

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตแยม เยลลี่และมาร์มาเลด จัดเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบันและเป็นช่องทางการนำผลไม้ที่ยังมีคุณภาพดีไม่เน่าเสีย แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานสำหรับจุดประสงค์อื่น เช่น มีรูปร่างผิดปกติ มีสีและขนาดไม่ได้ตามมาตรฐาน รวมทั้งเป็นการนำส่วนที่เหลือใช้ เช่น เปลือก แก่น ผลไม้ที่มีรอยชำแต่ยังไม่เน่า มาใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ (กิตติพงษ์, 2536)

#### 2.1 นิยามและลักษณะของผลิตภัณฑ์แยม

ตามคำนิยามของ Food and Drug Administration (FDA) ในปี 1936 แยมหมายถึงผลิตภัณฑ์ซึ่งได้จากการต้มส่วนของบรีโกลได้ของผลไม้กับน้ำตาลซูโครส หรือ เดกซ์โทรส อาจเติมเครื่องเทศ น้ำ น้ำส้มสายชู และกรดอินทรีย์ที่ไม่เป็นอันตราย แต่ไม่นับรวมกรดอินทรีย์หรือเกลือของกรดอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารกันเสีย (preservative) เกี่ยวจนมีความหนืดเหมาะสม ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด มีคุณภาพดี โดยกำหนดว่าจะต้องใช้ผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 45-47 ขึ้นกับชนิดของผลไม้ ต่อน้ำตาลร้อยละ 55 กรณีที่ผลไม้ที่ใช้มีเพคตินต่ำอาจเติมเพคตินลงไปได้แต่ต้องใช้สัดส่วนของผลไม้ต่อน้ำตาลไม่ต่ำกว่านี้ ผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเพคตินจะต้องมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ไม่ต่ำกว่า 65 องศาบริกซ์ (กิตติพงษ์, 2536; Baker *et al.*, 1996)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมในปี 2521 ได้กำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์แยม โดยกำหนดว่าแยมเป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อผลไม้กับสารให้ความหวาน อาจผสมน้ำผลไม้หรือน้ำผลไม้เข้มข้น แล้วทำให้มีความข้นเหนียวหรือกึ่งแข็งกึ่งเหลวพอเหมาะสำหรับใช้ทา (spreadability) มีสี กลิ่นรส ตามชนิดของผลไม้ที่ใช้ทำ อาจใช้สีผสมอาหารที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ในการปรุงแต่งสีได้และแบ่งแยมเป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ ประเภทที่มีเนื้อผลไม้ทั้งหมดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 45 ของน้ำหนักและประเภทที่มีเนื้อผลไม้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 33 ของน้ำหนักผลไม้ที่ใช้อาจใช้ผลไม้ชนิดเดียวกันหรือผลไม้ผสมหลายชนิด กรณีใช้ผลไม้ชนิดเดียว เช่นฝรั่งต้องมีเนื้อผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 18 ถ้าใช้มะม่วงหิมพานต์ต้องมีเนื้อผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ถ้าใช้

กระเจี๊ยบ จิง มะม่วง ต้องมีเนื้อผัก ผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 กรณีที่ใช้ผลไม้ 2 ชนิด จะต้องมีส่วนที่เป็นผลไม้ชนิดหลักร้อยละ 50-75 ของน้ำหนักส่วนที่เป็นผลไม้ทั้งหมด ยกเว้น ผลไม้จำพวก แดง มะละกอ อาจมีได้ถึงร้อยละ 95 ของน้ำหนักส่วนที่เป็นผลไม้ทั้งหมด สำหรับมะนาว จิง จะต้องมีเนื้อผักผลไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยส่วนผสมหลักอาจมากกว่าร้อยละ 75 ของส่วนที่เป็นผลไม้ทั้งหมด และกรณีที่เป็นผลไม้ 4 ชนิดจะต้องมีส่วนผสมที่เป็นผลไม้ชนิดหลักร้อยละ 25-75 ของส่วนที่เป็นผลไม้ทั้งหมด (มอก.263, 2521)

### 2.1.1 การผลิตแยม

วัตถุประสงค์หลักที่จำเป็นในการผลิตแยม คือ ผลไม้ เพกติน น้ำตาล และกรด นอกจากนี้อาจมีการเติมสารกันเสี้ยวหรือ สารต้านการเกิดฟอง (antifoaming agent) ด้วยก็ได้ (Baker *et al.*, 1996)

#### 2.1.1.1 ผลไม้

ผลไม้ที่ใช้ควรจะแก่และสุกเต็มที่ แต่ไม่ควรสุกกอมเกินไปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นรส และเนื้อสัมผัสที่ดี เพราะผลไม้ที่สุกกอมเกินไปนั้นเอนไซม์ตามธรรมชาติที่อยู่ในผลไม้จะทำลายโครงสร้างของสารประกอบเพกติน ดังนั้นกรณีที่เป็นต้องนำผลไม้ที่สุกกอมเกินไปไม่เหมาะสมกับการแปรรูปอย่างอื่นมาผลิตแยมจึงต้องมีการเติมเพกตินหรือเติมสีสังเคราะห์ลงไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและลักษณะปรากฏดีขึ้น สำหรับผลไม้ที่ยังไม่สุกหรือสุกๆดิบๆนั้น สารประกอบเพกตินที่มีในผลไม้เหล่านั้นไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตแยม (Broomfield, 1996; Pilgrim, 1991)

ผลไม้ที่เหมาะสมที่จะใช้ทำแยมควรเป็นผลไม้พันธุ์ที่มีปริมาณน้ำตาลและกรดเพียงพอ รวมทั้งจะต้องมีสีสวย มีกลิ่นรสที่ดี และควรเป็นผลไม้ที่สดด้วย แต่ในธรรมชาติการจะหาผลไม้ที่มีลักษณะดังกล่าวครบถ้วนเป็นไปได้ยาก การผลิตแยมจึงต้องเติมเพกตินหรือกรดลงไปเพื่อให้มีปริมาณสารเหล่านั้นเพียงพอและเหมาะสมในการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์ (กิตติพงษ์, 2536) อุตสาหกรรมแยมสามารถหาแหล่งของผลไม้ได้ถึง 5 ทางคือ (Bhatia, 1997)

1. ผลไม้สด
2. ผลไม้แช่เยือกแข็ง
3. ผลไม้กระป๋อง หรือ ผลไม้ที่ถูกถนอมรักษาด้วยความเย็น

4. ผลไม้ที่ถนอมรักษาด้วยสารประกอบพวกกำมะถัน
5. ผลไม้แห้ง

การเตรียมผลไม้ก่อนการผลิตแยมจะต้องทำการล้างทำความสะอาด พวกที่มีเปลือกหรือเมล็ดจะถูกปอกเปลือกหรือคว้านเมล็ดออกแยกเอาเฉพาะส่วนเนื้อที่รับประทานได้มาใช้ จากนั้นทำผลไม้ให้เป็นชิ้นเล็กจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ เช่น อาจใช้วิธี หั่น สับ หรือ ต้มจนและก็ได้ (Broomfield, 1996)

### 2.1.1.2 น้ำตาล (Sugar)

น้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตแยมโดยน้ำตาลทำให้เกิดโครงสร้างเจล และยังให้รสหวานแก่ผลิตภัณฑ์แยมอีกด้วย น้ำตาลส่วนใหญ่ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์คือ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลจะช่วยให้เกิดเจลโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของเพคตินหรืออาจจะเนื่องจาก น้ำตาลเป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากจึงอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลเพคตินเป็นอิสระสามารถเกิดพันธะไฮดรอกซิลบนโมเลกุลอื่นหรือบนส่วนอื่นของโมเลกุลเพคตินได้ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยทำให้เกิดพันธะขึ้นระหว่างกลุ่มเมธิลเอสเทอร์ในโมเลกุลเพคตินอีกด้วย (กิตติพงษ์, 2536; Baker *et al.*, 1996)

นอกจากน้ำตาลซูโครสแล้วยังอาจใช้น้ำตาลชนิดอื่นทดแทนน้ำตาลซูโครสได้บางส่วนเพื่อช่วยลดการตกผลึกของซูโครส เช่น การเติมน้ำตาลอินเวอร์ท แยมที่ดีควรมีน้ำตาลอินเวอร์ทอยู่ในช่วงร้อยละ 30-45 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ถ้ามีปริมาณน้ำตาลอินเวอร์ทมากเกินไปจะได้แยมที่มีลักษณะขุ่นและเกิดผลึกของกลูโคส น้ำตาลอินเวอร์ทอาจได้จากการเติมลงไปโดยตรงหรือจากการสลายตัวของน้ำตาลซูโครสด้วยกรดระหว่างการทำให้ความร้อนระหว่างการทำแยม

