

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. กล้วย

2.1.1. ประวัติของกล้วย (เบญจมาศ, 2545)

Reynold (1929) ได้กล่าวถึงถิ่นกำเนิดของกล้วยไว้ว่า กล้วยเป็นพืชที่ชอบอากาศร้อนชื้น ถิ่นกำเนิดของกล้วยจึงอยู่แถบเอเชียตอนใต้ ซึ่งจะพบกล้วยพื้นเมืองทั้งที่มีเมล็ดและไม่มีเมล็ด และจากการย้ายถิ่นฐานทำมาหากิน และการอพยพประชากรจากเอเชียตอนใต้ไปยังหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก ในต้นคริสต์ศักราชซึ่งได้นำหน่อกล้วยไปปลูกในแถบหมู่เกาะฮาวายและหมู่เกาะทางด้านตะวันออก หมู่เกาะตาฮีตี และหมู่เกาะฟีจี ทำให้กล้วยแพร่เข้าไปในแถบยุโรป

ประมาณ 327 ปีก่อนคริสต์กาล ได้มีการนำกล้วยจากประเทศอินเดียไปยังอาหรับโดย แอนโทนิอัส มูซา (Antonius Musa) แพทย์ประจำพระองค์ของจักรพรรดิกรุงโรม และเป็นที่ชื่นชอบมาก ชาวอาหรับเรียกกันว่า มูซ (muz) ต่อมาลิเบียได้ตั้งชื่อว่า มูซา (Musa) เพื่อเป็นเกียรติแก่แอนโทนิอัส มูซา และเนื่องจากการทำการค้าระหว่างอาหรับกับประเทศแถบอัฟริกา กล้วยจึงได้แพร่เข้าไปยังอัฟริกา ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงเดียวกับที่ชาวโปรตุเกสค้นพบฝั่งกินี ในอัฟริกา (ค.ศ. 1469-1474) ชาวอัฟริกาถือว่า คำว่า banana มาจากรากศัพท์ภาษาอัฟริกาตะวันตกว่า banena คำว่า banana ถูกใช้กันแพร่หลายเนื่องจากชาวโปรตุเกสซึ่งส่วนใหญ่เป็นพ่อค้าและเดินทางไปค้าขายในอัฟริกา ได้นำเอากล้วยไปค้าขายยังที่ต่างๆ ส่วนการนำกล้วยเข้าสู่ทวีปอเมริกานั้นเชื่อกันว่าเกิดขึ้นหลังจากที่ โคลัมบัส ค้นพบอเมริกา และมีการปลูกกล้วยกันเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วจนเป็นพืชเศรษฐกิจ ในศตวรรษที่ 19

สำหรับการนำกล้วยในประเทศไทย เชื่อกันว่าประเทศไทยเดิมเป็นแหล่งของกล้วยป่า และต่อมามีการนำเข้ากล้วยตานี และกล้วยชนิดอื่นในช่วงการอพยพของคนไทยไปตั้งถิ่นฐานที่สุโขทัย โดย De la Lovbere (1693) ได้บันทึกไว้ว่า เขาได้เดินทางเข้ามาในสมัยอยุธยา และพบกล้วยร้อยหวี ซึ่งเป็นกล้วยป่า ต่อมาเจ้าคุณศรีสุนทรโวหาร (2427) ได้กล่าวถึงชนิดของกล้วยไว้เป็นคำกลอน และในช่วงปีพ.ศ. 2523-2526 ได้มีการรวบรวมพันธุ์กล้วยขึ้นด้วยทุน IBPGR/FAO โดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และรวบรวมไว้ที่สถานีวิจัยปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

2.1.2. กล้วยที่เป็นที่รู้จักในประเทศไทย (ดวงแก้ว, 2544)

กล้วยในประเทศไทยมีอยู่หลายพันธุ์ด้วยกัน กล่าวกันว่ารวม 100 สายพันธุ์ แบ่งเป็น กล้วยป่า กล้วยบ้าน และกล้วยเมล็ด เป็นต้น

กล้วยบ้านกลายพันธุ์มาจากกล้วยป่า นิยมปลูกไว้ในบ้านเพื่อรับประทาน มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน คือ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยเล็บมือนาง กล้วยหักมุก กล้วยตานี และกล้วยหิน เป็นต้น แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะ กล้วยน้ำว้า กล้วยไข่ และกล้วยหอม เท่านั้น

กล้วยน้ำว้า เป็นกล้วยที่มีราคาสูง ออกผลได้ตลอดทั้งปี รสหวาน ให้คุณค่าทางอาหารสูง ทั้งในแง่ของพลังงาน และสารอาหารต่างๆ กล้วยน้ำว้าใช้ทำอาหารได้หลายชนิด เช่น กล้วยบวชชี กล้วยแขก กล้วยตาก กล้วยฉาบ ขนมกล้วย ข้าวต้มใส่กล้วย และกล้วยกวน เป็นต้น

กล้วยน้ำว้า มีลักษณะต้นสูง 2.5 – 4 เมตร ลำต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร กาบต้นเทียมด้านนอกสีเขียวอ่อนสม่ำเสมอ ก้านช่อดอกไม่มีขน ปลีสีแดงอมม่วง เครือยาวขนาด 7 - 15 หวี หวีหนึ่งหวีมี 10 – 16 ผล เมื่อดิบเปลือกผลสีเขียว เมื่อสุกมีสีเหลืองปนน้ำตาล เนื้อสีเหลืองอมขาว มีรสหวาน แบ่งออกเป็นสายพันธุ์ต่างๆ มากมาย แต่ละพันธุ์แตกต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 2.1 : กล้วยน้ำว้า

ที่มา : ดวงแก้ว (2544)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University
All Rights Reserved

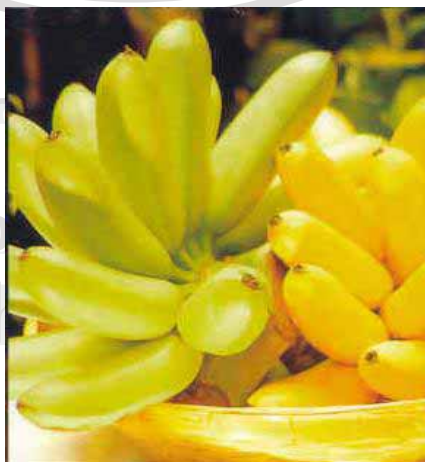
กล้วยหอม เป็นกล้วยที่มีวางขายเป็นประจำทั้งในตลาด ร้านค้า และรถเข็นผลไม้ กล้วยหอมมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ กล้วยหอมทอง กล้วยหอมเขียว กล้วยหอมทองค่อม กล้วยหอมเขียวค่อม กล้วยหอมวิลเลียม กล้วยหอมกะเหรี่ยง กล้วยหอมแกรนด์เนน และกล้วยหอมจันทร์ สำหรับกล้วยหอมทอง ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ถูกส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจในปัจจุบัน ลำต้นใหญ่ แข็งแรง สูง 2.5 – 3.5 เมตร ก้านใบมีร่องค่อนข้างกว้าง และมีปีก ก้านช่อดอกมีขน ผลยาวรี ปลายคอดมีจุดเปลือกบาง เมื่อดิบเปลือกมีสีเขียว สุกเปลือกสีเหลืองทอง เนื้อสีส้มอ่อน กลิ่นหอม รสหวาน



รูปที่ 2.2 : กล้วยหอมทอง

ที่มา : ดวงแก้ว (2544)

กล้วยไข่ ปลุกกันมากในจังหวัดกำแพงเพชร ได้รับการส่งเสริมให้เป็นพืชเศรษฐกิจ ลักษณะต้น กาบใบสีน้ำตาล ใบสีเขียวออกเหลือง ไม่มีนวล เครือขนาดเล็ก หวีมีลูกคก ผลขนาดเล็ก สีเหลืองไข่ ผิวเปลือกบาง เนื้อสีเหลือง มีรสหวาน นิยมปลูกเป็นไร่ ตกเครือลูกสุกช่วงเดือน กรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม ฤดูเดียวกับกับวันสารทไทย หรือวันเข้าพรรษา นิยมรับประทานกับข้าว กระจ่างสารท กล้วยไข่เจริญเติบโตได้ดีในที่ร่ม มีชื่อเรียกอื่นๆ ว่า กล้วยกำแพงเพชร ไข่พัทลุง ไม่ นิยมปลูกช่วงต้นฤดูฝน เพื่อป้องกันไม่ให้ตกเครือในฤดูแล้ง เพราะเมื่อขาดน้ำ กล้วยจะตกเครือเล็ก ให้ลูกเล็กแห้ง ไม่นำรับประทาน ขายไม่ได้ราคา กล้วยไข่จะออกปลีหลังจากปลูก 8 – 10 เดือน นิยม ปลูกปลายฤดูฝน คือ เดือนสิงหาคม กันยายน ไม่เกินตุลาคม และออกปลีประมาณเดือนกรกฎาคม พอดี



