

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารก่อเจล (Gelling agent)

สารก่อเจลเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ ที่สามารถจับกับน้ำได้ โดยเมื่อนำมาละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำร้อน จะให้สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงหรือให้เนื้อสัมผัสกลายเป็นเจลเมื่อทิ้งไว้ให้เย็น ทางด้านอุตสาหกรรมอาหารมีการนำสารก่อเจลชนิดต่างๆ มาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารอยู่หลายชนิด เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความข้นหนืด และความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร ทางอุตสาหกรรมยามีการนำเจลาตินไปผลิตเป็นแคปซูลยา นอกจากนี้ยังมีการใช้วุ้นหรืออะกาโรสไปใช้งานด้านปฏิบัติการเคมีและจุลินทรีย์ สารก่อเจลส่วนใหญ่เป็นสารไบโอพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ มีทั้งสารในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น วุ้น หรือสารในกลุ่มโปรตีน เช่น เจลาติน (Karim and Rajeev, 2009)

#### 2.2 วุ้น (Agar)

วุ้น คือสารไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดงที่อยู่ในไฟลัม Rhodophyta สาหร่ายทะเลสีแดงที่นำมาใช้ในการสกัดวุ้นส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายในกลุ่ม *Gracilaria spp.* ซึ่งพบมากตามชายฝั่งทะเลของประเทศญี่ปุ่น เม็กซิโก โบรตุเกส เดนมาร์ก และโมร็อกโก ส่วนสาหร่ายทะเลสีแดงชนิดที่พบในเมืองไทย ได้แก่ สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) พบมากในอ่าวปัตตานีและทะเลสาบสงขลา (Ruangchuay *et al.*, 2007)

##### 2.2.1 โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น

โมเลกุลของวุ้นประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อากาโรส (agarose) และ อากาโรเพคติน (agaropectin)

อากาโรส เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) คือ อากาโรไบโอส (agarobiose) (รูปที่ 2.1) ซึ่งประกอบด้วย  $\beta$ -D-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง  $1 \rightarrow 3$  และ 3,6-anhydro- $\alpha$ -L-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง  $1 \rightarrow 4$  โดยที่ในแต่ละโมเลกุลมีการต่อสลับกันด้วยพันธะ

ไกลโคไซด์ (glycosidic linkage) อากาโรสค่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุน้อยมากจึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide โครงสร้างของอากาโรสแสดงดังรูปที่ 2.2 (Saxena *et al.*, 2011)

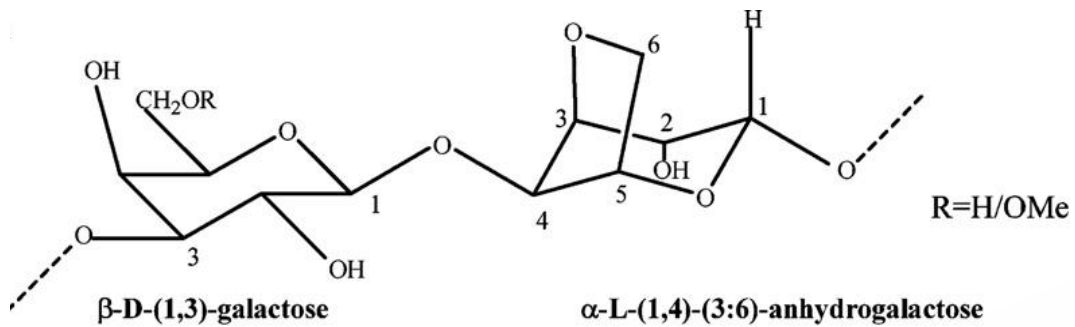


Figure 2.1 Structure of agarobiose

Source: Saxena *et al.* (2011)

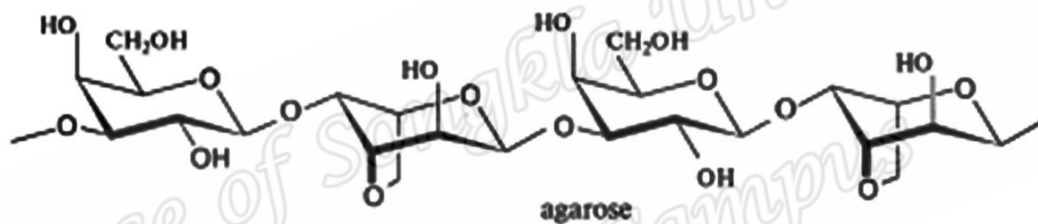


Figure 2.2 Structure of agarose

Source: Usov (1998)

สำหรับ Agaropectin (รูปที่ 2.3) มีโครงสร้างคล้าย agarose แต่มีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากบางโมเลกุลของ 3,6-anhydro- $\alpha$ -L-galactose จะมีอนุมูลซัลเฟตเกาะอยู่ ซึ่งถูกแทนที่ด้วย L-galactose sulfate และบางโมเลกุลของ D-galactose ถูกแทนที่ด้วย D-galactose sulfate หรือมีหมู่ไพรรูเวทเกาะอยู่ (4,6-O-(1-carboxy ethylidene) -D-galactopyranose) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้มีประจุ บางครั้งจึงเรียกว่า charged agarose (Usov, 1998)

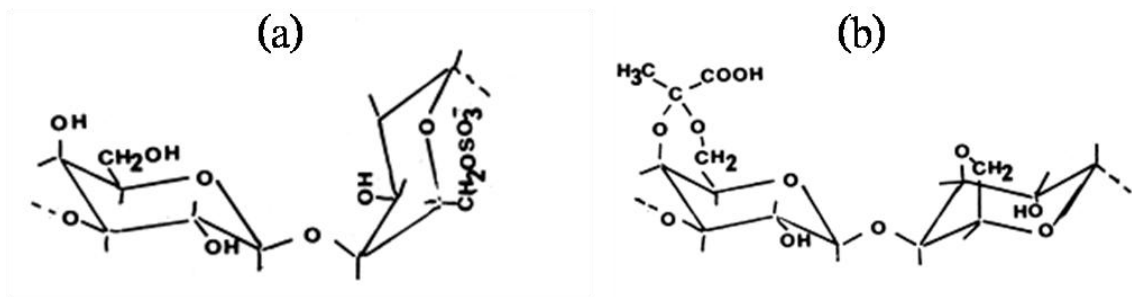


Figure 2.3 Structure of agarose (a); 6-galactan sulfate (b); pyruvated agarose

Source: Gertrudes (1990)

### 2.2.2 สมบัติของวุ้น

สมบัติการละลาย ปกติวุ้นจะไม่ละลายน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส แต่จะละลายได้ดีในน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสขึ้นไป หากใช้สารละลายวุ้นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 จะต้องใช้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ร่วมกับการคนสารละลายขณะให้ความร้อน จึงจะมีการละลายอย่างสมบูรณ์ หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 5 ต้องใช้หม้อนึ่งอัดความดันช่วยในการละลาย (Armisen *et al.*, 2000)

การเกิดเจลของวุ้น กลไกการเกิดเจลของวุ้น (รูปที่ 2.4) จะเกิดขึ้นเมื่อละลายผงวุ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 95-100 องศาเซลเซียส โมเลกุลของอะกาโรสในสารละลายจะมีลักษณะเป็น random coil ซึ่งในระยะนี้โครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง สายพอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพันกันเป็นเกลียวในลักษณะเกลียวคู่ (double helice) เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงอีกปลายสายของ double helice แต่ละคู่จะรวมตัวเข้ามาใกล้กัน และเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า junction zone ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจลมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่แข็งแรง หากนำเจลวุ้นไปให้ความร้อนอีกครั้งสารพอลิเมอร์ที่จับตัวกันเป็นเกลียวนั้น จะค่อยๆ คลายตัวออกจากกัน เมื่อทำการให้อุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเจลจะเกิดการคลายตัวกลายเป็นสารละลายในลักษณะของ random coil อีกครั้ง ดังนั้นเจลวุ้นจึงมีสมบัติเป็น thermoreversible gel เนื่องจากโครงสร้างของเจลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Dai and Matsukawa, 2012)