บางครั้งอาจมีการเติมน้ำเชื่อมกลูโคสแทนน้ำตาลซูโครสได้ในปริมาณร้อยละ 5-15 การเติมน้ำเชื่อมกลูโคสจะช่วยลดการตกผลึกของซูโครส เพิ่มความแวววาว ป้องกันการแยกตัวของน้ำออกจากเจลและยังช่วยลดความหวานของผลิตภัณฑ์ลงไม่ให้หวานจนเกินไปด้วย (กิตติพงษ์, 2536) แต่การใช้น้ำตาลชนิดอื่นแทนน้ำตาลซูโครสอาจมีผลทำให้ลักษณะเจลและสภาวะเจลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เช่น การใช้มอลโทสทดแทนซูโครสบางส่วนจะทำให้ระยะเวลาในการแข็งตัวของเจลเร็วขึ้นและเกิดเจลได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้างขึ้น (Baker *et al.*, 1996)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์แยม ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำแยม เพราะถ้าใช้เวลาสั้นน้ำตาลจะถูก hydrolysed ไปเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าใช้เวลานานปริมาณน้ำตาลจะแตกตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ และความเข้มข้นของกรด ถ้ามีกรดเป็นองค์ประกอบมากปริมาณน้ำตาลจะถูก hydrolysed มากขึ้นและเกิดได้เร็ว ส่วนชนิดของกรดที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ เช่น crab apple jelly ซึ่งประกอบด้วยกรดมาลิกเป็นส่วนใหญ่มี titratable acid คิดเป็นกรดกำมะถันได้ร้อยละ 0.17 สามารถทำให้น้ำตาลแตกตัวได้ถึงร้อยละ 58.8 แต่สำหรับเฮลลี่ส้มประกอบด้วยกรดมะนาวเป็นส่วนใหญ่มี titratable acid คิดเป็นกรดกำมะถันได้ร้อยละ 0.17 สามารถทำให้น้ำตาลแตกตัวได้เพียงร้อยละ 4.9 เท่านั้น (นัยทัศน, 2521)

### 2.1.1.3 กรด (Acid)

กรดที่ใช้ในผลิตภัณฑ์แยมมักเป็นกรดอินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติในผลไม้ ผลไม้ที่มีกรดต่ำอาจจะต้องเติมกรดลงไป กรดที่นิยมใช้เติมในผลิตภัณฑ์คือ กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก กรณีที่ผลไม้มีปริมาณกรดตามธรรมชาติมากเกินไปจะลดความเป็นกรดลงโดยการเติมเกลือที่มีสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โซเดียมซิเตรท การใช้บัฟเฟอร์เหล่านี้ต้องใช้ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป เพราะจะมีผลต่อการเกิดเจลของเพคตินและอาจทำลายกรดแอสคอร์บิกที่มีอยู่ (กิตติพงษ์, 2536)

กรดเป็นตัวช่วยในการเกิดเจลของเพคตินโดยในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่ำสูงจะมีผลทำให้หมู่คาร์บอกซิลบนโมเลกุลของเพคตินแตกตัวซึ่งทำให้โมเลกุลมีประจุ และเกิดการผลักกันขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีประจุด้วยกันเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ยากทำให้เกิดเจลไม่ได้ แต่ถ้ามีกรดจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่ำลงช่วยลดการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนและเกิดเจลได้ง่ายขึ้น (Baker *et al.*, 1996)

### 2.1.1.4 เพคติน (Pectin)

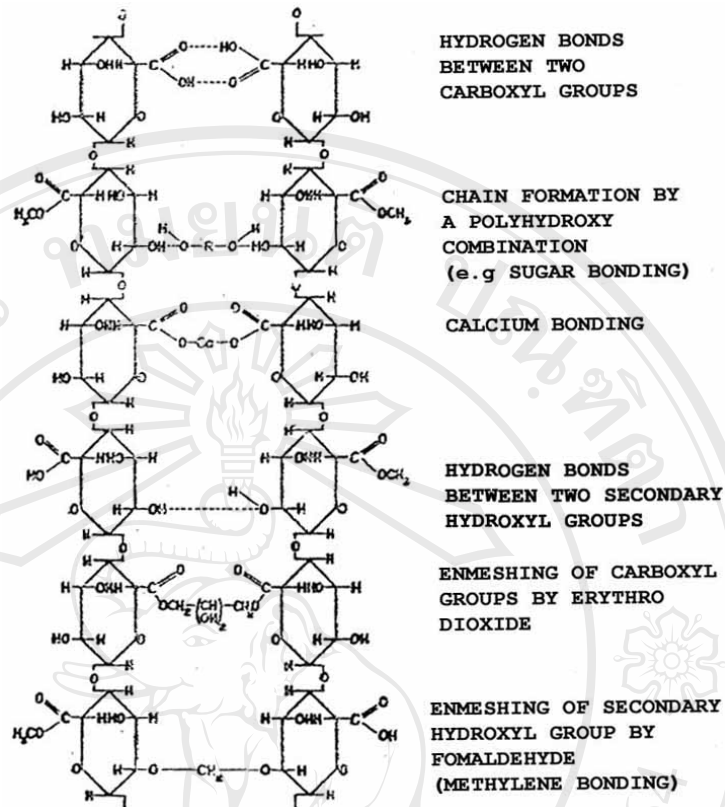
เพคตินเป็นสารที่สกัดจากพืชและเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สำคัญ สกัดได้จากเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม โครงสร้างโมเลกุลของเพคตินประกอบด้วยโพลีเมอร์ของกรดกาแลคตูลอนิก (D-galacturonic acid) เป็นสายหลัก มีสายแขนงเป็นน้ำตาลอะราบินอส (L-arabinose) และน้ำตาล

กาแลคโตส (*D*-galactose) น้ำหนักโมเลกุลของเพคตินต้นแปรอยู่ในช่วงประมาณ 10000-400000 Da (พัชรีย์, 2546)

DM หมายถึง อัตราส่วนของหมู่ methoxylated galacturonic acid ต่อหมู่ของกรดกาแลคตุโรนิก (galacturonic acid) ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ Low Methoxyl (LM) ซึ่งมีค่า DM น้อยกว่าร้อยละ 50 และชนิด High Methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่าร้อยละ 50 มักใช้กับอาหารที่มีกรดต่ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 2.0-3.5 และต้องมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 55 จึงจะเกิดเจลได้ เพคตินสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด เช่น เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) สารที่ทำให้เกิดการแขวนลอย (suspending agent) และสารเพิ่มความหนืด (thickeners) (นิธิยา, 2543)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่สำคัญ 2 ชนิดที่พบในสารประกอบเพคตินคือ พันธะไฮโดรเจนและแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรวมกันของเพคตินโดยเป็นตัวก่อ cross-link พันธะไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะภายในสายเดียวกันโดยจับกันที่ตำแหน่งออกซิเจนและไฮดรอกซิลไฮโดรเจน โดยปกติพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่ถูกทำลายได้ง่ายและยึดกันด้วยแรงอ่อนๆ แต่เมื่อมีการเกิดพันธะมากขึ้นสายโพลีเมอร์รวมกันมากขึ้นจึงเกิดความคงตัว หมู่ methoxyl ที่อยู่ในเนื้อเยื่อเพคตินสามารถรวมตัวกันได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก ซึ่งเป็นการรวมตัวกันเพื่อลดพื้นที่ผิวของส่วนที่มีขั้วและไม่ขั้ว และทำให้มีความคงตัวมากขึ้น เนื่องจากการลดพื้นที่ผิวจะเป็นการลดพลังงานในระบบด้วย จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนที่เกิดการรวมกันจะมีการดึงดูระหว่างโมเลกุลของเพคตินและหมู่ methoxyl ภายในตัวมันเอง ในการแยกเจลของเพคตินที่จับกันอยู่ เช่น ในเพคติน-กรด-น้ำตาล ซึ่งจับกันด้วยพันธะและแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อน เชื่อว่าสามารถนับจำนวนของจังก์ชัน โชนที่ทำให้เจลมีความคงตัวได้ (Buren, 1991)





รูปที่ 2.1 โครงสร้างและการเชื่อมเข้าด้วยกันระหว่างโมเลกุลของเพคติน  
ที่มา: นัยทัศน์, 2521

การแบ่งเพคตินตามค่า Degree of Esterification (DE) แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. เพคตินกลุ่มที่มีเมทอกซิลสูง (High-Methoxyl Pectin) เป็นสารเพคตินที่มีค่า DE ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 การเกิดเจลของเพคตินชนิดนี้จะต้องมีองค์ประกอบที่เหมาะสมคือ ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 55-65 ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 2.9-3.1 ซึ่งเป็นสภาวะปกติที่ใช้ในแฮมทั่วไป เพคตินเมทอกซิลสูงสามารถแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดเจลได้ 6 ชนิดคือ

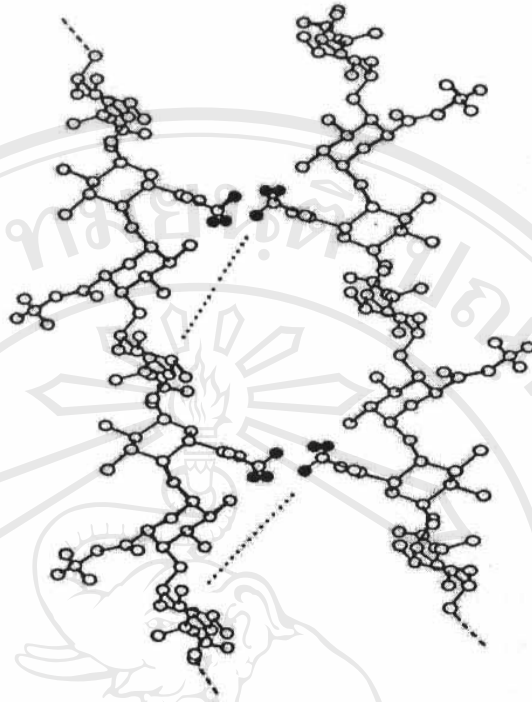
- 1.1 Ultra rapid set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 82
- 1.2 Extra rapid set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 76
- 1.3 Rapid set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 72
- 1.4 Medium rapid set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 60-69
- 1.5 Slow set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 60-64
- 1.6 Extra slow set pectin มีค่า DE เท่ากับร้อยละ 55-59