รูปที่ 2.3: กล้วยไข่

ที่มา : ดวงแก้ว (2544)

2.1.3. คุณค่าทางอาหาร และประโยชน์ของกล้วย (เบญจมาศ, 2545)

กล้วยสุกมักมีรสหวาน เป็นอาหารที่ย่อยง่าย ระยะเวลาในการย่อยกล้วยสุกหลังจากรับประทานสั้นกว่าการย่อย ส้ม นม กะหล่ำปลี หรือแอปเปิ้ลเสียอีก กล้วยจึงเป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับทารก คนชรา ผู้ป่วยเป็นโรคทางเดินอาหาร และเด็กที่ท้องเสียบ่อย กล้วยสามารถลดแก๊สในกระเพาะซึ่งเกิดจากความเครียด และยังมีวิตามิน A B6 และ C อีกด้วย

สำหรับคุณค่าทางอาหารของกล้วยในประเทศไทย ได้เริ่มมีการศึกษาดังแต่ พ.ศ. 2530 โดย ชูจิตร สมบัติพานิช ได้ทำการศึกษากกล้วยที่รับประทานกันเป็นประจำ คือ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยไข่ และ กล้วยหักมุก ต่อมาจึงได้มีการศึกษากกล้วยชนิดอื่นเพิ่มเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1: ส่วนประกอบทางเคมี แร่ธาตุ และปริมาณวิตามินของกล้วยพันธุ์ต่างๆ เป็นกรัมต่อ น้ำหนักผลสุก 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ไข่	เล็บมือนาง	ทองเคซ	ไข่พระตะบอง	หอมแมว	หอมทอง	น้ำ	งาช้าง	น้ำว้า	หักมุก	เปลือกหนา	เล็บข้างกุด
ความชื้น (g)	70.66	68.6	78.8	74.4	70.5	77.19	70.2	60.1	69.02	72.03	73.34	66.72
ไขมัน (g)	0.84	0.3	0.3	0.2	0.2	0.73	0.2	0.2	0.76	0.83	0.22	0.27
โปรตีน (N X 6.25)	1.45	1.6	1.4	1.0	1.3	1.82	0.4	1.3	0.90	1.18	0.86	0.94
คาร์โบไฮเดรต (g)	18.41	28.5	18.3	23.4	26.7	18.42	29.0	37.0	22.21	16.49	23.86	28.33
เถ้า (g)	0.61	0.9	1.0	0.8	1.1	0.65	1.0	1.2	0.72	0.54	0.72	0.82
เยื่อใย (g)	-	0.1	0.2	0.2	0.2	-	0.2	0.1	-	-	1.66	2.9
แคลเซียม (mg)	13.54	5.2	8.6	9.2	3.4	14.27	1.79	2.0	19.99	21.67	-	-
ฟอสฟอรัส (mg)	24.71	27.8	9.5	17.6	25.9	21.09	26.4	27.6	25.10	25.79	-	-
เหล็ก (mg)	6.71	0.50	0.5	0.4	0.7	8.71	1.1	0.5	11.39	8.27	-	-
โทอามีน (mg)	-	0.06	0.06	0.03	0.04	-	0.01	0.03	-	-	-	-
โรโบฟลาวิน (mg)	-	0.08	0.04	0.010-	0.02	-	0.01	0.21	-	-	-	-
วิตามินอี (IU)	-	0.09	0.27	0.430	.26	-	0.26	0.06	-	-	-	-
B-Carotene (mg)	589.4	158	387	493	385	197.2	116	1225	118.4	582.2	-	-
วิตามินเอ (IU)	-	264	645	822	641	-	194	2042	281.4	278.5	-	-
แอสคอร์บิก (mg)	16.91	-	0.94	1.38	-	11.06	-	-	18.35	14.99	-	-

หมายเหตุ: - หมายถึงยังไม่ได้วิเคราะห์

ที่มา : เบญจมาศ (2545)

ประโยชน์ใช้เป็นสมุนไพร (เบญจมาศ, 2545)

กล้วยนอกจากจะเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายแล้วยังใช้เป็นยารักษาโรคกระเพาะ และโรคเกี่ยวกับลำไส้ได้

ผลกล้วย แก่ท้องผูกได้ เนื่องจากมีเพคติน โดยเฉพาะผลสุกซึ่งมีเพคตินอยู่มาก เพคตินช่วยเพิ่มกากอาหารในลำไส้ ทำให้การขับถ่ายสะดวก และไม่เกิดการท้องผูก

กล้วยบางชนิดเมื่อเริ่มสุกจะมีรสฝาด เนื่องจากมีสารแทนนิน ซึ่งทำให้ท้องผูก ดังนั้นกล้วยเริ่มสุก หรือกล้วยที่ยังไม่อมช่วยรักษาอาการท้องเสียได้

นอกจากใช้ในการรักษาโรคท้องผูก และท้องเสียแล้ว กล้วยห้กมูก ยังได้ชื่อว่า ใช้รักษาโรคกระเพาะได้เป็นอย่างดี

2.1.4. การแปรรูปกล้วย

กล้วย นอกจากรับประทานผลสดแล้วยังสามารถแปรรูปเป็นอาหารได้หลายรูปแบบทั้งอาหารคาว-หวาน แต่โดยมากมักพบในรูปของอาหารหวานมากกว่า เช่น กล้วยบวชชี กล้วยทอด กล้วยเชื่อม กล้วยฉาบ กล้วยตาก ขนมหั้ว และกล้วยกวน ซึ่งในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะกล้วยกวนเท่านั้น

กล้วยกวน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2530) คือ การกล้วยผสมกับน้ำตาล เคี่ยวด้วยไฟอ่อนจนกล้วยและน้ำตาลเป็นเนื้อเดียวกัน กล้วยกวนสามารถเก็บไว้ได้นาน

ส่วนผสมของกล้วยกวน

กล้วยสุกงอมบดละเอียด	5	ถ้วยตวง
น้ำตาลมะพร้าว	3	ถ้วยตวง
กะทิ	5	ถ้วยตวง
เกลือ	3	ช้อนชา
เบะแซ (ถ้ามี)	300	กรัม

วิธีทำ

1. เคี่ยวหัวกะทิ 1 ถ้วยตวง จนเป็นน้ำมันมะพร้าว
2. ผสมกล้วยกับกะทิที่เหลือเข้าด้วยกัน กวนด้วยไฟกลางจนงวด จึงเติมน้ำตาลมะพร้าว ลดไฟอ่อน กวนต่อจนเหนียว แล้วค่อยๆ เติมน้ำมันมะพร้าวที่เคี่ยวไว้ทีละน้อย กวนจนเข้ากัน และกล้วยกวนแห้ง และร้อน ไม่ติดกระทะ

3. ทิ้งให้เย็น จากนั้นบรรจุภาชนะแห้ง และปิดสนิท

ลักษณะของกล้วยกวนที่ดี

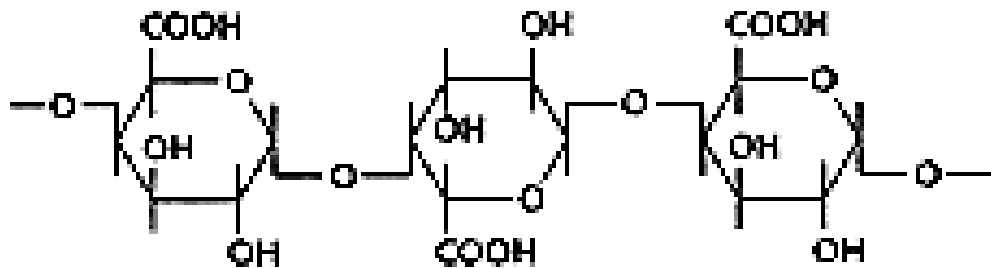
1. มีความมันวาว
2. มีลักษณะอยู่ตัว แต่ไม่แข็งเกินไป
3. มีความเหนียวตามธรรมชาติ
4. ไม่ตกทราย