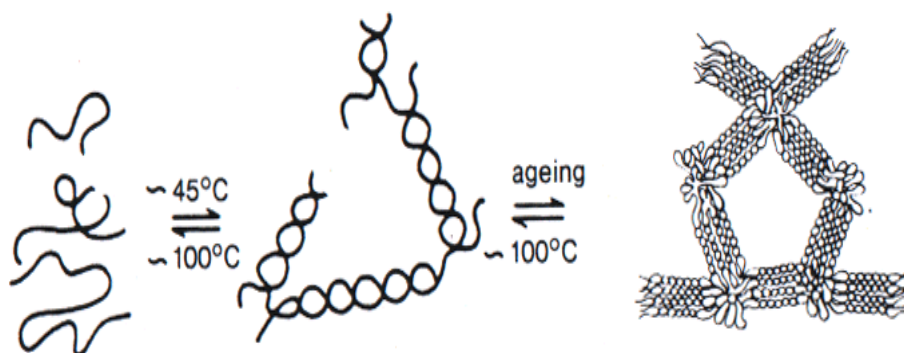


Figure 2.4 Gelation mechanism of agar gel

Source : Lonnerdal and Laas (1976)

### 2.2.3 เจลวุ้น

อุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการละลายมาก โดยจะเกิดการก่อเจลที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ใช้วุ้นความเข้มข้นเพียงร้อยละ 1-2 ก็สามารกเกิดเจลได้ Prasad *et al.* (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดงชนิด *G. acerosa* พบว่าวุ้นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.5 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ที่ประมาณ 41.02 องศาเซลเซียส ขณะที่ Lahrech *et al.* (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลของวุ้นความเข้มข้นของร้อยละ 1.5 พบว่ามีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ที่ 33 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของอุณหภูมิในการเกิดเจلدังกล่าวอาจเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ดังข้อ 2.2.4

เจลวุ้นจะมีลักษณะเนื้อแข็ง ใส เปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันของ double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Lahrech *et al.*, 2005)

อุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลวุ้นนั้น จะสัมพันธ์กับความแข็งของเจล น้ำหนักโมเลกุลของวุ้น และระดับความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ หากวุ้นมีความแข็งของเจลสูงอุณหภูมิในการหลอมเหลวก็จะสูงขึ้นด้วย และนอกจากนี้ อุณหภูมิในการหลอมเหลวจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ 3,6-anhydro-  $\alpha$ -L- galactose เพิ่มขึ้น ซึ่ง Prasad *et al.* (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลวุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดงชนิด *G. acerosa* ใช้ความเข้มข้นของผงวุ้นที่ร้อยละ 1.5

พบว่าวันมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ 80.65 องศาเซลเซียส และ Lahrech *et al.* (2005) ศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของวัน โดยใช้ความเข้มข้นของวันที่ร้อยละ 1.5 พบว่าวันมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ที่ 81 องศาเซลเซียส

#### 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเจลวัน

สมบัติของเจลวันจะมีความเหมือนหรือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สาหร่ายที่ใช้ในการสกัดวัน วิธีการสกัด และระดับความเข้มข้นของวันที่ใช้ในการเตรียมเจล

##### 1. ชนิดของสาหร่าย

วันที่สกัดได้จากสาหร่ายต่างชนิดกันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ให้สมบัติของเจลวันที่ได้มีความแตกต่างกัน แม้จะใช้ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจากอัตราส่วนของอะกาโรสและอะกาโรเพคตินในสาหร่ายแต่ละชนิดนั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน กล่าวคือหากสาหร่ายชนิดใดมีอะกาโรสสูงความแข็งแรงของวันจะเพิ่มขึ้น (Freile-Pelegr and Murano, 2005)

##### 2. แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่าย

แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่ายมีผลต่อสมบัติของเจลวันเช่นกัน ถึงแม้สาหร่ายที่นำมาสกัดนั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน และเก็บจากประเทศเดียวกันก็ตาม เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ที่ทำการเก็บเกี่ยวสาหร่ายนั้นมีสภาวะทางด้านต่างๆ และอาหารสำหรับสาหร่ายที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้เจลของวันมีสมบัติแตกต่างกัน ถึงแม้จะเก็บสาหร่ายภายในเดือนเดียวกัน (Prasad *et al.*, 2005)

##### 3. วิธีการสกัด

กระบวนการสกัดวันนั้นจะต้องกำจัดหมู่ซัลเฟตออกโดยการแช่ในสารละลายต่างและสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ล้วนส่งผลต่อคุณภาพของวันที่สกัดได้ การแช่วันในสารละลายต่างนั้นเป็นเทคนิคในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเจลวัน เนื่องจากเป็นวิธีการกำจัดหมู่ซัลเฟตออกจากโมเลกุลของวัน แต่การใช้ค่าที่ความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลต่อความแข็งแรงของเจลวันที่ต่างกันด้วย ซึ่งหากความเข้มข้นของสารละลายต่างเพิ่มขึ้นจะมีความแข็งแรงของเจลวันเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายต่างที่สูงขึ้นทำให้หมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลของสาหร่ายถูกกำจัดออกไปเพิ่มขึ้น แต่หากใช้ความเข้มข้นของค่าที่สูงจนเกินไปก็อาจทำให้โครงสร้างของโมเลกุลถูกทำลายลงได้ส่งผลต่อคุณภาพของเจลวัน และขั้นตอนของการสกัดด้วยน้ำร้อนนั้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความแข็งของเจลวุ้นเช่นกัน ซึ่งการสกัดวุ้นโดยใช้ความร้อนควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสกัด หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการสกัด อาจส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์ถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของวุ้นเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ส่งผลต่อคุณภาพของเจล (Kumar and Foteda, 2009)

#### 4. ความเข้มข้นของวุ้น

ความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ในการเตรียมเจลจะมีผลต่อสมบัติของเจลวุ้นเช่นกัน คือเมื่อใช้ระดับความเข้มข้นของวุ้นเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็จะสูงขึ้น และนอกจากนี้ความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเกิดเจล และอุณหภูมิในการหลอมเหลว กล่าวคือเมื่อใช้วุ้นที่ความเข้มข้นสูงขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจลและอุณหภูมิในการหลอมเหลวก็จะสูงขึ้นเช่นกัน (Nayar *et al.*, 2012)

#### 5. การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น

การผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นกับวุ้นอาจช่วยในเรื่องของการปรับปรุงให้วุ้นมีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากวุ้นมีข้อด้อยคือ เปราะและแตกง่าย ดังนั้นการผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นอาจช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวุ้นให้ดีขึ้น (Norziah *et al.*, 2006)

### 2.2.5 การใช้ประโยชน์จากวุ้น

มีการนำวุ้นมาใช้ประโยชน์ในหลายๆด้าน เช่น ทางด้านจุลชีววิทยา ซึ่งมีการนำวุ้นมาใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและรา เนื่องจากวุ้นมีคุณสมบัติพิเศษคือเกิดเจลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและรา ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและราคือ 37 องศาเซลเซียสและวุ้นยังทนต่อการย่อยสลายให้เป็นของเหลว จึงมีการนำวุ้นมาใช้ประโยชน์ทางด้านจุลชีววิทยามากที่สุด สำหรับทางด้านอาหารนั้นมีการใช้วุ้นกันอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมขนมหวาน ผลิตภัณฑ์นม อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม โดยนำวุ้นมาใช้เป็นสารให้ความคงตัว เพิ่มความใสให้กับผลิตภัณฑ์นำมาใช้เป็นสารที่ทำให้ข้น นอกจากนี้ยังมีการนำวุ้นมาใช้ทางการแพทย์ ซึ่งวุ้นจะช่วยในการรวมตัวกับสารพิษต่างๆ แล้วขับออกมาจากร่างกาย และวุ้นเป็นอาหารที่ไม่ให้แคลอรี จึงจัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพช่วยลดน้ำหนัก (Richard, 1996)