เจลของเพคตินชนิด HM มีลักษณะพิเศษคือ ไม่มีการผันกลับเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงเฉือน เจลมีลักษณะนี้ แต่ไม่ละลายเมื่อให้ความร้อน พื้นผิวที่แตกหรือถูกตัดจะกลับมารวมกันได้ใหม่ เจลอาจมีการไหลซึมออกมาของของเหลวที่เป็นส่วนประกอบของเจล ซึ่งการเกิดลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเกิดซินเนอริซิส (syneresis) (Oakenfull, 1991)

2. เพคตินกลุ่มที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low-Methoxyl Pectin) เป็นสารเพคตินที่มีค่า DE ต่ำกว่าร้อยละ 50 เพคตินชนิดนี้สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ต้องมีไอออนของโลหะบางชนิดช่วยในการเกิดเจล เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  โดยใช้ปริมาณน้ำตาลเพียงเล็กน้อยหรือไม่ใช้เลยและสามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3.0-4.5

การเกิดเจลของโพลีแซคคาไรด์ต่างๆเกิดจากโพลีเมอร์ที่มีรูปร่างขดเป็นเกลียวหลายๆเส้น พันกันซึ่งโครงสร้างนี้จะทำให้เกิด cross-link กับโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหขึ้น จากการศึกษาพบว่าเกลียวของเพคตินชนิด HM มีการจัดเรียงตัวเป็นเกลียวพับ 3 รอบซึ่งแต่ละเกลียวจะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยเกิดทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างสายโพลีเมอร์จึงทำให้เห็นว่าโครงสร้างจะมีความคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกระหว่างกลุ่ม ester methyl จังก์ชันโซน (junction zone) เกิดจากสายโพลีแซคคาไรด์ 2 สายเกิดแรงยึดเหนี่ยวกันและเกิดการพับ 3 รอบและเกิดแรงที่ยึดเหนี่ยวกันด้วย

จังก์ชันโซนสามารถยึดโมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์ในร่างแหสามมิติได้โดยอยู่ในส่วนที่มีการจับกันของสายโพลีแซคคาไรด์ 2 สาย ซึ่งทำให้เกิดความคงตัวโดยการจับกันของทั้งพันธะไฮโดรเจนและแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิกแต่โดยปกติแรงแต่ละชนิดจะจับกันอย่างอ่อนๆแต่เมื่อรวมกันจะทำให้เจลคงตัว ส่วนน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลชนิดอื่นคงตัวอยู่ได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก แต่น้ำตาลแรมโนสเป็นตัวที่ทำให้เกิดการบิดงอของสายโพลีแซคคาไรด์และการบิดงอนี้จะกระทบกับการเกิดจังก์ชันโซน



**รูปที่ 2.2** โครงสร้างส่วนหนึ่งของจังก์ชันโซนในเจลของเพคตินชนิด HM อะตอมของไฮโดรเจนของกลุ่ม เมทิลที่จับกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโอฟบิก แสดงให้เห็นเป็นวงกลมทึบ (●) และพันธะไฮโดรเจนเป็นแสดงเส้นประ

ที่มา: Oakenfull, 1991

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของเพคตินมีได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลของเพคติน เนื่องจากขณะเกิดเจลโมเลกุลของเพคตินที่เป็นสายตรงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโมเลกุลที่เป็นสามมิติเป็นผลให้สารละลายมีลักษณะเหนียวหนืดและแข็งตัวขึ้น แต่ถ้าโมเลกุลเป็นสายสั้นการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสามมิติไม่ค่อยสมบูรณ์ทำให้ได้เจลที่เหลวและไม่ค่อยแข็งตัว อีกปัจจัยหนึ่งคือปริมาณกลุ่มเมทิลในโมเลกุลเพคติน คือถ้าเพคตินมีกลุ่มเมทิลมากกว่า จะเปลี่ยนเป็นรูปสามมิติที่แข็งแรงและคงทนกว่า ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการเกิดเจลคือ ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงเกินไปจะไม่มีการเกิดเจล แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำเกินไปจะทำให้เจลที่ได้แข็งมาก ดังนั้นการเกิดเจลต้องมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมคือ 3.0-3.2 (พวงทอง และคณะ, 2541)



## 2.1.2 สมดุลขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

การเกิดเจลและลักษณะของเจลที่ดีในผลิตภัณฑ์นั้น เกิดจากสมดุลขององค์ประกอบที่สำคัญสามอย่าง คือ ปริมาณเพคติน ปริมาณน้ำตาลและปริมาณกรดที่เหมาะสม ความสมดุลขององค์ประกอบทั้งสามจะทำให้ได้เจลที่แข็งแรง โดยเพคตินจะเป็นตัวโครงสร้างและเกี่ยวข้องกับความต่อเนื่องของโครงสร้างเจล ส่วนน้ำตาลและกรดจะมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง (กิตติพงษ์, 2536; Baker *et al.*, 1996)

เนื่องจากเพคตินทำหน้าที่เป็นตัวโครงสร้าง ต้องมีปริมาณมากพอสมควรจึงจะสามารถเกิดเป็นร่างแหโครงสร้างที่ต่อเนื่องได้ ปริมาณเพคตินที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับเพคตินเกรดที่เลือกใช้ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำตาลควรใช้มากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้มากเกินไปอาจทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาลได้ โดยทั่วไปนิยมใช้ 65 เปอร์เซ็นต์ (Rolin and Vries, 1990)

นอกจากนี้ลำดับของการผสมองค์ประกอบต่างๆก็มีผลต่อการเกิดเจลที่ดีอีกด้วย ตามปกติจะเกี่ยวข้องกับน้ำตาลก่อน แล้วจึงเติมน้ำตาลที่ผสมเข้ากันกับเพคตินลงไป เมื่อน้ำตาลและเพคตินละลายหมดจึงเติมกรดรวมทั้งสีและกลิ่นถ้ามีการใช้ แล้วจึงหยุดการให้ความร้อน การเติมกรดหลังจากเกี่ยวข้องกับเพคติน เพราะถ้าเติมในช่วงแรกเพคตินจะถูกให้ความร้อนในสภาวะที่เป็นกรดเป็นเวลานาน โมเลกุลจะเกิดการแตกตัวทำให้ไม่เกิดเป็นเจลหรือเกิดเจลที่มีคุณภาพไม่ดี ซึ่งเป็นเหตุผลที่ต้องนำกรดมาเติมในช่วงท้ายของการให้ความร้อน นอกจากนี้กรดยังสลายน้ำตาลซูโครสทำให้มีปริมาณน้ำตาลอินเวอร์ทในผลิตภัณฑ์มากเกินไปซึ่งอาจเกิดการตกผลึกของกลูโคสได้ (กิตติพงษ์, 2536; Pilgrim, 1991)

## 2.2 กระบวนการความดันสูง

### 2.2.1 หลักการ

หลักการของ Le Chatelier กล่าวว่า เมื่อระบบอยู่ในสมดุลถ้าทำให้สภาวะของระบบเปลี่ยนไป (เช่นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเปลี่ยนเฟส หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล) ร่วมกับการลดปริมาตรลงจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น (Leadley and Williams, 1997) กระบวนการความดันสูงทำให้อาหารมีปริมาตรลดลงและยังส่งผลต่อพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิกและพันธะที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งความดันจะไม่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบของอาหารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น สารอาหารและลักษณะทางเนื้อสัมผัส ในขณะที่องค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น โครงสร้าง tertiary และพันธะโควาเลนต์บางชนิดจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากความดัน นอกจากนี้หลักการอื่นที่ใช้ร่วมกับกระบวนการความดันสูงคือ หลักการเกี่ยวกับ Isostatic ซึ่งหมายถึงการส่งผ่านความดันอย่างรวดเร็วและคงที่ ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของอาหาร อย่างไรก็ตามการส่งผ่านความดันอย่างรวดเร็วจะไม่สามารถทำได้ถ้ามีฟองอากาศเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีหลักการเกี่ยวกับ Microscopic Ordering หมายถึงที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันจะเป็นการทำให้ระดับการจัดเรียงตัวของสารเพิ่มขึ้น (Heremans, 1992) กฎข้ออื่นที่น่าสนใจคือการใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยในการกดของแข็งหรือของเหลวให้มีความดัน 500 MPa ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ความร้อนถึง 100 องศาเซลเซียส กระบวนการความดันสูงมีข้อดีคือ ช่วยลดเวลาในกระบวนการผลิต ลดการถูกทำลายเนื่องจากความร้อน นอกจากนี้ยังรักษาความสด รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และสีของผลิตภัณฑ์ให้เหมือนกับของสด ซึ่งเมื่อเทียบกับความร้อนแล้วความดันยังทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลดลง และไม่มี การสูญเสียวิตามินซีอีกด้วย (Farr, 1990; Mertens, 1992; Williams, 1994; Cheftel, 1995; Knorr, 1995; Leadley and Williams, 1997)

