากการวัด Texture Profile Analysis แสดงดังรูป 2.2



รูป 2.2 รูปแบบกราฟที่สร้างได้จาก Texture Profile Analysis

ที่มา: Smewing (1999)

จากกราฟในรูป 2.2 พารามิเตอร์ที่บ่งลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากการวัดตัวอย่างโดยวิธี Texture Profile Analysis ได้แก่

Hardness : ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดหัววัดลงบนตัวอย่างครั้งแรก

Fracturability : ค่าแรงที่ทำให้ตัวอย่างเปราะหรือแตกออกเมื่อกดหัววัดบนตัวอย่างครั้งแรก จากกราฟจะเป็นตำแหน่งแรงสูงสุดก่อนที่แรงจะตกหลังจากที่ตัวอย่างแตกออก หลังจากนั้นแรงจะเพิ่มขึ้นไปอีกครั้งจนถึงค่าแรงสูงสุด ค่าความเปราะนี้บางครั้งอาจใช้คำว่า “brittleness”

Adhesiveness : งานที่ต้องการใช้ในการดึงหัววัดออกจากผิวหน้าของตัวอย่างจากการกดครั้งแรก คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ A3 ตัวอย่างที่มีผิวหน้าเหนียวหรือเกาะติดกับหัววัด จะทำให้มีพื้นที่ดังกล่าวมาก

Cohesiveness : ความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นภายในชิ้นตัวอย่าง คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่สองหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งแรก

Springiness : ระยะทางที่ตัวอย่างคลายตัวกลับขึ้นมาหลังจากดึงหัววัดขึ้น คำนวณจากเวลาที่ใช้ในการกดตัวอย่างครั้งที่สองจนถึงจุดแรงสูงสุด หารด้วยเวลาที่ใช้ในการกดตัวอย่างครั้งแรกจนถึงจุดแรงสูงสุด โดยเริ่มคิดเวลาเมื่อเริ่มมีแรงต้านเกิดขึ้นจากการกดตัวอย่าง บางครั้งอาจใช้คำว่า “elasticity”

Gumminess : พลังงานที่ใช้ในการบดเคี้ยวอาหารกึ่งแข็งจนอยู่ในสภาพพร้อมจะกลืน คำนวณได้จากการนำค่า hardness คูณด้วยค่า cohesiveness

Chewiness : พลังงานที่ใช้ในการบดเคี้ยวอาหารแข็งจนอยู่ในสภาพพร้อมจะกลืน คำนวณได้จากการนำค่า gumminess คูณด้วยค่า springiness

3. Fundamental methods เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของเจลหรือวัสดุอย่างแท้จริง โดยใช้หลักการวัดพร้อมทั้งแสดงค่าออกมาเป็นหน่วยในทางวิทยาศาสตร์ และสามารถนำความสัมพันธ์จากสมบัติต่างๆของวัสดุที่วัดได้ไปทำนายค่าของสมบัติอื่นที่เกี่ยวข้องได้ วิธีการนี้สามารถวัดได้ทั้งแบบ large deformation หรือวิธีการวัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างถาวร โดยโครงสร้างเกิดการเสียหาย และ small deformation หรือวิธีการวัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อยโดยโครงสร้างไม่เกิดการเสียหายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง อยู่ในช่วง linear viscoelastic region วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การทดสอบการคืบ (creep test) การทดสอบการพักความเค้น (relaxation test) และการทดสอบแบบสั่น (dynamic oscillatory test)

2.5 รีโวลยี (Rheology)

รีโวลยี เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (flow) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง วัสดุทุกชนิดมีคุณสมบัติทางรีโวลยีอยู่ในตัวด้วยเหตุนี้จึงทำให้รีโวลยีแพร่หลายไปในวิทยาศาสตร์แทบทุกด้าน เช่น เทคโนโลยีด้านคอนกรีต ซีเมนต์ พลาสติก หรือแม้แต่ด้านวิทยาศาสตร์การอาหาร การวัดทางรีโวลยีถือว่ามีความสัมพันธ์กับอุตสาหกรรมอาหาร ตั้งแต่วัตถุดิบ ระหว่างการผลิต จนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Steffe, 1996)

อาหารถือว่าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนซึ่งจะแสดงพฤติกรรมทางกลที่แตกต่างกัน อาหารทุกชนิดไม่ได้แสดงความเป็นของแข็ง (solid) หรือของเหลว (liquid) อย่างสมบูรณ์ แต่จะแสดงความเป็นของแข็งยืดหยุ่น (elastic solid) และของไหลหนืด (viscous fluid) ร่วมกัน เรียกวัสดุที่มีสมบัติแบบนี้ว่า วิสโคอีลาสติก (viscoelastic) และเมื่อให้แรง แก่อาหารที่มีลักษณะเป็น วิสโคอีลาสติก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจำเป็นต้องใช้เวลาและเมื่อถอนแรงออกจากวัสดุ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Gunasekaran and Mehmet, 2000)

การศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติกเป็นส่วนหนึ่งในศาสตร์รีโอโลยีและปัจจุบันยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ เนื่องจากอาหารหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกมากกว่าเป็นของแข็งหรือของเหลวเพียงอย่างเดียวเช่น เนยแข็ง น้ำสลัดแบบข้น เยลลี่ หรือแม้แต่ผักผลไม้บางชนิด (Rao and Steffe, 1992)

สมบัติทางรีโอโลยีที่มีลักษณะเฉพาะของอาหารหลายชนิดถูกรายงานและตีพิมพ์บ้างแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม ค่าต่างๆ ที่ถูกรายงานสำหรับด้านอาหารยังไม่ถูกต้องแม่นยำมากนัก เนื่องจากปัจจัยในหลายด้านเช่น สายพันธุ์ ความแก่อ่อน องค์ประกอบภายใน กระบวนการผลิต อุณหภูมิ เวลา เทคนิคการวิเคราะห์ อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ สิ่งต่างๆเหล่านี้ ล้วนมีอิทธิพลต่อสมบัติทางรีโอโลยี (Tabilo and Barbosa, 2005)

สมบัติทางรีโอโลยีของอาหารประเภทเจลได้มีการศึกษามานานแล้ว โดยในที่นี้เจลหมายถึงคอลลอยด์ (colloid) ที่มีของแข็งกระจายตัวอยู่ในของเหลว ซึ่งเฟสของแข็งจะสร้างโครงสร้างตาข่ายเพื่อกัก (immobilize) ของเหลวไว้ภายใน และจะสร้างสมบัติที่มีลักษณะเป็นของแข็งเกิดขึ้น การเกิดเจล (gelation) สามารถเกิดได้ทั้งที่เป็นการเกิดร่างแหทางเคมี (chemical cross-linking) ซึ่งได้แก่ พันธะโควาเลนต์ และการเกิดร่างแหทางกายภาพ (physical cross-linking) ซึ่งได้แก่ พันธะนอนโควาเลนต์ เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) และพันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bond) (Ross- Muphy, 1995)

มีวิธีทางรีโอโลยีหลายวิธีที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างเจล ซึ่งมีทั้ง large deformation หรือวิธีการวัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างถาวร โดยโครงสร้างเกิดการเสียหาย ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรง อยู่ในช่วง non linear viscoelastic region นิยมใช้ในการหาความสัมพันธ์กับการทดสอบทางประสาทสัมผัส ส่วน small deformation หรือวิธีการวัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อย โดยโครงสร้างไม่เกิดการเสียหายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง อยู่ในช่วง linear viscoelastic region นิยมใช้ใน Fundamental test เมื่อใช้ทั้ง large

deformation และ small deformation ร่วมกัน จะสามารถอธิบายสมบัติทางกายภาพของเจลได้ดียิ่งขึ้น (Barrangou *et al.*, 2006)

ในระหว่างกระบวนการผลิตจนถึงการบริโภคอาหารประเภทเจล จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับ large deformation ซึ่งอาหารจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างไม่ผันกลับหรือมีการแตกหักเกิดขึ้น โดยปกติแล้วการวัดแบบมิติเดียว (single point measurement) เช่นการหาความแข็งแรงของเจล (gel strength) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการหาสมบัติของเจล แต่อย่างไรก็ตามการวัดแบบมิติเดียวส่วนใหญ่พิจารณาถึงการแตกหัก (rupture test) ซึ่งไม่ใช่ตัวแทนพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเจลทั้งหมด (Mulvihill and Kinsella, 1987)

รีโอโลยีจะสนใจว่าวัสดุจะมีการตอบสนองอย่างไรเมื่อมีการให้แรง (force) หรือการผิดรูป (deformation) กุญแจสำคัญในการนำไปสู่ การเข้าใจถึงศาสตร์รีโอโลยีต้องอาศัยความรู้เบื้องต้นทางฟิสิกส์เกี่ยวกับแรงและพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรง ดังนี้

ความเค้น (stress : σ) หมายถึงค่าแรง (Force : F) หน่วยเป็นนิวตัน (N) ต่อพื้นที่ที่แรงนั้นมากระทำบนระนาบ (Area : A) หน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

หน่วยของความเค้นเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa)

ความเครียด (strain : γ) คือ อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไป (ΔL) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) เมื่อมีการให้ความเค้นกับวัสดุซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\gamma = \Delta L / L_0 \quad (2.2)$$

ความหนืด (viscosity : μ) คือแรงต้านการไหลของของไหลนิยามได้จาก

$$\mu = \tau / \dot{\epsilon}^0 \quad (2.3)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืด หน่วยเป็น $N \cdot sec / m^2$

τ คือ ความเค้นเฉือน หน่วยเป็น N / m^2

$\dot{\epsilon}^0$ คือ อัตราเฉือน หน่วยเป็น sec^{-1} โดย $\dot{\epsilon}^0 = \epsilon / t$