## 2.3 เจลาติน (Gelatin)

เจลาตินเป็นสารสกัดจากคอลลาเจนของเนื้อเยื่อในหนัง เอ็น และกระดูก โดยการใช้กรดหรือด่าง และสกัดด้วยน้ำร้อน สำหรับวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเจลาตินในระดับอุตสาหกรรมนั้น มักใช้กระดูก และหนัง จากโค กระบือ และสุกร เนื่องจากจะให้เจลาตินที่มีคุณภาพดี ส่วนการผลิตเจลาตินจากปลานั้น ไม่ค่อยมีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมากนักเนื่องจากเจลาตินปลาไม่ทนต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวและให้ค่าความแข็งแรงของเจลที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Karim and Rajeev, 2009)

เจลาตินแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เจลาตินชนิดเอและบี โดยจะแบ่งชนิดของเจลาตินตามการปรับสภาพที่เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิดสำหรับการสกัดเจลาติน เจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยกรดมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 7 ถึง 9 เจลาตินที่ได้เรียกว่า เจลาตินชนิดเอ (gelatin type-A) มีค่าความแข็งแรงของเจล (Bloom strength) อยู่ในช่วง 50-300 กรัม ตัวอย่างที่มักเตรียมด้วยวิธีนี้ได้แก่ หนังและกระดูกสุกร และเจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยด่างมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 เจลาตินที่ได้เรียกว่า เจลาตินชนิดบี (gelatin type-B) มีค่าความแข็งแรงของเจลอยู่ในช่วง 50-200 กรัม ตัวอย่างที่มักเตรียมโดยวิธีนี้คือ หนังและกระดูกของโค และ กระบือ (Cole, 2000)

### 2.3.1 โครงสร้างของเจลาติน

เจลาตินเป็นสายพอลิเมอร์ของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ มาต่อกันเป็นสายยาวได้แก่ อะลานีน อาร์จินีน แอสปาดิกแอซิด ซีสเทอีน กลูตามิก แอซิด ไกลซีน ฮิสติดีน ไฮดรอกซีไลซีน ไฮดรอกซีโพรลีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน ไลซีน เมไทโอนีน ฟีนิลอะลานีน โพรลีน ซีรีน ทรีโอนีน ทริปโตแฟน ไทโรซีน และวาเลอีน โดยพบไกลซีน ในปริมาณมากที่สุด ประมาณร้อยละ 33 ของกรดอะมิโนทั้งหมด พบโพรลีนร้อยละ 12 และไฮดรอกซีโพรลีนร้อยละ 11 โครงสร้างของเจลาตินในตัวอย่างหลายชนิดจะเป็นไปทำนองเดียวกันคือจะมีองค์ประกอบของ กรดอะมิโนโพรลีน ไฮดรอกซีโพรลีน และไกลซีน โดยในโมเลกุลประกอบด้วยลำดับของ glycine-X-Y triplets ที่ซ้ำ ๆ กัน ซึ่ง X และ Y มักเป็นกรดอะมิโนโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีน แสดงดังรูปที่ 2.5 ระหว่างกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมีพันธะเพปไทด์เชื่อม

อยู่เพื่อประกอบเป็นสายพอลิเพปไทด์ สายพอลิเพปไทด์จะมีการบิดเป็นเกลียวโดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโน เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเกลียว ( $\alpha$ -chain) (Hung et al., 2004) เจลาตินที่ผลิตจากคอลลาเจนจากแหล่งที่แตกต่างกันจะให้ความแข็งของเจลที่ต่างกันด้วย ซึ่งความแข็งของเจลจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของกรดอะมิโนโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีน (Harris, 1990) ซึ่งโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนเป็นกรดอะมิโนสำคัญที่ช่วยให้เกิดความแข็งของเจล โดยที่โพรลีนทำให้โครงสร้าง triple helix เสถียร ส่วนไฮดรอกซีโพรลีนก็ช่วยทำให้โมเลกุลคอลลาเจนเสถียร เจลาตินที่มีปริมาณกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนต่ำ จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่าเจลาตินที่มีกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนสูง พบว่าปริมาณกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนและความเสถียรต่อความร้อนของ เจลาตินปลา นั้น มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำที่ปลาอาศัยอยู่ ซึ่งเจลาตินที่ได้จากปลาแต่ละชนิดจะมีปริมาณกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนที่ต่างกัน (Cole, 2000) แสดงดังตารางที่ 2.1

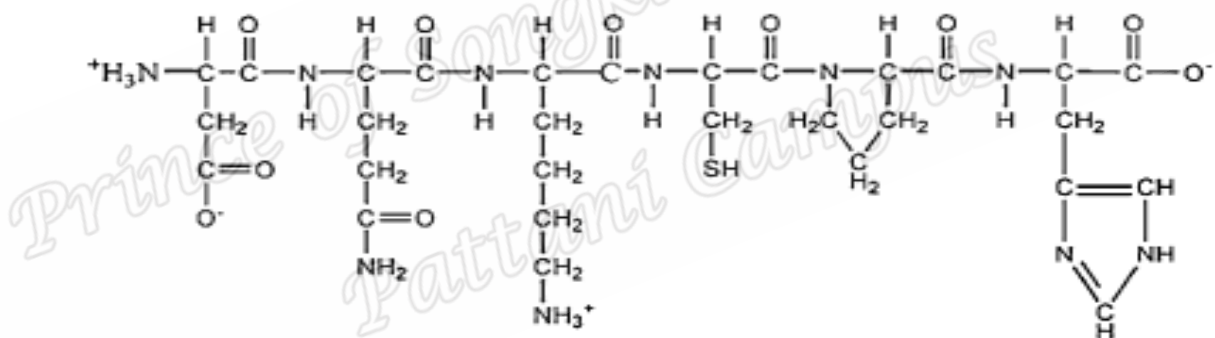


Figure 2.5 Structure of gelatin

Source : Liu *et al.* (2011)



Table 2.1 Amino acid content in some fish gelatins compared to pork gelatin.

| Amino acid     | Cod <sup>a</sup> (%) | Alaska <sup>b</sup> (%) | Hake <sup>a</sup> (%) | Megrim <sup>a</sup> (%) | Tilapia <sup>c</sup> (%) | Pork <sup>d</sup> (%) |
|----------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Alanine        | 96                   | 108                     | 119                   | 123                     | 123                      | 112                   |
| Arginine       | 56                   | 51                      | 54                    | 54                      | 47                       | 49                    |
| Aspartic acid  | 52                   | 51                      | 49                    | 48                      | 48                       | 46                    |
| Cysteine       | 0                    | 0                       | -                     | -                       | 0                        | 0                     |
| Glutamic acid  | 78                   | 74                      | 74                    | 72                      | 69                       | 72                    |
| Glycine        | 344                  | 358                     | 331                   | 350                     | 347                      | 330                   |
| Histidine      | 8                    | 8                       | 10                    | 8                       | 6                        | 4                     |
| Hydroxylysine  | 6                    | 6                       | 5                     | 5                       | 8                        | 6                     |
| Hydroxyproline | 50                   | 11                      | 59                    | 60                      | 79                       | 91                    |
| Isoleucine     | 11                   | 55                      | 9                     | 8                       | 8                        | 10                    |
| Leucine        | 22                   | 20                      | 23                    | 21                      | 23                       | 24                    |
| Lysine         | 29                   | 26                      | 28                    | 27                      | 25                       | 27                    |
| Methionine     | 17                   | 16                      | 15                    | 13                      | 9                        | 4                     |
| Phenylalanine  | 16                   | 12                      | 15                    | 14                      | 13                       | 14                    |
| Proline        | 106                  | 95                      | 114                   | 115                     | 119                      | 132                   |
| Serine         | 64                   | 63                      | 49                    | 41                      | 35                       | 35                    |
| Threonine      | 25                   | 25                      | 22                    | 20                      | 24                       | 18                    |
| Tryptophan     | 0                    | 0                       | -                     | -                       | 0                        | 0                     |
| Tyrosine       | 3                    | 3                       | 4                     | 3                       | 2                        | 3                     |
| Valine         | 18                   | 18                      | 19                    | 18                      | 15                       | 26                    |