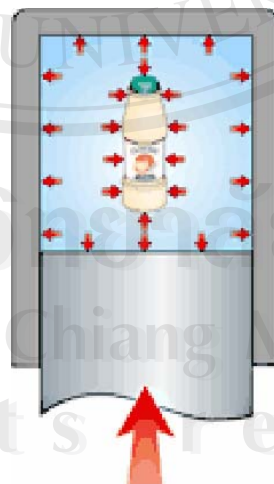
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการความดันสูงที่มีวางขายในอเมริกาเช่น ผลิตภัณฑ์จากอะโวคาโด (guacamole) แสม น้ำผลไม้ และหอยนางรม ส่วนในยุโรปและญี่ปุ่นมีผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการความดันสูง เช่น แยม เยลลี่ ปลา ผลิตภัณฑ์จากเนื้อ แสมแผ่น น้ำสลัด เค้กจากข้าว แสม น้ำผลไม้ และโยเกิร์ต เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการความดันสูงที่วางขายในท้องตลาด  
ที่มา: <http://ohioline.osu.edu/fse-fact/0001.html>

### 2.2.2 กระบวนการทำงาน

การใช้กระบวนการความดันสูงในการผลิตอาหาร อาหารจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีความยืดหยุ่น เช่นถุงหรือขวดที่มีความทนทานต่อความดันสูง แล้วนำไปใส่ในช่องของเครื่องความดันสูง (high pressure) ที่มีของเหลวซึ่งใช้เป็นตัวส่งผ่านความดันบรรจุอยู่ด้วยรูป

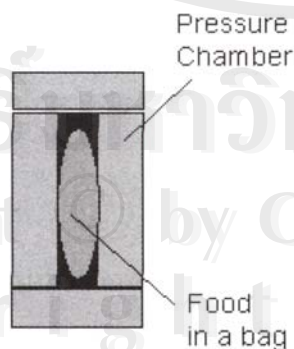


รูปที่ 2.4 ลักษณะของอาหารที่ลอยอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวส่งผ่านความดันในเครื่องความดันสูง  
ที่มา: <http://ohioline.osu.edu/fse-fact/0001.html>

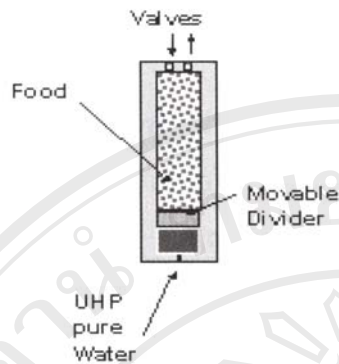
ของเหลวที่ใช้เป็นตัวส่งผ่านความดันจะอยู่ในช่องที่ใช้เครื่องสูบ (pump) เป็นตัวอัดความดัน แล้วความดันจะถูกส่งผ่านไปยังอาหารอย่างสม่ำเสมอเท่าๆกันในทุกๆทิศทาง ทำให้อาหารยังคงรูปร่างเดิมของมันไว้ได้ และเนื่องจากไม่มีการใช้ความร้อนจึงทำให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหารยังคงอยู่และมีความปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์

### 2.2.3 เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารด้วยความดันสูงคล้ายคลึงกับการแปรรูปโดยใช้ความร้อนซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป คือ เป็นระบบกะหรือต่อเนื่อง โดยทั่วไปเครื่องจะประกอบด้วยถังทนความดันสูงขนาด 10-50 ลิตร และเครื่องผลิตความดันสูง เมื่อวางอาหารในภาชนะบรรจุลงในถังแล้วจะปิดฝาด้านบนเครื่อง ต่อจากนั้นจะเป็นการสูบล้างในการให้ความดันซึ่งนิยมใช้น้ำเข้ามาทางใต้ถัง ความดันจะถูกส่งผ่านตัวกลางและอาหารอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นอาหาร อาหารจะไม่เปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากได้รับความดันเท่ากันทุกด้าน ดังภาพ 2.4 รอบเวลาที่ใช้ทั่วไปเป็นเวลาสั้นๆไม่เกิน 15 นาที เมื่อได้ความดันตามที่ต้องการแล้วระบบปั๊มจะหยุด วาล์วปิดและความดันจะคงที่โดยที่ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานแก่ระบบอีก การแปรรูปอาหารเหลวอาจทำได้โดยการใส่อาหารเหลวหรือน้ำผลไม้ลงในถังและให้ความดันในระบบกึ่งต่อเนื่อง (วิล, 2545) ดังภาพ 2.5 เป็นเครื่องแปรรูปอาหารในภาชนะบรรจุด้วยความดันสูงแบบกะ ส่วนภาพ 2.6 เป็นไอโซเลเตอร์และระบบต่อเนื่องซึ่งใช้ได้กับอาหารเหลวที่สามารถสูบหรือปั๊มได้ โดยอาหารจะถูกสูบเข้าไปในไอโซเลเตอร์ (isolator) ซึ่งเป็นถังความดันสูงและใช้น้ำเป็นตัวกลางความดันเป็นเวลาตามที่กำหนด



รูปที่ 2.5 เครื่องแปรรูปอาหารในภาชนะบรรจุด้วยความดันสูงแบบกะ  
ที่มา: วิล (2545)



รูปที่ 2.6 เครื่องแปรรูปอาหารด้วยความดันสูงแบบต่อเนื่อง  
ที่มา: วิไล (2545)

#### 2.2.4 ข้อดีของกระบวนการความดันสูง

1. ยับยั้งปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ และเอนไซม์
2. รักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ใกล้เคียงกับของสด เช่น สี รสชาติ กลิ่น และลักษณะเนื้อสัมผัส
3. ไม่มีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารระหว่างกระบวนการ
4. ยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์
5. ไม่จำเป็นต้องใส่สารกันเสีย จึงหลีกเลี่ยงกลิ่นรสที่ไม่ต้องการได้
6. แรงดันที่ส่งผ่านไปยังอาหารเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อาหารจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
7. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์
8. เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ก่อให้เกิดของเสีย

#### 2.2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการความดันสูง

Donsi *et al.* (1996) ใช้ gas chromatography ศึกษาถึงองค์ประกอบแต่ละชนิดในกลิ่นของน้ำส้ม พบว่าน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดันจะมีปริมาณของไลโมนีนใกล้เคียงกับน้ำส้มสด โดยไลโมนีนเป็นองค์ประกอบของกลิ่นและมีความคงตัวน้อยที่สุด เมื่อผ่านความร้อนจะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นความดันยังไม่ทำให้องค์ประกอบอื่นของกลิ่น เช่น เทอพินีน (terpinene)



ไซมิน (cymene) ไลนาลูล (linalool) และไมร์ซีน (myrcene) เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Parish (1994) นำน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดัน 500 MPa เป็นเวลา 30 วินาทีกับน้ำส้มสดมาทำการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ และเมื่อเก็บรักษาน้ำส้มสดไว้ที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียสนาน 2 สัปดาห์ จะเกิดการหมักขึ้นทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้ทำการทดสอบ ในขณะที่น้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดันจะยังคงปราศจากการหมักนานถึง 5 สัปดาห์

Parish (1998) ศึกษาผลของความดันในช่วง 500-700 MPa ที่มีต่อน้ำส้มวาเลนเซีย พบว่า ผู้ทำการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสลงความเห็นว่า น้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดันมีรสชาติใกล้เคียงกับน้ำส้มสดหรือน้ำส้มแช่เย็นมากกว่าน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความร้อน จึงมีการศึกษาถึงรสชาติบางตัวที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความร้อนและน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดัน โดยเฉพาะในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความดันยังคงรักษารสชาติที่ดีได้มากกว่าน้ำส้มที่ผ่านการใช้ความร้อน และการเพิ่มความร้อนเพียงเล็กน้อย (จาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสในทุกๆด้าน

Porretta (1995) รายงานว่าการใช้ความดันสูงมีผลต่อความหนืดของน้ำมะเขือเทศและทำให้โครงสร้างมีลักษณะคล้ายเจลลี่มากขึ้น เนื่องจากโปรตีนเกิดการเสียสภาพธรรมชาติอย่างถาวรและเกิดการแข็งตัว สำหรับความดันที่มากกว่า 700 MPa จะทำให้น้ำมะเขือเทศมีความหนืดและค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้น เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาของเอนไซม์เพิ่มขึ้นและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด

Gow *et al.* (1996) ศึกษาคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของน้ำฝรั่งเข้มข้นที่ผ่านการใช้ความดัน 600 MPa ร่วมกับการใช้ความร้อน 88-90 องศาเซลเซียสนาน 24 วินาที พบว่าสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ให้มีปริมาณน้อยกว่า 10 CFU/ml และยังคงมีคุณภาพที่ดีคล้ายของน้ำฝรั่งสดได้นานถึง 40 วันโดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้กระบวนการความดันสูงยังสามารถยังยั้งการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์ในน้ำฝรั่งได้อีกด้วย

Yen *et al.* (1996) ศึกษา น้ำฝรั่งเข้มข้นที่ผ่านการใช้ความดัน 600 MPa อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที พบว่ายังคงมีสีเช่นเดียวกับน้ำฝรั่งสด และเมื่อนำมาทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 60 วัน ค่าความสว่างและค่าสีเขียวของน้ำฝรั่งลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการใช้ความดันมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการใช้ความดัน