2.2. เพคติน (Pectin) (Dumitriu, 1998)

เพคติน คือ สารประกอบโพลีแซคคาไรด์ พบมากในโครงสร้างพืช ทั้งในผัก และผลไม้ มักเตรียมจาก เปลือกส้ม เพื่อการใช้ประโยชน์ทางอาหาร เช่น เป็นสารเพิ่มความหนืด สารก่อเจล และสารเพิ่มความคงตัว เป็นต้น

2.2.1. โครงสร้างของเพคติน

เพคติน ประกอบด้วย หน่วยย่อยของ methylated poly- α -(1 \rightarrow 4)-D-galacturonic acid ต่อกันแบบเส้นตรง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4: โครงสร้างของเพคติน

ที่มา : University of Edinburgh (2003)

คุณสมบัติของเพคตินขึ้นอยู่กับจำนวนของ methyl group ที่ก่อพันธะเอสเทอร์อยู่กับ galacturonic acid ซึ่งในทางการค้าแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ low-ester และ high-ester

2.2.2. ชนิดของเพคติน

การแบ่งชนิดของเพคตินในทางการค้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ high methoxyl pectin (high-ester) และ low methoxyl pectin (low-ester) ซึ่งการแบ่งชนิดดังกล่าวนี้แบ่งตาม degree of methyl esterification (DE) ดังนี้

2.2.2.1. HM-Pectin (High Methoxyl Pectin)

HM-pectin คือ เพคตินที่มี DE ตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ 55 – 75 การเกิดเจลของ HM-pectin ขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และ pH ที่เหมาะสม คือ ต้องมี pH ประมาณ 3 และมีของแข็งที่ละลายน้ำได้อย่างน้อยร้อยละ 55

HM-pectin ยังแบ่งออกได้เป็นอีก 3 ชนิด ตามอัตราการเกิดเจล ดังนี้

- ชนิด rapid set : มี DE อยู่ระหว่างร้อยละ 70 – 75
- ชนิด medium rapid set : มี DE อยู่ระหว่างร้อยละ 65 – 69
- ชนิด slow set : มี DE อยู่ระหว่างร้อยละ 60 – 64

นอกจากนี้ อุณหภูมิในการเกิดเจล ยังสูงขึ้นตามค่า DE อีกด้วย

2.2.2.2. LM-Pectin (Low Methoxyl Pectin)

LM-pectin คือ เพคตินที่มี DE ต่ำกว่าร้อยละ 50 ส่วนใหญ่อยู่ระหว่างร้อยละ 20 – 40 เพคตินชนิดนี้ผลิตโดยกระบวนการ alkaline deesterification โดยใช้ แอมโมเนีย เพื่อเปลี่ยน methyl-esterified carboxylate ให้เป็นสารประกอบ amide เพื่อลด DE ของเพคติน เนื่องจากเพคตินที่สกัดได้ส่วนใหญ่มี DE สูงถึงร้อยละ 50 – 75 และเพคตินชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ rapid set และ slow set ตาม degree of amidation (DA) ซึ่ง DA เป็นตัวบ่งถึง calcium reactivity ในเพคตินได้ อีกที คือ เพคตินที่มี calcium reactivity มาก จัดเป็นชนิด rapid set และเพคตินที่มี calcium reactivity น้อยจัดเป็นชนิด slow set

2.2.3 กลไกการเกิดเจลของเพคติน (Oakenfull, 1991)

เจลของเพคตินประกอบด้วยโมเลกุลสายยาวก่อ cross-link กันจนเป็นร่างแหโดยอาศัยตัวกลางที่เป็นของเหลว สำหรับอาหารตัวกลางของเหลว คือ น้ำ โดยการเกิดเจลของเพคตินนั้น จะก่อพันธะร่วมกันกับเพคตินที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในอาหารนั้น ซึ่งการก่อพันธะดังกล่าวจะเป็นการก่อร่างแหจากการรวมกันของโพลิเมอร์ตั้งแต่ 2 สายขึ้นไป ซึ่งการเกิดโครงสร้างแบบร่างแหนี้เรียกว่า การเกิด “จังก์ชัน โซน” (Junction zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่จังก์ชัน โซนดังกล่าว เป็นจังก์ชัน โซนที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากรวมตัวกันด้วยแรงระหว่างพันธะอย่างอ่อน ซึ่งไม่แข็งแรงนัก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างร่างแหของเจล และจังก์ชัน โชน (บริเวณภายในวงกลม)
ที่มา : Oakenfull (1991)

2.2.3.1. แรงระหว่างโมเลกุลที่มีผลต่อความคงตัวของเจลเพคติน

เพคตินก่อเจลด้วยการรวมตัวกันของสายโพลีเมอร์โดยอาศัยพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล คือ พันธะไฮโดรเจน และพันธะไฮโดรโฟบิก

2.2.3.1.1. พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจน เป็นแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อน มีบทบาทต่อความคงตัวของโครงสร้างที่เป็นโมเลกุลใหญ่ เจลมีความคงตัวต่อความร้อนมากขึ้น เมื่อจำนวนพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น

2.2.3.1.2. พันธะไฮโดรโฟบิก

พันธะไฮโดรโฟบิก เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ซึ่งต่างจากน้ำที่เป็นโมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลไม่มีขั้วดังกล่าว ยึดเกาะกับส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลใหญ่ เพื่อลดพลังงานให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

2.2.4. การประยุกต์ใช้เพคตินในอาหาร (Dumitriu, 1998)

การเติมเพคตินลงในผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนใหญ่มีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความหนืด เป็นสารก่อเจล และเพิ่มความคงตัว ถ้าสุดได้มีการพัฒนาเพคตินที่มีสมบัติพิเศษ เพื่อใช้แทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไขมันต่ำ ซึ่งการประยุกต์ใช้เพคตินในอาหารดังกล่าว ผู้เขียนได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้เพคตินในผลิตภัณฑ์อาหาร

ประเภทการใช้งาน	ผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์
1. สารเพิ่มความหนืด และ สารก่อเจล	แยม เยลลี่ เบเกอรี่ ผลไม้ที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์นม ลูกกวาด และลูกกวาดชนิดเจล	เพื่อการยอมรับของผู้บริโภค แยม เพิ่มความแน่นเนื้อ แต่ ยังคงแผ่ออกได้ ลูกกวาด เพิ่มความแน่นเนื้อ เบเกอรี่ เพื่อความมันเงา
2. สารเพิ่มความคงตัว และ Emulsifier	เครื่องดื่มจากผลไม้ และนม เช่น low-pH milk drink, Fermented drink, mix of Fruit and milk	เพื่อความเป็นเนื้อเดียวกัน เพิ่ม isoelectric point ของ โปรตีนในนม (casein)
3. fat mimetic	มายองเนส มาร์การีน น้ำสลัด ไอศกรีม ไส้กรอก	ใช้แทนไขมัน คงลักษณะเนื้อสัมผัสของ ไขมันในอาหาร

ที่มา : Dumitriu, (1998)

2.3. รีโอลยี (Rheology)

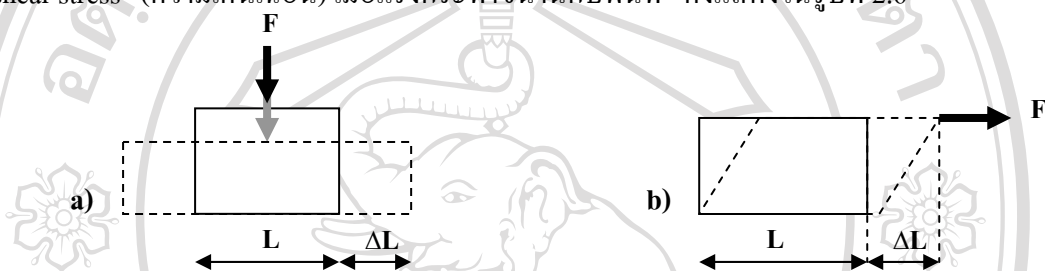
“รีโอลยี” ถูกบัญญัติขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ Eugene C. Bingham ศาสตราจารย์ด้านเคมีผู้หนึ่ง ซึ่งกล่าวอ้างอิงถึงภริยาของนักปราชญ์ชาวกรีกโบราณผู้หนึ่ง กล่าวไว้ว่า παντα ρηει อ่านว่า “panta rhei” หมายถึง “everything flows” (Steffe, 1996) คำว่า “rhei” หมายถึง to flow จึงเป็นที่มาของคำว่า “rheology” นั่นเอง (Macosko, 1994)

ปัจจุบัน rheology เป็นที่รู้จักในนามของวิทยาศาสตร์แห่งการไหล และการผิดรูปของสสาร เป็นการศึกษาถึงลักษณะการตอบสนองของวัสดุต่อการกระทำของแรงภายนอก (force) และ/หรือ ความเครียด (strain) วัสดุทุกชนิดมีคุณสมบัติทาง rheology อยู่ในตัว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ rheology แพร่หลายไปในวิทยาศาสตร์แทบทุกด้าน เช่น เทคโนโลยีด้านคอนกรีต ซีเมนต์ พลาสติก โพลีเมอร์ เครื่องสำอาง หรือแม้แต่ ด้านวิทยาศาสตร์การอาหาร ซึ่งรีโอลยีเข้ามามีบทบาททั้งในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Steffe, 1996)

การเข้าใจถึงศาสตร์รีโอโลยีได้นั้น ต้องอาศัยความรู้เบื้องต้นทางฟิสิกส์เกี่ยวกับแรง และ พฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรง ซึ่งก็คือ ความเค้น ความเครียด และความหนืด ทั้งนี้ความเค้น และ ความเครียด จัดเป็นกุญแจสำคัญในศาสตร์ รีโอโลยี (Macosko, 1994)

2.3.1. ความเค้น (stress) (Western and Crummett, 1994)

ความเค้น หมายถึง ขนาดของแรงที่กระทำบนวัสดุใดๆ ต่อขนาดพื้นที่ของวัสดุนั้น เรียกว่า “normal stress” (แรงกด) หรือ “tensile stress” (แรงดึง) เมื่อแรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ และเรียก “shear stress” (ความเค้นเฉือน) เมื่อแรงกระทำขนานกับพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 : (a) ความเค้น และ (b) ความเค้นเฉือน
ที่มา : Western and Crummett (1994)

ขนาดของความเค้น หาได้จาก

$$\text{stress} = F/A \dots\dots\dots (2.1)$$

Stress มีสัญลักษณ์เป็น	σ	เมื่อเป็น	normal stress	(N/ m ²)
และเป็น	τ	เมื่อเป็น	shear stress	(N/ m ²)
โดย	F	คือ	แรง	(N)
	A	คือ	พื้นที่	(m ²)

2.3.2. ความเครียด (strain) (Western and Crummett, 1994)

ความเครียด หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุใด ๆ เมื่อมีการให้ความเค้นกับวัตถุนั้น และหาได้จาก

$$\text{strain} = \Delta L / L \dots\dots\dots (2.2)$$

ความเครียดมีสัญลักษณ์เป็น ϵ
 และ ΔL คือ ผลต่างของ ความยาวเริ่มต้น และ ความยาวสุดท้าย (m)
 L คือ ความยาวเริ่มต้น (m)

2.3.3. ความหนืด (viscosity) (Steffe, 1996)

ความหนืด หมายถึง แรงต้านการไหลของของไหล นิยามได้จาก

$$\mu = \tau / \epsilon^\circ \dots\dots\dots (2.3)$$

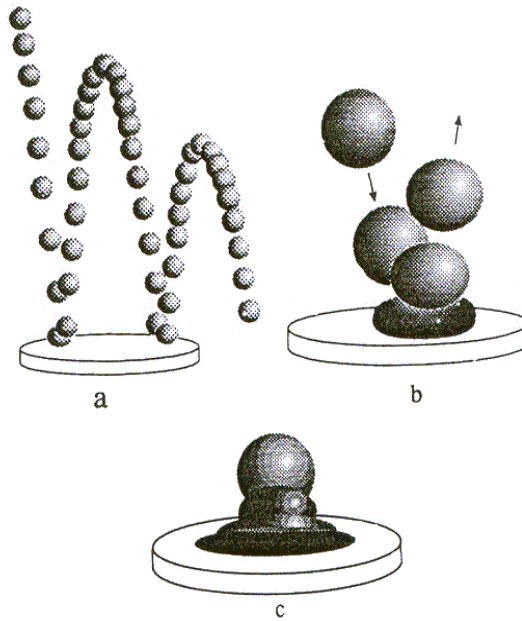
เมื่อ	μ	คือ	ความหนืด	(P:Poise หรือ N•s/ m ²)
	τ	คือ	ความเค้นเฉือน	(N/m ²)
	ϵ°	คือ	อัตราเฉือน	(s ⁻¹)
		โดย	$\epsilon^\circ = \epsilon / t$	
เมื่อ	t	คือ	เวลา	(s)

การศึกษาคุณสมบัติทางวิสโคอิลาสติก เป็นส่วนหนึ่งในศาสตร์รีโอโลยี และปัจจุบันยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิต และควบคุมคุณภาพอาหารอีกด้วย เนื่องจากอาหารหลายชนิดมีสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกมากกว่า เป็นของแข็งหรือของเหลวเพียงอย่างเดียว เช่น เนยแข็ง น้ำสลัดแบบข้น เยลลี่ หรือแม้แต่ผักผลไม้สดบางชนิดก็ตาม (Rao and Steffe, 1992)

2.4. Viscoelasticity (Macosko, 1994)

“วิสโคอิลาสติก” ใช้เรียกวัสคูที่มีคุณสมบัติร่วมระหว่างของแข็ง (elastic solid) และของเหลว (viscous fluid)

ตัวอย่างของวิสคูวิสโคอิลาสติกที่อาจเห็นภาพได้ชัดเจน คือ “bouncing putty” ลูกบอลของเล่นชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อปล่อยให้ bouncing putty หล่นลงสู่พื้น มันจะเกิดการผิดรูปชั่วคราว และตั้งกลับขึ้นมาพร้อมกับคืนรูปเดิมทันที คือ แสดงคุณสมบัติของของแข็งนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7: a) และ b) แต่เมื่อออกแรงกดลูกบอลเป็นเวลานานช่วงหนึ่ง มันกลับแสดงการไหลเหมือนของเหลวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7: c) นั่นคือ มีสมบัติร่วมระหว่าง elastic และ viscous นั่นเอง



รูปที่ 2.7 : bouncing putty: a), b) เมื่อถูกแรงกระทำชั่วคราว c) เมื่อถูกแรงกระทำนานช่วงหนึ่ง
ที่มา : Macosko (1994)

การศึกษาคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของวัสดุใดๆ นั้น โดยมากมักอธิบายในเชิงของแบบจำลองวิสโคอีลาสติก (viscoelastic models) โดยประกอบด้วยแบบจำลองพื้นฐาน 2 แบบด้วยกัน คือ **แบบจำลองของแมกซ์เวลล์** (Maxwell's model) และ **แบบจำลองของวอค-เคลวิน** (Voigt-Kelvin's model) โดยแบบจำลองทั้งสองประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญสองชนิดคือ สปริง เป็นสัญลักษณ์แทนสมบัติยืดหยุ่น หรือสมบัติของของแข็ง (elastic solid) และ ลูกสูบ เป็นสัญลักษณ์แทนสมบัติข้นหนืด หรือสมบัติของของเหลว (viscous fluid) โดยแบบจำลองทั้งสองต่างกันที่การจัดเรียงของ สปริง และลูกสูบ คือ แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ จัดเรียงองค์ประกอบทั้งสองแบบอนุกรม ส่วนแบบจำลองของวอค-เคลวิน นั้นจัดเรียงองค์ประกอบทั้งสองแบบขนาน

การอธิบายคุณสมบัติของแข็งยืดหยุ่น อาศัย **กฎของ Hooke** (Hooke's law) ในการอ้างอิง และของเหลวนั้น ใช้ **กฎของนิวตัน** (Newton's law of viscosity) ในการอ้างอิง ดังนี้

2.4.1. Hooke's law (Macosko, 1994)

Hooke's law กล่าวว่า แรง เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ การผิดรูป หรือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- เมื่อ σ คือ ความเค้น
- E คือ อีลาสติค โมดูลัส (elastic modulus)
- ε คือ ความเครียด

สมการที่ 2.4 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของของแข็ง และสัญลักษณ์แทนสมบัติดังกล่าว คือ สปริง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 : a)

หมายเหตุ : Hooke's Law ใช้กับวัสดุที่เป็นสารเนื้อเดียว (homogeneous) และแรงที่กระทำจะต้อง อยู่ในช่วงแปรผันตรง (Proportional limit) เท่านั้น

2.4.2. Newton's law of viscosity (Macosko, 1994)

Newton's law of viscosity กล่าวว่า ความเค้น เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ อัตราการผิดรูป คือ

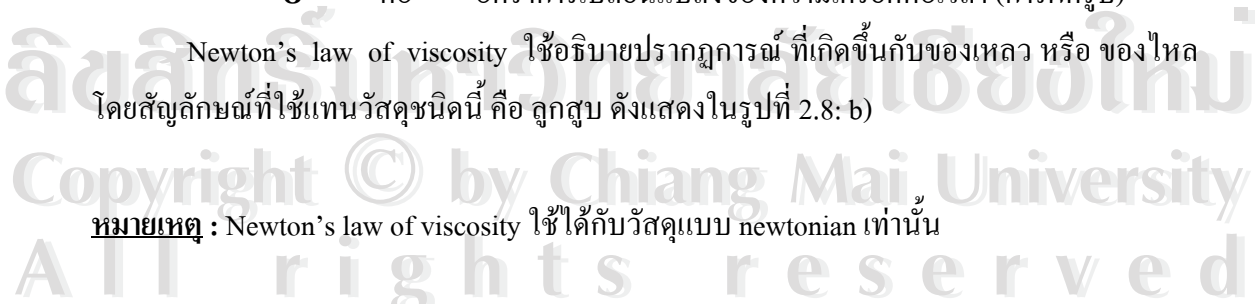
$$\sigma = \mu \dot{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

- เมื่อ σ คือ ความเค้น
- μ คือ ความหนืดของวัสดุ
- $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดต่อเวลา (การผิดรูป)

Newton's law of viscosity ใช้อธิบายปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นกับของเหลว หรือ ของไหล โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนวัสดุชนิดนี้ คือ ลูกสูบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8: b)

หมายเหตุ : Newton's law of viscosity ใช้ได้กับวัสดุแบบ newtonian เท่านั้น

วัสดุหลายชนิดเป็นไปตามกฎทางอุดมคติทั้งสอง ดังเช่น กฎของ Hooke ได้แก่ เซรามิก และของแข็งอื่นๆ วัสดุที่มีสมบัติเป็นไปตามกฎของ Hooke เรียกว่า “Hookean” หรือ “ideally elastic” ในทำนองเดียวกันวัสดุที่เป็นไปตามกฎของนิวตัน จะถูกเรียกว่า “newtonian fluid” หรือ “newtonian liquid” (Macosko, 1994)



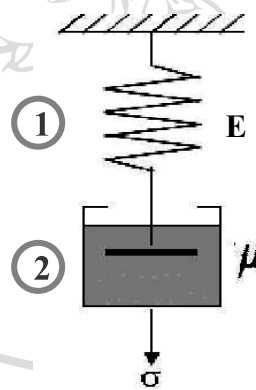


รูปที่ 2.8 : a) สปริง และ b) ลูกสูบ
ที่มา : University of Nottingham (2002)

2.5. แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติค (Viscoelastic Model)

2.5.1. แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Model) (มันน์ส, 2537)

แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ ประกอบด้วย สปริง ต่ออนุกรม กับลูกสูบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 : แบบจำลองของแมกซ์เวลล์
ที่มา : University of Nottingham (2002)

เมื่อมีแรงกระทำกับวัสดุแมกซ์เวลล์ สปริงจะยืดออกทันทีเป็นอันดับแรก ต่อมาลูกสูบจึงค่อย ๆ ยืดออกด้วยอัตราเร็วคงที่ ความเค้นที่กระทำกับแบบจำลองจะเท่ากันทั้งสองส่วน นั่นคือ ความเค้นที่กระทำกับสปริงเท่ากับความเค้นที่กระทำกับลูกสูบ แต่ตรงข้ามกันกับความเครียด ความเครียดทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับความเครียดของสปริงรวมกับความเครียดของลูกสูบ

ความเค้น : $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$
 ความเครียด : $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$

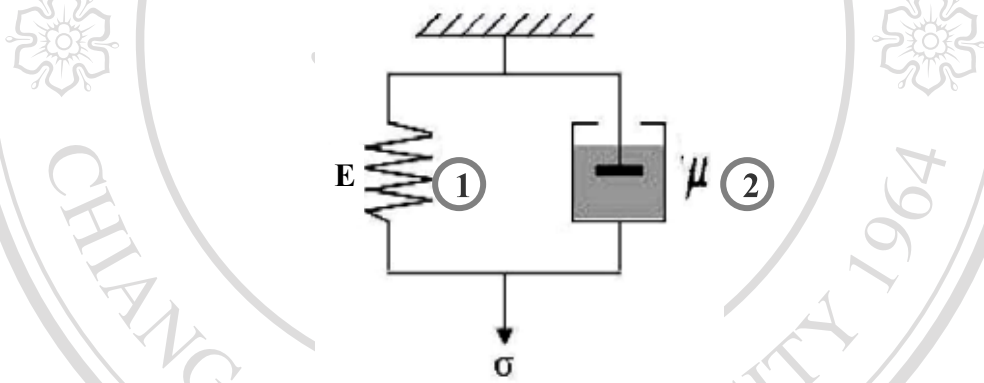
ในที่นี้ σ คือ ความเค้นรวม σ_1 คือ ความเค้นของส่วนที่ 1 (สปริง ในรูปที่ 2.9) และ σ_2 คือ ความเค้นของส่วนที่ 2 (ลูกสูบ ในรูปที่ 2.9) และเช่นกัน ความเครียดรวมนั้น คือ ϵ มีค่าเท่ากับ ความเครียดของส่วนที่ 1 (ϵ_1) รวมกับ ความเครียดในส่วนที่ 2 (ϵ_2)

จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้สมการอธิบายแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ ดังสมการที่ 2.6 (University of Nottingham, 2002)

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\mu} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.5.2. แบบจำลองของวอค-เคลวิน (Voigt-Kelvin's Model) (มันส์, 2537)

แบบจำลองของวอค-เคลวิน สปริง ถูกต่อขนานกับ ลูกสูบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 : แบบจำลองของวอค-เคลวิน
ที่มา : University of Nottingham, 2002

แบบจำลองนี้ ความเค้น ถูกกระจายให้กับทั้งสองส่วนของแบบจำลอง คือ ความเค้นของแบบจำลอง เท่ากับความเค้นของสปริงรวมกับความเค้นของลูกสูบ ส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นเท่ากันทั้งสองส่วน คือ ความเครียดรวม เท่ากับความเครียดของสปริง และเท่ากับความเครียดของ

ลูกสูบ

ความเค้น : $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$

ความเครียด : $\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$

จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้สมการอธิบายแบบจำลองของไวค-เคลวิน ดังสมการที่ 2.7 (University of Nottingham, 2002)

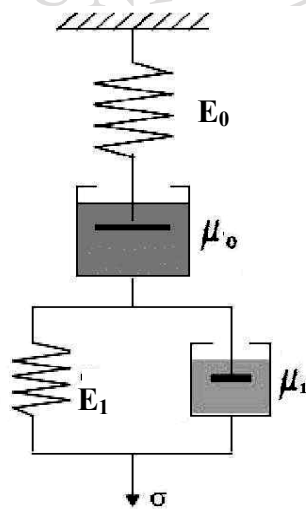
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + (1 - e^{-t/\lambda}) \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อ λ คือ relaxation time
มีค่าเท่ากับ $\frac{\mu}{E}$