พื้ : a: Gomes *et al.* (2002)

c: Sarabia *et al.* (2000)

b: Zhou *et al.* (2006)

d: Eastoe and Leach (1977)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดอะมิโนที่พบในเจลาตินปลาและกรดอะมิโนที่พบในเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม พบว่ามีกรดอะมิโนอยู่หลายชนิดในเจลาตินปลาที่มีปริมาณสูงกว่าเจลาตินที่พบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น ซีรีนและทรีโอนีน แต่พบปริมาณกรดอะมิโนชนิดโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนในปริมาณที่ต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม โดยที่จะพบปริมาณโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนในเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมประมาณร้อยละ 30 พบในเจลาตินจากปลาน้ำจืดร้อยละ 22-25 และพบในเจลาตินจากปลาน้ำเค็มร้อยละ 17 (Muyonga *et al.*, 2004) ซึ่งกรดอะมิโนที่มีบทบาทช่วยในเรื่องความแข็งแรงของเจลคือ โพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีน แต่ในเจลาตินปลาพบกรดอะมิโน 2 ตัวนี้ในปริมาณที่ต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ความแตกต่างกันของกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนระหว่างเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและเจลาตินจากปลานั้น เป็นเหตุให้เจลาตินปลาคุณภาพของเจลที่ด้อยกว่าเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มีความคงตัวน้อยกว่า และมีความเสถียรต่อความร้อนต่ำกว่าเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Avena-Bustillos *et al.*, 2006) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลาตินจากปลาน้ำเค็มและเจลาตินจากปลาน้ำจืด เจลาตินปลาน้ำเค็มมีกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนน้อยกว่าเจลาตินปลาน้ำจืด ทำให้เจลาตินปลาน้ำเค็มมีความคงตัวน้อยกว่าเจลาตินปลาน้ำจืด (Cole, 2000) แต่โดยทั่วไปแล้วเศษเหลือทิ้งจากปลาโดยส่วนใหญ่ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น เป็นปลาที่ได้จากแหล่งน้ำเค็ม ทำให้ส่งผลต่อคุณภาพของเจลาตินที่สกัดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงของเจลและอุณหภูมิในการเกิดเจล ซึ่งเจลาตินจากปลาน้ำเค็มจะให้เจลที่อ่อนมีความคงตัวน้อย ซึ่งเจลาตินจากปลาน้ำจืดจะให้เจลที่อ่อนและเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 8 องศาเซลเซียส (Muyonga *et al.*, 2004)

### 2.3.2 สมบัติของเจลาติน

สีของเจลาตินควรจะมีสีจางถึงสีสว่างอำพันหรือสีเหลืองจางๆ ในสารละลายซึ่งเจลาตินเกรดต่ำ จะให้ลักษณะสีไม่โปร่งใสจนถึงขุ่น หรือมีสีเหลืองส้ม ความขุ่นของเจลาตินมักเกิดเนื่องจากใช้กระบวนการผลิตไม่ดี หรือมีวัตถุเจือปนอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย เจลาตินละลายได้เพียงบางส่วนในน้ำเย็น การละลายเจลาตินต้องทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งหากสูงกว่านี้ จะทำให้โครงสร้างของเจลาตินถูกทำลาย ส่งผลต่อคุณภาพของเจล ซึ่งอุณหภูมิอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการละลายของเจลาตินคือ 50-55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67

(Schrieber and Gareis, 2007) สารละลายเจลาตินมีความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นที่ใช้ และเจลาตินมีความสามารถในการยึดติด จึงสามารถใช้เป็นกาวจากสัตว์ (Cole, 2000)

กลไกการเกิดเจลของเจลาตินนั้น เริ่มแรกเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายเจลาตินจะเปลี่ยนเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloidal solution) หรือซอล โมเลกุลของเจลาตินจะยึดตัวออกอยู่ในรูปของ random coil แต่เมื่อทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง โมเลกุลที่ยึดตัวออกแล้วจะเริ่มเกิดการขดตัวอย่างซ้ำๆ (fold) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดก่อกำเนิดจะมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงขึ้น เชื่อมกันระหว่างโมเลกุลมากขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก หรือพันธะไฮโดรโฟบิก จนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ (รูปที่ 2.6) ซึ่งในขณะนี้ทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลเกิดการจับตัวกันอย่างคงตัวและแข็งแรงมากขึ้นพันธะหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมกันของโมเลกุลเจลาตินคือพันธะไฮโดรเจน และหากมีการให้ความร้อนอีกครั้งจะเกิดการหลอมเหลวเป็นสารละลายหรือโซล การเปลี่ยนเฟสระหว่างโซลและเจลนี้เรียกว่า sol-gel transition (Schrieber and Gareis, 2007)

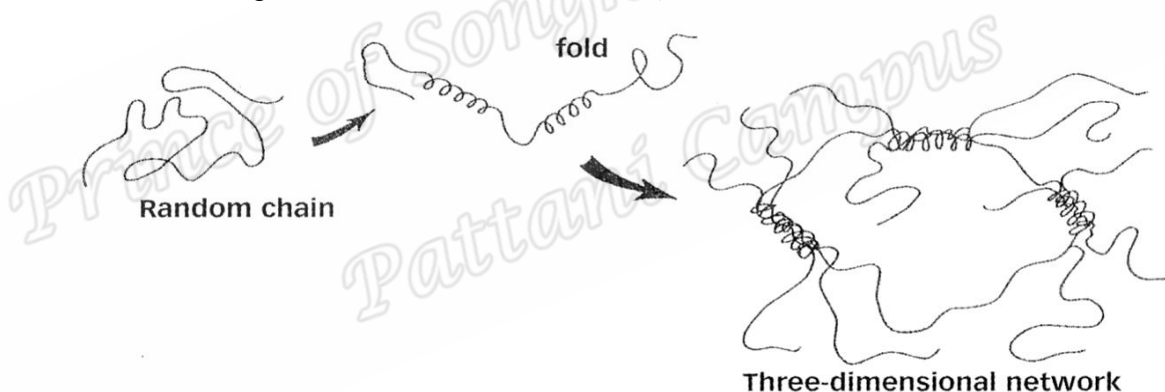


Figure 2.6 Gelatin mechanism of gelatin

Source: Schrieber and Gareis. (2007)

อุณหภูมิในการเกิดเจลของเจลาตินขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความเข้มข้นที่ใช้ เมื่อปล่อยสารละลายเจลาตินให้เย็นตัวลงสารละลายจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดเจลในที่สุด แต่ทั้งนี้การเกิดเจลของเจลาตินจะเร็วหรือจะช้าต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเจลาตินที่ใช้ เจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส และเจลาตินปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 8-25 องศาเซลเซียส (Gomez *et al.*, 2002) แสดงอุณหภูมิในการเกิดเจลดังตารางที่ 2.2

Table 2.2 Bloom strength, gelling temperature and melting point of gelatin from various sources.

| gelatin sources     | Bloom strength<br>(g) | Gelling temperature<br>(°C) | Melting point<br>(°C) | Concentration<br>(% w/v) | Reference                    |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| Porcine*            | 295                   | 25.6                        | 36.5                  | 6.67                     | Cho <i>et al.</i> (2005)     |
| Bovine*             | 239.9                 | 19.6                        | 28.9                  | 6.67                     | Cheow <i>et al.</i> (2007)   |
| Cod**               | ~90                   | 11-12                       | 13.8                  | 6.67                     | Gomez <i>et al.</i> (2002)   |
| Hake**              | ~110                  | 11-12                       | 14                    | 6.67                     | Gomez <i>et al.</i> (2002)   |
| Sin croaker**       | 124.9                 | 7.1                         | 18.5                  | 6.67                     | Cheow <i>et al.</i> (2007)   |
| Young Nile perch*** | 202                   | 13.8                        | 21.4                  | 10                       | Muyonga <i>et al.</i> (2004) |
| Adult Nile perch*** | 229                   | 19.5                        | 26.3                  | 10                       | Muyonga <i>et al.</i> (2004) |
| Cat fish***         | 243                   | 15                          | 23                    | 6.67                     | Liu <i>et al.</i> (2008)     |