Yen *et al.* (1999) ใช้ gas chromatography และ mass spectrometry ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารที่ระเหยง่ายในน้ำฝรั่งระหว่างผ่านการใช้ความดัน 600 MPa อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที และทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 25 องศาเซลเซียสพบว่า สารระเหยง่ายที่มีมากที่สุดคือน้ำฝรั่งคือเอสเทอร์ รองลงมาคือแอลกอฮอล์ ซึ่งมีเอทิล-แอล-เฮกซาโนเอท (ethyl-l-hexanoate) ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของรสชาติ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับน้ำฝรั่งสดพบว่าองค์ประกอบของสารระเหยง่ายในน้ำฝรั่งที่ผ่านการใช้ความดันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับน้ำฝรั่งสดและมีค่าลดลงระหว่างการเก็บรักษา ปริมาณแอลกอฮอล์และเอสเทอร์ในน้ำฝรั่งที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสนาน 30 วันจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำฝรั่งสดและยังคงรสชาติเดิมได้มากกว่าน้ำฝรั่งที่ไม่ได้ผ่านการใช้ความดัน เนื่องจากเอนไซม์ในน้ำฝรั่งที่ผ่านการใช้ความดันถูกยับยั้งไปบางส่วน หลังจากทำการเก็บรักษานาน 60 วันความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ เมื่อนำน้ำฝรั่งไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสนาน 30 วันพบว่ามีเปลี่ยนแปลงที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ เมทานอล (methanol) เอทานอล (ethanol) เอทิลอะซิเตท (ethyl acetate) เมทิล-แอล-โพรพิโอเนท (methyl-l-propionate) และทู-เอทิลฟูราล (2-ethylfuran) จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆจะลดลง

Lopez-Malo *et al.* (1998) พบว่าน้ำอะโวคาโดเข้มข้นที่ผ่านการใช้ความดัน 345-689 MPa เป็นเวลา 10-30 นาทีมีสีเทียบเท่ากับน้ำอะโวคาโดสด คือมีค่า  $a$  อยู่ระหว่าง  $-7.9$  ถึง  $-7.3$  และระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเล็กน้อยคือ ในตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.1 ผ่านการ ใช้ความดัน 689 MPa เป็นเวลา 20 นาที ค่าสี  $L$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 1 และค่าสี  $L$  จะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าตัวอย่างนั้นผ่านการ ใช้ความดันต่ำ มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง หรือทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นสีเขียวของตัวอย่างจะค่อยๆลดลงโดยดูจากค่าสี  $a$  มีค่าเป็นบวก เป็นเพราะการเกิดสีน้ำตาลเนื่องมาจากเอนไซม์

polyphenol oxidase (PPO) ที่เหลืออยู่ การยืดอายุการเก็บรักษาสามารถทำได้โดยการใช้ความดันสูง ร่วมกับค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำและทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ

Horie *et al.* (1991) ศึกษาแฮมสตอเบอร์รี่ที่ผ่านการใช้ความดันสูงของบริษัท Meidi-ya Food Factory Co. ในญี่ปุ่น ซึ่งเป็นบริษัทอาหารรายแรกที่ใช้กระบวนการความดันสูงในการถนอมอาหาร พบว่าสามารถกำจัดยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*, *Zygosaccharomyces rouxii* และแบคทีเรีย *Staphylococcus spp.*, *Salmonella spp.* และ โคลิฟอร์มได้ แยมถูกผลิตโดยใช้ความดัน 294 MPa เป็นเวลา 20 นาที และมีปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นอยู่ระหว่าง  $10^5$  and  $10^6$  CFU/ml หลังกระบวนการผลิต ต้องเก็บรักษาแยมไว้ในตู้เย็นเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงด้านรสชาติ การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจาก เอนไซม์ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเนื่องจากการเพิ่มของออกซิเจน ส่วนทางด้านผู้ทดสอบชิมลง ความเห็นว่าชอบแยมที่ผ่านกระบวนการความดันสูงมากกว่าแยมที่ผ่านการใช้ความร้อน นอกจากนี้แยมที่ผ่านการใช้ความดันสูงยังคงมีปริมาณวิตามินซีเหลืออยู่ถึงร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับของสด

Dervisi *et al.* (2001) ทำการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสและสีของแฮมสตอเบอร์รี่ที่ผ่านการใช้ความดัน 400 MPa อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และแปรผันปริมาณเพคตินคือ ร้อยละ 0.1, 0.5, 2.5, 5, 7.5 และ 10 ทำการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้การทดสอบ creep และวัดค่าสีโดยใช้ spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุดคือมีปริมาณเพคตินเท่ากับร้อยละ 2.5 และ 5 เมื่อเพิ่มปริมาณเพคตินจะทำให้ค่า storage moduli และ loss moduli เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของเพคตินมีการเปลี่ยนแปลงแล้วก่อจังก์ชัน โชนขึ้นทำให้มีลักษณะที่เหนียวหนืดและแข็งตัวมากขึ้น หลังจากทำการเก็บรักษานาน 8 สัปดาห์พบว่าค่าสีแดงของแฮมสตอเบอร์รี่มีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ทำให้สารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารสีในสตอเบอร์รี่มีค่าลดลงและเกิดสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น

Kimura *et al.* (1994) ทำการเปรียบเทียบคุณภาพ (เช่น กลิ่น การเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารแอนโทไซยานิน น้ำตาลซูโครส และปริมาณวิตามินซี) ของแยมที่ผ่านการใช้ความดันและแยมที่ผ่านการใช้ความร้อนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-3 เดือน พบว่าหลังจากผ่านกระบวนการแยมที่ผ่านการใช้ความดันจะมีลักษณะสดใหม่กว่าแยมที่ผ่านความร้อน และแยมทั้งสองชนิดจะยังคงรักษาคุณภาพที่ดีไว้เมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามแยมที่ผ่านการใช้ความดันไม่สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์และ

ออกซิเจนทำให้คุณภาพของแยมเสื่อมลง แยมที่ผ่านการใช้ความดันสามารถเก็บที่อุณหภูมิตู้เย็นได้นานกว่า 3 เดือนโดยมีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารและลักษณะทางประสาทสัมผัสน้อยมาก

Phunchaisri and Apichartsrangkoon (2005) ใช้กระบวนการความดันสูงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการเก็บรักษาลิ้นจี่ในกระป๋อง โดยนำลิ้นจี่สดและลิ้นจี่ที่แช่ในน้ำเชื่อมมาทำการแปรผันความดัน (200-600 MPa) อุณหภูมิ (20-60 องศาเซลเซียส) และเวลา (10 หรือ 20 นาที) จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและหาปฏิกิริยาของเอนไซม์ peroxidase (POD) และ polyphenol oxidase (PPO) พบว่ากระบวนการความดันสูงทำให้ลิ้นจี่สดและลิ้นจี่ที่แช่ในน้ำเชื่อมมีการสูญเสียคุณภาพทางกายภาพน้อยกว่ากระบวนการใช้ความร้อน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์ PPO และ POD ในลิ้นจี่คือ 5.0-8.0 และ 7.0 ตามลำดับ การใช้ความดัน 200 MPa ร่วมกับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะเพิ่มปฏิกิริยาของเอนไซม์ POD มากกว่าที่ 20 และ 60 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้ความดัน 400 และ 600 MPa ร่วมกับอุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ POD ผลของการใช้ความร้อนร่วมกับความดันสูงที่มีต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ PPO จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้เวลามากกว่า 20 นาที และการใช้ความดัน 600 MPa ร่วมกับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาทีจะยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ POD และ PPO ในลิ้นจี่สดได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์และ 90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่สำหรับลิ้นจี่ในน้ำเชื่อมจะมีผลกระทบน้อยมาก ซึ่งอาจเกิดจากการแช่ในน้ำเชื่อม โดยรวมแล้วพบว่าเอนไซม์ POD จะมีความทนต่อแรงดันได้มากกว่าเอนไซม์ PPO

Watanabe *et al.* (1991) ทำการวิเคราะห์ก๊าซที่อยู่ส่วนบนของแยมในภาชนะบรรจุโดยใช้ gas chromatography พบว่าแยมที่ผ่านการใช้ความดันองค์ประกอบเดิมของกลิ่นเช่น ทราน-ทู-เฮกซานอล (trans-2-hexanol) ลิลนาลูล (linalool) เอทิลบูไทเรท (ethyl butyrate) และกรดเมทิลบูไทเรท (ethyl butyrate) ยังคงอยู่มากกว่าแยมที่ผ่านการใช้ความร้อนที่วางขายตามท้องตลาด เมื่อนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนาน 2-3 เดือน พบว่า แยมยังคงอยู่ในสภาพที่ดีไม่เปลี่ยนแปลง ในทางกลับกันถ้านำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสคุณภาพของแยมจะเสื่อมลงเนื่องจากการสลายตัวของออกซิเจนและปฏิกิริยาของเอนไซม์ยังคงมีอยู่