โมดูลัส (modulus) คือค่าคงที่ของวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากกฎของฮุก (Hooke's law) ค่าโมดูลัสเป็นค่าที่บ่งบอกความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยทฤษฎีของฮุก ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าวัสดุนั้นต้องเป็นสารเนื้อเดียว (homogenous) โดยมีสมการเป็น

$$\sigma = E\gamma \quad (2.4)$$

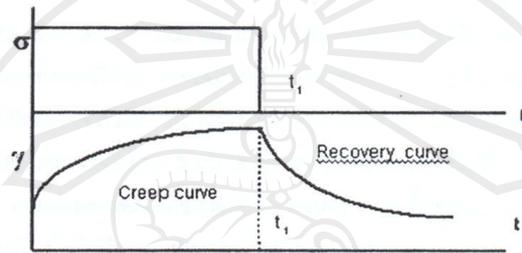
เมื่อ E คือ elastic modulus มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

เทคนิคการวัดทางรีโอโลยี แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. การวัดแบบทรานส์เซนต์ (transient test) ได้แก่ การทดสอบการคืบ (creep test) และ การทดสอบการพักความเค้น (relaxation test)

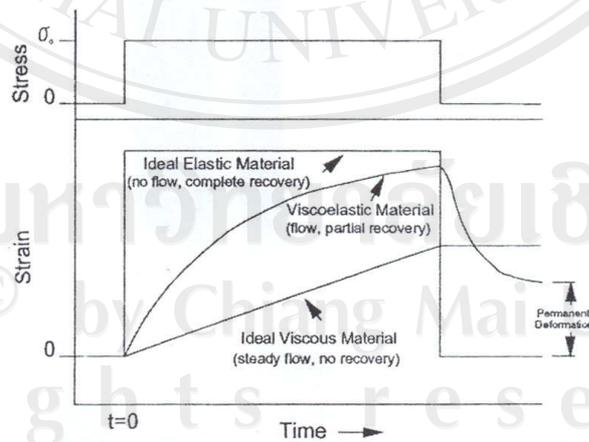
2. การวัดแบบสั่น (dynamic oscillatory test)

1. การทดสอบการคืบ (creep test) เป็นการทดสอบที่มีการควบคุมความเค้นที่ใส่บนวัสดุและวัดความเครียดที่เกิดขึ้น โดยวัสดุจะเกิดการผิดรูปอย่างช้าๆตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังรูป 2.3



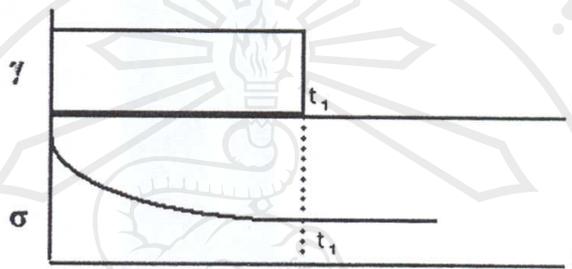
รูป 2.3 พฤติกรรมการคืบของวัสดุวิสโคอิลาสติกเมื่อได้รับแรงคงที่
ที่มา : Steffe (1996)

การคืนรูป (recovery) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการคืบ หลังจากการถอนความเค้น วัสดุยืดหยุ่น (elastic) จะหดตัวกลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ ขณะที่วัสดุที่เป็นของไหล (fluid) จะไม่เกิดการหดตัวกลับ สำหรับวัสดุที่เป็นวิสโคอิลาสติก การหดตัวกลับเกิดขึ้นได้บางส่วนและบางส่วนเกิดการผิดรูปอย่างถาวร (permanent deformation) แสดงได้ดังกราฟรูป 2.4

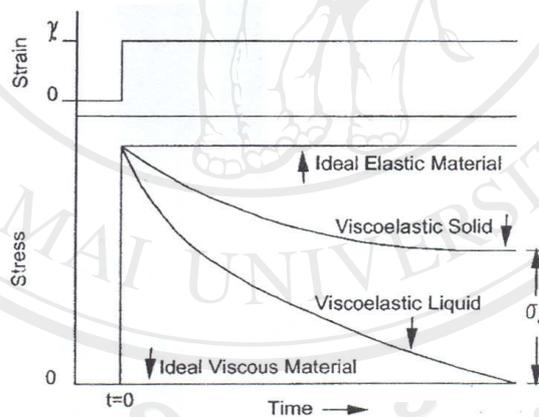


รูป 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟการคืบของวัสดุในอุดมคติและวัสดุวิสโคอิลาสติก
ที่มา : Steffe (1996)

2. การทดสอบการพักความเค้น (stress relaxation test) เป็นการทดสอบที่มีการควบคุมความเครียดที่ใส่บนวัสดุและวัดความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนเข้าสู่จุดสมดุลเทียบกับเวลา วัสดุที่เป็น ideal elastic จะไม่เกิดการพักความเค้น ขณะที่ ideal viscous จะเกิดการพักความเค้นอย่างรวดเร็ว โดยวัสดุที่เป็น viscoelastic solid จะเกิดการพักความเค้นและมีค่าความเค้นสมดุลย์มากกว่าศูนย์ ขณะที่วัสดุที่เป็น viscoelastic fluid ค่าความเค้นที่เหลืออยู่จะเข้าสู่ศูนย์ ดังรูป 2.5 และ 2.6 (Steffe, 1996)