โดยส่วนใหญ่วัสดุในธรรมชาติไม่ได้เป็นไปตามแบบจำลองทั้งสองอย่างสมบูรณ์ มักเป็นแบบผสมกันหลายๆ องค์ประกอบ เช่น แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (4-parameters model) แบบจำลอง 6 องค์ประกอบ (6-parameters model) หรือแบบจำลอง 8 องค์ประกอบ (8-parameters model) เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองแต่ละแบบมีสมการที่อธิบายแบบจำลองต่างกันไปตามองค์ประกอบที่ประกอบเป็นแบบจำลองนั้นๆ การตอบสนองต่อแรงกระทำของแบบจำลองแต่ละแบบก็ต่างกันด้วย ซึ่งในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะ แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ ดังนี้

2.5.3. แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (4 – parameters model) (University of Nottingham, 2002)

แบบจำลองนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่าง แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ และแบบจำลองของไวค-เคลวิน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 : แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (4 – parameters model)

ที่มา : University of Nottingham, 2002

การตอบสนองต่อแรงกระทำของแบบจำลองนี้ เป็นลักษณะร่วมระหว่างแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ และแบบจำลองของไวค-เคลวิน ดังนั้นสมการของแบบจำลองนี้จึงประกอบด้วยสมการของแบบจำลองทั้งสองรวมกัน ดังนี้

$$\text{ความเครียดรวม } (\epsilon) = \epsilon_{\text{Maxwell}} + \epsilon_{\text{Kelvin}}$$

ดังนั้น

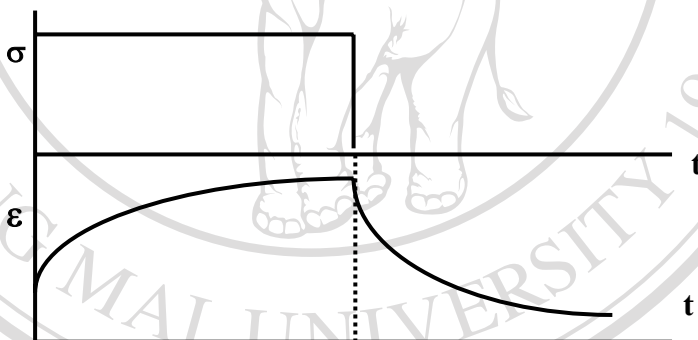
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\mu_0} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-t/\lambda}) \dots\dots\dots(2.8)$$

2.6. พฤติกรรมทางวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Behaviors)

พฤติกรรมทางวิสโคอีลาสติก แบ่งออกเป็น 3 พฤติกรรมหลัก ได้แก่

2.6.1. Creep

Creep หมายถึง การผิดรูปอย่างช้าๆ ตามเวลาที่เปลี่ยนไป เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงคงที่ค่าหนึ่ง (Rao and Steffe, 1992)



รูปที่ 2.12 : พฤติกรรม creep ของวัสดุเมื่อได้รับแรงคงที่

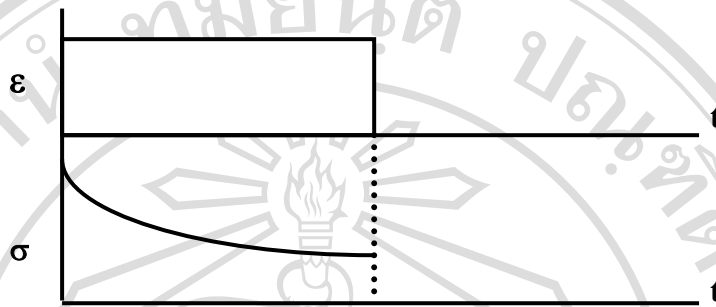
ที่มา : University of Nottingham, 2002

2.6.2. Recovery

Recovery เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดต่อเนื่องจาก creep หลังจากการถอนความเค้น วัสดุยืดหยุ่น (elastic) จะหดตัวกลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ แต่จะไม่เกิดการหดกลับสำหรับวัสดุที่เป็นของไหล (fluid) การหดกลับสามารถเกิดขึ้นได้บางส่วนกับวัสดุที่เป็นวิสโคอีลาสติก และบางส่วนเกิดการผิดรูปไปถาวร (permanent deformation) ซึ่งในที่นี้ คือ ส่วนของเส้นโค้งหลังจากถอนแรง ณ เวลาสุดท้ายในรูปที่ 2.12 (มนัส, 2537)

2.6.3. Stress relaxation

Stress relaxation คือ การลดลงตามเวลาของความเค้นขณะที่ความเครียดคงที่ การทดสอบ stress relaxation ทำโดยการให้แรงกับวัสดุ โดยคงการเปลี่ยนรูปไว้ หรือคงความเครียดไว้นั่นเอง และวัดความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา (มนัส, 2537)



รูปที่ 2.13 : พฤติกรรม stress relaxation ของวัสดุเมื่อความเครียดคงที่
ที่มา : University of Nottingham, 2002

2.7. การทดสอบพฤติกรรมทางวิสโคอิลาสติก

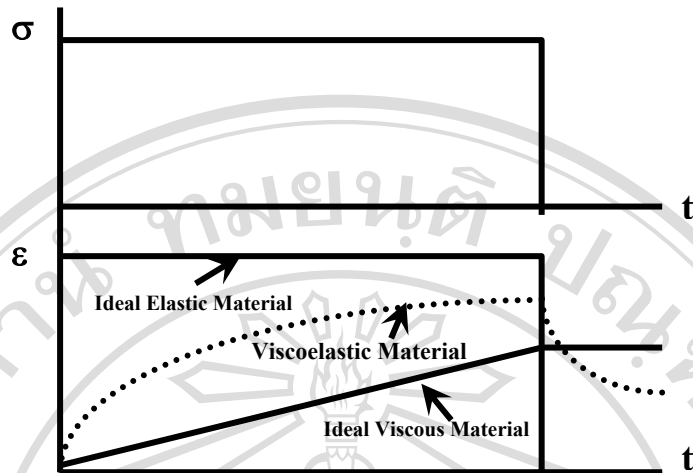
การทดสอบพฤติกรรมทางวิสโคอิลาสติกมีหลายวิธี เช่น การทดสอบ creep การทดสอบ relaxation และ การทดสอบแบบ dynamic หรือ oscillatory ซึ่งในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบ creep เท่านั้น

2.7.1. Creep test

Creep test ทำได้โดยการให้แรงคงที่กับวัสดุ แล้ววัดการผิดรูปที่เปลี่ยนไปตามเวลา และแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การผิดรูป หรือความเครียด กับเวลา (มนัส, 2537)

2.7.1.1. การตอบสนองต่อ creep test ของวัสดุในอุดมคติกับวัสดุวิสโคอิลาสติก

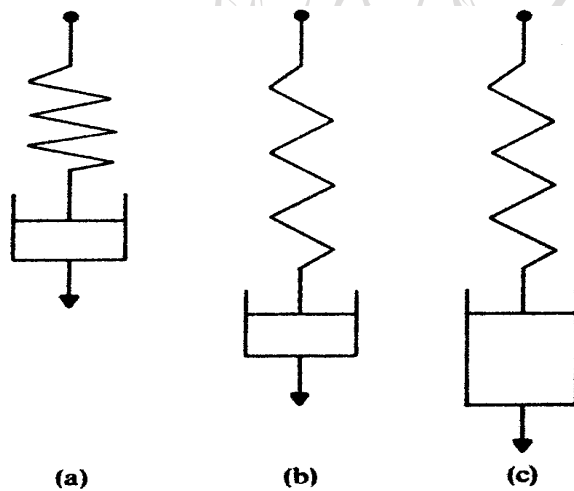
เนื่องจากวัสดุในอุดมคติ และวัสดุวิสโคอิลาสติก มีพื้นฐานสมบัติที่ต่างกัน ดังนั้นจึงตอบสนองต่อการทดสอบ creep ที่ต่างกันด้วย ซึ่งวัสดุวิสโคอิลาสติก เป็นวัสดุที่มีสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุในอุดมคติ 2 ชนิด คือ ของแข็งยืดหยุ่น และของเหลวชั้นหนืด เส้นโค้งของ creep ที่ได้จึงอยู่ระหว่างเส้นโค้งของ creep ของวัสดุทั้งสอง (Steffe, 1996) ดังนี้



รูปที่ 2.14: การเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งของ creep ของวัสดุในอุดมคติ และวัสดุวิสโคอีลาสติก
ที่มา : Steffe (1996)

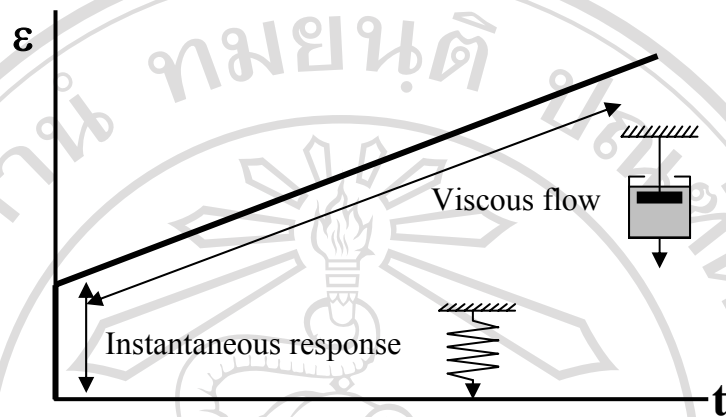
2.7.1.2. การตอบสนองต่อ creep test ของวัสดุแบบแมกซ์เวลล์ (Steffe, 1996)

เมื่อให้แรงคงที่กับวัสดุแมกซ์เวลล์ สปริงจะยืดออกทันที จากนั้นลูกสูบจึงยืดออกตามมา และค่อยๆ ไหลอย่างช้าๆ (creep) ด้วยอัตราเร็วคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 : การตอบสนองต่อ creep test ของแบบจำลองของแมกซ์เวลล์
ที่มา : Rao and Steffe (1992)

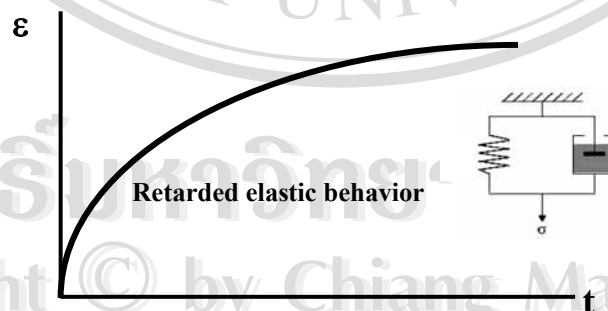
เมื่อพิจารณาความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาตามสมการของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ (สมการที่ 2.6) จะได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 2.16 : Creep curve ของวัสดุแบบแมกซ์เวลล์
ที่มา : Steffe (1996)

2.7.1.3. การตอบสนองต่อ creep test ของวัสดุแบบไค-เคลวิน (Steffe, 1996)

สำหรับวัสดุไค-เคลวิน เนื่องจากสปริง และลูกสูบต่อกันแบบขนาน ทำให้องค์ประกอบทั้งสองมีอิทธิพลต่อกัน การยืดออกของสปริงถูกหน่วงไว้ด้วยความหนืด (แรงต้านการไหล) ของลูกสูบ การตอบสนองต่อแรงกระทำจึงไม่เป็นเส้นตรง และเมื่อพิจารณาตามสมการของแบบจำลองไค-เคลวิน (สมการที่ 2.7) จะได้เส้นโค้งของ creep เป็นดังนี้

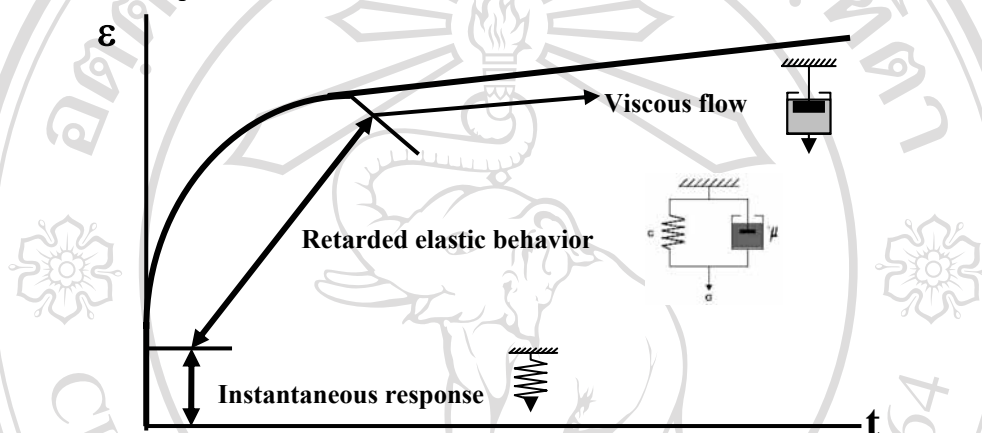


รูปที่ 2.17 : Creep curve ของวัสดุแบบไค-เคลวิน
ที่มา : Steffe (1996)

2.7.1.4. การตอบสนองต่อ creep test ของวัสดุแบบ 4 องค์ประกอบ (Rao and Steffe, 1992)

วัสดุในธรรมชาติโดยมากไม่ได้เป็นไปตามทั้งแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ และแบบจำลองของไวค-เคลวิน มักมีหลายองค์ประกอบรวมกันเสียมากกว่า เช่น 4 องค์ประกอบ 6 องค์ประกอบ และ 8 องค์ประกอบ เป็นต้น

สำหรับวัสดุแบบ 4 องค์ประกอบ เมื่อพิจารณาจากสมการของแบบจำลอง (สมการที่ 2.8) จะได้ผลของ creep test ดังนี้



รูปที่ 2.18 : Creep curve ของวัสดุแบบ 4 องค์ประกอบ
ที่มา : Steffe (1996)

2.7.2. Creep compliance (J)

ในทางปฏิบัติ ผลการทดสอบ creep หรือ creep curve ของวัสดุทดลองใดๆ นิยมแสดงในรูปของ creep compliance กับเวลา มากกว่าแสดงในรูปของความเครียดกับเวลา ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาแบบจำลองของวัสดุนั้น เนื่องจากค่าคงที่ที่ได้จากสมการของ compliance สามารถนำไปสู่ค่าคงที่ของแบบจำลองได้โดยตรงดังจะแสดงต่อไปนี้

Compliance คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียด กับ ความเค้น และมีสัญลักษณ์เป็น J (Rao and Steffe, 1992)

คือ
$$J = \epsilon / \sigma \dots\dots\dots (2.9)$$

ยกตัวอย่าง จากสมการของ แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (สมการที่ 2.8) ดังนี้

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\mu_0} + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-t/\lambda})$$

จากนิยามของ compliance (สมการที่ 2.9) ทำให้ได้ compliance ของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบเป็นดังนี้ (Rao and Steffe, 1992)

$$J = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\mu_0} + \frac{1}{E_1}(1 - e^{-t/\lambda}) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

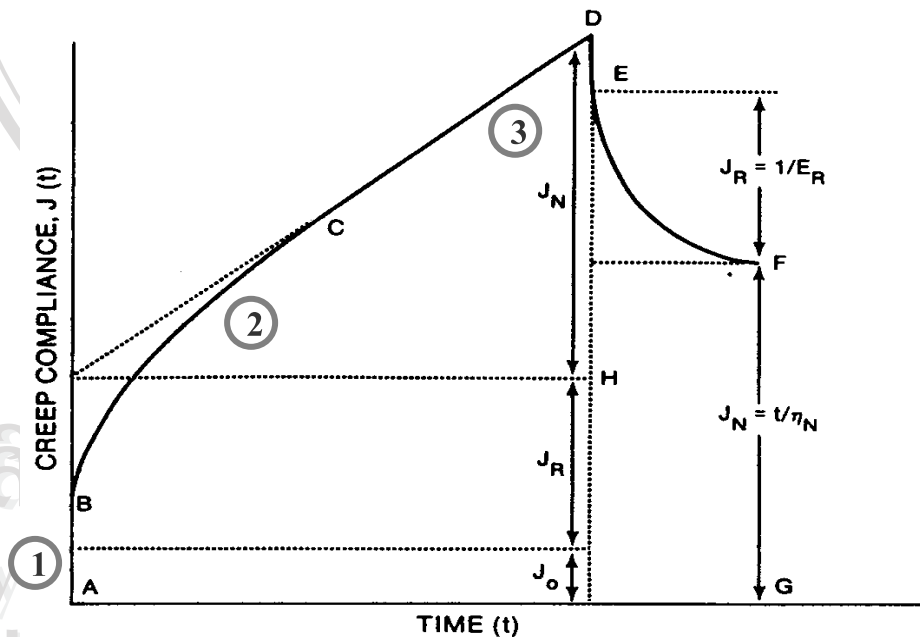
เมื่อกำหนดให้ J_0 คือ $1/E_0$

และ J_1 คือ $1/E_1$

สมการที่ 2.10 เขียนใหม่ได้เป็น

$$J = J_0 + \frac{t}{\mu_0} + J_1(1 - e^{-t/\lambda}) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