### 2.3 รีโโลยี

คำว่า “รีโโลยี (Rheology)” ผู้บัญญัติคนแรกคือ Eugene C. Bingham และได้ให้ความหมายว่า รีโโลยี หมายถึงวัสดุทุกสิ่งทุกอย่างที่สามารถไหลได้ (everything flow) (Steffe, 1996) รีโโลยีเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) และการไหลของวัสดุ (flow) ของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือการกระทำใดๆที่ทำให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของวัสดุหรือทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปดังนั้นรีโโลยีทางอาหารจึงเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป และผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายในกระบวนการผลิตอาหารระดับอุตสาหกรรม ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตมีผลต่อคุณภาพทางรีโโลยี เพราะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะส่งผลไปถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารด้วยการวัดเนื้อสัมผัสของอาหารเป็นวิธีการที่ใช้เครื่องมือหรือวิธีการที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ เพื่อวัดค่าทางคุณสมบัติที่เกี่ยวกับเนื้อสัมผัสจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาทางรีโโลยี (ธงชัย, 2545)

นอกจากนี้การศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของอาหารทำให้ทราบถึงส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างอาหาร ลักษณะโครงสร้างอาหาร เช่น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเจลที่มีเฟสแยกกัน หรือมีลักษณะเป็นอิมัลชัน และจะทำให้ทราบเงื่อนไขในกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา ซึ่งพฤติกรรมทางกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นสามารถบอกถึงสิ่งเหล่านี้ได้ ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติทางรีโโลยีของอาหารจึงมีประโยชน์และมีความสำคัญ เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตั้งแต่การขนส่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การควบคุมการผลิต และในด้านการประเมินทางประสาทสัมผัส ซึ่งต่อมารวมไปถึงการวางจำหน่ายของผลิตภัณฑ์อาหารด้วย (Rao and Cooley, 1993) ค่าพื้นฐานทางรีโโลยีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

- ความเค้น (Normal Stress:  $\sigma_{\text{normal}}$ ) คือค่าแรง (Force: F) หน่วยเป็นนิวตัน (N) ต่อพื้นที่ที่แรงนั้นมากระทำบนระนาบ (Area: A) หน่วยเป็นตารางเมตร ( $\text{m}^2$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{\text{normal}} = F / A \quad (1)$$

หน่วยของความเค้นเป็น นิวตันต่อตารางเมตร ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) หรือปาสกาล (Pa)



- **ความเครียด (Strain:  $\epsilon$ )** คืออัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไป ( $\Delta L$ ) 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) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ มีสมการคือ

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

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

- แต่ถ้าความเค้นนั้นเกิดจากแรงเฉือนจะได้ค่าโมดูลัสเป็น shear modulus (G) โดยค่าโมดูลัสจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress :  $\tau$ ) และความเครียดเฉือน (shear strain :  $\gamma$ ) และได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

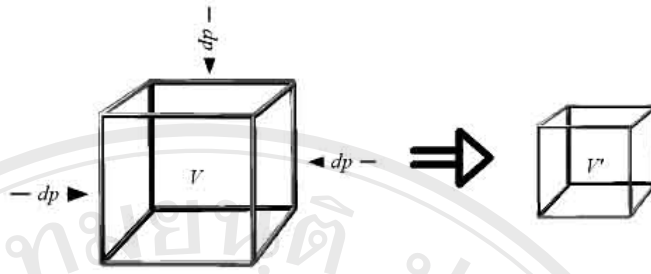
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4)$$

shear modulus มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

- ถ้าความเค้นเกิดจากแรงกดอัด โมดูลัสที่คำนวณได้จะเป็น bulk modulus (K) ดังรูปที่ 2.7

$$K = \frac{-dp}{(dV/V)} \quad (5)$$

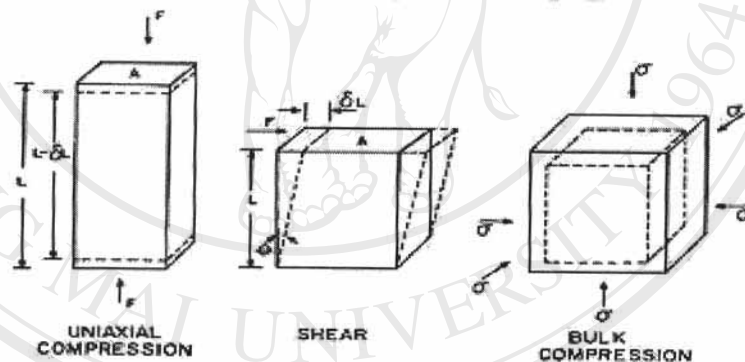
bulk modulus มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)



รูปที่ 2.7 โมดูลัสที่เกิดจากแรงกดอัด (Bulk Modulus)

ที่มา: [http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d\\_585.html](http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d_585.html)

ดังนั้น โมดูลัสจะมีหลายรูปแบบขึ้นกับลักษณะของแรงที่มากระทำต่อตัวอย่างว่าเป็นแรงชนิดไหน เช่น แรงกด (compression) แรงดึง (tension) แรงเฉือน (shear) และแรงกดอัด (bulk compression) แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โมดูลัสของแรงต่างๆที่กระทำกับตัวอย่าง

ที่มา: Rao and Steffe, 1992

สำหรับส่วนที่มีการไหลซึ่งเป็นสมบัติของของไหล สามารถอธิบายได้ตามกฎของนิวตัน (Newton's law) บางครั้งเรียกวัดความหนืดของไหลแบบนิวตัน ซึ่งการวัดค่าเนื้อสัมผัสจะวัดเป็นค่าความหนืด (viscosity:  $\mu$ ) เมื่อมีความเค้นเฉือน (shear stress:  $\sigma$ ) กระทำต่อตัวอย่างโดยมีอัตราเร็วในการเฉือน (shear rate:  $\dot{\gamma}$ ) ต่างๆกัน โดยอัตราเฉือนจะวัดในหนึ่งหน่วยเวลา เนื่องจากความเค้นเฉือนที่ทุกตำแหน่งมีค่าเท่ากันหมด ฉะนั้นความหนืดจึงเป็นฟังก์ชันของเวลา ( $t$ ) มีความสัมพันธ์ดังสมการ (Steffe, 1996)

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} = \mu (d\gamma / dt) \quad (6)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ความหนืด (viscosity) มีหน่วยเป็น ปาสคาล-วินาที (Pa s)

คุณสมบัติทางรีโอโลยีจะอธิบายถึงสมบัติของวัสดุที่มีลักษณะที่ยากที่กำหนดแน่นอน เช่น วัสดุแขวนลอยหรือวัสดุอิมัลชัน (suspension or emulsion) วัสดุโพลิเมอร์ (polymer materials) และ วัสดุวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) (มันัส, 2538)

## 2.4 วัสดุวิสโคอีลาสติก

โดยทั่วไปวัสดุในธรรมชาติ เช่น ผักและผลไม้ เนื้อสัตว์ หรือ ยาง จะแสดงพฤติกรรมพื้นฐานที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุเป็น 2 ลักษณะคือ ส่วนที่มีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ในอุดมคติ จะใช้กับวัสดุที่เป็นของแข็ง และส่วนที่เป็นของไหลในอุดมคติจะใช้กับวัสดุที่เป็นของเหลว ซึ่งในความเป็นจริงคุณสมบัติของวัสดุส่วนใหญ่รวมทั้งในอาหารจะไม่สามารถอธิบายสมบัติของวัสดุนั้นได้ด้วยพฤติกรรมอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่สามารถอธิบายได้ดีเมื่อนำพฤติกรรมทั้งสองส่วนมารวมกัน ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติที่เป็นเหมือนทั้งของแข็งและของเหลว เรียกคุณสมบัติที่เกิดขึ้นนี้ว่า คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic properties) และเรียกวัสดุที่มีสมบัตินี้ว่า วัสดุวิสโคอีลาสติก (viscoelastic materials) ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกนี้คือ คุณสมบัติของวัสดุจะขึ้นกับเวลา ดังนั้นวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว และกึ่งของแข็ง สามารถนำไปศึกษารีโอโลยีของวัสดุนั้นๆ ได้ (Rao and Steffe, 1992)

พฤติกรรมที่มีความยืดหยุ่นแบบอุดมคติของของแข็งคือ เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ รูปร่างของวัสดุจะเปลี่ยนไป แต่เมื่อถอนแรงออกรูปร่างของวัสดุนั้นจะกลับมาสู่สภาพเดิมเหมือนกับสภาพที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ทั้งนี้เนื่องจากของแข็งมีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานได้และใช้พลังงานนั้นในการกลับสู่รูปเดิม ในทางกลับกันของเหลวจะแสดงพฤติกรรมที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนทั้งก่อนและหลังมีแรงภายนอกมากระทำ และเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจะเกิดการไหลไปโดยไม่มี การไหลกลับมา (Ward and Hadley, 1995)

การที่ของไหลไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ เนื่องจากของไหลไม่มีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานทำให้พลังงานสูญหายไป ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุวิสโคอีลาสติกมีลักษณะคือ เมื่อ