รูป 2.5 พฤติกรรมการพักความเค้นของวัสดุวิสโคอีลาสติกเมื่อให้ความเครียดคงที่
ที่มา : Steffe (1996)



รูป 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟการพักความเค้น
ของวัสดุในอุดมคติและวัสดุวิสโคอีลาสติก
ที่มา : Steffe (1996)

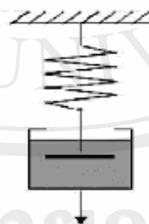
การทดสอบการพักความเค้นถือเป็นวิธีที่ง่ายและให้ผลที่ถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ สามารถนำกราฟมาเปรียบเทียบกันได้ โดยใช้สภาวะในการทดสอบแบบเดียวกัน มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้การทดสอบการพักความเค้นในการหาสมบัติทางรีโอโลยีของอาหารเช่น Bashford and Hartung (1976) ศึกษาความสดของขนมปัง Kim *et al.* (1978) ศึกษาสมบัติของเจลเพกติน Watase and

Nishinsri (1980) ศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างอะการ์โรสและเจลาติน Peleg and Pollak (1982) ศึกษาสมบัติของเจลของอะการ์ Maekaji and Kawamura (1984) ศึกษาสมบัติของแป้งบุก Shiinoki and Yano (1986) ศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างอะการ์และเจลาติน Nolan (1987) ศึกษาระยะเวลาในการบ่มต่อคุณสมบัติของชีสในระหว่างการเก็บรักษา Nussinovich *et al.* (1989) ศึกษาสมบัติของเจลอะการ์และแอลจินต Nussinovich *et al.* (1990) ศึกษาสมบัติของเจลแลนกันที่ความเข้มข้นต่างๆ Gamero *et al.* (1993) ศึกษาสมบัติของเจลคาร์ราจีแนนและเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและโกลด์สตาร์บีนกัน

การศึกษาศักยภาพทางวิสโคอีลาสติกของวัสดุใดๆนั้น โดยมากมักอธิบายในเชิงของแบบจำลองวิสโคอีลาสติก (viscoelastic model) โดยประกอบด้วยแบบจำลองพื้นฐาน 2 แบบคือแบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) และแบบจำลองวอยท์-เคลวิน (Voigt-Kelvin model) โดยมีสปริง (spring) เป็นสัญลักษณ์แทนส่วนที่มีการยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ และใช้ลูกสูบ (dashpot) เป็นสัญลักษณ์แทนส่วนที่มีการไหลหนืด

แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model)

เป็นแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยสปริง ต่อแบบอนุกรมกับลูกสูบ เมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุตัวสปริงจะยืดออกทันทีต่อมาลูกสูบจึงค่อยๆยืดออกด้วยอัตราเร็วคงที่ ความเค้นที่กระทำกับแบบจำลองจะเท่ากันทั้ง 2 ส่วนนั่นคือ ความเค้นที่กระทำกับสปริงเท่ากับความเค้นที่กระทำกับลูกสูบแต่ทางตรงกันข้าม ความเครียดทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับผลรวมของความเครียดของสปริงกับความเครียดของลูกสูบ



รูป 2.7 แบบจำลองของแมกซ์เวลล์

ที่มา : Steffe (1996)

$$\text{ความเค้น} : \sigma = \sigma_{\text{spring}} = \sigma_{\text{dashpot}} \quad (2.5)$$

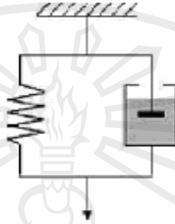
$$\text{ความเครียด} : \gamma = \gamma_{\text{spring}} + \gamma_{\text{dashpot}} \quad (2.6)$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้สมการอธิบายแบบจำลองของแมกซ์เวลล์เป็น

$$\gamma = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\mu} \quad (2.7)$$

แบบจำลองไวค-เคลวิน (Voigt-Kelvin model)

เป็นแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยสปริงต่อแบบขนานกับลูกสูบ ความเค้นจะถูกกระจายให้กับทั้งสองส่วนของแบบจำลองนั่นคือความเค้นของแบบจำลองเท่ากับความเค้นของสปริงรวมกับความเค้นของลูกสูบ ส่วนความเครียดรวมจะเท่ากับความเครียดของสปริงและเท่ากับความเครียดของลูกสูบ



รูป 2.8 แบบจำลองของไวค-เคลวิน

ที่มา : Steffe (1996)

$$\text{ความเค้น} : \sigma = \sigma_{\text{spring}} + \sigma_{\text{dashpot}} \quad (2.8)$$

$$\text{ความเครียด} : \gamma = \gamma_{\text{spring}} = \gamma_{\text{dashpot}} \quad (2.9)$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้สมการอธิบายแบบจำลองของไวค-เคลวินเป็น

$$\gamma = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-t/\lambda}) \quad (2.10)$$

เมื่อ λ คือ ค่า retardation time มีค่าเท่ากับ μ / E

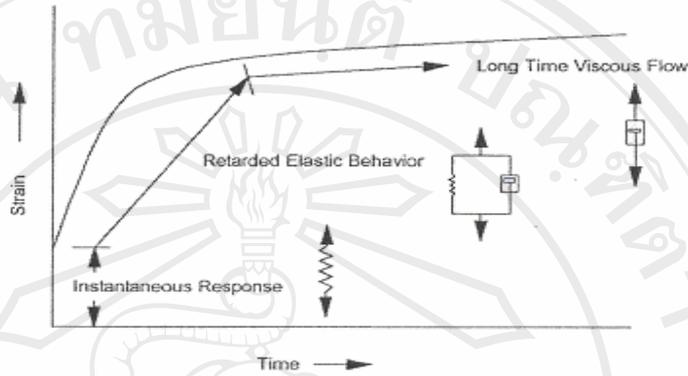
โดยส่วนใหญ่วัสดุในธรรมชาติไม่ได้เป็นไปตามแบบจำลองทั้งสองอย่างสมบูรณ์ มักเป็นแบบผสมกันหลายองค์ประกอบ เช่นแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ แบบจำลอง 6 องค์ประกอบ หรือแบบจำลอง 8 องค์ประกอบ เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองแต่ละแบบมีสมการที่อธิบายแบบจำลองต่างกันไปตามองค์ประกอบที่ประกอบเป็นแบบจำลองนั้นๆ การตอบสนองต่อแรงกระทำของแบบจำลองแต่ละแบบก็ต่างกันด้วย

แบบจำลองการทดสอบการคืบ (creep models)

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ ที่เป็นการผสมผสานกันระหว่างแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ และแบบจำลองของไวค-เคลวิน อาจเรียกว่า Burgers model ดังนั้นสมการของแบบจำลองจึงประกอบด้วยสมการของแบบจำลองทั้งสองรวมกันดังสมการ (2.11)

$$\text{ความเครียดรวม } (\gamma) = \gamma_{\text{maxwell}} + \gamma_{\text{kelvin}} \quad (2.11)$$

$$\gamma = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\mu} t + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-t/\lambda}) \quad (2.12)$$



รูป 2.9 กราฟการคืบของวัสดุที่มีแบบจำลองที่ประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย ต่ออนุกรมกับแบบจำลองของไวค-เคลวิน 1 หน่วย
ที่มา : Steffe (1996)

ในทางปฏิบัตินิยมแสดงในรูปของ creep compliance กับเวลา มากกว่าแสดงในรูปความเครียดกับเวลา ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาแบบจำลองของวัสดุต่างๆ โดยค่า compliance (J) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดกับความเค้น ดังนั้นสมการแบบจำลอง 4 องค์ประกอบสามารถเขียนใหม่เป็น

$$J = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{\mu} t + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-t/\lambda}) \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้ J_0 คือ $1/E_0$ และ J_1 คือ $1/E_1$

สมการ (2.13) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$J = J_0 + \frac{t}{\mu} + J_1 (1 - e^{-t/\lambda}) \quad (2.14)$$

ในบางครั้งอาจต้องเพิ่มองค์ประกอบของไวค-เคลวิน ใน Burgers model เพื่อให้การแปลผลของกราฟสมบูรณยิ่งขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ ดังสมการ

$$J = J_0 + \sum_{i=1}^m J_i [1 - e^{-(t/\lambda_i)}] + \frac{t}{\mu} \quad (2.15)$$

เมื่อ m = จำนวนองค์ประกอบของไวค-เคลวิน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะมีค่า J_i และ λ_i ที่ต่างกัน

แบบจำลองการทดสอบการพักความเค้น (relaxation models)

นิยมใช้แบบจำลองแมกซ์เวลล์ในการแปรผลกราฟการพักความเค้นของวัสดุวิสโคอีลาสติก เปลี่ยนสมการ (2.7) ให้เป็นอนุพันธ์ของเวลาได้ดังนี้

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu} \tag{2.16}$$

เอา μ คูณตลอดแล้วแทนค่า $\lambda = \mu / E$ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{dy}{dt} \mu = \lambda \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \tag{2.17}$$

ในการทดสอบ เมื่อความเครียดมีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราเฉือนจึงมีค่าเท่ากับ 0 จากสมการ (2.17) สามารถแปลงเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$0 = \lambda \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \tag{2.18}$$