\*Mammalian

\*\*Cold water fish

\*\*\*Warm water fish

อุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจล คือ อุณหภูมิที่ทำให้เจลเปลี่ยนสถานะจากเจลกลายเป็นสารละลายอีกครั้ง เจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเจลาตินจากปลา และจะเห็นว่า เจลาตินปลาน้ำเย็นมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำมาก เนื่องจากมีปริมาณกรดอะมิโนชนิดโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนในปริมาณที่ต่ำ ในขณะที่เจลาตินที่ได้จากปลาน้ำอุ่นบางชนิดมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวก่อนข้างใกล้เคียงกับเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จึงทำให้เจลาตินจากปลาน้ำเย็นมีข้อจำกัดต่อการนำมาใช้ คุณสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างเจลาตินปลาและเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เป็นเหตุให้ เจลาตินปลามีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ต่ำ (Gomez *et al.*, 2002) จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 อยู่ในช่วง 28 - 36 องศาเซลเซียส ส่วนเจลาตินปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67-10 มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำกว่าคือ 14 - 28 องศาเซลเซียส

ความแข็งของเจลเกิดจากการเชื่อมกันระหว่างพันธะเพปไทด์ประกอบกันเป็นสายพอลิเพปไทด์ สายพอลิเพปไทด์จะมีการบิดเป็นเกลียววนซ้าย (left-handed-helix) โดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนเพื่อทำให้โครงสร้างที่เป็นเกลียว (เกลียว) เกิดความคงตัวทำให้เกิดความแข็งของเจล (Cho *et al.*, 2005) หาก  $\alpha$ -chain เพิ่มขึ้นความแข็งแรงก็จะเพิ่มขึ้น ค่ามาตรฐานของความแข็งของเจลทางการค้ามีค่า bloom strength อยู่ในช่วง 250-260 กรัม (Schrieber and Gareis, 2007) เจลาตินจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.67 มีค่าความแข็งของเจลอยู่ในช่วง 230-290 กรัม ส่วนเจลาตินจากปลามีค่าความแข็งของเจลอยู่ในช่วง 90-243 กรัม (ตารางที่ 2.2)

### 2.3.3 การนำเจลาตินไปใช้ประโยชน์

เจลาตินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ทางด้านอุตสาหกรรมอาหารมีการนำเจลาตินมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่างๆ เช่น ขนมหวาน ไอศกรีม โยเกิร์ต เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความข้นหนืด และความคงตัวในผลิตภัณฑ์ ส่วนทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตยา มีการนำเจลาตินมาใช้ในการเคลือบเม็ดยาและผลิตเป็นแคปซูล ทั้งชนิดแคปซูลแข็งและแคปซูลนิ่ม อุตสาหกรรมถ่ายภาพใช้ในการเคลือบฟิล์ม ซึ่งมีรายงานพบว่าทั่วโลกมีการใช้เจลาตินสูงถึง 326,000 ตันต่อปี โดยเจลาตินที่ใช้ในอาหารมีประมาณ 30,000 ตันต่อปี และในอุตสาหกรรมยา 10,000 ตันต่อปี (GME, 2008)

โดยทั่วไปถึงแม้จะมีการนำเจลาตินที่ได้จากหมู หรือวัวมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย แต่ก็ยังคงมีความกังวลและความเคลือบแคลงใจในผู้บริโภคบางกลุ่มที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากเจลาตินหมูหรือวัวได้ เนื่องจากขัดกับหลักทางด้านศาสนา (Asher, 1999) เช่น ศาสนาอิสลามห้ามการบริโภคผลิตภัณฑ์จากหมู และศาสนาฮินดูห้ามการบริโภคผลิตภัณฑ์หรืออาหารที่ได้จากวัว เจลาตินปลาจึงสามารถนำไปใช้เป็นอีกหนึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้บริโภคที่มีข้อจำกัดทางเรื่องศาสนา นอกจากนี้ยังเป็นการลดมลพิษที่อาจเกิดขึ้นจากการเน่าเสียจากเศษเหลือทิ้งที่เป็นผลพลอยได้จากการแปรรูป (Wasswa *et al.*, 2007)

#### 2.4 คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic)

ในการศึกษานี้ต้องการปรับปรุงสมบัติของวุ้น จากการค้นคว้าพบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงส่งผลกระทบต่อการแตกหักของโมเลกุล ในหัวข้อนี้จึงขอกด้างถึงคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อเป็นความรู้ โดยสังเขป Czechowska-Biskup *et al.* (2005)

คลื่นเสียงความถี่สูง หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่าอัลตราโซนิกจึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นระดับอัลตราโซนิกมาใช้ เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้สามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง การมีทิศทางของคลื่นเสียงระดับ อัลตราโซนิกทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งกระแยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในการหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้ ปัจจุบันแนวโน้มของการนำคลื่นเสียงความถี่สูงมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารด้านต่าง ๆ มีมากขึ้น อาทิเช่น ใช้ในการสเตอริไลซ์ การสกัด การตกผลึก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุล (Czechowska-Biskup *et al.*, 2005) เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากคลื่นเสียงความถี่สูงในกระบวนการแปรรูปอาหารทำให้มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารโดยเฉพาะ ผลต่อการแตกหักของโมเลกุล ผลต่อความหนืด ซึ่งการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่กำลังวัตต์และ

ระยะเวลาต่างกัน จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารที่แตกต่างกันออกไปตามกำลังวัตต์ และระยะเวลาที่ใช้

Jambrak *et al.* (2010) ได้ศึกษาผลของคลื่นเสียงความถี่สูงต่อสมบัติทางกายภาพของ สตาร์ชข้าวโพด โดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการตัดแปรแป้งข้าวโพดที่กำลัง 100 วัตต์ 300 วัตต์ และ 400 วัตต์ ระยะเวลาที่ 15 และ 30 นาที พบว่าเมื่อกำลังวัตต์ของคลื่นเสียงความถี่สูงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น เม็ดแป้งจะมีกำลังการพองตัวมากขึ้นและใช้พลังงานในการเกิดเจลในเซชันน้อยลง

Zhou and Ma (2006) ศึกษาการผลของการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่กำลัง 400, 800, 1000 และ 1200 วัตต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ต่อการทำลายสมบัติของสารที่สกัดได้จากสาหร่าย สีแดงชนิด *Porphyra yezoensis* ในการศึกษาใช้ระดับความเข้มข้นของสารที่ร้อยละ 1 นำมาทดสอบหาค่าความหนืด โดยใช้ระยะเวลา 0–240 นาที พบว่าในช่วงแรกค่าความหนืดยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง และที่กำลัง 1200 วัตต์จะให้ค่าความหนืดต่ำสุด

Czechowska-Biskup *et al.* (2005) ศึกษาผลของการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่กำลัง 100 วัตต์ เป็นระยะเวลา 0–240 นาที ต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของไคโตแซนพบว่าเมื่อระยะเวลาในการใช้คลื่นใช้ความถี่สูงเพิ่มขึ้นน้ำหนักโมเลกุลของไคโตแซนจะลดลง ที่ระยะเวลา 100 นาที น้ำหนักโมเลกุลของไคโตแซนจะลดลงจาก 323 กิโลดาลตัน เป็น 52 กิโลดาลตัน ซึ่งจากเดิมไคโตแซนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 323 กิโลดาลตัน