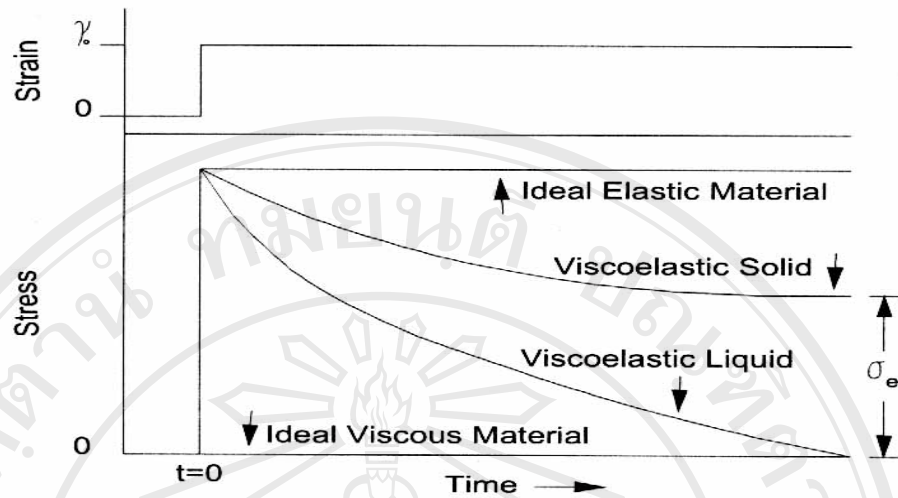
ให้ความเค้นเฉือน (shear stress) กับวัสดุที่มีความเครียด (shear strain) และถอนความเค้นออกทันทีทันใด วัสดุวิสโคอีลาสติคจะมีการยืดหยุ่นโดยมีการคืนรูปตามเวลาเหมือนสมบัติของของแข็ง แต่ไม่กลับไปสู่สภาพเริ่มต้น เนื่องจากจะมีลักษณะของของเหลวที่เกิดการไหลไปข้างหน้าโดยไม่มีการย้อนกลับสู่สภาพเดิมได้ (Christensen, 1971)

ความสามารถในการเกิดเจลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเพคติน ซึ่งบทบาทในการเกิดเจลและลักษณะของเจลเพคตินพิจารณาได้จากพฤติกรรมด้านรีโอโลยี เจลเพคตินมีสมบัติที่เป็นทั้งของเหลวที่ไหลได้และเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น ลักษณะนี้เป็นลักษณะของวิสโคอีลาสติค โดยลักษณะทางรีโอโลยีนั้นจะแสดงได้ในเทอมของอีลาสติคโมดูลัสและการไหลแบบนิวทอนเนียน ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลา โดยโมดูลัสอธิบายในเทอมของอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดและทำการวัดความเครียดที่เปลี่ยนไปภายใต้เวลาที่ต่างกัน การทดลองหาโมดูลัสทำได้ทั้งแบบดึง กด และเฉือน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากเจลเพคตินเป็นวิสโคอีลาสติค ความเครียดที่เปลี่ยนไปจะขึ้นกับทั้งแรงเค้นที่ให้และเวลาในการให้ความเค้นเข้าไปด้วย ซึ่งการศึกษานี้จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเครียดที่เปลี่ยนไปที่ละน้อย พฤติกรรมของวิสโคอีลาสติคของเจลเพคตินมีการศึกษาได้จากการทดสอบ เช่น dynamic-shear, creep-compliance และ stress relaxation (Alexos *et al.*, 1991)

## 2.5 การพักความเค้น

การพักความเค้น (stress relaxation) คือ ค่าความเค้น (stress) ที่ลดลงตามระยะเวลา โดยให้ความเครียด (strain) คงที่ การพักความเค้นหาได้จากการให้ความเครียดในอัตราคงที่กับวัสดุที่เป็นของไหลแล้วหยุดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทันที วัดค่าความเค้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Steffe, 1996)



รูปที่ 2.9 กราฟการพักความเค้น (Stress Relaxation Curve)

ที่มา : Steffe, 1996

จากภาพที่ 2.9 แสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ผ่านการทดสอบการพักความเค้น ซึ่งพบว่าไม่มีการพักความเค้นในวัสดุยืดหยุ่นแบบอุดมคติ (ideal elastic material) ขณะที่วัสดุที่มีความหนืดแบบอุดมคติ (ideal viscous material) จะมีการพักความเค้นทันที ส่วนวัสดุวิสโคอีลาสติกจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงการพักความเค้นไปจนถึงจุดสุดท้ายขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุที่ทดสอบ ซึ่งความเค้นในวัสดุวิสโคอีลาสติกแบบของแข็งจะลดลงจนถึงจุดสมดุลความเค้น (equilibrium stress:  $\sigma_e$ ) และมีความมากกว่าศูนย์ แต่ความเค้นที่เหลืออยู่ในวัสดุวิสโคอีลาสติกแบบของเหลวจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (Steffe, 1996)

โดยทั่วไปข้อมูลการพักความเค้นจะแสดงในรูปของโมดูลัสของการพักความเค้น คือ

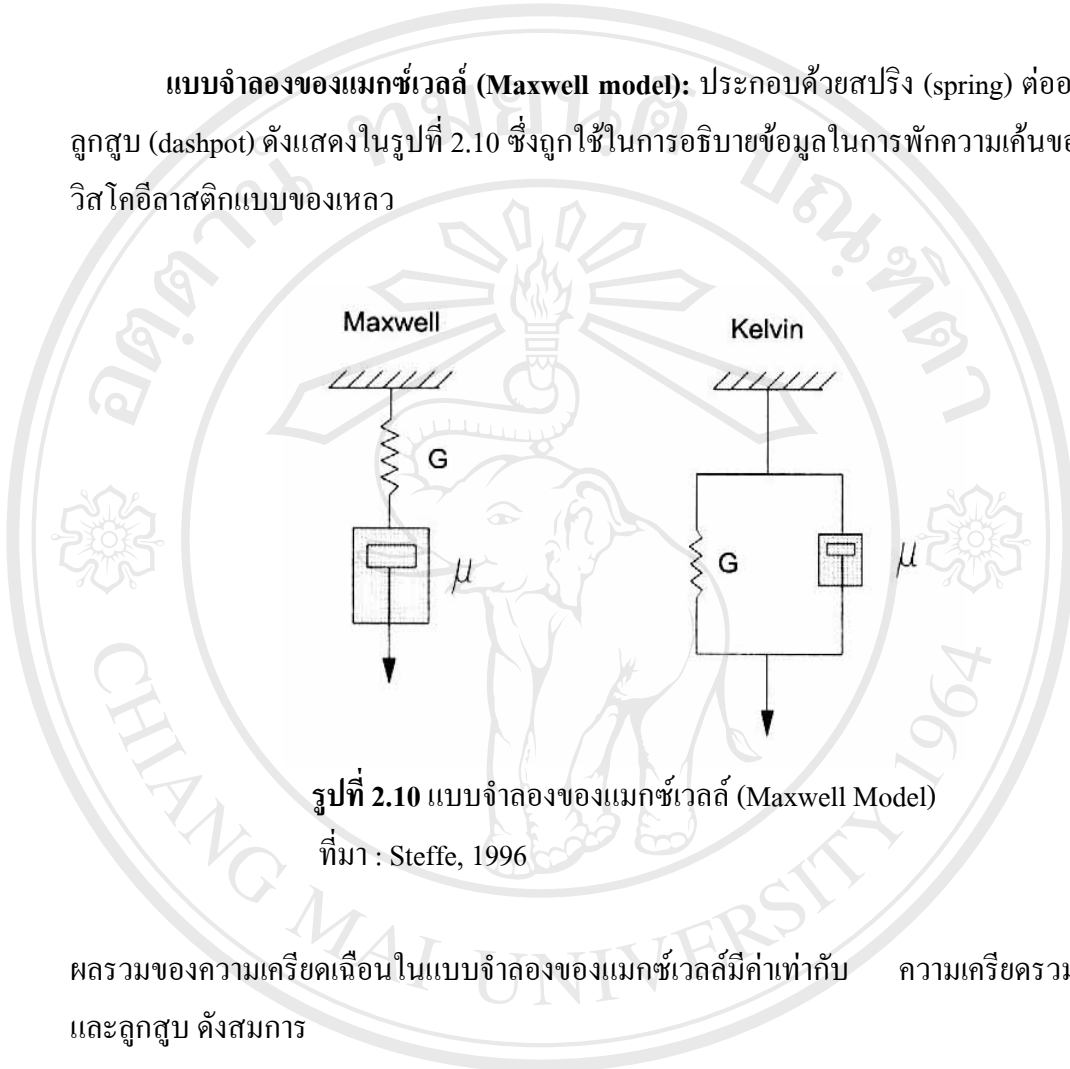
$$G = f(t) = \frac{\sigma}{\gamma_{constant}} \quad (7)$$

ถ้าวัสดุมีความยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์ โมดูลัสของการพักความเค้นจะมีค่าเท่ากับโมดูลัสของแรงเฉือน อธิบายได้จากสมการ  $G = \sigma / \gamma$  โดย  $G(t)$  คือโมดูลัสของแรงเฉือนที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลในการทดลอง กราฟระหว่างการพักความเค้นกับเวลาจะเกิดขึ้นที่ระดับที่แตกต่างกันกับความเครียด ซึ่งจะมีส่วนที่ซ้อนทับกันถ้าข้อมูลถูกเก็บในช่วงเวลาที่วัสดุ



แสดงพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติกในเชิงเส้นตรง และฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องสามารถพบในเทอมของแรงดึง (tension:  $E(t)$ ) และแรงกดอัด (bulk compression:  $K(t)$ ) (Ferry, 1980)

**แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell model):** ประกอบด้วยสปริง (spring) ต่ออนุกรมกับลูกสูบ (dashpot) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งถูกใช้ในการอธิบายข้อมูลในการพักความเค้นของวัสดุวิสโคอีลาสติกแบบของเหลว



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Model)  
ที่มา : Steffe, 1996

ผลรวมของความเครียดเฉือนในแบบจำลองของแมกซ์เวลล์มีค่าเท่ากับ ความเครียดรวมในสปริงและลูกสูบ ดังสมการ

$$\gamma = (\gamma)_{spring} + (\gamma)_{dashpot} \tag{8}$$

เปลี่ยนสมการที่ (8) ให้เป็นอนุพันธ์ของเวลาโดยการแทนค่า  $\gamma_{spring} = \sigma / G$  และ  $\gamma_{dashpot} = \sigma / \mu$  ได้ดังนี้

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{1}{G} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) + \frac{\sigma}{\mu} \tag{9}$$

หรือ

$$\sigma + \lambda_{rel} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) = \mu \dot{\gamma} \tag{10}$$

โดย relaxation time สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\lambda_{rel} = \frac{\mu}{G} \quad (11)$$

Relaxation time ( $\lambda_{rel}$ ) คือ เวลาที่วัสดุต้องการในการกลับไปสู่สภาพเดิม (อสิรา, 2545) ถ้าการทดสอบกระทำโดยใช้แรงดึงในระนาบเดียว หรือแรงกด ค่า  $\lambda_{rel}$  จะคิดในเทอมของ extensional viscosity ( $\eta_E$ ) และ Young's modulus (E)

แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ช่วยให้เข้าใจข้อมูลของ  $\lambda_{rel}$  มากขึ้น พิจารณาจากการทดลองหา ค่า  $\lambda_{rel}$  โดยกำหนดให้ค่าความเครียดเฉือนมีค่าคงที่ ( constant shear strain:  $\gamma_0$  ) เมื่อความเครียดคงที่ อัตราเฉือนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\dot{\gamma} = 0$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (10) จะได้เป็น

$$\sigma + \lambda_{rel} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) = 0 \quad (12)$$

อินทิเกรตสมการนี้โดยกำหนดให้  $\sigma = \sigma_0$  ที่เวลา  $t = 0$

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = \int_0^t -\frac{dt}{\lambda_{rel}} \quad (13)$$

$$\sigma = f(t) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) \quad (14)$$

สมการ (14) อธิบายถึงการพักความเค้นอย่างช้าๆ จากความเค้นเริ่มต้น ( $\sigma_0$ ) ไปจนถึงศูนย์หลังจากที่ความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถกำหนดค่า  $\lambda_{rel}$  ได้คือ เวลาที่ความเค้นลดลงร้อยละ 36.8 จากจุดเริ่มต้น

เวลาที่ความเค้นลดลงเท่ากับร้อยละ 36.8 มาจาก

ถ้าให้  $t = \lambda_{rel}$  จากสมการ (14) จะได้ว่า

$$\sigma = f(t) = \sigma_0 \exp(-1) = \sigma_0 (0.3678)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 0.3678 = \frac{36.78}{100}$$

ถ้าความเค้นเริ่มต้น ( $\sigma_0$ ) มีค่าเท่ากับ 100 ดังนั้น  $\sigma$  จึงมีค่าเท่ากับ 36.78 หรือประมาณ 36.8

แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการพักความเค้นของวัสดุวิสโคอีลาสติกได้ทั้งหมด เนื่องจากไม่ได้รวมสมดุลความเค้น (equilibrium stress:  $\sigma_e$ ) เข้าไปด้วย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ต่อขนานกับสปริงดังรูปที่ 2.11 (a) ซึ่งสปริงอิสระใช้ในการอธิบายสมดุลความเค้น ( $\sigma_e = \gamma_0 G_0$ ) และสมการการสำหรับแบบจำลองนี้คือ

$$\sigma = f(t) = \sigma_e + (\sigma_0 - \sigma_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) \quad (15)$$

สำหรับแบบจำลองสี่องค์ประกอบ คือ แบบจำลองของแมกซ์เวลล์สามองค์ประกอบต่อขนานกับสปริงอิสระดังรูป 2.11 (b) และมีสมการดังนี้

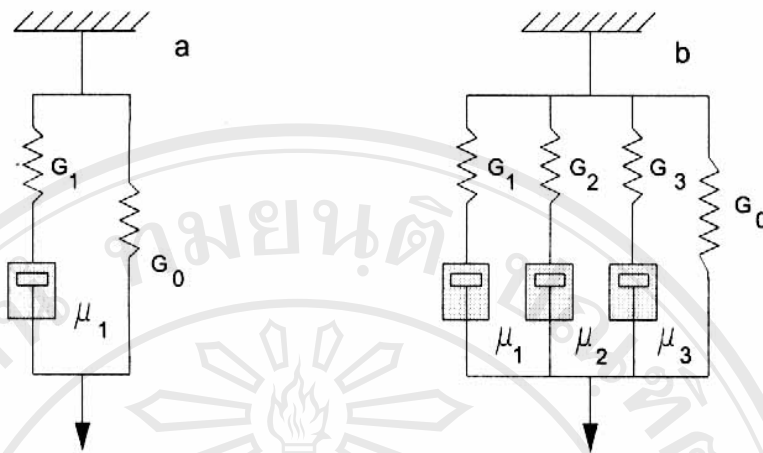
$$\sigma = f(t) = A_1 \exp\left(\frac{-tG_1}{\mu_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-tG_2}{\mu_2}\right) + A_3 \exp\left(\frac{-tG_3}{\mu_3}\right) + \gamma_0 G_0 \quad (16)$$

หรือ

$$\sigma = f(t) = A_1 \exp\left(\frac{-t}{(\lambda_{rel})_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-t}{(\lambda_{rel})_2}\right) + A_3 \exp\left(\frac{-t}{(\lambda_{rel})_3}\right) + \sigma_e \quad (17)$$

เมื่อ  $A = (\sigma_0 - \sigma_e)$

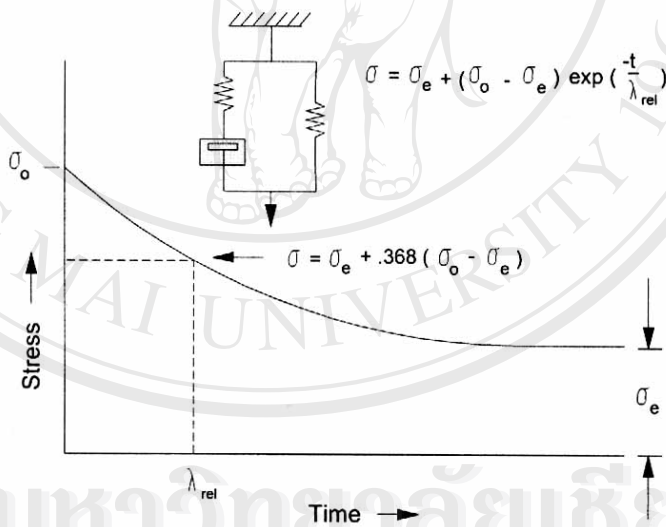
ดังนั้นในแต่ละหน่วยของแบบจำลองของแมกซ์เวลล์จะมีค่า  $\lambda_{rel}$  และค่า A ที่ต่างกัน



รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ที่ต่อขนานกับสปริง

- a.) แบบจำลองของแมกซ์เวลล์แบบหนึ่งองค์ประกอบต่อขนานกับสปริงอิสระ
- b.) แบบจำลองของแมกซ์เวลล์แบบสามองค์ประกอบต่อขนานกับสปริงอิสระ

ที่มา : Steffe, 1996



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะการพักความเค้นของแบบจำลองของแมกซ์เวลล์แบบหนึ่งองค์ประกอบต่อขนานกับสปริงอิสระ

ที่มา : Steffe, 1996

### 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพักความเค้น

Houze' *et al.* (2005) ศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของเจลในนมเปรี้ยวที่มีปริมาณไขมันแตกต่างกัน พบว่าการทดสอบการพักความเค้นสามารถบอกถึงความแน่น (firmness) และความยืดหยุ่น (elastic) ของเจล โดยอิมัลชันเจลที่ทำจากน้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันมะกอก น้ำมัน groundnut และไขมันนมที่ปราศจากน้ำจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ไม่มีไขมัน ส่วนความแน่นของเจลที่มีไขมันปริมาณน้อยจะมีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่าเจลที่ไม่มีไขมัน และเวลาที่ใช้ในการกลับคืนสู่สภาพเดิมจะมีค่าสูงในบริเวณที่เป็นผลึกของไขมัน

Limanond *et al.* (2002) ประเมินค่าความเหนียวหนืด (stiffness) ของขนมปังข้าวโพด (corn tortilla) ที่ทำเสร็จใหม่ๆ และทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 6 – 35 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 วัน โดยใช้ทฤษฎีการก่อผลึกของโพลีเมอร์และโปรแกรม Matlab แปลงข้อมูลจากการพักความเค้นเป็นค่าความเหนียวหนืด พบว่าขนมปังข้าวโพดที่ทำเสร็จใหม่ๆ จะมีค่าความเหนียวหนืดต่ำกว่าขนมปังข้าวโพดเก่าและมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนียวหนืดลดลง