

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลិតภัณฑ์มะม่วงกวน

วิธีการถนอมอาหารที่มักใช้น้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลักนั้นเป็นวิธีการที่ใช้กันมากโดยเฉพาะการเชื่อมและการกวน ซึ่งมักนิยมนำผลไม้ต่างๆ มาเชื่อมและกวน ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อเก็บรักษาผลไม้แปรูปนั้นไว้ได้นาน (สำนักงานคณะกรรมการวัฒนธรรมแห่งชาติ, 2546) เพราะน้ำตาลเป็นสารที่เพิ่มปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จึงช่วยลดค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity ; a_w) ของผลิตภัณฑ์ลงได้ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น และการกวนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ปริมาณน้ำในเนื้ออาหารลดลงโดยอาหารที่นำมาทำกวนส่วนใหญ่เป็นผลไม้สุกที่เหลือจากการบริโภคสดๆ เช่น มะม่วง กัลลวย มะยม และผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ เช่น หัวมัน หัวเผือก ถั่วเขียว และข้าวเหนียว เป็นต้น มีวิธีการทำ คือ นำเนื้อผลไม้หรือผลผลิตทางการเกษตรที่ต้องการกวนนั้นมายีหรือขยี้ให้เนื้อแตกแล้วใส่ลงในกระทะทองเหลือง ตั้งไฟอ่อนๆ ใช้ไม้พายกวนหรือคนไปเรื่อยๆ เพื่อให้ระเหยออกและไม่ให้เนื้ออาหารติดกระทะ ระหว่างนั้นใส่น้ำตาลลงไป ถ้าอาหารที่นำมากวนนั้นต้องการรสชาติมันๆ เพิ่มขึ้นด้วยก็ใส่มะพร้าวชูดหรือน้ำกะทิลงไป เดิมเกลือเล็กน้อยเพื่อเพิ่มรสชาติ กวนจนเนื้อขึ้นเหนียวจึงค่อยยกลง ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเก็บใส่ภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด ลักษณะของผลิตภัณฑ์ผลไม้กวนจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบด้วย เช่น กัลลวย เผือก ทูเรียน ซึ่งมีเนื้อละเอียด มีแป้งมาก กวนแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเนียนและเหนียว และนอกจากจะมีการปรุงแต่งรสชาติด้วยกะทิแล้วยังมีการปรุงแต่งเนื้อสัมผัสโดยเติมแบะแซหรือสารที่ช่วยให้ข้นขึ้น (thickening agent) เช่น เพกติน เจลาติน เป็นต้น (สินธนา, 2535)

ดังนั้นมะม่วงกวนเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีการแปรรูปโดยมีวิธีการทำ คือ นำเนื้อมะม่วงสุก ล้างหรือบดละเอียด ผสมน้ำตาลทราย กรดมะนาว และเกลือ แล้วนำส่วนผสมทั้งหมดเคี่ยวหรือกวนด้วยไฟอ่อนๆ เพื่อระเหยน้ำ จนผลิตภัณฑ์เหนียวขึ้น นำมาขึ้นรูป และเก็บในภาชนะสะอาดปิดสนิท และมะม่วงกวนจะมีลักษณะเหนียว นุ่ม คงตัว มีสีน้ำตาล และมีความยืดหยุ่น (สุกัญญา, 2545)

การแปรรูปโดยการกวนเป็นการระเหยเอาน้ำออกจากอาหารซึ่งมีผลทำให้อาหารมีสีเข้มขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณของแข็งทั้งหมด ในการแปรรูปการใช้ความร้อนสูงมีผลทำให้สารสีในอาหารถูกทำลาย และในผลไม้กวนซึ่งมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อถูกความร้อนทำให้โมเลกุลของน้ำตาลเกิดการสลายตัว (thermolysis) และเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล โดยปฏิกิริยานี้สารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น เรียกว่า คาราเมลไลเซชัน (caramelization) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลนี้ เมื่ออาหารได้รับความร้อน จะมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) มีการสลายตัว (degradation) และมีการรวมตัวกัน (condensation) โดยสารสีในอาหารมีการพัฒนาเป็นสารสีเหลืองจนถึงน้ำตาลและน้ำตาลแดง (Fenema, 1996)

ส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์มะม่วงกวน

2.1.1 มะม่วง (Mango)

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn) เป็นผลไม้เขตร้อนและมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศ มะม่วงมีมากมายหลากหลายพันธุ์และมีการนำไปบริโภคในรูปแบบต่างๆ เช่น รับประทานผลดิบ รับประทานผลสุก และนำไปแปรรูป มะม่วงทุกสายพันธุ์ไม่สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์แปรรูปบางชนิดต้องการพันธุ์ที่มีลักษณะเฉพาะเท่านั้น (วิจิตร, 2533) โดยมะม่วงบางสายพันธุ์ที่สำคัญ ได้แก่ มะม่วงแก้ว ตลับนาก พิมเสนมัน ฟ้ายัน และแรด ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของแต่ละสายพันธุ์แสดงดังตารางที่ 2.1 และมีลักษณะที่สำคัญในการแปรรูป ดังนี้

มะม่วงแก้ว เป็นมะม่วงที่ใช้มากในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทนสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการปลูกได้ดี จึงมีการปลูกกันมากและส่งผลให้มีการแปรรูปมะม่วงแก้วสูงและที่รู้จักกันมากที่สุด คือ ใช้ผลดิบในการดอง ส่วนผลสุกใช้ทำมะม่วงกวนและมะม่วงแผ่น มีความหวาน 20 องศาบริกซ์ (ถวิล, 2525)

มะม่วงตลับนาก เป็นมะม่วงพันธุ์ท้องถิ่นในเขตภาคเหนือตอนบนและใช้แปรรูปเมื่อมะม่วงแก้วขาดแคลน มีความหวาน 18-20 องศาบริกซ์

มะม่วงฟ้ายัน เมื่อมะม่วงอมมีรสหวานโดยมีความหวานประมาณ 20 องศาบริกซ์ ผลมีขนาดใหญ่และเมล็ดเล็ก ขาวแบน

มะม่วงพิมเสนมัน มีเสี้ยนน้อย การติดผลค่อนข้างดก เมล็ดลีบและแหลมเล็ก แต่มีจุดด้อย คือ ผลมักแตกง่าย มีความหวาน 23 องศาบริกซ์

มะม่วงแรด มีผลโตปานกลาง รับประทานได้ทั้งระยะแก่จัดและสุก ผลแก่เร็ว ติดผลดก มีรสหวาน วัดความหวานได้ประมาณ 18-20 องศาบริกซ์

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงแก้ว ตลับนาถ พิมเสนมัน ฟ้ายัน และแรด

ลักษณะทางกายภาพ	สายพันธุ์มะม่วง (variety)				
	แก้ว	ตลับนาถ	พิมเสนมัน	ฟ้ายัน	แรด
ลักษณะผล	ค่อนข้างกลม	อ้วนป้อม	หัวผลใหญ่หนา	หัวโตปลายแหลม	หัวใหญ่อ้วน
ขนาดผล	เล็ก-ปานกลาง	ขนาดใหญ่	ปลายผลมนกลม	ปลายผลมนกลม	ปลายเรียวเล็ก
น้ำหนักต่อผล	200-300 กรัม	250-300 กรัม	ปานกลางค่อนข้างใหญ่	ค่อนข้างเล็กถึงโตปานกลาง	โตปานกลาง
สีเปลือกผลสุก	เขียวปนเหลือง	เขียวปนเหลือง	เหลืองอ่อน	เขียวปนเหลือง	เขียวปนเหลืองหรือเหลืองเข้ม
สีเนื้อผลสุก	เหลือง	เหลืองทอง	เหลือง-เหลืองเข้ม	ขาวอมเหลือง	ขาวอมเหลือง
ลักษณะเนื้อของผลสุก	ละเอียด ไม่มีเสี้ยน	ละเอียด มีเสี้ยนน้อย	ค่อนข้างหยาบ มีเสี้ยนมาก	หยาบกรอบ แตกง่าย	ละเอียด มีเสี้ยนมากปานกลาง
รสชาติ	หวานมันอมเปรี้ยว	หวานหอม	หวานกรอบอมเปรี้ยว	หวานไม่จัด	หวานอมเปรี้ยว
ลักษณะเมล็ด	เมล็ดเล็ก	เมล็ดเล็ก	เล็ก ขาวแบน	ลีบ แหลมเล็ก	แบน สั้น
ลักษณะเด่น	เนื้อค่อนข้างเหนียว	แบนเล็กน้อย กล้ายตลับ	มีเนื้อ 2 ชั้น	เนื้อเปราะมาก มีเสี้ยนดั่งถัน	มี "นอ" เห็นชัด

ที่มา : รัชชัชและสิวาพร, 2542

นอกจากนี้มะม่วงยังมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ซึ่งมีคุณค่าทางอาหารสูงโดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตและเส้นใยอาหารซึ่งมะม่วงไทยโดยเฉลี่ยมีค่าร้อยละ 1.83 โดยน้ำหนักแห้ง และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่าเป็น 16.6 องศาบริกซ์ (Vásquez-Caicedo *et al.*, 2002) และยังมีอุดมด้วยแร่ธาตุต่างๆ ทั้งนี้ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงตามสายพันธุ์ แหล่งที่ปลูก และระดับความแก่-อ่อนของมะม่วง (ไพโรจน์, 2545) ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ โดยทั่วไปแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางอาหารของมะม่วงดิบและมะม่วงสุกจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

คุณค่าทางอาหาร	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุก	หน่วย
ความชื้น	81.0	76.7	
พลังงาน	74.0	90.0	แคลอรี
คาร์โบไฮเดรต	17.6	21.7	กรัม
ไขมัน	0.2	0.1	กรัม
โปรตีน	0.5	0.6	กรัม
แคลเซียม	14.0	34.0	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	2.0	10.0	มิลลิกรัม
วิตามิน เอ	80.0	71.7	หน่วยสากล
วิตามิน บี 1	0.04	0.05	มิลลิกรัม
วิตามิน บี 2	0.02	0.06	มิลลิกรัม
วิตามิน ซี	198.0	160.0	มิลลิกรัม
ไนอาซิน	0.2	1.1	มิลลิกรัม

ที่มา : พานิชย์, 2544

องค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและพบในมะม่วงได้แก่

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

เมื่อมะม่วงสุกจะเกิดการไฮโดรไลซ์แป้งให้เป็นน้ำตาล คือ น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และ ซูโครส ดังนั้นปริมาณแป้งจะลดลงในขณะที่ปริมาณน้ำตาลจะเพิ่มสูงขึ้น ในระหว่างการสุกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของน้ำตาลชนิดหนึ่งเป็นน้ำตาลอีกชนิดหนึ่งได้โดยปฏิกิริยาของเอนไซม์ (Boehringer, 1998)

สำหรับมะม่วงจะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะสลายเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสในเวลาต่อมา (คณัยและนิธิยา, 2535)

กรดอินทรีย์ (Organic acid)

กรดอินทรีย์ในมะม่วงจะมีปริมาณลดลง เมื่อมะม่วงสุกมากขึ้น กรดที่พบในมะม่วงได้แก่ กรดซิตริก มาลิก ทาร์ทาริก กลัยโคลิก และออกซาลิก แต่กรดอินทรีย์ที่พบมากและเด่นชัดมากในมะม่วงคือ กรดซิตริกและมาลิก (Mitra and Baldwin, 1997)

รงควัตถุ (Pigment)

สารสีที่พบมากในมะม่วงมีหลายชนิด สีของผลจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของสารสีที่เป็นองค์ประกอบ คือ

คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เป็นสารสีเขียวซึ่งมีการสลายตัวตลอดเวลาภายหลังการเก็บเกี่ยว การสูญเสียของสีเขียวทำให้สารสีอื่นๆ ที่มีอยู่แล้วในผลไม่ปรากฏขึ้น ดังจะเห็นได้เมื่อผลไม้สุกสีเขียวจะหายไปและมีสีเหลืองหรือแดงปรากฏขึ้นแทน

แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) สารกลุ่มแคโรทีนอยด์มีหลายชนิดที่พบมากในมะม่วง ได้แก่ แคโรทีน (Carotene) ซึ่งแบ่งออกเป็น α , β และ δ -carotene ในมะม่วงดิบจะมีแคโรทีนเป็นองค์ประกอบอยู่แล้วแต่ถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บดบังไว้ เมื่อมะม่วงเริ่มสุกคลอโรฟิลล์สลายตัวไปจึงปรากฏสีเหลือง ส้ม และแดงของแคโรทีนแทน (รุ่งอรุณ, 2545)

วิตามินและแร่ธาตุ (Vitamins and minerals)

วิตามินที่พบมากในมะม่วงได้แก่ โปริวิตามินเอ วิตามินบีต่างๆ และวิตามินซี

โปริวิตามินเอ พบในรูปของแคโรทีนซึ่งเป็นสารให้สี มี 3 รูปแบบได้แก่ α , β และ δ -carotene โดยจะพบ β -carotene ในปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ α -carotene และ δ -carotene พบน้อยที่สุด เมื่อผลไม้สุกจะมีการสังเคราะห์ชนิดและปริมาณแคโรทีนเพิ่มมากขึ้น

วิตามินบีชนิดต่างๆ ได้แก่ Thiamine (B1), Riboflavin (B2) และ Pyridoxine (B6) ทำหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ในปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญหลายอย่าง

วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก วิตามินที่มีคุณค่าต่อร่างกายจะอยู่ในรูป L-ascorbic acid โดยมีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันตามธรรมชาติ เมื่อถูกออกซิไดซ์จะเปลี่ยนเป็น Dehydro-L-ascorbic acid และถูกเปลี่ยนเป็น Diketo-L-gulonic acid ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีคุณสมบัติของวิตามินซีเหลืออยู่จึงไม่มีประโยชน์ต่อร่างกาย หลังการเก็บเกี่ยวจะมีการเปลี่ยนแปลงของวิตามินซีมากเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ที่มีอยู่แล้วในผลไม้ และอาจเกิดจากปัจจัยภายนอกเช่นการออกซิเดชัน โดยมี แสง ออกซิเจน และอนุมูลโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

แร่ธาตุที่พบมากในมะม่วงได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัส

แมกนีเซียม เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในคลอโรฟิลล์ที่ใช้สังเคราะห์แสง

แคลเซียม มีส่วนสัมพันธ์กับโครงสร้างของผนังเซลล์รวมทั้งเมตาบอลิซึมต่างๆ

ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบของทั้งโปรตีน ไขมัน และโมเลกุลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมแทบทุกกระบวนการ (รุ่งอรุณ, 2545)

2.1.2 เพกติน (Pectin)

เพกตินเป็นสารที่สกัดได้จากพืชและเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สำคัญ สกัดได้จากเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม โครงสร้างโมเลกุลของเพกตินประกอบด้วยโพลีเมอร์ของกรดกาแลคตูลอนิก (D-galacturonic acid) เป็นสายหลัก และมีสายแขนงเป็นน้ำตาลอะลาบินโนส (L-arabinose) และน้ำตาลกาแลคโตส (D-galactose) และจะมี degree of methoxylation (DM) แตกต่างกันตามชนิดของเพกติน

DM หมายถึง อัตราส่วนของหมู่ methoxylated galacturonic acid ต่อ หมู่ของกรดกาแลคตูโลนิก (galacturonic acid) ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพกติน ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Low Methoxyl (LM) ซึ่งมีค่า DM น้อยกว่าร้อยละ 50 และชนิด High Methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่าร้อยละ 50 มักใช้กับอาหารที่มีกรดต่ำมีพีเอชระหว่าง 2.0 - 3.5 และต้องมีของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 55 จึงจะเกิดเจลได้ เพกตินสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายอย่าง ได้แก่ เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) สารที่ทำให้เกิดการแขวนลอย (suspending agent) และสารเพิ่มความหนืด (thickeners) (นิธิยา, 2543)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่สำคัญ 2 ชนิดที่พบในสารประกอบเพกติน คือ พันธะไฮโดรเจนและแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรวมกันของเพกตินโดยเป็นตัวก่อ cross-link พันธะไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะภายในสายเดียวกันได้โดยจับกันที่ตำแหน่งออกซิเจนและไฮดรอกซิลไฮโดรเจน โดยปกติพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่ถูกทำลายได้ง่ายและยึดกันด้วยแรงที่อ่อนๆ แต่เมื่อมีการเกิดพันธะมากขึ้นสายโพลิเมอร์รวมตัวกันมากขึ้นจึงเกิดความคงตัวได้ หมู่ methoxyl ที่อยู่ในเนื้อเยื่อเพกตินสามารถรวมตัวกันได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกซึ่งการรวมตัวกันเพื่อลดพื้นที่ผิวของส่วนที่มีขี้ขี้และไม่ขี้ขี้ และทำให้มีความคงตัวมากขึ้น โดยการลดพื้นที่ผิวจะเป็นการลดพลังงานในระบบด้วย จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนที่เกิดการรวมกันจะมีการดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลของเพกตินและหมู่ methoxyl ภายในตัวมันเอง ในการแยกเจลของเพกตินที่จับกันอยู่ เช่น ในเพกติน-กรดน้ำตาล ซึ่งจับกันด้วยพันธะและแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนเชื่อว่าสามารถนับจำนวนของจังก์ชันโซนที่ทำให้เจลมีคงตัวได้ (Van Buren, 1991)

2.1.2.1 เพกตินชนิด HM (High Methoxyl Pectins)

การเซตตัวของเพกตินชนิด HM จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ส่วนประกอบของอาหาร อุณหภูมิขณะผสม และค่าความเป็นกรด-ด่าง เจลของเพกตินชนิด HM มีลักษณะพิเศษคือไม่มีการผ่นกลับเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงเฉือน เจลมีลักษณะนิ่ม แต่ไม่ละลายเมื่อให้ความร้อน พื้นที่ผิวที่แตกหรือถูกตัดจะกลับมารวมกันได้ใหม่ เจลอาจการไหลซึมออกมาของของเหลวที่เป็นส่วนประกอบของเจลซึ่งการเกิดลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดซินเนอริซิส (syneresis) (Oakenfull, 1991)

2.1.2.2 กลไกเกี่ยวกับโมเลกุลในการเกิดเจล (The Molecular Mechanism of Gelation)

- **แนวคิดพื้นฐาน (Basic Concept)**

เจลของเพกตินประกอบด้วยโมเลกุลสายยาวที่เกิดการก่อ cross-link พันกันจนเป็นร่างแหซึ่งข่มไปด้วยตัวกลางที่เป็นของเหลวซึ่งในอาหารของเหลว นั่นคือ น้ำ โดยการเกิดเจลเพกตินจะก่อพันธะกับอาหารอื่นที่มีเพกตินเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ในอาหารที่เกิดเจลการก่อพันธะจนเป็นร่างแหจะเกิดจากการรวมกันของโพลีเมอร์ 2 สายหรือมากกว่าซึ่งการเกิดโครงสร้างแบบนี้เรียกว่า การเกิดจังก์ชันโซน แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะคงตัวอยู่ด้วยแรงระหว่างพันธะที่เป็นแรงอ่อนๆ ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดจังก์ชันโซนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะเจลที่เป็นร่างแหซึ่งบริเวณที่เกิดการจับกันคือจังก์ชันโซน

ที่มา : Oakenfull (1991)

- **แรงระหว่างโมเลกุลที่มีผลต่อความคงตัวของเจล**

แรงสำคัญที่ทำให้เกิดการรวมตัวของเพกติน คือ พันธะไฮโดรเจน และแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก

พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

พันธะไฮโดรเจนมีบทบาทต่อการเกิดความคงตัวของโครงสร้างของโมเลกุลใหญ่ๆ ซึ่งโดยปกติพันธะไฮโดรเจนจะเป็นแรงที่ยึดกันอย่างอ่อนๆ แต่เมื่อมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้เจลที่เกิดการก่อร่างแหมีความคงตัวต่อความร้อนมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

แรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interactions)

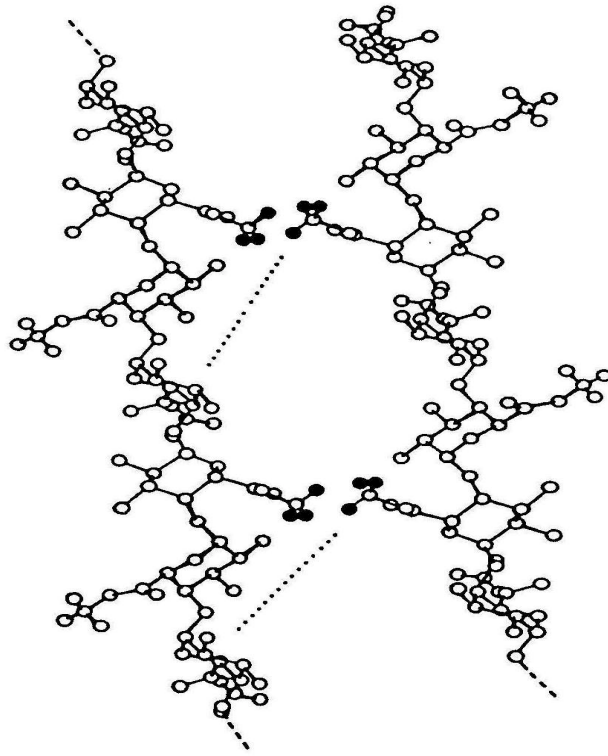
แรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกเป็นแรงที่เกิดจากโมเลกุลของสารละลายที่ไม่มีขั้วหรือหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ เช่น น้ำมัน ซึ่งจะเกิดการยึดเหนี่ยวกันเนื่องจากต้องการลดพลังงานให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถอยู่ในน้ำนั้นได้

2.1.2.3 การเกิดเจลของเพกตินชนิด HM (High-Methoxyl Pectin Gelation)

● การเกิดจังก์ชันโซน

การเกิดเจลของโพลีแซคคาไรด์ต่างๆ เกิดจากโพลีเมอร์ที่มีรูปร่างขดเป็นเกลียวหลายๆ เส้นพันกันซึ่งโครงสร้างนี้จะก่อ cross-link กับโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหขึ้น จากการศึกษาพบว่าเกลียวของเพกตินชนิด HM มีการจัดเรียงตัวเป็นเกลียวพับ 3 รอบซึ่งแต่ละเกลียวจะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนโดยเกิดทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างสายโพลีเมอร์ จึงทำให้เห็นว่าโครงสร้างจะมีความคงตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกระหว่างกลุ่ม ester methyl การเกิดจังก์ชันโซนเกิดจากสายโพลีแซคคาไรด์ 2 สายดังรูปที่ 2.2 ซึ่งทั้งสองสายจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกันและเกิดการพับ 3 รอบซึ่งเกิดแรงที่ยึดเหนี่ยวกันด้วย

จังก์ชันโซนสามารถยึดโมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์ในร่างแหสามมิติได้โดยอยู่ในส่วนที่มีการจับกันของสายโพลีแซคคาไรด์ 2 สายซึ่งทำให้เกิดความคงตัวโดยการจับกันของทั้งพันธะพันธะไฮโดรเจนและแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก แต่โดยปกติแรงแต่ละชนิดจะจับกันอย่างอ่อนๆ แต่เมื่อรวมกันจะทำให้เจลคงตัว น้ำตาลซูโครสและน้ำตาลชนิดอื่นคงตัวอยู่ได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก แต่น้ำตาล rhamnose เป็นตัวที่ทำให้เกิดการบิดงอของสายโพลีแซคคาไรด์และการบิดงอนี้จะกระทบการเกิดจังก์ชันโซน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของจังก์ชันโซนในเจลของเพคตินชนิด HM อะตอมของไฮโดรเจนของกลุ่มเมทิลที่จับกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโพบิกแสดงให้เห็นเป็นวงกลมทึบ (●) และพันธะไฮโดรเจนแสดงเป็นเส้นประ

ที่มา : Oakenfull (1991)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของเพคติน

1. น้ำหนักโมเลกุลของเพคตินมีความสำคัญต่อการเกิดเจล ขณะเกิดเจลโมเลกุลของเพคตินที่เป็นสายตรงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโมเลกุลที่เป็นสามมิติ เป็นผลให้สารละลายมีลักษณะเหนียวหนืด และแข็งตัวขึ้น แต่ถ้าโมเลกุลเป็นสายสั้นการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสามมิติไม่ค่อยสมบูรณ์ทำให้ได้เจลที่มีลักษณะเหลว และไม่ค่อยแข็งตัว

2. ปริมาณกลุ่มเมทิลใน โมเลกุลเพคติน ถ้าเพคตินที่มีกลุ่มเมทิลมากกว่าจะเปลี่ยนเป็นรูปสามมิติที่แข็งแรงและคงทนกว่า

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จะมีผลต่อการเกิดเจล คือ ถ้าพีเอชสูงเกินไปจะไม่มีการเกิดเจล แต่ถ้าพีเอชต่ำเกินไปจะทำให้เจลที่ได้แข็งมาก ดังนั้นการเกิดเจลต้องมีพีเอชที่เหมาะสม คือ

3.0 - 3.2 (พวงทอง และคณะ, 2541)

2.2 รีโวลยี (Rheology)

คำว่า “รีโวลยี (Rheology)” ผู้บัญญัติคนแรกคือ Eugene C. Bingham และได้ให้ความหมายว่า รีโวลยี หมายถึง วัสดุทุกสิ่งทุกอย่างสามารถไหลได้ (everything flow) (Steffe, 1996)

รีโวลยีเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) และการไหล (flow) ของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือการกระทำใดๆ ที่ทำให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของวัสดุ หรือทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป ดังนั้น รีโวลยีทางอาหารจึงเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป และผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายในกระบวนการผลิตอาหารระดับอุตสาหกรรม ขึ้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตมีผลต่อคุณภาพทางรีโวลยี เพราะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะส่งผลไปถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารด้วยการวัดเนื้อสัมผัสของอาหารเป็นวิธีการที่ใช้เครื่องมือหรือวิธีการที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ เพื่อวัดค่าทางคุณสมบัติที่เกี่ยวกับเนื้อสัมผัสจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาทางรีโวลยี (ธงชัย, 2545)

นอกจากนี้การศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของอาหารทำให้ทราบถึงส่วนประกอบสำคัญในโครงสร้างอาหาร ลักษณะโครงสร้างอาหาร เช่น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเจลที่มีเฟสแยกกัน หรือมีลักษณะเป็นอิมัลชัน และจะทำให้ทราบเงื่อนไขในกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาซึ่งพฤติกรรมทางกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นสามารถบอกถึงสิ่งเหล่านี้ได้ ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติทางรีโวลยีของอาหารจึงมีประโยชน์และมีความสำคัญเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตั้งแต่การขนส่งวัตถุดิบ และในกระบวนการผลิต การควบคุมการผลิต และในด้านการประเมินทางประสาทสัมผัส ซึ่งต่อมารวมไปถึงการวางจำหน่ายของผลิตภัณฑ์อาหารด้วย (Rao, 1999) ค่าพื้นฐานทางรีโวลยีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

- ความเค้น (Stress : σ) คือ ค่าแรง (Force : F) หน่วยเป็นนิวตัน (N) ต่อพื้นที่ที่แรงนั้นมากระทำบนระนาบ (Area : A) หน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = F / A \quad (1)$$

หน่วยของความเค้นเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa)

- ความเครียด (Strain : ϵ) คือ อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไป (ΔL) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) บางครั้งอาจคิดเป็นร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (% deformation) คำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (2)$$

ความเครียดไม่มีหน่วยเนื่องจากมีหน่วยเป็นเมตรต่อเมตร จึงไม่มีหน่วย

- **โมดูลัส (Modulus)** คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากกฎของฮุก (Hooke's law) ค่าโมดูลัสเป็นค่าที่บ่งบอกความยืดหยุ่นของวัสดุ (elasticity) โดยทฤษฎีของฮุกจะเป็นจริงหรือตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าวัสดุนั้นต้องเป็นวัสดุสารเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์มีสมการคือ

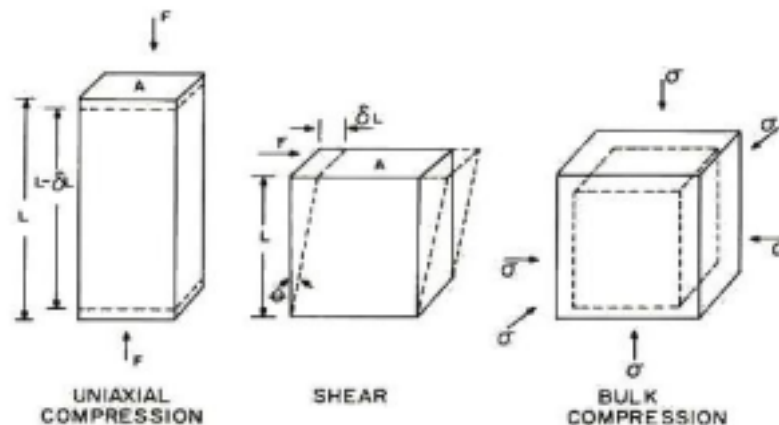
$$\sigma = E \epsilon \quad (3)$$

โดย E คือ Young's modulus of elasticity มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa)

แต่ถ้าความเค้นนั้นเกิดจากแรงเฉือนจะได้ค่าโมดูลัสเป็น shear modulus (G) โดยค่าโมดูลัสจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress : τ) และความเครียดเฉือน (shear strain : γ) และได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\tau = G \gamma \quad (4)$$

และถ้าความเค้นเกิดจากแรงดัน โมดูลัสที่คำนวณได้จะเป็น bulk modulus (K) ดังนั้นโมดูลัสจะมีหลายรูปแบบ ขึ้นกับลักษณะขอแรงที่มากระทำต่อตัวอย่างว่าเป็นแรงชนิดใด เช่น แรงกดหรือแรงดึง (compression or tension) แรงเฉือน (shear) และแรงกดอัด (bulk compression) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมดูลัสของแรงต่างๆ ที่กระทำกับตัวอย่าง

ที่มา : Rao and Steffe (1992)

สำหรับส่วนที่มีการไหลซึ่งเป็นสมบัติของของไหลสามารถอธิบายได้ตามกฎของนิวตัน (Newton's law) บางครั้งเรียกวัสดุนี้ว่าของไหลแบบนิวตัน ซึ่งการวัดค่าเนื้อสัมผัสจะวัดเป็นค่าความหนืด (viscosity : η) เมื่อมีความเค้นเฉือน (shear stress : τ) กระทำต่อตัวอย่างโดยมีอัตราเร็วในการเฉือน (shear rate : $\dot{\gamma}$) ต่างๆ กัน โดยอัตราเฉือนจะวัดในหนึ่งหน่วยเวลา เนื่องจากความเครียดเฉือนที่ทุกตำแหน่งมีค่าเท่ากันหมด ฉะนั้นความหนืดจึงขึ้นกับฟังก์ชันของเวลา (t) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ (Steffe, 1996)

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta (d\gamma / dt) \quad (5)$$

เมื่อ η คือ ความหนืด (viscosity) มีหน่วยเป็นเซ็นติพอยส์ (cP)

คุณสมบัติทางรีโอโลยีจะอธิบายถึงสมบัติของวัสดุที่มีลักษณะที่ยากที่กำหนดแน่นอน เช่น วัสดุแขวนลอยหรือวัสดุอิมัลชัน (suspension or emulsion) วัสดุโพลิเมอร์ (polymer materials) และวัสดุวิสโคอิลาสติก (มนัส, 2538)

2.3 วัสดุวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic Materials)

โดยทั่วไปวัสดุในธรรมชาติ เช่น ผักและผลไม้ เนื้อสัตว์ หรือยาง จะแสดงพฤติกรรมพื้นฐานที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุเป็น 2 ลักษณะ คือ ส่วนที่มีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ในอุดมคติจะใช้กับวัสดุที่เป็นของแข็ง และส่วนที่เป็นของไหลในอุดมคติซึ่งจะใช้กับวัสดุที่เป็นของเหลว ซึ่งในความเป็นจริงคุณสมบัติของวัสดุส่วนใหญ่รวมทั้งในอาหารจะไม่สามารถอธิบายสมบัติของวัสดุนั้นได้ด้วยพฤติกรรมอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่สามารถอธิบายได้ดีเมื่อนำพฤติกรรมทั้งสองส่วนมารวมกันซึ่งจะแสดงคุณสมบัติที่เป็นเหมือนทั้งของแข็งและของเหลว เรียกคุณสมบัติที่เกิดขึ้นนี้ว่า คุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic properties) และเรียกวัสดุที่มีสมบัตินี้ว่า วัสดุวิสโคอิลาสติก (viscoelastic materials) ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกนี้คือคุณสมบัติของวัสดุนี้จะขึ้นกับเวลา ดังนั้นวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และกึ่งของแข็ง สามารถนำไปศึกษารีโอโลยีของวัสดุนั้นๆ ได้ (Rao and Steffe, 1992)

พฤติกรรมที่มีความยืดหยุ่นในอุดมคติของของแข็งมีลักษณะ คือ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุรูปร่างของวัสดุจะเปลี่ยนไป แต่เมื่อถอนแรงออกรูปร่างของวัสดุนั้นจะกลับมาสู่สภาพเดิมเหมือนกับสภาพที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ทั้งนี้เนื่องจากของแข็งมีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานได้และใช้พลังงานนั้นในการกลับสู่รูปเดิม ในทางกลับกันของเหลวจะแสดง

พฤติกรรมที่ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนทั้งก่อนและหลังมีแรงภายนอกกระทำ และเมื่อมีแรงภายนอกกระทำจะเกิดการไหลไปโดยไม่มีการไหลกลับมา (Ward and Hadley, 1995)

การที่ของไหลไม่สามารถคืนรูปเดิมได้เนื่องจากของไหลไม่มีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานได้ทำให้พลังงานสูญหายไป ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุวิสโคอิลาสติกจะมีลักษณะคือ เมื่อให้ความเค้นเฉือน (shear stress) กระทำกับวัสดุที่มีความเครียด (shear strain) ระดับหนึ่งเมื่อถอนความเค้นออกทันทีทันใด วัสดุวิสโคอิลาสติกนี้จะมีการยืดหยุ่นโดยมีการคืนรูปตามเวลาเหมือนสมบัติของของแข็ง แต่ไม่กลับไปสู่สภาพเริ่มต้นเนื่องจากจะมีลักษณะของของเหลวที่เกิดการไหลไปข้างหน้าโดยไม่มีการย้อนกลับสู่สภาพเดิมได้ (Christensen, 1971)

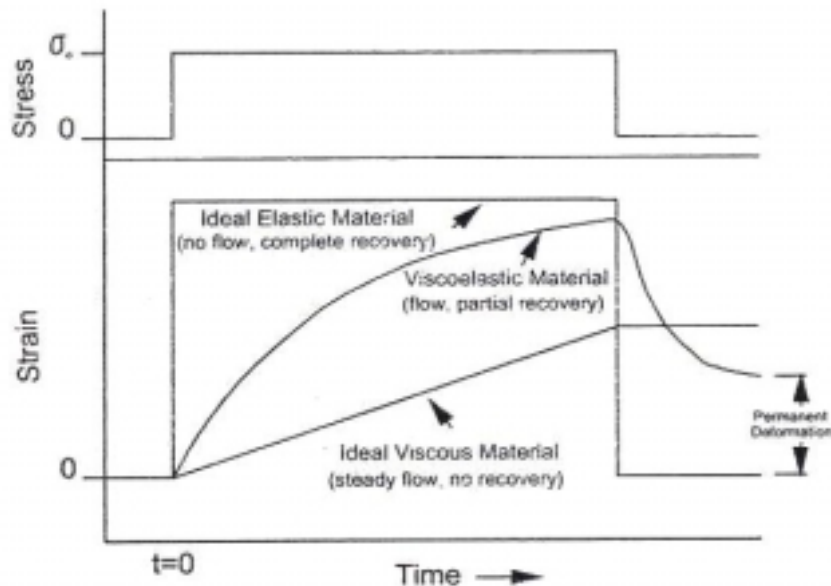
- **ลักษณะทางรีโอโลยีของเจลเพกติน**

ความสามารถในการเกิดเจลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเพกติน ซึ่งบทบาทของเพกตินในการเกิดเจลและลักษณะเจลของเพกตินพิจารณาได้จากพฤติกรรมด้านรีโอโลยี เจลของเพกตินมีสมบัติที่เป็นทั้งของเหลวที่ไหลได้และเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่นซึ่งลักษณะนี้เป็นลักษณะของวัสดุวิสโคอิลาสติกโดยลักษณะทางรีโอโลยีนั้นจะแสดงได้ในเทอมของอีลาสติกโมดูลัสและการไหลแบบนิวทอนเนียนซึ่งไม่ขึ้นกับเวลา โดยโมดูลัสอธิบายได้ในเทอมของอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด (stress : strain) และอธิบายได้จากการวัดความเครียดที่เปลี่ยนไปภายใต้เวลาที่ต่างกัน การทดลองหาโมดูลัสทำได้ทั้งแบบดึง กด และเฉือน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากเจลเพกตินเป็นวิสโคอิลาสติก ความเครียดที่เปลี่ยนไปจะขึ้นกับทั้งแรงเค้นที่ให้และเวลาในการให้ความเค้นเข้าไปด้วยซึ่งการศึกษานี้จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเครียดที่เปลี่ยนไปอย่างน้อยๆ พฤติกรรมของวัสดุวิสโคอิลาสติกของเจลเพกตินมีการศึกษาได้จากการทดสอบ เช่น dynamic-shear, creep-compliance, และวิธีการพักความเค้น (stress relaxation technic) (Alexos *etal.*, 1991)

creep เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยขึ้นกับเวลาเพื่อเข้าสู่จุดสมดุล การเกิด creep นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของความเครียดต่ำมากและเมื่อถอนแรงออกก็มีการคืนรูป (recovery) ส่วนอาหารที่มีลักษณะของวิสโคอิลาสติก เมื่อให้ความเค้น (stress) คงที่กดลงบนอาหาร ความเครียด (strain) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างทันทีทันใดและเมื่อออกด้วยแรงคงที่อย่างต่อเนื่อง ความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเกิดความหน่วงซึ่งเกิดขึ้นตาม

เวลาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อถอนแรงออกความเครียดจะเกิดการคืนรูป (recovery) บางส่วนและมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร โดยถ้าเป็นของแข็งในอุดมคติความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความเค้นจะไม่มีสมบัติการไหลและจะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าเป็นของเหลวในอุดมคติความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีการไหลที่คงที่และไม่มี การคืนรูป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.4 การศึกษาปรากฏการณ์ creep ความเค้นที่ให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแรงดึงหรือแรงกดก็ได้ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ห้นี้ได้ ทำการศึกษามาแล้วในตัวอย่างอาหารที่เป็นน้ำสลัดและน้ำส้ม การคืนรูปของความเครียดหรือการคืนรูปของ creep เรียกได้อีกว่าเป็นว่า การหดตัวกลับ (recoil) ซึ่งอาจแสดงได้ในเทอมของฟังก์ชันการหดตัวกลับ (Steffe, 1996)



รูปที่ 2.4 กราฟ creep และการคืนรูป (recovery)

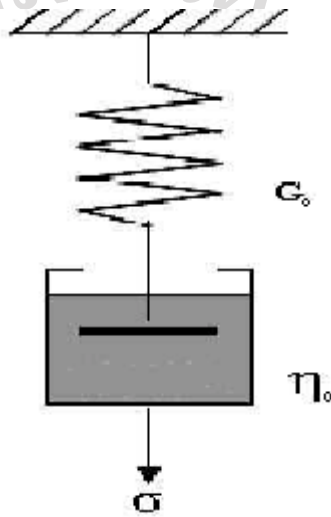
ที่มา : Steffe (1996)

2.4 แบบจำลองวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Modeling)

การอธิบายผลการตอบสนองของ creep และการคืนรูป (recovery) สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองในการอธิบายซึ่งจะใช้สปริง (spring) เป็นสัญลักษณ์แทนส่วนที่มีการยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (elastic) และใช้ลูกสูบ (dashpot) เป็นสัญลักษณ์แทนส่วนที่มีการไหลหนืด (viscosity) แบบจำลองที่ใช้กันในผลิตภัณฑ์วิสโคอีลาสติก เช่น แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model), แบบจำลองเคลวิน-ไวท์ (Kelvin-Voigt model) แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (Four element Burger model) และแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ (Six-element model) เป็นต้น (Steffe, 1996)

- แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) (Rao and Steffe, 1992)

เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบของสปริง (spring) ต่ออนุกรมกับลูกสูบ (dashpot) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแบบจำลองนี้เสนอโดย James Clerk Maxwell จึงได้ชื่อว่าแบบจำลองแมกซ์เวลล์



รูปที่ 2.5 แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model)
ที่มา : Steffe (1996)

เมื่อให้ความเค้น (stress : σ) ซึ่งความเค้นของสปริงและลูกสูบในแบบจำลองแมกซ์เวลล์จะเท่ากันและจะเท่ากับความเค้นเฉือน (shear stress : τ) แต่ความเครียด (strain : ϵ) ที่เกิดจะเป็นความเครียดรวมของสปริงและลูกสูบเนื่องจากคุณสมบัติที่ต่างกันของสปริงและลูกสูบสามารถแสดงดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\sigma = \sigma_{\text{spring}} = \sigma_{\text{dashpot}} \quad (6)$$

$$\epsilon = \epsilon_{\text{spring}} + \epsilon_{\text{dashpot}} \quad (7)$$

จากกฎของฮุกตั้งสมการความสัมพันธ์ที่ (3) และจากกฎของนิวตันตั้งสมการความสัมพันธ์ที่ (5) การเปลี่ยนแปลงของความเครียดของสปริงและลูกสูบจึงเป็น

$$\epsilon_{\text{spring}} = \sigma_{\text{spring}} / E_0 \quad (8)$$

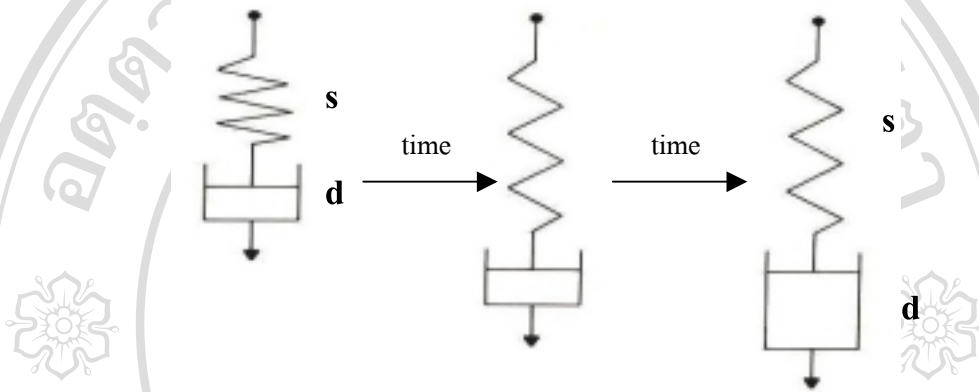
$$\epsilon_{\text{dashpot}} = \sigma_{\text{dashpot}} / \eta_0 \quad (9)$$

แทนสมการที่ (8) และ (9) ในสมการที่ (7) และการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป

ดังนั้นจึงเขียนสมการรีโอโลยีของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ได้เป็น

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \left[\frac{d\sigma}{dt} \right] + \frac{\sigma(t)}{\eta_0} \quad (10)$$

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสปริงและลูกสูบของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดย d ; dashpot และ s ; spring

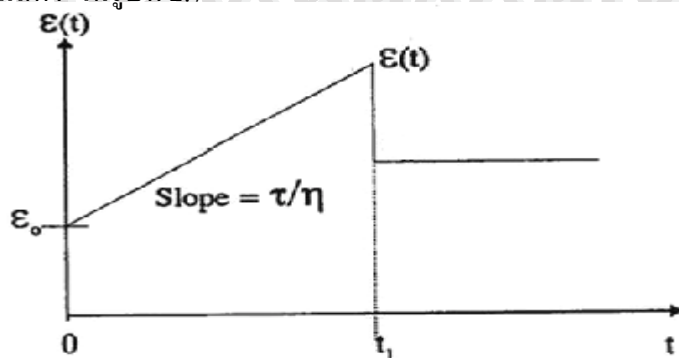


รูปที่ 2.6 ผลการตอบสนองของแบบจำลองแมกซ์เวลล์เมื่อให้ความเค้นคงที่
ที่มา : Rao and Steffe (1992)

พิจารณาการเกิด creep : ถ้าให้ความเค้นคงที่ (σ_0) ที่เวลา t จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้สมการ creep ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์เป็น

$$\varepsilon = f(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0 t}{\eta_0} \quad (11)$$

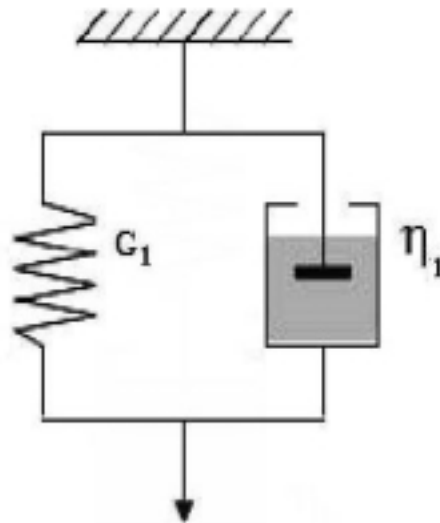
และสามารถแสดงผลการตอบสนองของ creep และการคืนรูป (recovery) ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ได้ดังแสดง ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์ creep และการคืนรูป (recovery) ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์
ที่มา : มนัส (2538)

- แบบจำลองเคลวิน – โวก (Kelvin – Voigt model)

เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบของสปริง (spring) ต่อขนานกับลูกสูบ (dashpot) แสดงดังรูปที่ 2.8 แบบจำลองนี้เสนอโดย Lord Kelvin ผู้ที่ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ในเรื่องความยืดหยุ่น บางครั้งอาจเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองเคลวิน



รูปที่ 2.8 แบบจำลองเคลวิน - โวก (Kelvin – Voigt model)

ที่มา : Steffe (1996)

ในแบบจำลองเคลวิน เมื่อให้ความเค้น (stress : σ) ความเค้นที่ปรากฏจะเป็นความเค้นรวมของสปริงและลูกสูบ แต่ความเครียด (strain : ϵ) ที่เกิดของสปริงและลูกสูบจะเท่ากัน แสดงดังสมการที่ (12) และ (13)

$$\sigma = \sigma_{\text{spring}} + \sigma_{\text{dashpot}} \quad (12)$$

$$\epsilon = \epsilon_{\text{spring}} = \epsilon_{\text{dashpot}} \quad (13)$$

จากกฎของฮุกตั้งสมการความสัมพันธ์ที่ (3) และจากกฎของนิวตันตั้งสมการความ

สัมพันธ์ที่ (5) การเปลี่ยนแปลงของความเครียดของสปริงและลูกสูบจึงเป็น

$$\sigma_{\text{spring}} = \epsilon_{\text{spring}} E_0 \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{dashpot}} = \epsilon_{\text{dashpot}} \eta_0 \quad (15)$$

แทนสมการที่ (14) และ (15) ในสมการที่ (12) และการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป

ดังนั้นจึงมีสมการรีโอโลยีของแบบจำลองเคลวินเป็น

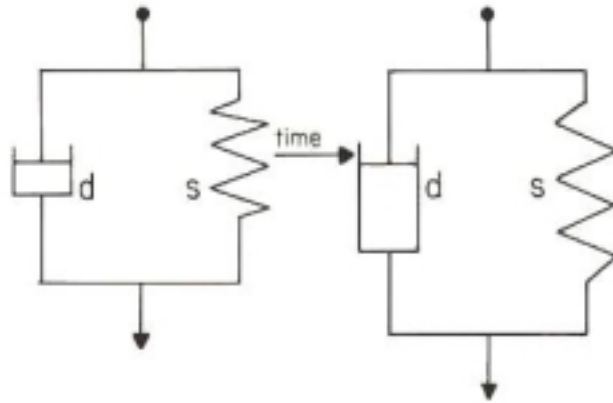
$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_{\text{spring}}(t) + \eta_0 \frac{d\varepsilon_{\text{dashpot}}(t)}{dt} \quad (16)$$

หรือ

$$\frac{1}{E_0} \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) = \dot{\varepsilon} + \lambda_{\text{ret}} \left(\frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} \right) \quad (17)$$

โดยที่ $\lambda_{\text{ret}} = \eta_1 / E_1 = \text{retardation time}$

และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสปริงและลูกสูบของแบบจำลองเคลวิน – โวคดังรูปที่ 2.9

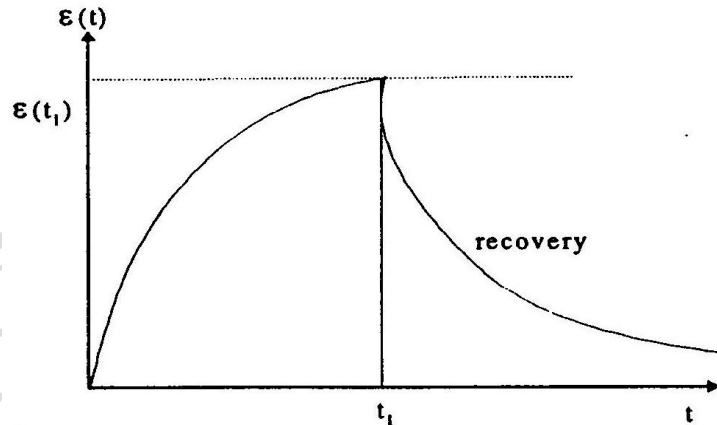


รูปที่ 2.9 ผลการตอบสนองของแบบจำลองเคลวินเมื่อให้ความเค้นคงที่
ที่มา : Rao and Steffe (1992)

พิจารณาการเกิด creep : ถ้าให้ความเค้นคงที่ (σ_0) ที่เวลา t จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้สมการ creep ของแบบจำลองเคลวินเป็น

$$\varepsilon = f(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp \left(\frac{-t}{\lambda_{\text{ret}}} \right) \right) \quad (18)$$

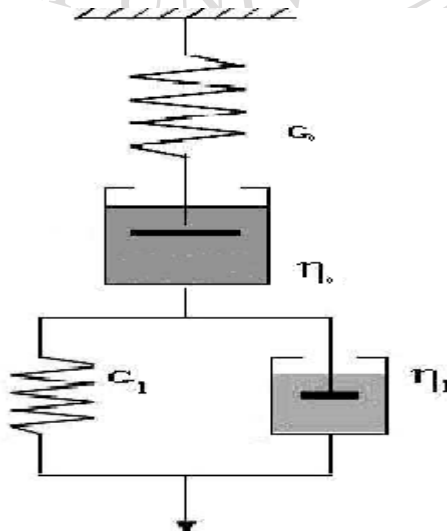
ผลการตอบสนองของการทดสอบ creep และการคืนรูป (recovery) ของแบบจำลองเคลวินแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงปรากฏการณ์ creep และการคืนรูป (recovery) ของแบบจำลองเคลวิน
ที่มา : มนัส (2538)

• แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (Four element Burger model) (Steffe, 1996)

จากการที่แบบจำลองแมกซ์เวลล์และเคลวินอย่างง่ายข้างต้นไม่สามารถแสดงสมบัติวิสโคอีลาสติก เช่น ปรากฏการณ์ creep ได้ดีพอและเหมาะสมในตัวอย่างอาหารหรือวัสดุทางชีววิทยา ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นใหม่โดยนำแบบจำลองทั้งสองมาต่อรวมกันจะทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ creep ได้ดีขึ้น โดยเรียกแบบจำลองที่ได้ใหม่นี้ว่า แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (Four element Burger model) หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่าแบบจำลองเบอร์เกอร์ (Burger model) แบบจำลอง 4 องค์ประกอบนี้จะประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ต่ออนุกรมกับแบบจำลองเคลวิน แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (Four element Burger model)

ที่มา : Steffe (1996)

ลิขสิทธิ์
Copyright ©
All rights reserved

เชียงใหม่
University
reserved

พิจารณาการเกิด creep : เมื่อให้ความเค้นคงที่ (σ_0) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเป็นความเครียดรวมของทั้งสองแบบจำลอง จะได้สมการ creep ของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบเป็น

$$\epsilon = f(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_{ret}}\right) \right) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_0} \quad (19)$$

โดยที่ $\lambda_{ret} = \eta_1 / E_1 = \lambda_1$ ซึ่งเป็นค่า retardation time ของแบบจำลองเคลวิน

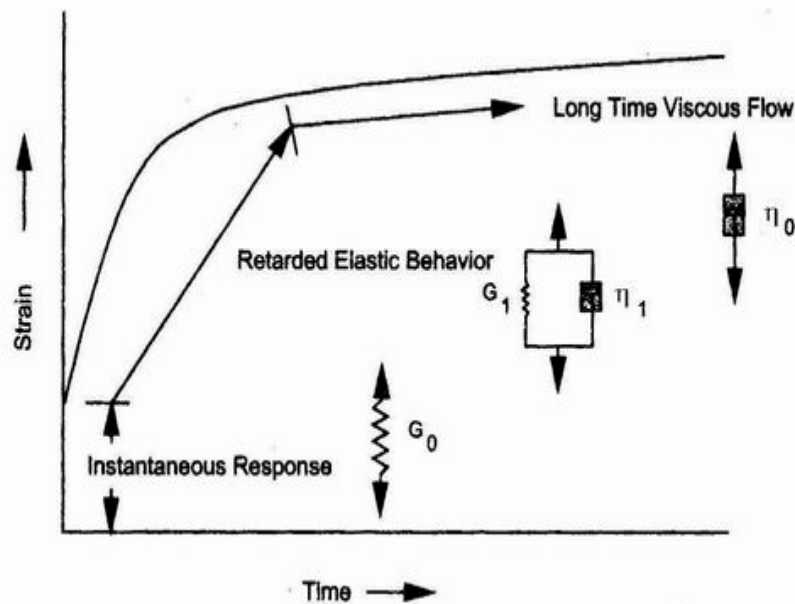
η_0 = เป็นค่าความหนืดของแบบจำลองแมกซ์เวลล์

E_0 = เป็นค่าโมดูลัสเฉือนของแบบจำลองแมกซ์เวลล์

η_1 = เป็นค่าความหนืดของแบบจำลองเคลวิน

E_1 = เป็นค่าโมดูลัสเฉือนของแบบจำลองเคลวิน

กราฟ creep ที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบและทำให้เกิดสมบัติต่างๆ ของแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟ creep ที่แสดงองค์ประกอบของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบซึ่งอธิบายพฤติกรรม การไหลและการยืดหยุ่น

ที่มา : Steffe (1996)

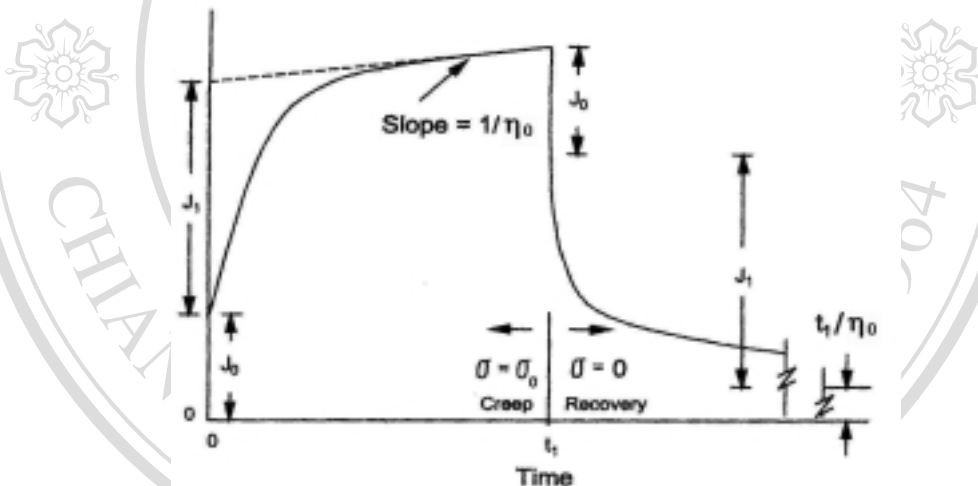
ปรากฏการณ์การเกิด creep สามารถอธิบายได้ในเทอมของ creep compliance (J) ซึ่งถ้าเป็นของแข็งที่เป็นอีลาสติก $J = 1/E$ แต่ถ้าเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก $J(t) \neq 1/E(t)$ เนื่องจากความแตกต่างกันในรูปแบบของเวลาในการทดลอง (Ferry, 1970)

$$J = f(t) = \epsilon / \sigma_{\text{const}} \quad (20)$$

ดังนั้นจากสมการ (12) สามารถแสดงในรูปของ creep compliance (J) ได้เป็น

$$J = f(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) \right) + \frac{t}{\eta_0} \quad (21)$$

และจากสมการ (14) จะได้กราฟ creep compliance และการคืนรูป (recovery) แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟ creep compliance และการคืนรูป (recovery) ของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ
ที่มา : Steffe (1996)

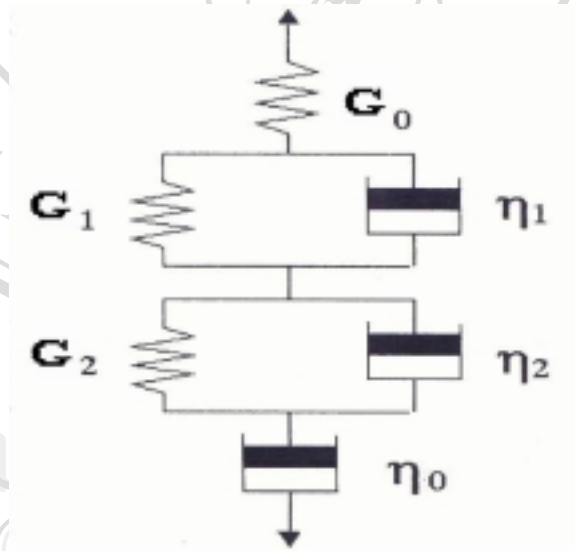
จากกราฟสามารถอธิบายสมบัติวิสโคอีลาสติกได้คือ จากจุดเริ่มต้นของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของ compliance (J_0) ที่เกิดขึ้นทันทีทันใดซึ่งเกิดจากสมบัติสปริงของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ จากนั้นค่า compliance (J_1) จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มแบบเอกซ์โปเนนเชียลซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดการหน่วงของเวลา องค์ประกอบที่แสดงลักษณะกราฟช่วงนี้คือองค์ประกอบแบบจำลองเคลวิน เมื่อถอนแรงจะมีการคืนรูป (recovery) และเมื่อเวลาผ่านไปนาน compliance จะขึ้นกับสมบัติที่เป็นลูกสูบเป็นผลของของเหลวซึ่งจะเกิดการไหลที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ข้อมูลจากกราฟ creep จะสัมพันธ์กับตัวแปร 2 ตัว คือ slope = $1/\eta_0$ และเมื่อต่อจุดไปตัดกับแกน y ที่เวลา $t = 0$ จะเรียกว่าเป็นสถานะคงที่ของ compliance มีค่าเท่ากับ $J_0 + J_1$

ที่ $t = t_1$ ความเค้นถูกย้ายออก (σ_0) เกิดการเปลี่ยนแปลงของ compliance ทันทีซึ่งมีค่าเท่ากับ J_0 ลูกสูบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรซึ่งเกี่ยวกับค่า compliance ของ t_1/η_0 ตัวแปรนี้จะมี ความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการไม่คืนรูปของตัวอย่าง ถ้าการแทนที่เป็นไปตามแบบจำลอง 4 องค์ประกอบแล้วค่า J_0 และ J_1 ที่เปลี่ยนแปลงจากกราฟ creep จะเท่ากับค่า J_0 และ J_1 จากกราฟ การคืนรูปด้วย

● **แบบจำลอง 6 องค์ประกอบ (Six - element model) (Steffe, 1996)**

เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วยต่ออนุกรมกับแบบจำลองเคลวิน 2 หน่วย รวมเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ และได้พัฒนามาจากแบบจำลอง 4 องค์ประกอบโดยการเพิ่มแบบจำลองเคลวินเข้าไปอีก 1 หน่วย แบบจำลองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 สมการทางคณิตศาสตร์ของ creep ของแบบจำลอง 6 องค์ประกอบแสดงได้เป็น

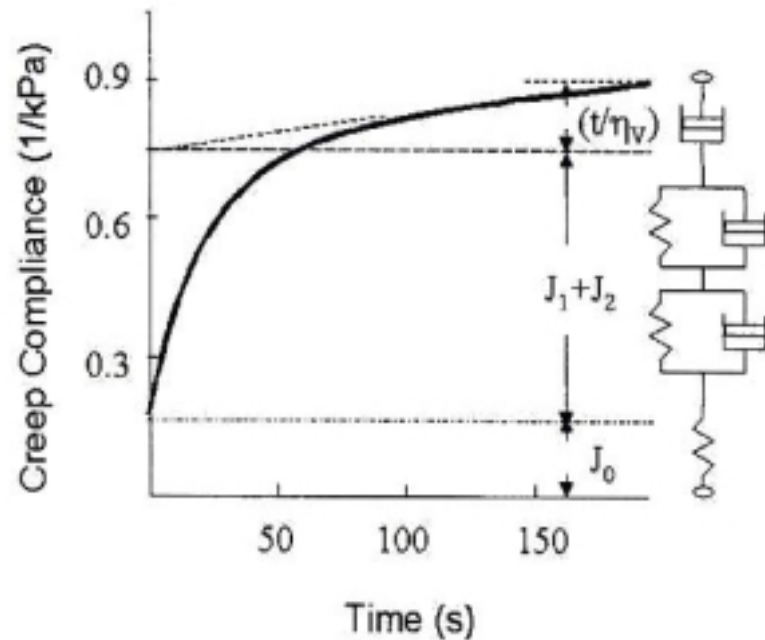
$$J = f(t) = J_0 + J_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) \right) + J_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_2}\right) \right) + \frac{t}{\eta_0} \quad (22)$$



รูปที่ 2.14 แบบจำลอง 6 องค์ประกอบ (Six - element model)

ที่มา : Kuo (2000)

ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ creep compliance กับ องค์ประกอบในแบบจำลองแสดงได้ ดังรูปที่ 2.15 โดย $J_0 =$ compliance ที่มีเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของของแข็ง J_1 และ $J_2 =$ compliance ที่เกิดความหน่วง $\eta_v =$ ความหนืด และ $t =$ เวลา



รูปที่ 2.15 ผลการตอบสนอง creep ซึ่งแสดงความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ

ที่มา : Kuo (2000)

ดังนั้นในอาหารหรือตัวอย่างที่ไม่สามารถหาแบบจำลองที่เหมาะสมจากแบบจำลองแบบ 4 หรือ 6 องค์ประกอบได้ สามารถเพิ่มองค์ประกอบของแบบจำลองเคลวินได้อีกเพื่อให้ค่าผลการตอบสนองของ creep compliance มีความเหมาะสมและสามารถอธิบายสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของอาหารนั้นได้โดยสมการทั่วไปทางคณิตศาสตร์ของสมการคือ

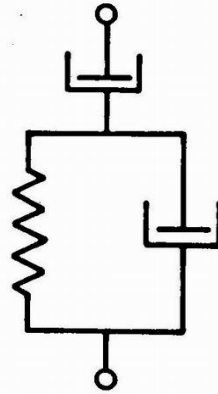
$$J = f(t) = J_0 + \sum_{i=1}^m \left\{ J_i \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\lambda_i} \right) \right] \right\} + \frac{t}{\eta_0} \quad (23)$$

โดยที่ m เป็นจำนวนองค์ประกอบของเคลวินทั้งหมดในแบบจำลอง
 เช่น ถ้า $m = 1$ แบบจำลองนี้จะเป็นแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ แต่ถ้า $m = 2$ แบบจำลอง
 ที่ได้เป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถึงสมบัติวิสโคอิลาสติกของอาหารจากการทดสอบ creep และใช้แบบจำลองในการอธิบายสมบัติต่างๆ รวมถึงมีการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางวิสโคอิลาสติกนี้ โดยผู้ทำการศึกษาค้นคว้าได้ศึกษาในอาหารหลายชนิด เช่น Morrow and Mohsenin (1966) ได้ศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกในผักและผลไม้ซึ่งมีปริมาณน้ำในตัวอย่างสูงซึ่งแบบจำลองของผักและผลไม้ที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกันโดยพฤติกรรมของเซลล์จะใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เป็นส่วนยึดหยุ่น และของเหลวภายในเซลล์แสดงลักษณะของ องค์ประกอบที่เป็นของไหลในแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงมีทั้ง 2 พฤติกรรมที่แสดงออกมาซึ่งเห็นได้เด่นชัดในผลแอปเปิลพันธุ์ McIntosh และแบบจำลองที่ได้จากศึกษา คือ แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาในเนื้อเยื่อไขมันฝรั่งเศส คือ Alvarez and Canet (1998a ; 1998b) ซึ่งศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อเยื่อไขมันฝรั่งเศสและผ่านการต้มในน้ำเดือด 15 นาที ทำให้เปลี่ยนรูปโดยใช้แรงกดในแนวเดียวกัน แรงเฉือน และแรงดึงในแนวเดียวกัน หาค่าการพักความเค้น (stress relaxation), creep compliance, และการกัด 2 ครั้ง (Texture Profile Analysis ; TPA) โครงสร้างที่ศึกษาของเนื้อเยื่อไขมันฝรั่งเศสภายใต้แรงกดเกิดคล้ายกับการศึกษาภายใต้แรงเฉือน แต่แตกต่างกับการศึกษาภายใต้แรงดึง แบบจำลองที่เห็นได้ชัดจากพฤติกรรม creep และเหมาะสมมากที่สุดของเนื้อเยื่อไขมันฝรั่งเศส คือ แบบจำลอง 6 องค์ประกอบของเบอร์เกอร์ โดยวิสโคอิลาสติกโมดูลัสจะเกิดจากความดันภายในเซลล์ การเกิดเจลของแป้งและส่วนที่เป็นวิสโคอิลาสติกที่แสดงสมบัติวิสโคอิลาสติกคือสารประกอบเพกตินและเซลลูโลสตามลำดับ

นอกจากมีการศึกษาในผักและผลไม้สดแล้วยังมีอาหารที่เป็นแป้งสำหรับทำขนมปังที่หมักด้วยยีสต์โดยมีผู้ทำการศึกษาคือ Bloksma (1972) ได้นำประโยชน์จากแบบจำลองเชิงกลมาอธิบายถึงคุณสมบัติทางรีโอโลยีของโด (แป้งสำหรับทำขนมปังที่หมักด้วยยีสต์) ซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วยสปริง (spring) และลูกสูบ (dashpot) ต่อขนานกันและมีลูกสูบอีกตัวต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.16 ในการทดสอบ creep เมื่อให้แรงเข้าไปทันทีจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นการเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นต่อเนื่องอย่างช้าๆ จนเมื่อถอนแรงออกตัวอย่างจะคืนรูปอย่างรวดเร็วในตอนแรกและหลังจากนั้นจะคืนรูปอย่างช้าๆ การเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วและการคืนรูปจะสัมพันธ์กับการทำงานของสปริงซึ่งได้ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนของสปริงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 5×10^2 ถึง $7 \times 10^2 \text{ kg/m} \cdot \text{sec}^2$



รูปที่ 2.16 แบบจำลอง 3 องค์ประกอบสำหรับโด
ที่มา : Bloksma (1972)

ส่วนลูกสูบจะสัมพันธ์กับการคืนรูปที่เกิดอย่างช้าๆ เวลาที่เกิดการหน่วงในงานวิจัยนี้คือ 10 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับความหนืดที่มีค่า 10^4 kg/m·sec ส่วนของลูกสูบเป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปของของเหลวที่ไหลได้และสามารถอธิบายได้จาก creep test ต่อมาได้มีการศึกษาในเจลซึ่งเป็นลักษณะที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติกอย่างเด่นชัดโดยมีการศึกษาในเจลที่เตรียมจากเวย์โปรตีน โดย Katsuta *et al* (1990) ศึกษาพฤติกรรม creep ของเจลซึ่งทำจากเวย์โปรตีนที่แยกน้ำออกซึ่งมีโปรตีนมากกว่าร้อยละ 95 โดยใช้ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่ากราฟ creep ของเจลที่ศึกษามีแบบจำลองเป็น 6 องค์ประกอบประกอบด้วยสปริง 1 หน่วย แบบจำลองเคลวิน 2 หน่วย และองค์ประกอบที่เป็นของไหลอีก 1 หน่วย ความเข้มข้นและอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางวิสโคอีลาสติกแต่ละค่า ซึ่งสามารถหาได้และข้อมูลที่ได้นำไปใช้อธิบายในกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลที่มีการก่อร่างแหในโครงสร้าง หลังจากนั้นยังมีผู้ทำการศึกษาถึงการให้ความร้อน การเพิ่มประจุและพีเอชของโปรตีน เพื่อศึกษาถึงผลของการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ จากการเพิ่มประจุ และการให้ความร้อนซึ่งส่งผลต่อคุณภาพทางเคมี-กายภาพของการเกิดเจลโดยในที่นี้เป็นเจลของโปรตีนถั่วเหลือง โดยมีผู้ศึกษาคือ Chronakis (1996) ซึ่งศึกษาถึงการให้ความร้อนในระดับต่างๆ การเพิ่มประจุที่ทำให้เกิดพันธะแข็งแรง และพีเอชของโปรตีนที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในโมเลกุลระหว่างกระบวนการผลิตอาหาร ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพในการเกิดเจลของโปรตีนถั่วเหลือง ลักษณะของโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ ใช้การวัดทางรีโอโลยี (โมดูลัสของของแข็ง $\tan\delta$ creep/compliance) ให้ความร้อนช่วง 30 ถึง 90 องศาเซลเซียสแก่โปรตีนถั่วเหลือง พบว่าเจลเกิดการรวมกันที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) เจลเกิดร่างแหที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับช่วงเริ่มเกิดเจลในกระบวนการผลิต

ส่วนของเจลที่ไม่รวมกันที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลเกาะกันอย่างอ่อนๆ แต่มีผลต่อส่วนที่เป็นอีลาสติก สิ่งสำคัญคือ ความร้อนทำให้เกิดร่างแหที่ก่อพันธะไดซัลไฟด์และแรงที่ทำให้เกิดการดึงดูดกันของ ร่างแหซึ่งเกิดในขณะเย็นโดยมีลักษณะที่คล้ายกันมาก การสรุปผลของโครงสร้างและส่วนที่มีความ แข็งศึกษาได้จาก creep test ที่ใช้เวลานาน พบว่าพันธะโควาเลนต์และไม่ใช่โควาเลนต์เกิดการ รวมกันที่ความร้อนสูง (90 องศาเซลเซียส) โครงสร้างมีความคงตัวซึ่งที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งจะมีค่า คงที่ของวิสโคอีลาสติกค่าหนึ่ง ถ้าความเข้มข้นเปลี่ยนค่าคงที่ทางวิสโคอีลาสติกก็เปลี่ยนด้วย โดยแบบจำลองที่เหมาะสม คือ แบบจำลอง 6 องค์ประกอบ ส่วนเนื้อสัมผัสของโปรตีนถั่วเหลือง เกิดการเปลี่ยนแปลงง่ายตามปริมาณของประจุและพีเอชที่เปลี่ยนไป การวัดเนื้อสัมผัสใช้แรงกด ผลคือแรงที่เกิดจากเกลือรวมตัวกันทำให้โครงสร้างเพิ่มความแข็งแรงขึ้น

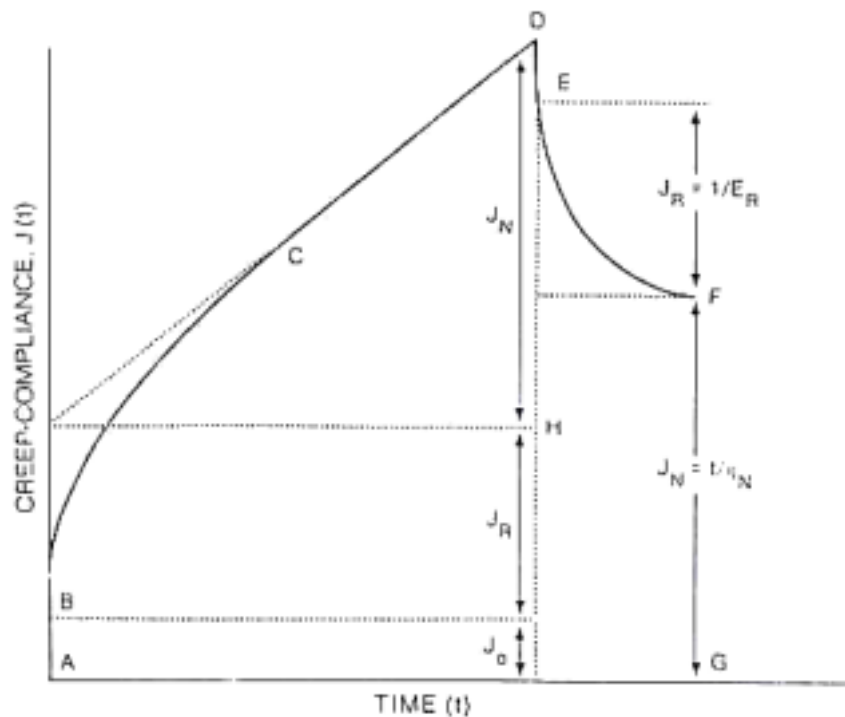
นอกจากมีการศึกษาในเจลของเวย์โปรตีนแล้วยังมีการศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติก ของชีสโดยมีผู้ศึกษาคือ Ma *et al* (1996) ซึ่งศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของชีสที่เพิ่ม เลซิซินปริมาณร้อยละ 0.2 และ 0.5 โดยน้ำหนัก และหาค่าความคงตัว การศึกษาโดยวิธีใช้การแกว่ง (dynamic test) และ creep test อีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus) และโมดูลัสที่สูญหายไป (loss modulus) ของชีสลดไขมันที่เพิ่มเลซิซินจะมีค่ามากกว่าชีสลดไขมันหาค่าความคงตัว ($p < 0.01$) แต่น้อย กว่าค่าของชีสที่มีไขมัน ($p < 0.01$) ในการทดสอบ creep และการคืนรูป (recovery) ค่าความเครียด (strain) ที่เหลือของชีสที่มีไขมัน ชีสลดไขมันที่เพิ่มเลซิซินร้อยละ 0.5 หรือ 0.2 และชีสลดไขมัน หาค่าความคงตัวมีค่าเป็นร้อยละ 7.8 7.9 8.7 และ 15.4 ตามลำดับ พฤติกรรม creep compliance ของ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายของชีสทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มเป็นไปทางเดียวกันโดย แบบจำลองของชีสจะเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ หลังจากนั้น Ma *et al* (1997) ก็ได้ทำการ ศึกษาต่อในด้านรีโอโลยีของเชดดาร์ชีสที่มีไขมันและที่มีไขมันต่ำ โดยใช้ไขมันทดแทน 3 ชนิด คือ คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate based) เวย์โปรตีน (whey based) และโปรตีนเป็นตัวหลัก (protein based) การเตรียมเชดดาร์ชีสไขมันต่ำทำโดยลดไขมันลงร้อยละ 60 พร้อมกับการใช้สาร ทดแทนทั้ง 3 ชนิดและศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติก ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus) และโมดูลัสที่สูญหายไป (loss modulus) ของชีสไขมันต่ำซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตเป็น สารทดแทนมีค่ามากกว่าชีสไขมันต่ำที่มีโปรตีนเป็นสารทดแทนทั้งสองชนิด ($p < 0.05$) แต่มีค่า น้อยกว่าชีสที่มีไขมัน ($p < 0.05$) แบบจำลองที่ใช้ทำนายของวิสโคอีลาสติกชีสทั้งหมด คือ แบบ จำลอง 6 องค์ประกอบ และพบว่าชีสไขมันต่ำที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นสารทดแทน มีโครงสร้างที่เป็น ร่างแหเหมือนชีสที่มีไขมัน โครงสร้างที่เป็นร่างแหนี้มีมากกว่าชีสที่มีไขมันต่ำหาค่าความคงตัวและมี โปรตีนเป็นสารทดแทนทั้งสองชนิด

นอกจากการศึกษาในชีสแล้วยังมีการศึกษาในเจลของแซนแทนกันซึ่งเป็นสารในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสและเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง โดย Ma and Barbosa-Cánovas (1997) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของเจลจากแซนแทนกันซึ่งเกิดปฏิกิริยากับประจุบวกของ Na^+ , Ca^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งความเข้มข้นของแซนแทนกันและชนิดของประจุบวกมีผลอย่างมากต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของเจล โดยทดลองวัดโมดูลัสของพลังงานสะสม (Storage moduli : G') ที่มีความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ พบว่าแซนแทนกันที่มีความเข้มข้นของโพลีเมอร์ร้อยละ 0.5 และมีประจุ Na^+ , Ca^{2+} และ Fe^{3+} มีค่า G' เป็น 8.3, 10, และ 2700 ปาสคาล และแซนแทนกันที่มีความเข้มข้นของโพลีเมอร์ ร้อยละ 1.0 และมีประจุ Na^+ , Ca^{2+} , และ Fe^{3+} มีค่า G' เป็น 37, 42, และ 13,000 ปาสคาล ตามลำดับ แบบจำลอง creep compliance ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างแซนแทนเจลนี้ คือ แบบจำลองทั่วไปของเคลวินซึ่งเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบประกอบด้วยแบบจำลองเคลวิน 2 หน่วยต่ออนุกรมกับสปริงและลูกสูบ และประจุของเหล็กจะเป็นตัวที่ก่อ cross-link ที่ดีที่สุด ทำให้เจลแข็งแรงและมีความแน่น การศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกในเจลยังสามารถศึกษาจากเซลล์ซึ่งเติมเพกตินซึ่งเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมี Qiu *et al.* (1990) เป็นกลุ่มนักวิจัยที่ทำการศึกษาตัวอย่างเซลล์ที่เติมเพกตินที่เซตตัวด้วยความเร็วปานกลาง และเติมซูโครสปริมาณร้อยละ 100 พบว่าจะมีค่าอิลาสติกโมดูลัสและค่าความหนืดที่สูง แต่ค่า compliance ที่เกิดความหน่วงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทดสอบโดยใช้ rheometer ที่ควบคุมความเค้น ทดลองแทนซูโครสด้วยฟรุคโตสในสัดส่วนซูโครสร้อยละ 50 และฟรุคโตสร้อยละ 50 ได้ผลคือ ทำให้ค่า compliance ที่เกิดความหน่วงเพิ่มขึ้นเห็นได้โดยการเพิ่มของพื้นที่กราฟ creep-compliance โดยใช้เวลาในการเก็บข้อมูลตั้งแต่ 0 ถึง 3 นาที พบว่าการใช้ฟรุคโตสแทนเพิ่มร้อยละ 17 ทำให้พื้นที่กราฟเพิ่มร้อยละ 50 และถ้าแทนฟรุคโตสเพิ่มร้อยละ 53 ทำให้พื้นที่กราฟเพิ่มร้อยละ 75 ซึ่งพื้นที่กราฟจะแสดงได้ชัดเจนเกี่ยวกับการศึกษาชนิดของน้ำตาลที่มีผลต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี จากการทดลองสรุปได้ว่าฟรุคโตสจะทำหน้าที่เหมือนพลาสติกเพิ่มมากขึ้น คือ เพิ่มความเหนียวนุ่มและเพิ่ม compliance ที่เกิดความหน่วง เห็นได้ชัดจากค่าตัวแปร และจากการทดลองของ May, 1990 พบว่าการใช้ฟรุคโตสแทนทำให้เกิดการเซตตัวที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งโครงสร้างของเจลจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจากการทดสอบโดยการหา creep ซึ่งถ้าเป็นข้อมูลของน้ำหนักโมเลกุลหรือปริมาณ starch oligomer จะไม่เพียงพอในการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์นี้ได้ซึ่งผลที่แสดงถึงจำนวนและลักษณะของจังก์ชัน โชนที่เปลี่ยนไปจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

และจากการศึกษาถึงสมบัติวิสโคอีลาสติกจากการเกิดเจลเพกตินดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายการก่อและสลายของเจลเพกตินได้โดยมีผู้สนใจทำการวิจัยคือ Sherman (1970) ศึกษา creep-compliance ของเจลเพกติน โดยใช้ตัวอย่างที่ยังไม่มี การเสียรูป จากนั้นให้ความเค้นเฉือนคงที่ ; σ_c พบว่าความเครียดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงสภาพคงที่ คือ อัตราส่วนความเครียดต่อเวลาที่มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ของ J, γ, σ คือ

$$J(t, \sigma_c) = \gamma / \sigma_c$$

และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟ creep-compliance ที่มีส่วนต่างๆ แตกต่างกัน

ที่มา : Sherman (1970)

ช่วง A – B คือส่วนที่ Compliance J เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดซึ่งเป็นพันธะระหว่างหน่วยโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งจะเป็นการยืดหยุ่นโดยตรง ในส่วนนี้ถ้าถอนแรงเค้นออก โครงสร้างของตัวอย่างจะคืนรูปอย่างสมบูรณ์ จะได้ว่า

$$J = 1/E_0$$

เมื่อ E_0 เป็นอีลาสติกโมดูลัสที่เกิดขึ้นทันทีทันใด

ช่วง B – C เป็นช่วงที่ค่า Compliance J ขึ้นอยู่กับเวลาของอิลาสติกที่เกิดการหน่วงซึ่งเป็น ส่วน Compliance J_R ในส่วนนี้พันธะจะแตกและเปลี่ยนรูปแต่พันธะไม่ได้แตกและเปลี่ยนรูปด้วย อัตราเดียวกันทั้งหมด สมการที่ใช้ในส่วนนี้มีค่าตัวแปรเป็น

$$J_R = J_m [1 - \exp(-t/\tau_m)]$$

เมื่อ J_m เป็น Compliance ของพันธะทั้งหมด

τ_m เป็น เวลาที่เกิดการหน่วง = Compliance $J_m \eta_m$

η_m เป็นความหนืดที่สัมพันธ์กับความยืดหยุ่น

ช่วง C – D เป็นส่วนที่เป็นเส้นตรงของ Compliance ที่แสดงสมบัติของไหลนิวทอนเนียน ซึ่งพันธะในส่วนนี้เกิดการแตกหักและแสดงสมบัติการไหล Compliance J_N และสมบัติการไหลสัมพันธ์กันโดย

$$J_N = t/\eta_n$$

และเมื่อถอนแรงเค้นออกทันทีทันใดที่จุด D จะพบว่าเกิดการคืนรูป (recovery) ของอิลาสติก คือ ช่วง (D - E) จากนั้นก็เกิดการคืนรูปของอิลาสติกที่มีค่าความหน่วง (E - F) เนื่องจากพันธะระหว่างหน่วยโครงสร้างเกิดการแตกหักที่ C – D ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่แตกหักจะไม่มี การคืนรูป