## 2.5 รีโอโลยีของเจล (Rheology of gel) (Steffe, 1996)

รีโอโลยี เป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการบิดรูป (deformation) และการไหล (flow) ของ สสาร อันเนื่องมาจากการตอบสนองต่อแรง (force) ที่กระทำ การบิดรูปที่เกิดขึ้นอาจเป็นลักษณะที่ไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เช่น การไหลของของเหลว (flow) ซึ่งไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ และลักษณะที่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ เช่น ความยืดหยุ่นของของแข็ง (elasticity) การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายถึงสมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกของวัสดุ (viscoelastic properties) ซึ่งผสมระหว่างสมบัติการยืดหยุ่นและการไหลหนืด การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ของวัสดุ รวมทั้งการไหล จะพิจารณาถึงผลของเวลาขณะที่มีแรงมากระทำต่อวัสดุ โดยจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรสำคัญ 3 ตัวแปร คือ แรง การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และ

เวลา เพื่อดูลักษณะโครงสร้างและสมบัติการเป็นของแข็งและของเหลวทำให้ทราบลักษณะทางกายภาพของอาหาร และความรู้ดังกล่าวจะช่วยเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมกับการเติมลงในอาหารชนิดต่างๆ รวมทั้งยังช่วยคำนวณพลังงาน และต้นทุนที่ใช้ในการผลิตได้ด้วย

การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี จำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางด้านฟิสิกส์เกี่ยวกับแรง และพฤติกรรมของวัสดุที่ตอบสนองต่อแรงที่กระทำดังนี้

1. ความเค้น (stress) หมายถึง แรงที่กระทำต่อพื้นที่วัสดุ คือลักษณะอย่างหนึ่งของวัสดุขณะอยู่ใต้อิทธิพล

2. ความเค้นเฉือน (shear stress) เมื่อวัสดุชิ้นหนึ่งถูกแรงกระทำจะเกิดการผิดรูป (deformation) หรือการเคลื่อนที่ การผิดรูปเป็นการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของจุดในตำแหน่งต่าง ๆ ในวัสดุ ซึ่งจะขึ้นกับขนาดและการกระจายของแรงที่กระทำ

3. ความเครียด (strain) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากระทำ คือถ้ามีแรงมากระทำ กับวัสดุและเกิดความเค้นขึ้น วัสดุนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เช่นการยืดหรือการอัด

4. ความเครียดเฉือน (shear strain;  $\gamma$ ) หมายถึง การผิดรูปที่เกิดจากแรงที่กระทำขนานกับพื้นที่ของวัสดุ ทำให้วัสดุเคลื่อนที่

### 2.5.1 สมบัติเชิงวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic property)

สมบัติวิสโคอีลาสติก คือ สมบัติของสารที่มีลักษณะเหนียวหนืด (viscous) เหมือนของเหลวและยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกันและมีการตอบสนองต่อการสั่น (Marcotte *et al.*, 2001) มักใช้ในการศึกษาโครงสร้างของอาหารที่มีลักษณะเป็นเจล (Rao and Cooley, 1993)

การศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกจะนิยามวัดค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus;  $G'$ ) แสดงถึงสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือ elastic modulus โดยวัสดุจะสะสมพลังงานที่ใช้ในการผิดรูปไว้ภายในวัสดุ เพื่อใช้ในการคืนสู่รูปเดิม (storage partition) เมื่อถอนแรงเค้น ส่วนสมบัติการไหลหนืดของสาร หรือ viscous modulus ในส่วนนี้พลังงานถูกใช้ในการสร้างและสลายพันธะตลอดเวลาที่เกิดการผิดรูปและจะสูญเสียไปไม่คืนสู่รูปเดิม ทำให้พลังงานเกิดการสูญเสีย เรียกว่า loss modulus ( $G''$ ) (Morris, 1995)

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่า loss tangent ( $\tan \delta$ ) เพื่อแสดงสัดส่วนของการแสดงสมบัติการไหลหนืดต่อสมบัติการยืดหยุ่น ( $\tan \delta = G'' / G'$ ) ค่า  $\tan \delta$  การเปลี่ยนแปลงค่า ค่า  $\tan \delta$  นี้เป็น



ตัวชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแก้วสู่สถานะยางได้เนื่องจาก  $0 \leq \delta \leq \pi/2$  ค่า  $\tan \delta$  จึงมีค่าตั้งแต่  $0-\infty$  และถ้าค่า  $\tan \delta$  มากกว่า 1 แสดงว่าวัสดุมีการไหลหนืดมากกว่าการยืดหยุ่น (Steffe, 1996)

### 2.5.2 การทดสอบแบบสั่น (Oscillation testing)

การทดสอบแบบสั่นเป็นการศึกษาคุณสมบัติการไหลหนืด และการยืดหยุ่นของวัสดุ ตลอดจนสามารถศึกษาลงไปถึงโครงสร้างโมเลกุล การทดสอบแบบสั่นอาจกระทำได้หลายรูปแบบทั้งวิธียืดหรือวิธีกดหรือวิธีเฉือน แต่ที่นิยมคือวิธีเฉือนเป็นวิธีที่ควบคุมให้ความเครียดคงที่ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นไปตามความถี่ของการสั่นหรือตามเวลาของการสั่นหรืออุณหภูมิในการสั่น ในทำนองเดียวกันอาจให้ความเค้นคงที่ แล้ววัดความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของการสั่นเช่นเดียวกับการวัดความเค้น สำหรับวิธีการสั่นนี้ใช้กับอาหารเหลวและอาหารกึ่งแข็ง(เจล) โดยอาหารจะถูกลอยไว้ระหว่างแผ่นกรวยกับแผ่นเรียบ (cone and plate) หรือแผ่นเรียบกับแผ่นเรียบ (plate and plate) แผ่นบนจะหมุนในแนวราบไปและกลับตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ จะปรากฏคลื่นในการสั่น 2 คลื่น คือ คลื่นของความเค้นและคลื่นของความเครียด ถ้าเป็นวิธีสั่นแบบให้ความเครียดคงที่การตอบสนองของความเค้นจะมีความต่างเฟสกันระหว่าง  $0-90$  องศา ที่ตอบสนองต่อการสั่น (Steffe, 1996)

### 2.6 สมบัติของเจลผสม

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ ต้องการปรับปรุงสมบัติของเจลผสมระหว่างวุ้นกับเจลาตินปลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเจลผสมจะขึ้นกับสมบัติของส่วนผสมแต่ละชนิด และอันตรกิริยา (interaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนผสม โดยการนำระบบของเจลผสมมาใช้ในอาหารเพื่อเป็นการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากการใช้ สารก่อเจลจากสารไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว อาจให้คุณสมบัติที่ไม่เป็นตามความต้องการ (Zasytkin *et al.*, 1996) อย่างเช่น การปรับปรุงสมบัติของเจลวุ้นโดยการผสมสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ถึงแม้วุ้นจะมีข้อดีคือ มีอุณหภูมิในการเกิดเจลและอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง แต่เจลของวุ้นมีความเปราะและแตกหักง่าย และยังมีการขับน้ำออกจากเจลระหว่างการเก็บรักษา จึงมีการผสมสารไฮโดรคอลลอยด์เพื่อช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสและลดการขับน้ำออก (Armise *et al.*, 2002)

การเกิดเจลผสมในระบบที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด เมื่อนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดมาผสมกันแล้ว จะเกิดเจลที่มีโครงสร้างและลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในระบบ (Brownsey and Morris, 1998) ดังรูปที่ 2.7

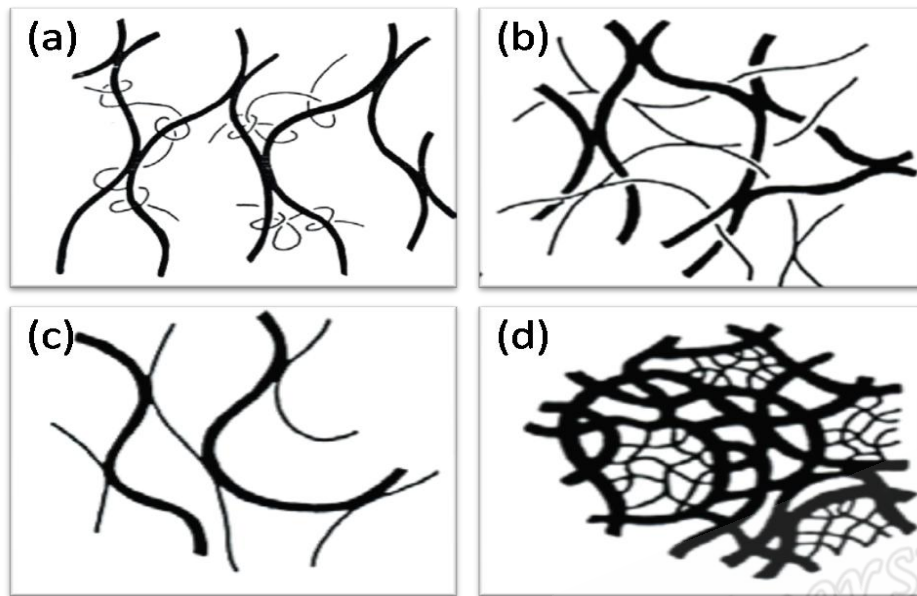


Figure 2.7 Structure of mixed gels. (a) swollen network (b) interpenetrating networks (c) phase-separated networks and (d) coupled networks

Source: Brownsey and Morris (1998)

จากรูป 2.7 เจลผสมในรูปแบบ a มีโครงสร้างเป็นลักษณะ swollen network คือ พอลิเมอร์ชนิดแรกไม่ได้เกิดโครงสร้างแบบเป็นเจลแต่อยู่ในรูป active form โดยสารชนิดที่ 1 จะแทรกอยู่ในโครงข่าย (network) ของ เจลพอลิเมอร์ ชนิดที่ 2 แบบ b มีโครงสร้างเป็นลักษณะ interpenetrating networks (IPN) คือ เจลที่ได้ประกอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสอดแทรกระหว่างกัน โดยตลอดทั้งโครงข่ายของเจล แต่ไม่เกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน โดยพอลิเมอร์ตัวแรกเกิดการเชื่อมโยงกันแบบโครงข่ายตาข่ายเจลสามมิติ จากนั้นพอลิเมอร์ตัวที่สองแทรกเข้าไปในโครงข่ายตาข่ายของพอลิเมอร์ตัวแรกแล้วเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายตาข่ายเช่นเดียวกัน (Sperling, 2006) แบบ c มีโครงสร้างเป็นลักษณะ phase-separated networks คือพอลิเมอร์ทั้ง 2 ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน โครงสร้างของเจลเป็นไปในรูปแบบของสารทั้งสองชนิด และแบบ d เป็นแบบ coupled networks คือพอลิเมอร์ทั้ง 2 ในระบบสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันแล้ว จะเกิดเป็นโครงข่ายแบบเจลขึ้น (Brownsey and Morris, 1998) การผสมสารก่อเจล 2 ชนิดด้วยกันนั้น มีผลต่อสมบัติการแยกชั้น ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจล รวมถึงสมบัติวิสโคอิลาสติกของเจล

การผสมสารละลายคาราจีแนนความเข้มข้นครั้งที่ร้อยละ 1 และเจลาตินปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-10 แล้วตั้งไว้ให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้องพบว่าเกิดการแยกชั้นของเจลผสม เนื่องจากคาราจีแนนนั้นเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ในขณะที่เจลาตินปลาเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นการเก็บรักษาเจลไว้ที่อุณหภูมิห้อง จึงยากที่จะทำให้เจลาตินปลาเกิดการก่อนเจล การเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลของเจลาตินปลาเป็นไปอย่างช้า ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นของระบบเจลผสมเกิดขึ้น เนื่องจากส่วนของคาราจีแนนเกิดเป็นเจล แต่มีบางส่วนของเจลาตินปลายังคงเป็นสารละลาย ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Lau *et al.*, 2000) และการเตรียมเจลผสมจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาวะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเซตเจลโดยพิจารณาจากอุณหภูมิในการเกิดเจลของสารแต่ละชนิดที่อยู่ในระบบเจลผสม (Haug *et al.*, 2004b)

ปิยะดา (2550) ศึกษาผลของการผสมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกับไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางกายภาพและทางรีโอโลยีในระหว่างและหลังการให้ความร้อนของสารผสม โดยทำการผสมแซนแทนกัม และกัวกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.35 – 1.0 (w/w) กับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 6.0 (w/w) ผลจากการวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Viscoanalyzer (RVA) พบว่าความหนืดของสารผสมระหว่างแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกัวกัมและสารผสมระหว่างแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกับ แซนแทนกัมจะมีความหนืดสูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของกัวกัมและแซนแทนกัมเพิ่มขึ้น และการวัดสมบัติ วิสโคอิลาสติกด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ พบว่าสารผสมระหว่างแซนแทนกัมกับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวแสดงความเป็นสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกที่ดีกว่า สารผสมระหว่างกัวกัมกับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว โดยพิจารณาจากค่า storage modulus ( $G'$ ) ที่สูงกว่าค่า loss modulus ( $G''$ ) ซึ่งการมีค่า  $G'$  สูงกว่า  $G''$  นั้นแสดงว่าตัวอย่างมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และค่า  $\tan \delta$  ที่ต่ำแสดงถึงตัวอย่างที่มีความยืดหยุ่นสูง

Norziah *et al.* (2006) ศึกษาสมบัติของสารผสมระหว่างวุ้นและแคปไซ-คาราจีแนนในอัตราส่วนวุ้น/แคปไซ-คาราจีแนนที่ 100/0, 80/20, 60/40, และ 20/80 โดยให้ความเข้มข้นของเจลผสมรวมเท่ากับร้อยละ 1.5 พบว่าในการผสมแคปไซ-คาราจีแนนลงในวุ้นนั้นมีผลทำให้ อุณหภูมิในการเกิดเจลและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลของวุ้นลดลงเมื่อสัดส่วนของแคปไซ-คาราจีแนนสูงขึ้น

Cheng *et al.* (2008) ศึกษาสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก ของเจลผสมระหว่างเจลาตินปลา กับ เพคติน ในอัตราส่วนเจลาตินปลาต่อเพคตินที่ 3:0, 2:1, 1:1 และ 1:2 ที่ความเข้มข้นของเจลผสมรวมเท่ากับร้อยละ 3 ทดสอบด้วยวิธี oscillatory temperature sweep โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 5 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 50 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ความเครียด (strain) ที่ร้อยละ 2 และความถี่ 1 เฮิรตซ์ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของ เพคตินเพิ่มขึ้น ค่า storage modulus ( $G'$ ) ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการผสมเพคตินในเจลาตินปลานั้นมีผลทำให้สารผสมมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มสูงขึ้น บ่งชี้ว่าเพคตินช่วยให้เจลาตินปลาที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8

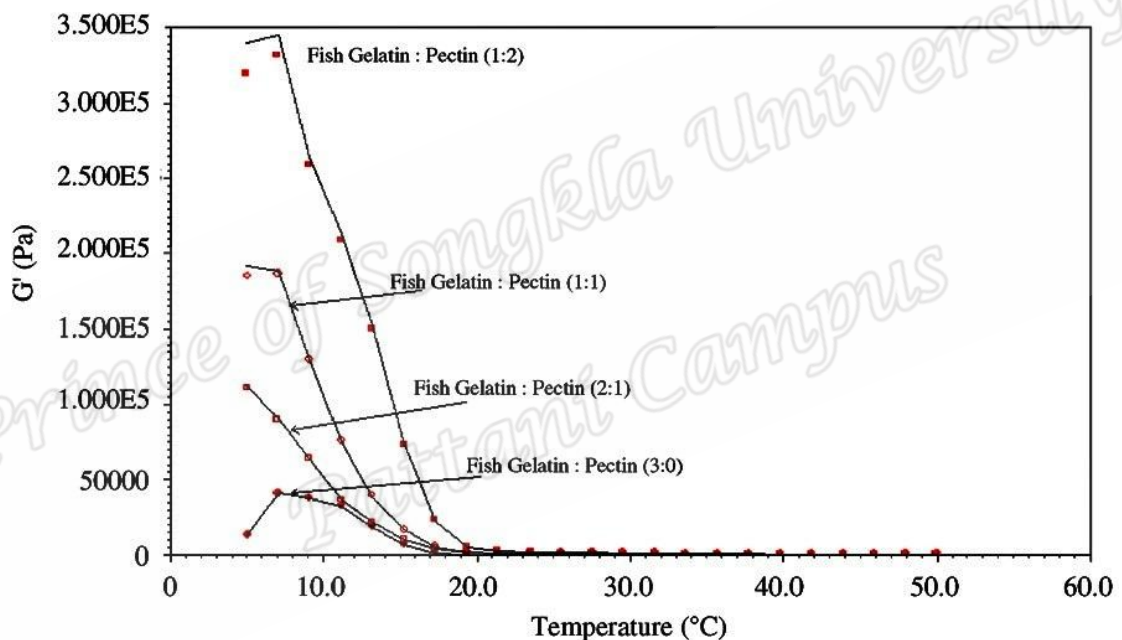


Figure 2.8 Storage modulus ( $G'$ ) of fish gelatin and pectin mixed gels.

Source: Cheng *et al.* (2008)

## 2.7 ผลของน้ำตาลต่อสมบัติของเจล

ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มของเจล เช่น เยลลี่ โดยมีส่วนประกอบหลักคือ น้ำตาล ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของเจล ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

น้ำตาลซูโครส มีสมบัติช่วยให้เกิดความหวานแก่ผลิตภัณฑ์ และน้ำตาลซูโครส มีความสามารถในการช่วยสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของเจล ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นร่างแหเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้น (Nishinari *et al.*, 1997)

Normand *et al.* (2003) ทำการศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้น 0, 40, 60 และร้อยละ 70 ต่ออุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของของ อะกาโรสที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่ร้อยละ 60 ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของเจลสูงสุด ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นของซูโครสที่ร้อยละ 60 นี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายไปสู่การจับตัวกันระหว่างสายโซ่ของอะกาโรส (coil-to-helix) โดยที่ซูโครสจะแทรกเข้าไปอยู่ในร่างแหของเจลมากขึ้น จึงช่วยเร่งให้เกิดกลไกการเกิดเจลเร็วขึ้นส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น และยังช่วยให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น เนื่องจากสายอีลิทซ์มีความเสถียรมากขึ้น ทำให้เกิดความทนต่อความร้อนมากขึ้น น้ำตาลกลูโคสระดับความเข้มข้นของ แต่ที่ระดับความเข้มข้นของซูโครสมากกว่าร้อยละ 60 การเกิดเจลลดลงเนื่องจากที่ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง ทำให้เกิดความเหนียวหนืดจนเกินไป ส่งผลให้การจับตัวกันระหว่างสายโซ่เป็นไปได้น้อย

กลูโคสไซรัปหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอร์นไซรัป (corn syrup) เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้คือ ข้าวโพด กลูโคสไซรัปมีส่วนช่วยให้ซูโครสที่อยู่ในสถานะสารละลายอิมัลชันยังคงไม่ตกผลึกออกมาหรือเกิดผลึกช้าหรือน้อยลง เมื่อซูโครสกับกลูโคสไซรัปอยู่ร่วมกันในสารละลายจะทำให้ค่าปริมาณของแข็งเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้ (สุวรรณ, 2543)

## 2.8 ผลิตภัณฑ์เยลลี่

ผลิตภัณฑ์ประเภทเยลลี่ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่อ่อนนุ่มหรือมีความยืดหยุ่นสูงจนเหนียวแข็งกัดขาดได้ยาก เยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง คือ มีความชื้นร้อยละ 10-25 แต่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นส่วนประกอบทำ หน้าที่ในการยึดจับน้ำส่วนหนึ่งไว้ (สุวรรณ, 2543) มีกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน การผลิตเยลลี่สำเร็จรูปในเชิงอุตสาหกรรมมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ กัม (gums) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล ชนิดของกัมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ คาราจีแนน เจลาติน

อะการ์ และเพคติน (ศรีสุวรรณ, 2531) ผลิตภัณฑ์เจลลี่สำเร็จรูปที่จำหน่ายในท้องตลาดสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้

1. เจลลี่อาหารว่าง (dessert jelly) เป็นเจลลี่ที่มีเนื้อสัมผัสนุ่ม มีน้ำมาก ใช้ช้อนตักรับประทาน หรือใช้หลอดดูดได้มักรับประทานแบบแช่เย็น เป็นของหวาน เป็นอาหารว่าง หรือหลังมื้ออาหาร อาจรับประทานกับไอศกรีม เจลลี่ประเภทนี้มีส่วนผสมของสารที่ทำให้เกิดเจลได้แก่การาจินแนนเจลาติน ผงบุก มีการเติมน้ำตาล กรดซิตริก สีผสมอาหาร และสารปรุงแต่งกลิ่นรส (flavoring agent) ผลิตภัณฑ์มีทั้งรส หวานและรสเปรี้ยว เจลลี่ที่ดีต้องมีลักษณะใสและมีเนื้อสัมผัส อ่อนนุ่มแต่ไม่เหนียวจนหนืด และไม่เหลว ต้องแข็งพอที่จะคงรูปเดิมเมื่อตัดด้วยมีดก็เป็นเหลี่ยมตามรอยมีด ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบในท้องตลาดอาจเป็นผงเจลลี่ผสมสำเร็จรูป ที่ผู้บริโภคนำมาผสมน้ำร้อนตามสัดส่วน แล้วแช่เย็นเพื่อให้เกิดเจล อีกรูปแบบหนึ่งคือเจลลี่ที่พร้อมรับประทานบรรจุถ้วยในภาชนะที่ปิดผนึกสนิท

2. เจลลี่แข็ง หรืออาจเรียกว่า กัมมี่เจลลี่ (gummy jelly) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน (confectionery) ที่ได้จากสารก่อเจล เช่น เจลาติน การาจินแนน วุ้น ผสมกับ สารให้ความหวาน เช่น น้ำตาลทราย น้ำเชื่อมกลูโคส (glucose syrup) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม อาจผสมส่วนผสมอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ สมุนไพร แต่งสีผสมอาหาร สารให้กลิ่นรส กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก ส่วนผสมมาผสมให้เข้ากัน ให้ความร้อน จนมีความข้นเหนียวพอเหมาะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม หยดใส่พิมพ์ หรือตัดเป็นชิ้นหลังจากทิ้งไว้ให้เย็น ได้ผลิตภัณฑ์กัมมี่เจลลี่ มีลักษณะแข็งไม่ติดมือ มีเนื้อสัมผัสเหนียวหนึบ แล้วอาจคลุกด้วยน้ำตาลหรือแป้ง (ศิมาภรณ์, 2546) โดยกัมมี่เจลลี่จัดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทลูกกวาด ซึ่งมีส่วนแบ่งตลาดครึ่งหนึ่งของตลาดลูกกวาดในประเทศไทย และได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผู้บริโภคนิยมบริโภคผลิตภัณฑ์ที่สามารถเคี้ยวได้ (สุวรรณ, 2543)

เมทินี (2554) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลกลูโคสไซรัป ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กัมมี่เจลลี่ โดยใช้เจลาตินคงที่ที่ร้อยละ 9 ซูโครสที่ร้อยละ 19, 20 และ 23 และกลูโคสไซรัปร้อยละ 29, 27 และ 25 พบว่าปริมาณซูโครสและกลูโคสไซรัปที่แตกต่างกันให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของตัวอย่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) และการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลทรายมีแนวโน้มให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ลดลง เนื่องจากโมเลกุลของซูโครสมีปริมาณ

เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการจับตัวกันกับน้ำในโครงสร้างเจลเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำอิสระ (free water) ในผลิตภัณฑ์ลดลง ส่งผลให้ค่าออสโมติซิตีลดลง

Prince of Songkla University  
Pattani Campus