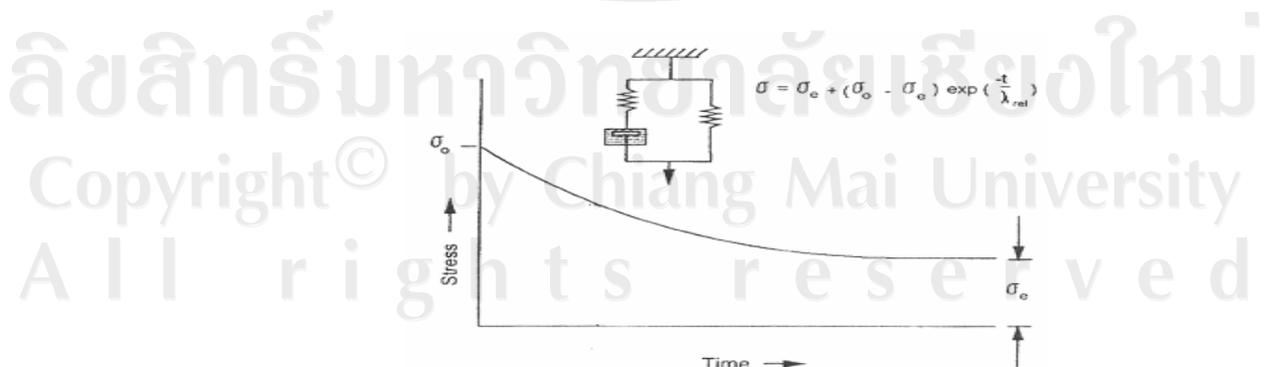
$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{-dt}{\lambda} \tag{2.19}$$

อินทิเกรตสมการนี้ โดยกำหนดให้ $\sigma = \sigma_0$ ถึง $\sigma = \sigma$ และ $t = 0$ ถึง $t = t$ ได้สมการดังนี้

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \tag{2.20}$$

แต่แบบจำลองแมกซ์เวลล์ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการพักความเค้น ของวัสดุวิสโคอีลาสติกได้ทั้งหมด เนื่องจากไม่ได้รวมสมดุลความเค้น (equilibrium stress : σ_e) ปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยใช้แบบจำลองแมกซ์เวลล์ต่อขนานกับสปริงอิสระ ดังนั้นสมการของแบบจำลองนี้คือ

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_0 - \sigma_e) e^{-t/\lambda} \tag{2.21}$$



รูป 2.10 กราฟการพักความเค้นของวัสดุที่มีแบบจำลองที่ประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์

เวลล์ 1 หน่วย ต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย

ที่มา : Steffe (1996)

ในบางครั้งอาจต้องเพิ่มองค์ประกอบของแมกซ์เวลล์ เพื่อให้การแปรผลของกราฟสมมูรณ์
ยิ่งขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ ดังสมการ (2.22)

$$\sigma = \sigma_e + A_1 e^{-t/\lambda_1} + A_2 e^{-t/\lambda_2} + A_3 e^{-t/\lambda_3} + \dots \quad (2.22)$$

เมื่อ $A = (\sigma_0 - \sigma_e)$ โดยในแต่ละหน่วยของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ จะมีค่า λ และ A ที่
แตกต่างกัน

Shellhammer *et al.* (1997) ใช้การทดสอบการพักความเค้น เพื่อศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของไขมัน 4 ชนิด คือ Beewax, Candelilla wax, Carnuba wax และ high-melting milk fat พบว่าไขมันทุกชนิดมีแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกเป็นแบบ 5 องค์ประกอบ ประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 2 หน่วย กับสปริงอิสระ 1 หน่วย โดย Candelilla wax และ Carnuba wax มีความเป็นอิลาสติกสูง ขาดต่อการผิดรูป ส่วน Beewax และ high-melting milk fat มีความเป็นของไหลหนืดสูง มีความยืดหยุ่นต่ำ และง่ายต่อการผิดรูป

วสาวิ (2547) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเศษเนื้อนกกระจอกเทศขึ้นรูปที่มีการเติมสารเพิ่มการยึดเกาะ 2 ชนิดคือกลูเตน (gluten) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolated) ร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก และสารเพิ่มการอุ้มน้ำ ได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ร้อยละ 0-0.2 โดยน้ำหนัก โดยวิธีการทดสอบการพักความเค้น พบว่าเศษเนื้อนกกระจอกเทศขึ้นรูปทั้งสุกและดิบ สอดคล้องกับแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 3 หน่วยต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย และพบว่าเศษเนื้อนกกระจอกเทศขึ้นรูปดิบมีค่าความเค้นสมดุลย์ (equilibrium stress) ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อน และการเติมกลูเตนร้อยละ 5 โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 2.5 และโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ร้อยละ 0.1 มีผลทำให้ได้ความเค้นสมดุลย์ ของเศษเนื้อนกกระจอกเทศขึ้นรูปสุกมีค่าสูงสุด นอกจากนี้ เเผด็จ (2547) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเบอร์เกอร์เศษเนื้อนกกระจอกเทศที่ผ่านการทำให้สุก โดยวิธีการทดสอบการพักความเค้น พบว่า การเติมกลูเตนและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีผลทำให้ค่าความเค้นสมดุลย์ เพิ่มขึ้น แสดงว่าสารทั้งสองชนิดนี้สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่เบอร์เกอร์ได้ดี โดยกลูเตนมีผล มากกว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 3 หน่วยต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย

วัชรารณ (2549) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของแยมฝรั่งที่แปรรูปโดยเทคนิคความร้อนและความดันสูง โดยใช้วิธีการทดสอบการพักความเค้น พบว่า แยมฝรั่งมีแบบจำลองที่สอดคล้องกับแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 3 หน่วยต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสมมูลย์ พบว่า แยมฝรั่งทุกสิ่งทดลองมีค่าความเค้นสมมูลย์ มากกว่าศูนย์ นั่นคือ แสดงสมบัติยืดหยุ่นมากกว่าสมบัติไหลหนืด และการเพิ่มปริมาณเพคตินมีผลทำให้ค่าความเค้นสมมูลย์เพิ่มขึ้น

Supavititpatana and Apichartsrangkoon (2007) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมันกระจอกเทศยอที่ผ่านการให้ความดันและความร้อนโดยใช้เทคนิคการพักความเค้น พบว่า มีแบบจำลองเป็นแบบ 9 องค์ประกอบ โดยประกอบด้วย แบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วยต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย โดยพบว่า ความดันและความร้อนมีผลทำให้เนื้อมันกระจอกเทศยอมีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น หรือมีความหนาแน่นของ cross link มากขึ้น

อุทัยวรรณ (2546) ศึกษาพฤติกรรมการคืบของมะม่วงกวน จากมะม่วง 5 สายพันธุ์ โดยเติมเพคติน 4 ระดับคือ ร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวอย่างมะม่วงกวนทั้งหมดมีแบบจำลองเป็นแบบ 6 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองไวค-เคลวิน 2 หน่วย และแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเพคติน ค่าอิลาสติกโมดูลัส (E_0) จะเพิ่มขึ้น แต่ค่าการผิดรูปอย่างถาวร (J_{pd}) มีค่าลดลง นอกจากนี้ กนกรัตน์ (2546) ยังศึกษาพฤติกรรมการคืบของกล้วยกวน 3 สายพันธุ์ โดยเติมเพคติน 4 ระดับคือ ร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวอย่างกล้วยกวนทั้งหมดมีแบบจำลองเป็นแบบ 6 องค์ประกอบเช่นเดียวกัน

Sun and Hayakawa (2002) ใช้การทดสอบการคืบเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของเจลไข่ขาวที่ผ่านการให้ความร้อน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างไข่ขาว 5 สปีชีส์ พบว่า เจลไข่ขาวทั้ง 5 สปีชีส์ มีแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกเป็นแบบ 6 องค์ประกอบ ประกอบด้วยสปริงเดี่ยว 1 หน่วย แบบจำลองไวค-เคลวิน 2 หน่วย และลูกสูบเดี่ยว 1 หน่วย โดยไข่ขาวที่ได้จากไก่ มีค่าอิลาสติกโมดูลัส ต่ำสุดคือ $1.33 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ ส่วนไข่ขาวที่ได้จากเป็ดมีค่าอิลาสติกโมดูลัสสูงสุดคือ $3.14 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ Solomon and Jindal (2005) ใช้การทดสอบการคืบศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางรีโอโลยีของมันฝรั่งระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 15 และ 25 องศาเซลเซียส โดยพบว่ามันฝรั่งมีแบบจำลองเป็นแบบ 4 องค์ประกอบ (Burgers model) โดยมันฝรั่งจะมีความยืดหยุ่นลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น ในทุกๆอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา Norziah *et al.* (2006) ใช้การทดสอบการคืบศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเจลผสม 2 ชนิดได้แก่ อะการ์และคาร์ราจีแนน โดยใช้ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 พบว่าคาร์ราจีแนนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการลดลงของความแข็งของเจล ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ instantaneous compliance (J_0)

Chatton *et al.* (2007) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเนื้องอกกระเจอกเทศยอที่เติมแซนแทนกัม ในปริมาณร้อยละ 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 โดยน้ำหนัก พบว่า ทุกสิ่งทดลองมีแบบจำลองเป็นแบบ Burgers model คือมีแบบจำลองแมกซ์เวลล์ต่ออนุกรมกับแบบจำลองไวคเคลวิน และพบว่า ความเข้มข้นของแซนแทนกัมที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าอีลาสติกโมดูลัส (E_0) และค่าความหนืด (μ) มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการผิรูดอย่างถาวร (J_{pd}) มีค่าเพิ่มขึ้น

3. การทดสอบแบบสั่น (dynamic oscillatory test)

dynamic oscillatory test ต่างจาก transient test ตรงที่ความเค้นและความเครียดที่ให้แก่วัตถุไม่ได้เป็นค่าคงที่ แต่จะอยู่ในรูป sinusoidal นั่นคืออยู่ในรูปคลื่น โดยความเค้นหรือความเครียดที่ให้จะเป็นความเค้นแบบสั่นหรือความเครียดแบบสั่น การทดสอบแบบสั่นนี้มีความเหมาะสมในการหาสมบัติเฉพาะของเจลทั้งการเกิดเจล (gelation) และการหลอมเหลว (melting) โดยจะศึกษาในช่วง linear viscoelastic region ซึ่งจะพิจารณาค่า G' (storage modulus) G'' (loss modulus) และ $\tan \delta$ การทดสอบแบบสั่น ที่นิยมใช้ในการหาสมบัติของเจล ทั้งการเกิดเจลและการหลอมเหลว แบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Lopes da Silva and Rao, 1999)

1. frequency sweep พิจารณา G' และ G'' เป็นฟังก์ชันกับความถี่ โดยกำหนดให้ความถี่คงที่
2. temperature sweep พิจารณา G' และ G'' เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ความถี่คงที่
3. time sweep พิจารณา G' และ G'' เป็นฟังก์ชันกับเวลา โดยกำหนดให้ความถี่และความถี่คงที่

Tako *et al.* (1999) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม โดยคาร์ราจีแนนที่ใช้สกัดจาก *Hypnea Charoides* LAMOUPOUX พบว่าเมื่อใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บีนกัมในอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.4 จะได้เจลที่มีค่า G' มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tako and Nakamura (1986) ที่ใช้คาร์ราจีแนนทางการค้าร่วมกับโลคัสต์บีนกัมในอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.6 จึงสรุปได้ว่าการใช้โลคัสต์บีนกัมร่วมกับคาร์ราจีแนนที่สกัดจาก *Hypnea Charoides* LAMOUPOUX ให้เจลที่แข็งกว่า เจลผสมที่ใช้คาร์ราจีแนนทางการค้าที่สกัดจาก *Eucheuma cottonii* ต่อมา Andrade *et al.* (2000) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเจลผสมระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม พบว่าการใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บีนกัมที่สกัดจาก *Ceratonia siliqua* ในอัตราส่วน 4:1

จะได้ค่า G' สูงที่สุด ขณะที่การใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโกลด์สตีนกับที่สกัดจาก *Cassia javanica* ในอัตราส่วน 2 : 1 จะได้ค่า G' สูงที่สุด ในขณะที่ Chen *et al.* (2001) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของระบบไฮโดรคอลลอยด์ผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโกลด์สตีนกับ พบว่า ไฮโดรคอลลอยด์ผสมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ใน อัตราส่วนระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโกลด์สตีนกับ 6 : 4 จะให้ค่าความเค้นของการแตก (rupture stress) และค่า G' สูงสุด

Apichartsrangkoon and Ledward (2002) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเจลผสมระหว่างกลูเตน และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในอัตราส่วน 20:80 40:60 60:40 และ 80:20 โดยให้ระดับความดัน 700 MPa 50 นาที ที่อุณหภูมิ 20 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลูเตน ค่า G' และ G'' จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้น ค่า G' และ G'' จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน จะมีผลต่อกลูเตนมากกว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัด นอกจากนี้ Apichartsrangkoon (2002) ยังศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของกลูเตน และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่กลูเตนและโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ค่า G' และ G'' จะเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยกลูเตนที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีค่า G' และ G'' มากกว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ผ่านการให้ความร้อน โดยค่า G' ที่ได้จะมีค่ามากกว่า G'' ในขณะเดียวกัน Apichartsrangkoon (2003) ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ผ่านการให้ความดัน พบว่าค่า G' และ G'' มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มความดัน โดยค่า G' ที่ได้ สูงกว่า G'' หนึ่ง log cycle

เผด็จ (2547) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของส่วนผสมเบอร์เกอร์เศษเนื้อมนกระจอกเทศดิบที่มีการเติมกลูเตน และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก และสารเพิ่มการอุ้มน้ำ ได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ร้อยละ 0-0.2 โดยน้ำหนัก พบว่า ส่วนผสมเบอร์เกอร์เศษเนื้อมนกระจอกเทศดิบที่มีการเติมกลูเตน และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีผลตอบสนองต่อค่า $\tan \delta$ ในทางลดลง (0.12-0.06) แสดงว่าส่วนผสมนี้มีสมบัติยืดหยุ่นเด่นกว่าสมบัติไหลหนืด และ Sivaramakrishnan *et al.* (2004) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของโดแป้งข้าวเจ้า 2 สายพันธุ์ และมีการเติม Hydroxypropylmethyl cellulose (HPMC) เพื่อทดแทนกลูเตน เปรียบเทียบกับโดของแป้งสาลี พบว่า โดของแป้งข้าวเจ้าพันธุ์เมล็ดยาวที่เติม HPMC ร้อยละ 1.5 มีลักษณะกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง G' และ G'' เทียบกับความถี่ คล้ายกับเส้นกราฟของโดแป้งข้าวสาลีมากที่สุด โดยมีค่า G' มากกว่า G'' นอกจากนี้ Chatton *et al.* (2007) ศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเนื้อมนกระจอกเทศที่ย่อยที่ผ่านกระบวนการให้ความดัน พบว่า เนื้อมนกระจอกเทศย่อยทุกสิ่งทดลองมีค่า G' สูงกว่า G'' และสารไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมลงไปมีผลทำให้ทั้ง G' และ G'' มีค่าลดลง นั่นคือเนื้อมนกระจอกเทศที่ย่อยที่ได้มีความยืดหยุ่นลดลง