สมการที่ 2.11 คือ สมการ compliance ของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ และเมื่อพิจารณา compliance curve ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาตามสมการดังกล่าว จะได้เส้นโค้งของ creep ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และจะเห็นว่า compliance curve แบ่งออกเป็น 3 ส่วน (Rao and Steffe, 1992) คือ



รูปที่ 2.19 : Compliance curve ของแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ
ที่มา : Rao and Steffe (1992)

ส่วนที่ 1: A - B คือ ส่วนของ instantaneous response หรือ การตอบสนองของสปริงเดี่ยวนั่นเอง ซึ่ง compliance ในส่วนนี้มีค่าเป็น J_0

ส่วนที่ 2: B - C คือ ส่วนของ retarded elastic behavior เป็นส่วนของการแสดงออกของวัสดุแบบ ไวค-เคลวิน และ

$$J_R = J_1 (1 - e^{-t/\lambda}) \dots \dots \dots (2.14)$$

ส่วนที่ 3: C - D คือ ส่วนของ viscous flow เป็นการไหลอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วคงที่ หรือการตอบสนองของลูกสูบเดี่ยวนั่นเอง

ดังนั้น $J_N = t / \mu_0 \dots \dots \dots (2.15)$

จาก compliance curve ดังกล่าว ทำให้ทราบถึงสมการของ creep curve และทราบได้ว่า วัสดุนั้นมีคุณสมบัติตรงกับแบบจำลองใด และอาจมีประโยชน์ต่อการศึกษาคุณสมบัติ การพัฒนา หรือการควบคุมคุณภาพของวัสดุ และผลิตภัณฑ์ชิ้นนั้นต่อไปได้

2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

การศึกษาศสมบัติวิสโคอีลาสติคในผลิตภัณฑ์อาหารนั้นมีด้วยกันหลายวิธีแต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบ creep โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มผัก และผลไม้ กลุ่มโปรตีน และกลุ่มเจล

สำหรับกลุ่มของผักและผลไม้ แบบจำลองที่พบมาก คือ แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ และแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ เช่น การทดสอบ creep กับผลแอปเปิ้ลพันธุ์แมคอินทอช (McIntish) ซึ่งพบว่าแบบจำลอง 4 องค์ประกอบสอดคล้องกับสมบัติวิสโคอีลาสติคของผลแอปเปิ้ลดังกล่าวมากที่สุด โดยพบว่า การตอบสนองต่อการทดสอบของเซลล์แสดงออกทั้งพฤติกรรมยืดหยุ่น และพฤติกรรมการไหล โดยพฤติกรรมการไหลนั้นได้รับอิทธิพลจากของเหลวภายในเซลล์ ส่วนพฤติกรรมส่วนยืดหยุ่นนั้นเป็นการตอบสนองของเซลล์ (Morrow and Mohsenin, 1966) นอกจากนี้ยังได้มีผู้ทดลองศึกษาผลของการสุกต่อสมบัติวิสโคอีลาสติคของเนื้อเยื่อ pericarp ของมะเขือเทศ และพบว่าพฤติกรรม creep ของเนื้อเยื่อดังกล่าวอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ โดยค่า instantaneous compliance ของโครงสร้างเนื้อเยื่อนั้น เพิ่มขึ้นตามความนิ่มของเนื้อเยื่อเมื่อเกิดการสุก และแสดงการไหลมากขึ้นเมื่อเนื้อเยื่อเริ่มสุกอีกด้วย (Jackman and Stanley, 1995) และในปี 1998 ได้มีผู้ศึกษาศสมบัติวิสโคอีลาสติคของเนื้อเยื่อมันฝรั่ง โดยอาศัยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อแปรผลข้อมูลของ creep compliance โดยเฉพาะ ซอร์ฟแวร์ดังกล่าวประกอบด้วย 2 ระบบหลัก คือ

ระบบจัดเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบ creep และระบบวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบ creep ซอร์ฟแวร์ระบบที่ 2 นี้ พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองวิสโคอิลาสติกของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ creep โดยเฉพาะ และในการทดลองนี้ผู้ทดลองได้ป้อนข้อมูลจากผลการทดสอบ creep ของเนื้อเยื่อไขมันฝรั่ง และพบว่าสอดคล้องกับแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ โดยสันนิษฐานว่าค่าอิลาสติกโมดูลัสในส่วนของ instantaneous modulus อาจสัมพันธ์กับแรงดันภายในเซลล์ และการเกิดเจลของสตาร์ช คือสารประกอบจำพวก pectic substances และ hemicellulose (Alvarez and others, 1998)

สำหรับกลุ่มของโปรตีนนั้น ในที่นี้ของยกตัวอย่างจากการศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อน pH และแคลเซียมไอออน ต่อโครงสร้างตาข่ายและสมบัติวิสโคอิลาสติกของโปรตีนถั่วเหลือง โดย Chronakis, (1996) ซึ่งศึกษาโครงสร้างของเจลจากโปรตีนถั่วเหลืองที่ถูกให้ความร้อนช่วง 30-90°C และทดสอบโดยการทดสอบแบบ small deformation โดยทดสอบเจลที่เกิด aggregation ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 60°C) และทดสอบเจลที่ไม่เกิด aggregation ที่อุณหภูมิสูง (90°C) ผลการทดสอบพบว่า เจลที่ไม่เกิด aggregation และทดสอบที่อุณหภูมิสูงมีโครงสร้างของเจลแน่น และมีความยืดหยุ่นมากกว่า อีกทั้งยังให้โครงสร้างเจลที่ดีกว่าเจลที่เกิด aggregation นอกจากนี้ยังพบอีกว่าพันธะไดซัลไฟด์ และพันธะนอน-โควาเลนต์ต่างๆ มีบทบาทสำคัญกับพฤติกรรมตอบสนองต่อการทดสอบของเจล เจลที่มีความเข้มข้นต่ำถูกทำลายได้ง่ายกว่าเมื่อได้รับความร้อน และจากการทดสอบ creep นั้นยังให้ผลสรุปทำนองเดียวกัน ค่าคงที่ต่างๆ ทางวิสโคอิลาสติก จากแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของเจลโปรตีน เจลที่ได้รับความร้อนให้โครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า ความเข้มข้นของเกลือไอออน (แคลเซียมไอออน) มีผลผลักดันให้เกิด aggregation ของโปรตีนได้ แต่เจลชนิดนี้มีความแข็งแรงกว่า ชนิดไม่เกิด aggregation

สำหรับการทดสอบ creep ในกลุ่มของเจลนั้นในที่นี้ยกตัวอย่างการศึกษาพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกของสารละลายโพลีเอธิลีนออกไซด์ และแซนแทนกัม โดย Apel (1997) พบว่าพฤติกรรมทางวิสโคอิลาสติกของโพลีเมอร์มีบทบาทสำคัญกับโครงสร้าง และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะแสดงพฤติกรรมเชิงของไหลอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งจะเด่นชัดในการแสดงพฤติกรรมเชิงของแข็งยืดหยุ่น การเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเมอร์สามารถเพิ่มการแสดงออกของสมบัติยืดหยุ่นในโพลีเมอร์เส้นตรงได้ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนสายโซ่โพลีเมอร์ และความยุ่งเหยิงในการสานกันของโพลีเมอร์อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สารละลายโพลีเอธิลีนออกไซด์ เข้ากันได้ดีกับแบบจำลองของวอค-เคลวิน ขณะที่สารละลายแซนแทนกัมเข้ากันได้ดีกว่ากับแบบจำลองของแมกซ์เวลล์